

CHALMERS



Grundvattenavsänkning vid tunnelbyggnad

– tillämpning Förbifart Stockholm

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

EMIL CEDERSTRÖM
ANNIE GJERS
OFELIA KULLERSTEDT
MARIA NILSSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2012
Kandidatarbete nr 2012:44

KANDIDATARBETE 2012:44

Grundvattenavsänkning vid tunnelbyggnad

- Tillämpning Förbifart Stockholm

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

EMIL CEDERSTRÖM

ANNIE GJERS

OFELIA KULLERSTEDT

MARIA NILSSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för geologi och geoteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2012

Grundvattenavsänkning vid tunnelbyggnad

- Tillämpning Förbifart Stockholm

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

EMIL CEDERSTRÖM

ANNIE GJERS

OFELIA KULLERSTEDT

MARIA NILSSON

© EMIL CEDERSTRÖM, ANNIE GJERS, OFELIA KULLERSTEDT, MARIA
NILSSON, 2012

Kandidatarbete 2012:44

Institutionen för bygg och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00

Chalmers Reproservice / Institutionen för bygg- och miljöteknik
Göteborg 2012

Grundvattenavsänkning vid tunnelbyggnad

- Tillämpning Förbifart Stockholm

EMIL CEDERSTRÖM, ANNIE GJERS, OFELIA KULLERSTEDT, MARIA NILSSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för geologi och geoteknik

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Vid tunnelbyggnad uppkommer ofta stora grundvattenavsänkningar på grund av inläckage till tunneln, vilket vanligtvis åtgärdas genom tätning av berget. Denna rapport fokuserar på grundvattenavsänkningar till följd av tunnelbyggnad i kristallint berg. Syftet är att ge exempel på hur en kommande grundvattenavsänkning och dess influensradie kan uppskattas utan fältundersökningar och utvärdera metoden. Rapporten ska också ge svar på vilken omgivningspåverkan denna uppskattade grundvattenavsänkning kan ge upphov till. Studien består av dels en litteraturstudie och dels en fallstudie av infrastrukturprojektet Förbifart Stockholm, där större delen av sträckan går i tunnel. Fallstudien innehåller främst två modelleringar av grundvattenavsänkningen - en modellering där all indata uppskattats med hjälp av kartmaterial samt en uppdaterad modellering med indata från fältundersökningar. Modellerna jämförs sedan med varandra och med litteraturstudien för att svara på rapportens syfte. Resultatet som undersökningen gav visar att influensradien blir minst 500 meter för tunnelsträckningen. Utifrån litteraturstudien, beskrivningen av området samt resultatet av modelleringen dras slutsatsen att risken för sättningar är störst på Lovön samt att sinande brunnar kan bli en följd av grundvattenavsänkningen på både Lovön och Kungshatt. Det kan också konstateras att tätning av berget krävs längs hela tunnelsträckan. Modelleringen bedöms dock inte vara tillräckligt tillförlitlig för att dessa resultat ska antas stämma. Istället rekommenderas att metoden för att ta fram indata med kartmaterial används som en första uppskattning av bergets vattengenomsläpplighet, men att fältundersökningar krävs för att få ett säkrare resultat av grundvattenmodelleringen.

Nyckelord: Grundvattenavsänkning, tunneldrivning, injektering, grundvattenflöden, GMS, grundvattenmodellering, influensradie.

Innehåll

SAMMANFATTNING	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	VI
BETECKNINGAR	VII
1 INLEDNING	1
1.1 Syfte	1
1.2 Metod	1
1.2.1 Litteraturstudie	1
1.2.2 Fallstudie	2
2 LITTERATURSTUDIE	3
2.1 Grundvattenflöden	3
2.1.1 Grundvatten i jord	3
2.1.2 Grundvattenflöden mellan jord och berg	5
2.1.3 Grundvatten i berg	5
2.2 Tunnel drivning	8
2.2.1 Varför fås en grundvattenavsänkning vid tunnel drivning?	8
2.2.2 Injektering	9
2.3 Omgivningspåverkan orsakad av grundvattenavsänkning	10
2.3.1 Sinande brunnar	11
2.3.2 Sättningar	11
2.3.3 Uppträngning och inträngning av saltvatten	11
2.3.4 Ruttnande träpålar	12
2.3.5 Påverkan på vegetation	12
2.4 Beräkningsteori	13
2.4.1 Beräkning av inläckage och hydraulisk konduktivitet för berg	13
2.4.2 Beräkning av hydraulisk konduktivitet för injekterat berg	14
2.4.3 Beräkning av avsänkning	14
3 FALLSTUDIE	15
3.1 Introduktion till Förbifart Stockholm	15
3.2 Beskrivning av området	16
3.2.1 Topografi och bebyggelse	16
3.2.2 Hydrologi och hydrogeologi	17

3.2.3	Berggrund	17
3.2.4	Jordarter	18
3.2.5	Sprickzoner längs tunnelsträckningen	20
3.2.6	Upprättande av jord- och bergprofil	21
3.2.7	Hydrogeologiska typmiljöer	21
3.3	Beräkningsresultat	22
3.3.1	Bergets hydrauliska konduktivitet	22
3.3.2	Hydraulisk konduktivitet för injekterat berg	23
3.3.3	Avsänkning	23
3.4	Modellering	23
3.4.1	Beskrivning av modelleringsprogrammet GMS 8.1	23
3.4.2	Modell 1 – antaganden och indata	24
3.4.3	Modell 2 – Uppdatering av indata	26
3.5	Resultat och jämförelse av modelleringar	27
3.5.1	Influensradien	27
3.5.2	Jämförelse mellan modell 1 och modell 2	28
4	DISKUSSION	30
4.1	Indata	30
4.2	Svårigheter med modelleringen	31
4.3	Numerisk modell – Analytisk modell	32
4.4	Modell 1 – Modell 2	33
4.5	Influensradie	33
4.6	Modell – verklighet	34
4.7	Omgivningspåverkan	34
5	SLUTSATS OCH REKOMMENDATIONER	37
6	REFERENSER	38
7	BILAGOR	41

Förord

Denna rapport är skriven under våren 2012 och är ett kandidatarbete som ges av institutionen för bygg- och miljöteknik, avdelningen för geologi och geoteknik på Chalmers tekniska högskola.

Under arbetets gång har vi fått mycket hjälp och stöd av våra handledare. Vi vill tacka Johan Thörn och Sara Kvartsberg som har varit uppmuntrande och kommit med många goda råd under arbetets gång. Ett tack riktas också till Christian Butron som har hjälpt oss med GMS-modelleringen och Ola Landin på Trafikverket för att vi fick ta del av undersökningsmaterial.

Beteckningar

Latinska versaler

A	Tunnelns tvärsnittsarea [m^2]
H	Djup till tunnel [m]
K	Hydraulisk konduktivitet [$\frac{m}{s}$]
K_{inj}	Hydraulisk konduktivitet för injekterat berg [$\frac{m}{s}$]
L	Tunnellängd [m]
R_0	Influensradie [m]
T	Transmissivitet [$\frac{m}{s} \cdot m$]
Q_{50}	Medianvärde på brunnars uttagskapacitet [$\frac{m^3}{s}$]

Latinska gemener

b	Mäktighet på vattenförande lager [m]
d_{50}	Medianvärde på brunnsdjup [m]
q	Inläckage till tunnel [$\frac{m^3}{s}$]
q_{krav}	Funktionskrav på maximalt inläckage till tunnel [$\frac{m^3}{s}$]
r_w	Brunnsradie [m]
r_t	Ekvivalent tunnelradie [m]
s_t	Avsänkning vid tunnel [m]

1 Inledning

Projektering av ett infrastrukturprojekt är en komplex process. Det finns många aspekter som behöver beaktas och ofta står de i konflikt med varandra. Det kan finnas en vilja att lämna marken orörd i så stor utsträckning som möjligt, vilket bland annat kan bero på att marken har ett kultur- eller naturvärde. I vissa områden kan det även vara svårt att bygga på grund av att terrängen är svårframkomlig eller området redan är tätbebyggt.

Denna problematik uppkom även inför infrastruktursatsningen Förbifart Stockholm. Förbifarten är en trafikled som ska förbinda Stockholms norra och södra länsdelar med varandra (Trafikverket 2012a). Stora delar av det område där förbifarten ska gå består av mark som är av intresse att bevara. Ett sätt att lösa den här typen av problem kan vara att bygga en tunnel istället för en väg ovan mark. Detta blev lösningen för stora delar av Förbifart Stockholm, där drygt 18 av vägens 21 km kommer att gå i tunnel (Trafikverket 2012a).

Vid ett tunnelbygge finns många faktorer som måste undersökas innan projektet kan påbörjas. Gustafson (2009) tar upp viktiga begrepp som byggbarhet, inre miljö och beständighet. Byggbarhet innefattar frågor om huruvida berget behöver tätas eller förstärkas. Inre miljö handlar om arbetsmiljön under byggandet och krav på miljön i den färdiga tunneln. För beständigheten måste bland annat hållbarheten hos tätningsmedel, bultar och sprutbetong undersökas (Gustafson 2009).

Det är också viktigt att undersöka hur omgivningen påverkas av tunnelbygget. Ett vanligt problem vid tunnelbyggnad är grundvattenavsänkning som i sin tur kan ge miljökonsekvenser, såsom sättningar och uttorkning av våtmarker. Om berget tätas med hjälp av injektering minskar inläckaget till tunneln och därmed blir grundvattenavsänkningen mindre. För att i ett tunnelprojekt undvika onödiga extrautgifter är det viktigt att kunna uppskatta kommande inläckage och grundvattenavsänkning så tidigt som möjligt för att vidta de åtgärder som krävs.

1.1 Syfte

Denna rapport fokuserar på problem med grundvattenavsänkningar i samband med tunnelbyggen i kristallint berg. Syftet är att, genom en fallstudie av Förbifart Stockholm delsträcka 2, ge exempel på hur en kommande grundvattenavsänkning och dess influensradie kan uppskattas utan fältundersökningar och utvärdera metoden. Rapporten ska också ge svar på vilken omgivningspåverkan denna uppskattade grundvattenavsänkning kan ge upphov till, samt ge förslag på hur påverkan kan minskas.

1.2 Metod

Rapporten delas in i två delar, en litteraturstudie för bakgrundsinformation och en fallstudie av Förbifart Stockholm. I bilaga 1 hittas förklaringar till begrepp som används i rapporten.

1.2.1 Litteraturstudie

Litteraturstudien innefattar teori som behövs för förståelse av fallstudien. I litteraturstudien beskrivs hur grundvatten rör sig i jord och berg. Vidare beskriver

litteraturstudien hur tunneldrivning går till, orsaker till grundvattenavsänkningar och vilken omgivningspåverkan dessa kan leda till. Informationen till litteraturstudien hämtas från böcker, rapporter och betrodda internetkällor, exempelvis Trafikverket.

1.2.2 Fallstudie

Projektet som studeras är delsträcka 2 i Förbifart Stockholm. För att introducera projektet ges i fallstudien först en beskrivning av Förbifart Stockholm och den studerade delsträckan utifrån Trafikverkets information. Sedan beskrivs områdets geologiska historia och de dominerande jord- och bergarterna utifrån litteratur om geologi och kartor från Sveriges Geologiska Undersökning, SGU. Områdets hydrologiska information om förväntad grundvattenbildning hämtas från SMHI. För att beskriva geologin längs tunnelsträckningen görs en berg- och jordartsprofil utifrån kartor från SGU, terrängkarta samt information om djup till berg från Brunnsarkivet. Jord- och bergprofilen innehåller information om dominerande bergarter, var större sprickzoner korsas och jordlagerföljder. Utifrån informationen från profilen skapas representativa tvärsnitt för de hydrogeologiska typmiljöer tunneln passerar.

Brunnsarkivets data över brunnar i området, och deras uttagskapacitet, används för att beräkna bergets genomsläpplighet. Även en beräkning över hur stort inläckage som kan förväntas i tunneln utförs, samt hur tätt berget behöver göras för att inläckaget ska begränsas till en acceptabel nivå. För att visualisera grundvattenavsänkningens storlek och form skapas grundvattenmodeller med modelleringsverktyget GMS 8.1.

Efter att modeller över de olika representativa tvärsnitten gjorts med tidigare nämnda indata, både utan och med tätning kring tunneln, uppdateras modellerna med resultat från Trafikverkets fältundersökningar. Genom att utvärdera och jämföra modellerna, som baseras på data från olika skeden i projektet, kan den tidiga prognosens rimlighet bedömas. För att bedöma modellernas rimlighet genomförs också en analytisk beräkning av avsänkningen utifrån beräknade värden på genomsläpplighet och tunnelns utseende.

2 Litteraturstudie

Litteraturstudien syftar till att ge en teoretisk bakgrund som ska göra det lättare att förstå kommande resonemang i rapporten. Här redogörs kortfattat för grundvatten i jord och berg, möjlig omgivningspåverkan på grund av grundvattenavsänkningar samt hur tunneldrivning går till med fokus på tätning av berg.

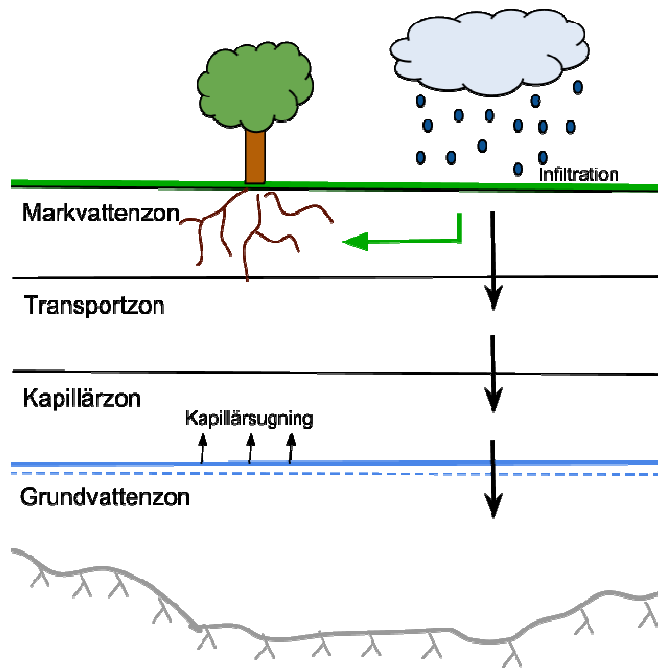
2.1 Grundvattenflöden

För att skapa en övergripande bild av grundvatten krävs en förståelse för hur grundvatten bildas och rör sig genom jord och berg. Nedanstående avsnitt behandlar detta och syftar till att förenkla förståelsen av kommande delar i rapporten, såsom Avsnitt 2.3 *Omgivningspåverkan orsakad av grundvattenavsänkning* och Kapitel 3 *Fallstudie*.

2.1.1 Grundvatten i jord

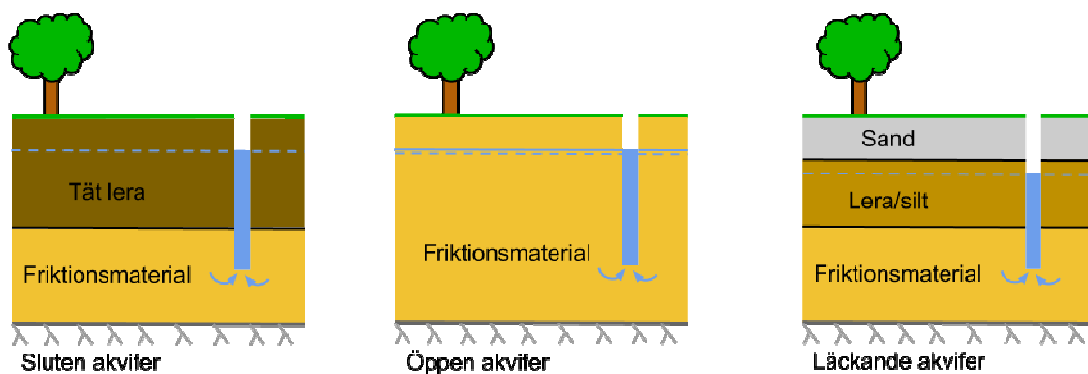
Vattnet som bildar grundvatten ingår i den hydrologiska cykeln, även kallad vattnets kretslopp (Carlsson 1997). Det regn som infiltrerar i jorden bildar grundvatten. Resterande del rinner av på ytan eller avdunstar. Carlsson (1997) beskriver marken som en serie av zoner som det infiltrerande vattnet måste ta sig igenom, se Figur 2.1. Närmast markytan ligger markvattenzonen där växterna har stor påverkan på hur mycket vatten som tar sig vidare. Under vissa perioder sker det knappt någon grundvattenbildning, till exempel på sommaren under vegetationsperioden då växterna tar upp stor del av nederbörden. Detta illustreras med den gröna pilen i Figur 2.1. Men när vattenhalten i markvattenzonen ligger över fältkapaciteten, det vill säga den maximala mängd vatten som en jordart kan hålla (Nationalencyklopedin A), dräneras vattnet till transportzonen, sedan till kapillärzonen och slutligen grundvattenzonen (Carlsson 1997). Som syns i Figur 2.1 så verkar kapillärkrafter i kapillärzonen, vilket innebär att den binder vatten från grundvattenzonen. Vattenhalten är därför hög, nära mättad. Längst ner ligger grundvattenzonen, vars övre gränsyta brukar kallas grundvattenytan. Här är porerna helt vattenfyllda, alltså mättade. De olika zonernas reservoarer svarar mot porvolymen i respektive zon (Carlsson 1997).

Områden där en infiltration sker kallas inströmningsområde. Vid dessa sker alltså en påfyllnad av grundvatten. Större delen av terrängen är i vanliga fall inströmningsområden (Nationalencyklopedin B). Motsatsen kallas utströmningsområde och där sker alltså ett utflöde av vatten från grundvattenzonen. Sådana områden har en grundvattenyta som ligger i närheten av eller strax över markytan (Nationalencyklopedin C). Exempel på utströmningsområden är vattendrag och vissa våtmarker.



Figur 2.1 Schematisk bild över markens infiltrationszoner.

När vattnet har infiltrerats och tagit sig hela vägen till grundvattenzonen har grundvatten bildats. Beroende på jordlagrens egenskaper ser grundvattenreservoarerna olika ut. Som exempel kan nämnas akviferer. Carlsson (1997) beskriver akviferer som geologiska bildningar som är så permeabla att grundvatten kan utvinnas i användbar mängd. Akvifererna kan delas in i tre typakviferer - slutna akvifer, läckande akvifer och öppna akvifer, se Figur 2.2. I slutna akviferer överlagras mer genomsläppliga bildningar av tät material. Ofta är vattentrycksnivån högre än akviferens övre gränssyta. Om vattentrycket även är högre än markytan kallas grundvattnet för artesiskt vatten (Carlsson 1997). Öppna akviferer har en fri grundvattenyta där vattentrycket är lika med atmosfärstrycket. Läckande akviferer är en blandning av öppna och slutna akviferer. De kan antingen överlagras eller underlagras eller vara både över och underlagrade av tätare material (Carlsson 1997).



Figur 2.2 Exempel på hur jordprofilen ser ut i olika akviferer, baserad på Carlsson (1997, s. 5).

Jordens vattengenomsläpplighet är en viktig faktor för grundvattenflödesberäkningar. Den skiljer sig åt mellan olika jordarter. Jordarter med stora kornstorlekar, till exempel sand eller grus, är mer genomsläppliga än de med mindre kornstorlekar som lera och silt. Detta påverkar hur stor infiltration som sker i marken och därmed hur stor grundvattenbildningen blir. Detta värde på markens vattengenomsläpplighet

kallas för hydraulisk konduktivitet (Carlsson 1997). Exempel på typvärden för olika jordarters hydrauliska konduktivitet finns i Tabell 2.1.

Tabell 2.1 Olika jordarters hydrauliska konduktiviteter (Carlsson 1997).

Jordart	Hydraulisk konduktivitet, K [m/s]
Grus	$10^{-1} - 10^{-3}$
Sand	$10^{-3} - 10^{-6}$
Silt	$10^{-5} - 10^{-9}$
Lera	$10^{-8} - 10^{-12}$

2.1.2 Grundvattenflöden mellan jord och berg

Av den nederbörd som infiltreras i marken kommer en del att stanna i jordlagren och en del att rinna ner till berggrunden. Normalt stannar större delen av vattnet i jorden och bara en mindre del läcker ner i berggrunden, som oftast har lägre hydraulisk konduktivitet (Axelsson 2000). Där berget är uppkrossat, till exempel i sprickzoner, kan dock mer vatten läcka till berggrunden. Under naturliga förhållanden strömmar vattnet från jordlagret till berggrunden i höga delar av terrängen och tvärtom i låga delar av terrängen. Om det finns tätare horisontella skikt eller lager i jorden, kan detta medföra att jordgrundvattnet utgör ett eget system isolerat från berggrundvattnet (Axelsson 2000).

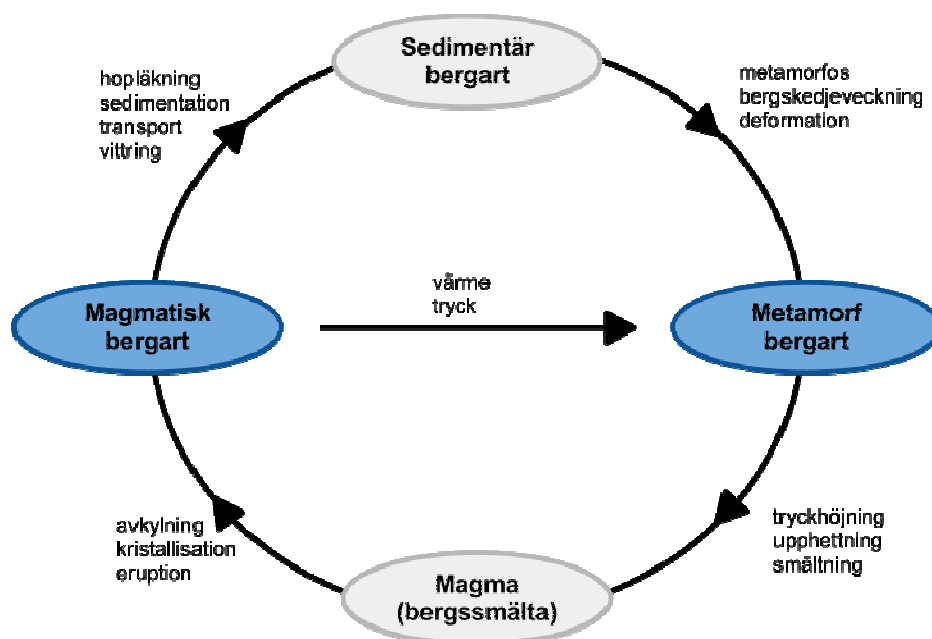
2.1.3 Grundvatten i berg

Vatten flödar på ett annat sätt i berg än i jord. Detta gäller framför allt för kristallina bergarter, som är de dominerande i Sveriges urberg (Gustafson 2009). Till de kristallina bergarterna hör magmatiska och metamorfa bergarter, se blåmarkering i Figur 2.3. Eftersom de kristallina bergarterna i sig har låg genomsläpplighet transporteras grundvattnet i huvudsak i sprickorna (Gustafson 2009). Detta gör att berggrundens grundvattenreservoar ofta är liten, då den begränsas av sprickornas volym (Olofsson 1991). Kristallint berg har tillsammans med sina sprickor en hydraulisk konduktivitet i storleksordningen 10^{-6} - 10^{-10} m/s som sjunker med djupet då sprickigheten minskar (Knutsson 1993).

En bergarts sprickighet beror bland annat på om bergarten är sur eller basisk (Gustafson 2009). En sur bergart har höga halter av kiseldioxid, medan en basisk bergart har låga halter (Andréasson 2009). Sura bergarter, exempelvis granit och gnejs, har högre elasticitetsmodul och lägre draghållfasthet än de basiska bergarterna (Gustafson 2009). Detta innebär att de sura bergarterna tar upp högre laster och därmed spricker sönder mer vid en berggrörelse.

För magmatiska bergarter, såsom granit, finns en annan faktor som påverkar bergartens sprickighet - temperaturen vid vilken bergarten stelnar (Gustafson 2009). En bergart som stelnar vid lägre temperatur är mer i jämvikt vid jordytans temperatur och blir därmed inte lika känslig för kemisk vittring som en bergart som stelnat vid högre temperatur (Gustafson 2009). Basiska bergarter, som stelnar vid hög temperatur, är därför känsligare för vittring än sura bergarter. Denna vittring brukar

dock inte utvidga sprickorna i den basiska bergarten, utan istället sätts sprickorna igen av vittringsprodukter från berget (Gustafson 2009).



Figur 2.3 Bergartscykeln baserad på Fredén (2009, s. 14).

Utifrån de två ovanstående paragraferna kan konstateras att sura bergarter har fler vattenförande sprickor än basiska bergarter - dels för att de sura bergarterna spricker upp mer vid berggrörelser och dels för att de basiska bergarternas sprickor sätts igen av den kemiska vittringen. Den större vattenföringen hos sura bergarter gör att dessa ofta innehåller mer grundvatten.

Ett exempel på de olika egenskaperna hos sura och basiska bergarter ses vid diabasgångar. Diabas är en basisk bergart och har därför låg vattengenomsläpplighet (Knutsson 1993). Eftersom diabasgångar har trängt upp och in i redan befintligt berg uppstår ofta sprickor runt omkring diabasgången. Detta gäller särskilt om diabasen tränger upp i granit, som är sur och som på grund av sin höga elasticitetsmodul och låga draghållfasthet spricker upp mer vid en berggrörelse. Diabasgången kommer då utgöra en sorts barriär för korsande vattenflöden i den mer vattenförande graniten (Knutsson 1993).

Trots att två bergarter har samma sammansättning, det vill säga båda är sura eller basiska och består av samma mineral, kan deras sprickor se olika ut (Knutsson 1993). Detta gäller till exempel granit och gnejs. Granit har sprickor i flera plan, både i vertikal- och horisontalled (Knutsson 1993). Sprickorna är vanligen långa och sammanhängande. Utifrån Knutsson (1993) dras slutsatsen att grundvatten kan transporteras längre sträckor i granit och därmed att ett stort antal sprickor kan bidra till vattentillförsel till exempelvis en tunnel. Gnejs däremot har mindre sammanhängande sprickor jämfört med granit (Knutsson 1993). I de områden där sprickorna i gnejs har en brant lutning är de oftast isolerade från varandra, vilket gör att vattnet inte transporteras mellan sprickorna (Knutsson 1993).

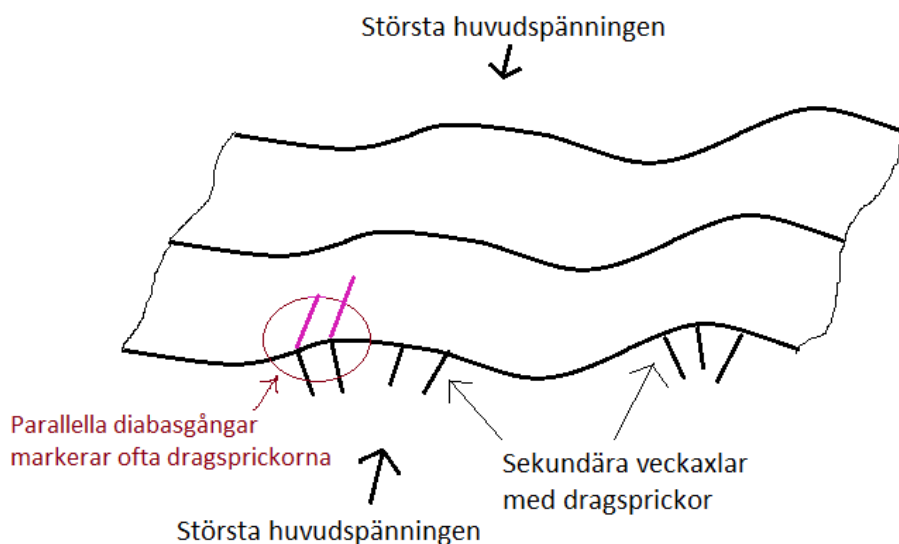
Sprickorna i gnejs är ofta tätt kopplade till bergartens foliation, en typisk skiktning som bildas när bergarten genomgår metamorfos (Gustafson 2009), se Figur 2.3. Dessa

foliationsplan bildar ofta svaghetszoner. Exempelvis vid sprängning av tunnel kan dessa svaghetsplan i bergarten spricka upp (Gustafson 2009). De nya sprickor som då bildas kan samla upp vatten från omkringliggande sprickor och leda in det i tunneln. Figur 2.4 visar ett exempel på hur foliationsplan med tillhörande sprickor kan se ut.



Figur 2.4 Foliationssprickor i gnejs.

I urberget finns större vattenförande sprickor vanligen i samma riktning som den största huvudspänningen har varit (Knutsson 1993). Gustafson (2009) beskriver hur det har bildats veck vinkelrätt mot huvudspänningen, men att det också uppstått mindre veck parallellt med den, se Figur 2.5. I de parallella vecken, som kallas de sekundära veckaxlarna, har dragsprickor uppstått. De markeras ofta av parallella diabasgångar som går att se på berggrundskartor (Gustafson 2009).



Figur 2.5 Uppkomst av större vattenförande sprickor i riktning med största huvudspänningen, baserad på figur 2.4 i Gustafson (2009, s. 16).

Förutom dragsprickor har även skjuvsprickor uppkommit vid plattetektoniska rörelser (Gustafson 2009). Andra orsaker till sprickbildning är bland annat när bergskedjor bildats och vid stelmandet av bergarten om det är en magmatisk bergart (Gustafson 2009). Gustafson (2009) beskriver att när en bergart som legat under stort tryck

avlastas på grund av erosion uppkommer sprickor när spänningen minskar. Dessutom har Sveriges berggrund utsatts för glaciation, vilket på flera sätt bidragit till sprickbildningen. Dels innebär isen en ökning av spänningen, vilket måste tas upp av berget, och dels har isens rörelse medfört att skjuvkrafter påverkat berget från ytan (Gustafson 2009). Förutom detta har den långa perioden med kallt klimat lett till att vatten frusit långt ned i berget och därmed orsakat frostsprängning.

2.2 Tunneldrivning

Det finns olika metoder för att bygga tunnlar. Den metod som ska användas för Förbifart Stockholm är konventionell tunneldrivning (Trafikverket 2011a), vilket innebär att successivt spränga sig fram i berget (Trafikverket 2012b). Här följer en kort beskrivning av hur denna metod går till (Trafikverket 2010; Trafikverket 2011a; Lindblom 2010):

1. Först behöver berget tätas för att förhindra att inläckaget av vatten blir för stort. Detta görs med så kallad förinjektering, se vidare Avsnitt 2.2.2 *Injektering*.
2. Nästa steg är att borra spränghålen. Dessa borraras i ett bestämt mönster. Hålen får rätt placering och riktning med hjälp av en dator i ett borrarregat som är styrt av digitala borrarplaner.
3. Borrhålen laddas sedan med sprängmedel och huvudladdningen pumpas in. Beroende på var borrhålen sitter i de olika tvärsnitten laddas de olika mycket. Borrhålen vid tunnelns tak och väggar laddas mindre än övriga hål för att begränsa sprickbildning i berget runt tunneln och undvika att spränga bort mer berg än vad som behövs. Ofta laddas hålen vid tunnelbotten kraftigt för att den lossprängda bergmassan ska lyftas upp och skakas om, vilket gör att den blir lättare att lasta ut. Nackdelen med detta är dock att det ofta leder till sprängskador på berget och ökat inflöde av grundvatten från botten av tunneln.
4. Därefter sprängs laddningarna. Varje sprängningstillfälle är en så kallad salva. Om bygget kräver extra försiktighet, till exempel i ett tätbebyggt område, används små salvor.
5. Sedan måste det sprängda berget schaktas ut. I Förbifart Stockholm sker krossningen av berget i tunneln och mycket av materialet fraktas till tillfälliga hamnar, där det transporteras vidare.
6. Nästa steg är skrotning. Då knackas löst berg bort från tunneltak och väggar. Detta görs både mekaniskt, med hjälp av en hydraulisk hammare, och manuellt.
7. Som sista steg förstärks berget genom att bergbultar borraras och gjuts fast. Hur mycket förstärkning som behövs beror på bergets kvalitet. Till slut sprutas tunnelns väggar och tak med betong.

Dessa steg upprepas tills hela tunneln sprängts fram. I en vanlig drivningscykel sprängs två till tre salvor om dagen, där varje salva drivs cirka fem meter (Eriksson 2005).

2.2.1 Varför fås en grundvattenavsänkning vid tunneldrivning?

Vid tunneldrivning sker alltid ett inläckage av vatten till tunneln. Större inläckage sker framförallt i krosszoner (Knutsson 1973). Krosszoner är långsträckta områden där berggrunden krossats på grund av kraftiga rörelser utmed ett plan eller en zon i

jordskorpan (Nationalencyklopedin D). Under perioderna trias, jura och krita var klimatet i Sverige varmt och fuktigt. Detta ledde till en djupvittring av berggrunden, framförallt längs krosszonerna (Fredén 2009). Tillsammans med inlandsisen har djupvittringen sedan åstadkommit långsträckta fördjupningar i berggrunden längs krosszonerna (Knutsson 1993). Här har smältvattenslam från isälvar i form av glacial sand och lera avsatts. När en tunnel går genom en krosszon dräneras vatten ut ur marklagren och dessa kan då sätta sig (Knutsson 1993).

Det stora inläckaget till tunneln sker när vattnet dräneras ur friktionsmaterial (Knutsson 1993). Detta sker relativt fort då vattnet kan rinna lätt genom dessa lager. När detta har skett fortsätter det att droppa in vatten från leran, vilket gör att den sakta sjunker samman (Knutsson 1993). Även om inläckaget sker långsamt i detta skede kan det ge stora konsekvenser eftersom stora sättningar kan fås, se Avsnitt 2.3.2 *Sättningar* (Knutsson 1993).

Axelsson (2000) beskriver hur vattenläckaget till en tunnel orsakar en sänkning av grundvattentrycket i berget runt tunneln. Detta orsakar i sin tur en ökad infiltration från jordlagret till berggrunden, vilket medför att grundvattennivån sänks. Hur mycket grundvattennivån sänks beror på förhållandet mellan vattengenomsläppligheten i jordlagret respektive berggrunden (Axelsson 2000). Om vattengenomsläppligheten i jordlagret är låg i förhållande till berggrunden medför det en ringa påverkan på jordgrundvattnet. Då kan det uppkomma dubbla grundvattenytor, med en grundvattenyta i berget och en i jorden och däremellan en omättad zon i bergets övre del (Axelsson 2000). Detta är vanligt vid sprickzoner. Om däremot jordlagret är mycket mer vattengenomsläppligt än berggrunden kan en större avsänkning av grundvattennivån i jordlagret ske (Axelsson 2000).

Avsänkningar vid ett visst inläckage blir större ju tätare berget är. Detta beror på att berggrundens grundvattenreservoar är liten, eftersom den representeras av sprickornas volym (Olofsson 1991). En liten reservoar gör att mindre läckage kan leda till stora sänkningar av grundvattennivåer.

Axelssons beskriver i sin rapport *Grundvattensänkning och dess effekter vid byggnation och drift av ett djupförvar* (2000) att sjöar och andra vattendrag som har kontakt med ett djupförvar genom bergets spricksystem, eventuellt kan få en avsänkning om berget är mycket genomsläppligt och vattentillförseln till vattendragen är låg. Om de motsatta förhållandena råder, god vattentillförsel och ett mindre permeabelt berg, kan vattendragen verka så att grundvattenavsänkningen i området begränsas. Detta kan även antas gälla för tunnelbyggnation.

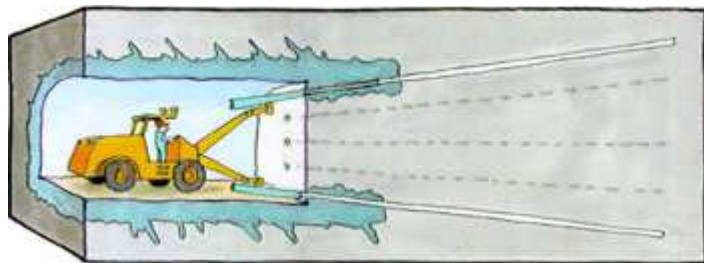
2.2.2 Injektering

Vid tunneldrivning uppkommer ofta problem med inläckage av vatten, särskilt då en krosszon i berget passeras (Knutsson 1973). Samma sak gäller för en sprickzon. För att undvika detta måste berget tätas, vilket kan göras genom så kallad injektering.

Vid injektering borrar hål i berget enligt ett i förväg bestämt mönster (Vägverket 2000). Genom tryck pressas sedan ett injekteringsmedel in i hålen och vidare ut i bergets spricksystem där medlet stelnar (Vägverket 2000). Målet är att tätas de vattenförande sprickorna och därmed minska inläckaget till tunneln.

Injektering kan antingen ske innan eller efter bergsprängningen och kallas då för- respektive efterinjektering (Gustafson 2009). Förinjektering sker framför tunnelfronten och skapar en injekteringskärm i form av en tratt (Gustafson 2009), se Figur 2.6. Injekteringskärmen designas så att den får en optimal skärmgeometri för

de rådande förhållandena (Eriksson 2005). Här tas bland annat hänsyn till bergets kvalitet – ju sprickigare berg desto tätare sätts hålen för att träffa de vattenförande sprickorna (Eriksson 2005). För att minska sannolikheten för att bergbultar utgör en länk mellan tunneln och oinjekterat berg måste den injekterade zonen ha en viss tjocklek, vanligen fyra till fem meter (Funehag 2011).



Figur 2.6 Förinjektering vid tunnelbygge (Trafikverket 2012c).

Fördelen med förinjektering är att injekteringsmedlet kan pressas in med högt tryck, vilket möjliggör en bättre spridning (Lindblom 2010). Vid den efterföljande sprängningen måste hänsyn tas till de injekterade bergmassorna så att inte dessa tar skada (Lindblom 2010).

Om för mycket vatten visar sig läcka in efter sprängningen, trots förinjektering, kan efterinjektering användas. Då borras hål där det behövs för att korsas de läckande sprickorna (Lindblom 2010). Vanligast är att använda kontinuerlig förinjektering och kompletterande efterinjektering där inläckaget fortfarande är för stort (Vägverket 2000).

Som injekteringsmedel används vanligen olika cementbaserade suspensioner (Vägverket 2000). Om tätningen inte skulle vara tillräcklig kan även kemiska injekteringsmedel användas, men på grund av vissa kemiska injekteringsmedels negativa miljöeffekter rekommenderar Vägverket (2000) att cementbaserade medel används i så stor utsträckning som möjligt.

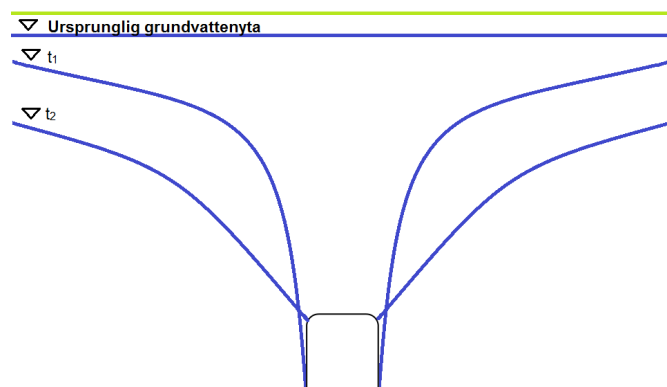
Enligt Andréasson (2009) är det fördelaktigt för tunneldrivningen om tunneln dras parallellt med större sprickor, eftersom naturliga svaghetszoner då underlättar sprängningen. När en sprickzon behöver korsas är det dock av injekteringskäl bättre att korsas sprickzoner med en rät vinkel. Eftersom förinjekteringen görs i form av en skärm snett framåt i tunnelns riktning är det svårare att träffa sprickor som ligger nästan parallellt med tunneln. Detta då sprickorna kan hamna mellan borrhål och därmed inte träffas av någon injektering. Därför behöver hänsyn tas till vilken riktning sprickorna har i jämförelse med tunneln i olika snitt och designa injekteringssskärm därefter.

2.3 Omgivningspåverkan orsakad av grundvattenavsänkning

Grundvattnet har stor betydelse, inte bara för naturen utan också för människans vardagliga liv. Som nämnts i Avsnitt 2.2.1 *Varför fås en grundvattenavsänkning vid tunneldrivning?* kan tunneldrivning ge upphov till grundvattenavsänkningar. Hur påverkar en sådan grundvattenavsänkning omgivningen? Nedanstående text besvarar denna fråga och beskriver hur denna påverkan uppkommer.

2.3.1 Sinande brunnar

När grundvattenytan förändras vid en avsänkning påverkar det hur grundvatten flödar i marken. Detta gör att brunnars uttagskapacitet kan förändras eller helt upphöra. När grundvattennivån sänks på grund av inläckage till en tunnel bildar grundvattenytan en avsänkningstratt ner mot tunneln, se Figur 2.7. Sänkningen är oftast störst precis efter att tunneln har gjorts (Olofsson 1991). Tratten kan dock breddas efterhand vilket gör att brunnar kan torka ut flera år efter att tunneln byggts.



Figur 2.7 Avsänkningstratt vid tunnel.

2.3.2 Sättningar

För att förstå varför det blir sättningar efter en grundvattenavsänkning är det viktigt att veta hur jordarter är uppbyggda. Jord kan beskrivas som ett trefasmaterial med korn, vatten och gas som ingående komponenter (Sällfors 2009). Kornen bygger upp en porös struktur som bär de laster som jorden utsätts för. Olika jordarter är bland annat uppbyggda av olika sorters mineraler. Dessa mineraler har varierande geometri, vilket gör att kornskelettet skiljer sig åt mellan olika jordarter. Därför har jordarterna också varierande egenskaper. Om en grundvattenavsänkning sker minskar porvattentrycket och markens stabilitet förändras, eftersom kornskelettet inte längre fylls upp av vatten som kan fördela belastningar (Sällfors 2009). Kohesionsjordar, som lera, påverkas särskilt av detta. När en grundvattensänkning sker överförs större delar av belastningen på kornskelettet, som då trycks ihop och ger sättningar (Sällfors 2009).

Sättningar kan bli problematiskt för de byggnader eller anläggningar som påverkas. I en byggnad eller anläggning som utsätts för ojämna sättningar kan sprickor uppkomma som följd av belastningsökningar som konstruktionen inte är avsedd för (Knutsson 1973). Om en byggnad däremot står på jordlager med samma mäktighet och samma benägenhet för sättningar, kommer hela byggnaden att utsättas för lika stora sättningar och konstruktionen tar ingen skada. Användbarheten, exempelvis i form av anslutningar till byggnaden, kan dock påverkas om byggnaden sjunker för mycket. Även ledningsnät, vägar, pålar och kablar kan skadas av sättningar (Knutsson 1973).

2.3.3 Uppträngning och inträngning av saltvatten

Axelsson (2000) beskriver att stora delar av den svenska östkusten under Östersjöns tidigare stadier täcktes av vatten. Vattnet var då mer salt än det är idag, eftersom förbindelsen till världshaven var djupare och större än den är i Östersjön idag. Axelsson (2000) beskriver vidare att eftersom saltvatten är tyngre än sötvatten finns det ofta salt grundvatten under det söta grundvattnet i områden under högsta marina

gränsen. Detta kan leda till problem i samband med grundvattenavsänkningar. Om grundvattenytan sänks kan det fås som konsekvens att mindre sött grundvatten finns tillgängligt och salt grundvatten tränger upp (Axelsson 2000). Detta kan till exempel påverka uttagsbrunnar i närheten som då pumpar upp salt grundvatten istället.

För att veta om det finns risk för uppträngning av salt grundvatten kan en karta över högsta marina gränsen studeras (Lewin Pihlblad 2006). Denna visar vilka delar av Sverige som legat under salt hav i jämförelse med högsta kustlinjen som även täcker in delar täckta av sötvatten. Utifrån kartan kan utläsas att större delen av Uppland, Västmanland och Södermanland ligger under högsta marina gränsen (Lewin Pihlblad 2006). Det gör även ett område kring Vättern samt en tunn remsa längs större delen av kusterna.

Enligt Lewin Pihlblad (2006) förekommer det salt grundvatten på stora djup även under övriga delar av Sverige, dock innebär djupet att det inte är någon större risk för saltvattenuppträngning. Riskerna är störst i närheten av sjöar och i andra lågområden, såsom svackor i terrängen. Vidare är det också störst risk för djupt borrade brunnar och vid stora uttag av vatten. Områden med små jorddjup, där det finns lite plats för magasinering av vatten, och områden med täta jordlager, som inte släpper igenom vatten uppifrån, har också större risk för att drabbas av uppträngning av salt grundvatten (Lewin Pihlblad 2006).

En annan form av problem med höga salthalter i brunnar är inträngning av saltvatten från havet. Inträngning fungerar på samma sätt som uppträngning med skillnaden att det salta vattnet kommer från sidan. Detta inträffar dock normalt endast i brunnar nära havet, i sällsynta fall upp till 300 meter ifrån kusten (Lewin Pihlblad 2006).

2.3.4 Ruttnande träpålar

Grundvatten kan ha en konserverande effekt på träpålar. En sänkning av grundvattenytan medför att syre kan tränga ner i marken och ruttningsprocesser kan starta i träet (Knutsson 1973). När träpålarna ruttnar ökar laster och spänningar i byggnaderna, vilket kan göra att stommen skadas.

2.3.5 Påverkan på vegetation

Hur mycket ett område påverkas av en grundvattenavsänkning hänger ofta ihop med om området är ett inströmningsområde eller utströmningsområde (Axelsson 2000), se Avsnitt 2.1.1 *Grundvatten i mark*. I ett inströmningsområde är vegetationen oftast bara beroende av markvattnet ovanför grundvattenytan. Om det däremot är en hög grundvattennivå i ett område kan en sänkning av grundvattennivån innebära att mängden växttillgängligt vatten i markvattenzonen minskar (Axelsson 2000). Detsamma gäller om området består av finkorniga jordarter med hög kapillär stighöjd, exempelvis silt (Olofsson 1991). Detta kan ge effekter på vegetationen, framförallt i torrperioder. Generellt är dock inströmningsområden mindre känsliga för grundvattensänkningar än utströmningsområden (Axelsson 2000).

Växter i leriga jordar med artesiskt vatten, det vill säga grundvatten med högt vattentryck, använder oftast inte detta vatten (Olofsson 1991). Detta gör att ett sänkt grundvattentryck, som en sänkt grundvattennivå skulle leda till, inte påverkar vegetationen.

I anslutning till utströmningsområden, där grundvattennivåerna är höga, finns ofta olika typer av våtmarksvegetation. Där är många växter beroende av att det under vissa tider under året är vått och om grundvattenytan sänks kan vegetationen påverkas

(Axelsson 2000). Området kan då efter hand övergå till en vegetation som kräver mindre tillgång till vatten.

Axelsson (2000) beskriver att det i utströmningsområden där grundvattenytan går upp till markytan bildas myrar. Beroende på vilken typ av myr det rör sig om är vegetationen olika känslig för grundvattenavsänkningar (Axelsson 2000). När sjöar, vikar och vattendrag växer igen kan kärr bildas. Kärr kan även bildas av att områden med hög grundvattennivå försumpas. I ett kärr är grundvattentrycket samma eller lägre än i omgivande fastmark, vilket betyder att kärret är ett utströmningsområde (Axelsson 2000). Ett kärr är beroende av att det tillförs vatten från omgivande fastmark. Detta gör att kärr är känsliga för sänkningar av grundvattennivån. I igenväxningskärr finns dock ofta en tät gyttjebotten vilket gör att den är mindre känslig för grundvattenavsänkningar än ett försumpningskärr (Axelsson 2000).

Då ett kärr växer på höjden och förlorar kontakten med fastmarkens vatten bildas en mosse (Axelsson 2000). Grundvattenytan i mossar är högre än omgivningens grundvattenyta, vilket innebär att mossar är inströmningsområden (Axelsson 2000). Mossar är enbart beroende av vatten i form av nederbörd. Detta medför att de är mindre känsliga för grundvattenavsänkningar.

Huruvida vegetationen i ett jordbruk påverkas av en grundvattenavsänkning beror på hur förhållandena ser ut från början. Om åkermarken inte är tillräckligt väl dränerad kan en mindre grundvattenavsänkning ge positiva effekter. Om avsänkningen medför att växterna får otillräcklig tillgång till vatten ger det däremot negativa konsekvenser. Under växtperioden fås inga större effekter om det regnar tillräckligt mycket och ofta (Axelsson 2000). Effekterna blir däremot större under torrperioderna eftersom växterna då tar vatten från markvattenmagasinet och detta minskar om grundvattenytan sänks. Beroende på hur geologin ser ut i området blir jordbruket olika känsligt för en avsänkning av grundvattennivån. Till exempel påverkas lerjordar mindre än jordar som består av grövre material (Axelsson 2000).

2.4 Beräkningsteori

För att ge ökad förståelse till fallstudien introduceras i detta kapitel den teori som ligger bakom beräkningarna som ingår i fallstudien. Beräkningarna används för att få fram bergets hydrauliska konduktivitet, beräkna hur tätt berget måste bli efter tätningåtgärder och uppskatta kommande grundvattenavsänkningar. Samtliga beräkningar är hämtade ur Gustafson (2009).

2.4.1 Beräkning av inläckage och hydraulisk konduktivitet för berg

För att beräkna bergets hydrauliska konduktivitet kan SGU:s Brunnsarkiv användas. Enligt Gustafson (2009) kan ett värde på bergets transmissivitet, som är ett jord- eller berglagets förmåga att leda vatten, bestämmas genom ekvation (2.1). Medianvärdet på brunnarnas uttagskapacitet och djup används för att inte extremvärdena ska ge för stor påverkan. När transmissiviteten T är bestämd för det sprickiga berget kan det sättas in i ekvation (2.2) för att få ut ett beräknat inläckage till tunneln. Detta bestäms med H som är tunneldjupet och ger flödet q i enheten $m^3/s/m$. Värdet görs sedan om till $l/min/100m$ för att kunna jämföras med vanliga funktionskrav för inläckage. Detta är en approximativ metod som används i ett tidigt skede för att bestämma indata till modellering. Med dessa formler för beräkningar av inläckage kombinerat med SGU:s brunnsarkiv kan en uppskattning på inläckage för en tunnel göras (Gustafson 2009).

När transmissiviteten beräknats kan den hydrauliska konduktiviteten tas fram enligt ekvation (2.3).

$$T \approx \frac{Q_{50}}{d_{50}} \quad (2.1)$$

$$q \approx \frac{H}{2R_0} \cdot \frac{Q_{50}}{d_{50}} \cdot \ln\left(\frac{R_0}{r_w}\right) \quad (2.2)$$

$$K = \frac{T}{b} = \frac{Q_{50}}{d_{50}} / d_{50} \quad (2.3)$$

2.4.2 Beräkning av hydraulisk konduktivitet för injekterat berg

För att kunna modellera grundvattenavsänkningen då berget kring tunneln injekterats, beräknas den konduktivitet som krävs för att det maximala inflödet i tunneln inte ska överskridas. Enligt Sällfors (2004) är ett vanligt krav på maximalt inläckage av vatten 2 l/min/100m i tätort. Utifrån detta krav har det injekterade bergets konduktivitet beräknats enligt ekvation (2.4) som hämtas från Gustafson (2009).

$$K_{inj} = q_{krav} \cdot \ln\left(\frac{2H}{r_t}\right) / (2\pi H) \quad (2.4)$$

2.4.3 Beräkning av avsänkning

Denna metod grundar sig på Thiems brunnsformel. Tunneln behandlas i beräkningarna på liknande sätt som brunnar gör i Thiems brunnsformel. r_t blir här ekvivalent tunnelradie för tvärsnittsarean A för ett av tunnelrören enligt ekvation (2.6). I ekvation (2.5) beräknas en hydraulisk konduktivitet utifrån transmissiviteten och tunnelns längd. Avsänkningen vid tunneln, utan hänsyn till grundvattenbildning, ges av ekvation (2.7). Denna metod kan ge en översiktlig bild av förväntade avsänkningar vid tunnelträckningen.

$$K = \frac{T}{L} \quad (2.5)$$

$$r_t = \sqrt{\frac{2 \cdot A}{\pi}} \quad (2.6)$$

$$s_t = \frac{q}{2\pi K} \cdot \ln \frac{R_0}{r_t} \quad (2.7)$$

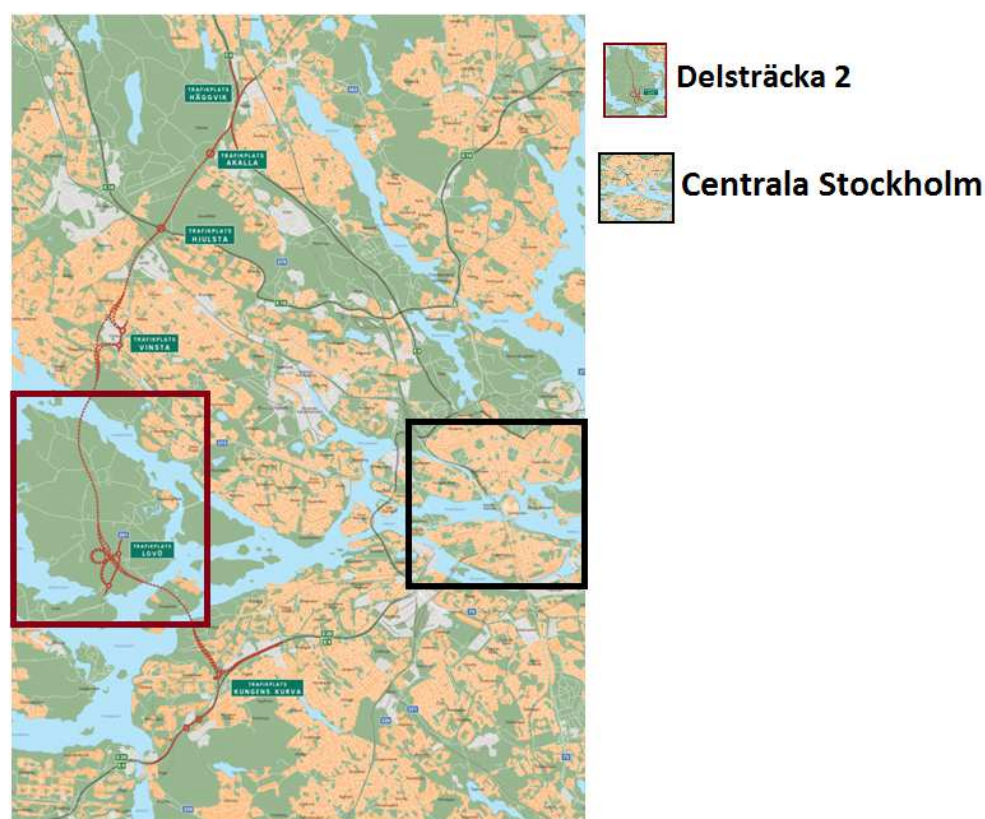
3 Fallstudie

Detta kapitel är en studie av grundvattenavsänkningar som skulle kunna uppkomma i samband med projektet Förbifart Stockholm, längs delsträcka 2. Det ges en introduktion till tunnelprojektet, en beskrivning av området samt beräkningar och resultat från modelleringen av grundvattenavsänkningen.

3.1 Introduktion till Förbifart Stockholm

Stockholmsregionen har ett trafiksystem som är radiellt uppbyggt (Trafikverket 2011b). Det gör att trafik som ska vidare till andra delar av regionen eller landet leds in på Stockholms infarter. Det blir därför stor trängsel på infarterna och genomfarterna, vilket i sin tur leder till köer. Naturliga barriärer i form av natur- och vattenområden försvårar förbindelser mellan trafiksektorerna. Framförallt utgör Mälaren och Saltsjön, en fjärd i Stockholms inlopp, stora barriärer mellan de södra och norra regionhalvorna (Vägverket 2001). Det har inte skett några satsningar på förbindelser i nord-sydlig riktning sedan Essingeleden färdigställdes 1966/67 och denna går rakt genom Stockholms centrala delar (Trafikverket 2011b). En ny förbindelse har därför diskuterats länge. Olika alternativ har övervägts och det som nu ska byggas är det som kallas Förbifart Stockholm (Trafikverket 2011c).

Förbifart Stockholm beräknas kosta 27,6 miljarder kronor i 2009 års prisläge (Trafikverket 2011c). Detta ska delvis finansieras av staten, men den större delen ska finansieras med intäkter från Stockholms trängselavgifter (Trafikverket 2011c). Vägen ska bli 21 km lång och 18 km av sträckan ska gå i tunnel (Trafikverket 2012a). Figur 3.1 visar hela Förbifart Stockholm. Delsträcka 2, som denna rapport fokuserar på, går mellan Kungshatt och Lambarfjärden och syns också i figuren.



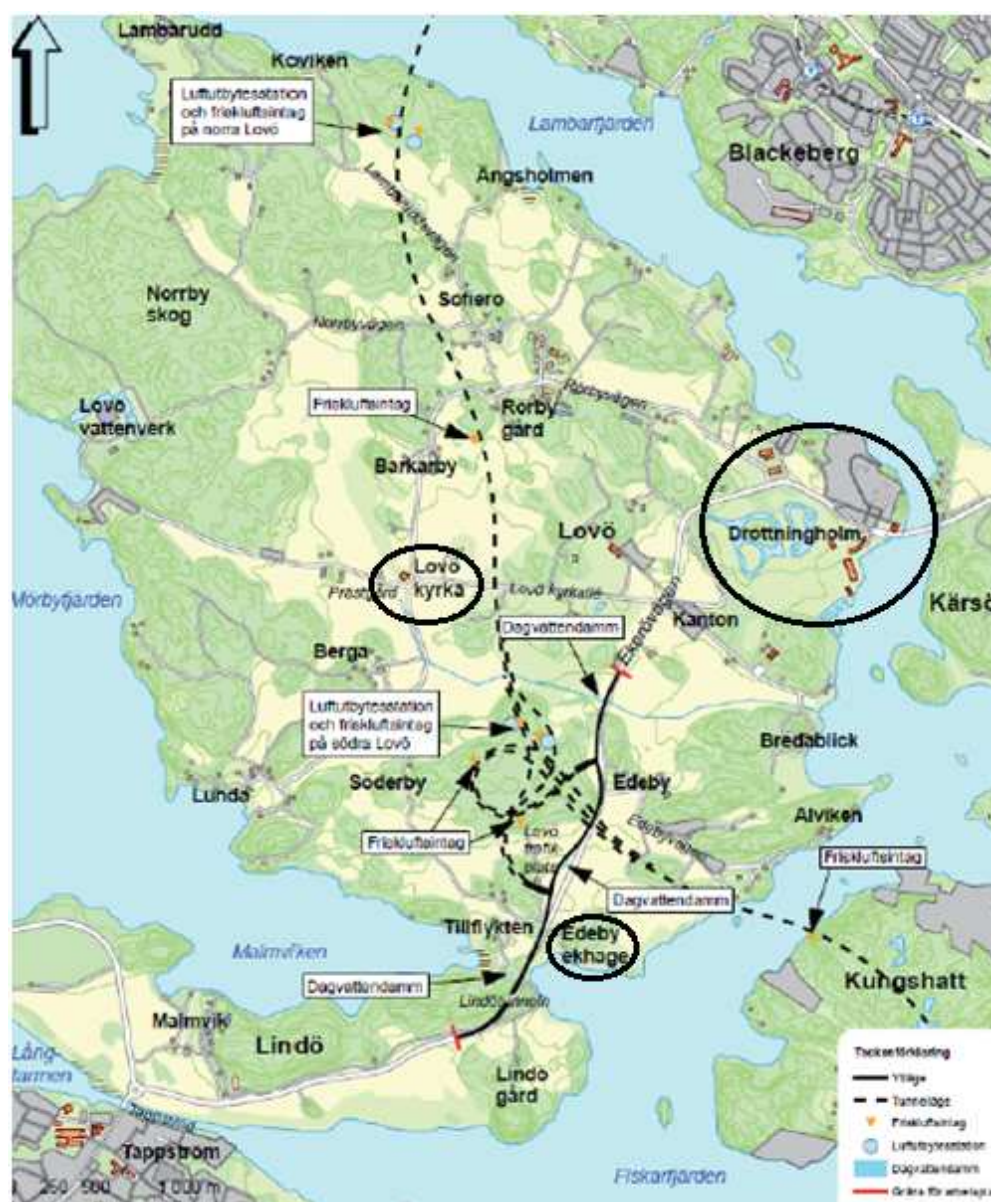
Figur 3.1 Karta över hela Förbifart Stockholm (Trafikverket 2012e).

3.2 Beskrivning av området

Nedan ges en beskrivning av området kring Förbifart Stockholm delsträcka 2, innehållande bland annat bebyggelse, hydrologi och hydrogeologi, jordlagerföljd och berggrund. Dessa används sedan dels som indata till grundvattenmodelleringen, dels för att utvärdera eventuella miljökonsekvenser.

3.2.1 Topografi och bebyggelse

Lovön och Kungshatt är två av Mäläröarna i Stockholms län. Lovöns topografi kan beskrivas som ett platt slättlandskap som omges av högre skog och bergsknallar längs vattenlinjen. Skogspartierna är särskilt tydliga längs den västra strandkanten. Kungshatt består av en hög bergsknalle täckt av skog (Länskartor 2012), se Figur 3.2.



Figur 3.2 Karta över Förbifart Stockholm delsträcka 2 med Drottningholm, Lovö kyrka och Natura 2000-området utmärkta (Trafikverket 2012d).

Längs sträckan där tunneln ska gå under Kungshatt finns enligt Länskartor (2012) ingen bebyggelse. Där finns dock en fornlämning utmärkt. Runt omkring på resten av Kungshatt finns ett hundratal bostäder, mestadels fritidshus, utspridda i grupper längs öns nordliga och sydliga strandkanter (Kungshättans Sportstugeförening).

Den större ön, Lovön, är rik på fornlämningar som har ett stort historiskt värde (Stockholm Länsmuseum). Dessa visar att ön har varit bebodd sedan stenåldern. Dagens Lovö domineras av ett herrgårdslandskap med många alléer och stora åkermarker (Stockholm Länsmuseum). De äldsta, mest välbevarade delarna av herrgårdarna byggdes under 1700- och 1800-talet. På Lovön hittas också byggnader med stort historiskt värde, såsom Drottningholms slott och Lovö kyrka vars äldsta delar byggdes under 1600- respektive 1000-talet. Drottningholms slott och dess parkanläggningar är så högt värderade att de står med på FN:s världsarvslista (Vägverket 2001). En stor del av Lovön är dessutom utpekad att vara av riksintresse för kulturmiljövården (Vägverket 2001). Det finns även ett Natura 2000-område i Edeby Ekhage på Lovöns södra spets (Trafikverket 2011d). Natura 2000-området och de viktiga byggnaderna Lovö kyrka och Drottningholms slott finns utmärkta i Figur 3.2.

3.2.2 Hydrologi och hydrogeologi

Årsnederbörden i trakten runt Lovön ligger enligt SMHI:s klimatdata från de senaste tio åren på runt 540 mm. Data från fem av SMHI:s mätstationer i närheten av Lovön - Stockholm Observatorielunden, Stockholm Bromma, Norsborg 11, Sättra och Adelsö - ger ett medelvärde av årsnederbörden på 520 mm under perioden 1961-1990. Denna period kallas av SMHI för en normalperiod. Att årsnederbörden har varit större de senaste tio åren jämfört med normalperioden, styrks också av SMHI:s avvikelsekartor, som visar att de senaste årens årsnederbörd har legat ungefär 5-10 procent över normalårsnederbörden (SMHI).

En vattendelare går genom västra Lovön från norr till söder (VISS 2012). Större delen av vattnet på Lovön rinner således av mot öns östra sida. Årsavrinningen i området är strax under 200 mm (SMHI). Enligt Rhode (2006) är grundvattenbildningen på lång sikt lika med den specifika avrinningen, det vill säga nederbörden minus avdunstningen. Detta innebär att grundvattenbildningen kan antas vara lika stor som årsavrinningen, det vill säga 200 mm per år.

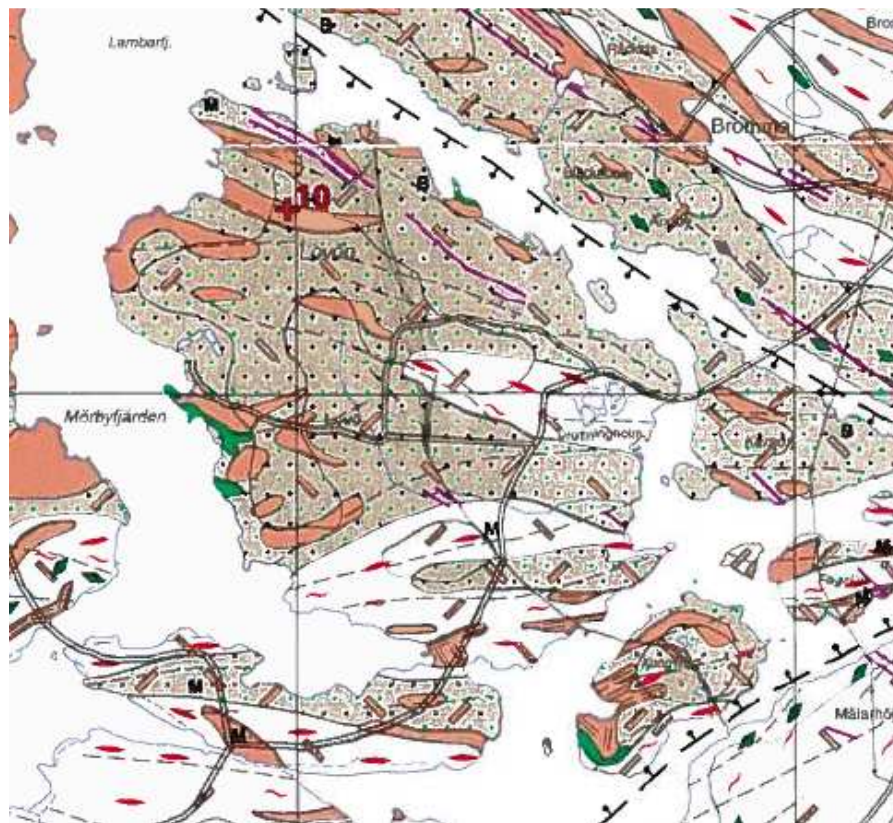
I Brunnsarkivet (SGU 2012a) finns data från alla borrade brunnar. På Lovön hittas 23 brunnar, både hushållsbrunnar och energibrunnar, i närheten av tunneln. Uttagskapaciteten i brunnarna varierar stort, från ett tiotal till några tusen liter per timme. Gemensamt för brunnarna är att de alla är bergbrunnar, det vill säga bergakviferer.

3.2.3 Berggrund

Stockholmsområdet tillhör den Svekokarelska provinsen som omfattar stora delar av östra Sverige och delar av västra Finland (Stejmar Eklund 2002). Berggrunden i regionen härstammar från den Svekokarelska orogesen, en bergskedjeutveckling som skedde för 1800-2000 miljoner år sedan. Huvudsakligen består berggrunden av kristallina bergarter, där de vanligast förekommande är olika typer av graniter och gnejser (Stejmar Eklund 2002). Utöver dessa Svekokarelska bergarter hittas ett antal ytbergarter, det vill säga bergarter som bildats på jordytan genom sedimentära eller vulkaniska processer (Fredén 2009). I Stockholmsregionen dominerar sedimentära, metamorfa och vulkaniska ytbergarter (Fredén 2009). Där hittas också migmatiska

gnejser som bildats när metamorfosen gått så långt att ytbergarterna delvis smälte (Fredén 2009).

Området där Förbifart Stockholm ska gå består till största del av hårda, kristallina bergarter, främst graniter och gnejser (SGU 2001). Berggrundskartan (SGU 2001) visar att granit till granodiorit är de dominerande bergarterna. Därpå följer metagråvacka och yngre granit, se Figur 3.3. Norra och västra Lovön utgörs av ett område med vulkanitgnejser (Möller 1965). På norra och mellersta Lovön hittas också bergarten diabas (Möller 1965). Diabasgångarna går i en sydostlig riktning och deras bredd förväntas variera mellan två decimeter upp till ett par meter, då detta är vanligt för området (Möller 1965).



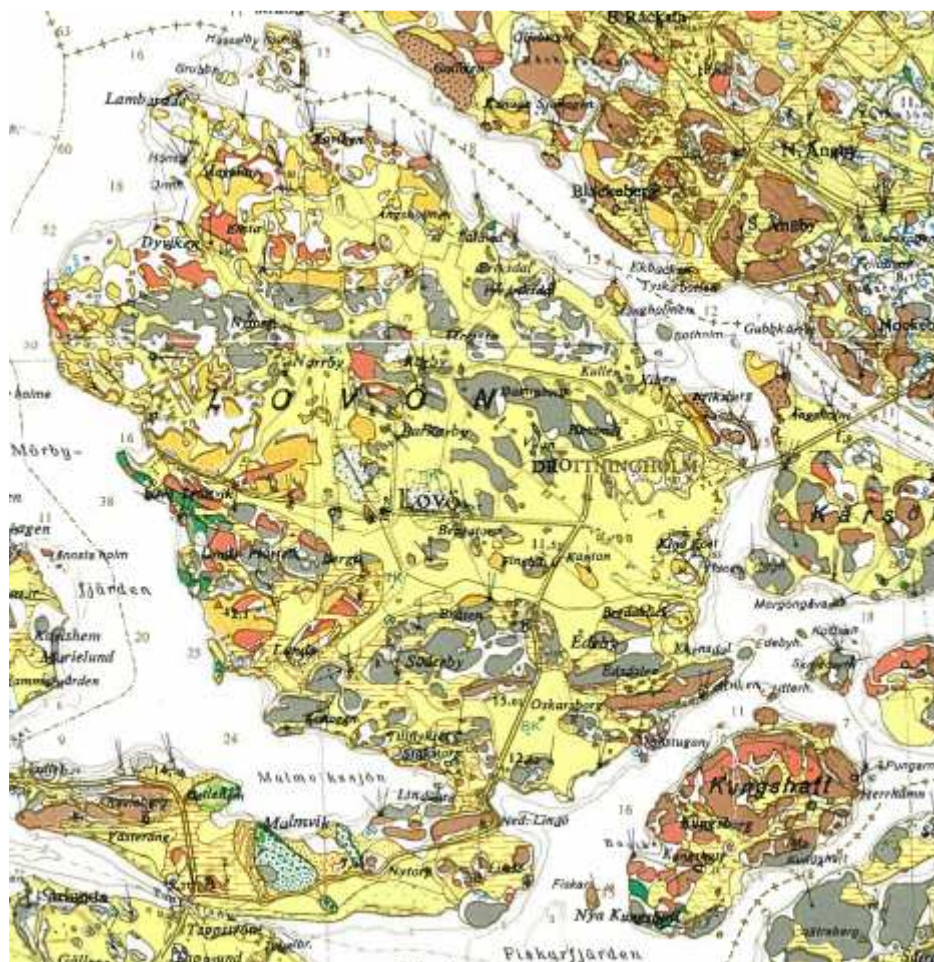
Figur 3.3 Snitt ifrån Berggrundskartan över Lovön och Kungshatt. Rödbruna zoner på kartan är yngre granit, gråbrunt är granit till granodiorit och vitt är metagråvacka © Sveriges geologiska undersökning, 2001.

Mälardalen är ett så kallat sprickdalslandskap (Möller 1965). Landskapet bildades genom att tektoniska rörelser gav upphov till krosszoner som sedan utsattes för djupvittring (Fredén 2009). Idag är de djupa dalgångarna, som vittringen ledde till i Mälardalen, vattenfyllda och ses på berggrundskartan som förkastningar och spricksystem (Möller 1965). Kring Lovön följer deformationszonerna Mälarfjärderna, en vid Lovöns norra sida och en öster om Kungshatt, se tjocka streckade linjer i Figur 3.3 (SGU 2001).

3.2.4 Jordarter

Berggrunden är på de flesta ställen täckt av olika jordlager med undantag för där det finns berg i dagen (SGU 1965). Dessa jordlager har bildats under den senaste istiden och den påföljande postglaciala tiden.

Den senaste istiden, Weichsel, råde för 110 000 - 10 000 år sedan (Andréasson 2009). Denna inlandsis överlagrade hela Stockholmsregionen och har därför haft stor påverkan på hur området ser ut idag. När landisen gled fram över området drog den med sig alla gamla jordlager och blottade det underliggande berget. Även delar av berggrunden bröts loss av isen (Andréasson 2009). De få äldre jordarter som finns kvar låg i skyddade lägen och har således bevarats. När isen sedan började smälta avsattes materialet som isen fångat upp. Materialet bestod av allt från lerpartiklar till större block och bildade den osorterade jordarten morän. De delar av moräntäcket som finns kvar ligger direkt på berggrunden (Andréasson 2009). Moränens mäktighet är sällan större än någon meter i tunnelsträckningens område, och denna beskrivs i huvudsak som sandig-siltig morän (Möller 1965). På Lovön är stora delar av moräntäcket överlagrat av glacial lera (SGU 1965), se Figur 3.4. Mäktigheten på den glaciala lera är oftast bara någon eller några meter (Möller 1965).



Figur 3.4 Jordartskarta över Lovön och Kungshatt. Gula områden står för lera medan rött, grått och brunt är berg i dagen © Sveriges geologiska undersökning, 1965.

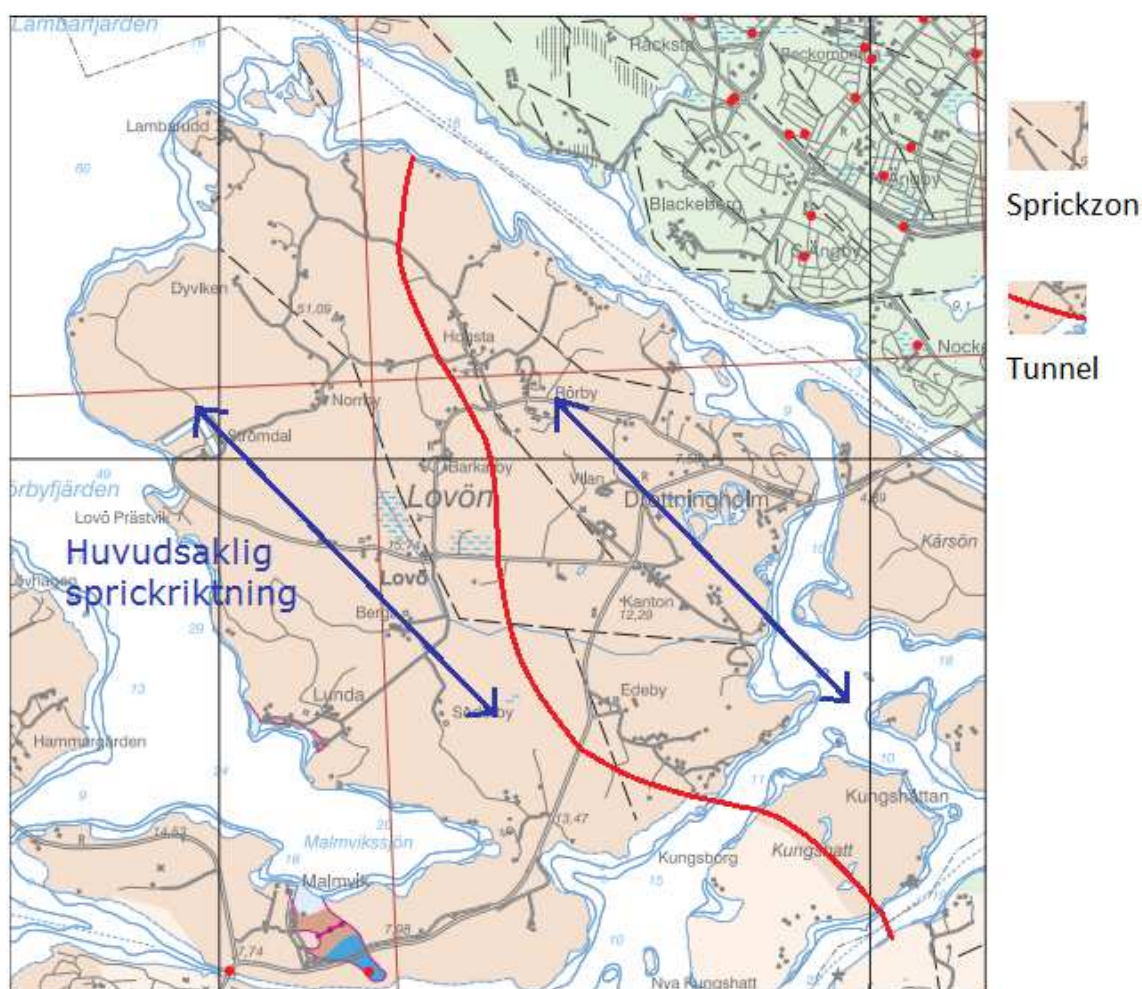
När landhöjningen började efter Weichsels slut, låg Lovön 150 meter under högsta kustlinjen (Andréasson 2009). Under landhöjningen kom landdelar att efterhand hamna i strandlinjen där vågor och svallning gav upphov till en omlagring av jordarterna (Möller 1965). På vissa ställen spolades all jord bort och bergytan kom upp i dagen. Omlagringen som svallningen gav upphov till bildade den postglaciala lera som nu täcker stora delar av Lovön (Fredén 2009). Lerområdena som finns på Lovön har mäktigheter på upp till 16 meter (SGU 1965).

3.2.5 Sprickzoner längs tunnelsträckningen

Den huvudsakliga sprickriktningen har lästs ut från berggrundskartan (SGU 2001) genom att studera sprickriktningarna över ett större område. Grundvattenkartan (SGU 2012b) har sedan använts för att ta reda på vilka som är de största sprickzonerna i området.

Som syns i Figur 3.5 är tunnelsträckningen, i figuren markerad med rött, nästan vinkelrät mot den huvudsakliga sprickriktningen endast i kortare sektioner. Större delen av tunnelsträckningen är helt eller nästintill parallell med den huvudsakliga sprickriktningen, angiven i figuren. De större sprickzoner som också är utmärkta i figuren, som svarta streckade linjer, korsar däremot tunneln närmast vinkelrätt eller med en vinkel på ungefär 45 grader. Under en längre sträcka löper tunnelsträckningen parallellt med två större sprickzoner. Enligt Avsnitt 2.2.2 *Injektering* underlättas tätningen av berget om tunneln korsar sprickzoner med en rät vinkel. Eftersom tunneln korsar den huvudsakliga sprickriktningen med en liten vinkel kan tätningen försvåras.

Deformationszonerna som tunneln passerar vid Lovöns norra sida och öster om Kungshatt ingår i delsträcka 2. I denna rapport behandlas dock inte dessa deformationszoner, då det saknas information om berggrund under vattnet i berggrundskartan. Dessutom finns inte några brunnar nära deformationszonerna, vilket gör att en hydraulisk konduktivitetsberäkning inte kan göras.



Figur 3.5 Karta över Lovöns större sprickzoner och huvudsakliga sprickriktning © Sveriges geologiska undersökning, 2012b.

3.2.6 Upprättande av jord- och bergprofil

Jord- och bergprofilen, se bilaga 2, är framtagen med information hämtad från tillgängliga geologiska kartor. Från det geologiska kartbladet (SGU 1965) och dess beskrivning (Möller 1965) kan jordarter och riktvärden på jordlagrens mäktighet utläsas. För att bestämma jorddjup i profilen mer exakt har dessa värden kontrollerats mot data från Brunnsarkivet som ger djup till berg i brunnar. Informationen om berggrunden ges av berggrundskartan (SGU 2001). Denna visar vilka bergarter som finns samt sprickor, gångbergarter, krosszoner och deformationer.

Berggrundens yta har sedan ritats in efter var det geologiska kartbladet visar berg i dagen. Lutningen på berget under markytan följer den topografi som kan utläsas från Länskartor (2012) tillsammans med informationen om bergarters djup ifrån berggrundskartan (SGU 2001). Det *Geologiska Kartbladet Stockholm NV* är från år 1965 och efter detta har det utvecklats nya mättekniker som ger information om berggrundens sammansättning. Därför har information om var olika bergarter finns längs tunnelsträckningen tagits uteslutande från den nyare berggrundskartan (SGU 2001).

3.2.7 Hydrogeologiska typmiljöer

Hydrogeologiska typmiljöer är avgränsade områden med likartade geologiska och hydrogeologiska villkor (Stejmar Eklund 2002). Typmiljöer används för att göra en förenklad modell som efterliknar verkliga förhållanden. Typmiljöerna är identifierade och beskrivna utifrån *Det geologiska kartbladet Stockholm NV* (SGU 1965), beskrivningen till det geologiska kartbladet (Möller 1965), *Hydrogeologiska typmiljöer* (Stejmar Eklund 2002) och berggrundskartan (SGU 2001). Delsträcka 2 delas in fem typmiljöer, vilka är markerade i jord- och bergprofilen, se bilaga 2.

Typmiljö 1: Kristallint berg i dagen under högsta kustlinjen

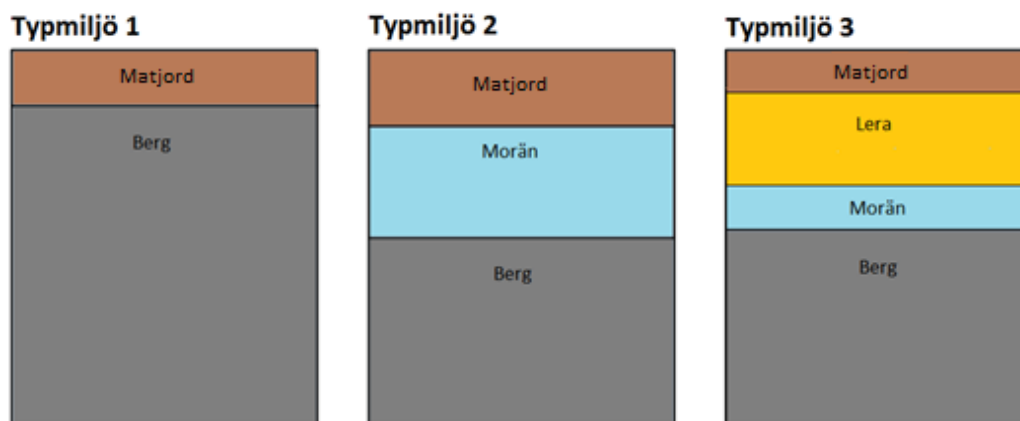
Vanliga bergarter i denna typmiljö är granit till granodiorit, yngre granit och metagråvacka. De jordarter som ligger på bergytan är organiska jordarter och har en mäktighet på upp emot en meter, se Figur 3.6. I denna rapport kallas dessa organiska jordarter för matjord. Akvifererna finns i sprickorna i berggrunden. Denna miljö är vanlig längs med tunnelsträckningen främst på Kungshatt, men också på Lovön.

Typmiljö 2: Moränområden under högsta kustlinjen

I denna typmiljö är akvifererna av öppen typ, för lagerföljd se Figur 3.6. Moränens mäktighet uppgår sällan till mer än fyra meter. På Lovön hittas denna typmiljö i strandlinjen i norr och på vissa höjder. På Kungshatt finns den endast i strandlinjen. Den vegetation som finns i denna typmiljö är oftast barrskog som växer på en podsolprofil.

Typmiljö 3: Lertäckta områden

Typmiljö 3 täcker stora delar av Lovön. Miljön består av slutna akviferer. Lerans mäktighet varierar från ett tunt täckande skikt upp till ett tiotal meter. De tjockare lagren hittas i de postglaciala lerfälten på Lovön. På Kungshatt finns typmiljö 3 på ett fåtal ställen. Figur 3.6 visar en schematisk bild över lagerföljden.



Figur 3.6 Schematisk bild över de olika typmiljöernas lagerföljd. Bilden visar endast lagerföljd, inte mäktighet.

Typmiljö 4: Diabasgång

Typmiljö 4 ligger på norra delen av Lovön. Där korsar en diabasgång Lovön i sydostlig riktning och berget är därför mer uppsprucket. Lagerföljden är samma som för typmiljö 3, men lerans mäktighet är mindre.

Typmiljö 5: Sprickzon

Typmiljö 5 representerar en sprickzon, ett område med mer uppsprucket berg. Denna typmiljö har mer vattenförande sprickor och därmed en högre hydraulisk konduktivitet. Sprickzonerna förekommer mest inom samma område som typmiljö 3, därför har dessa typmiljöer samma lagerföljd.

3.3 Beräkningsresultat

I detta avsnitt redovisas beräkningsresultat som getts utav formler i Avsnitt 2.4 *Beräkningsteori*. Beräkningsresultat innefattar bergets hydrauliska konduktivitet, konduktivitet för injekterat berg och avsänkning rakt ovanför tunneln. För samtliga resultat och indata se bilaga 4.

3.3.1 Bergets hydrauliska konduktivitet

SGU:s Brunnsarkiv används för att beräkna konduktiviteten i berget längs tunnelsträckan. Avsikten var att dela in brunnarna i områden efter hur nära större sprickzoner de låg. På grund av att Lovön inte har så många brunnar skulle varje område bestå av för få brunnar och indelningen bedömdes därför inte ge ett tillförlitligt resultat. Av denna anledning bestämdes att dela upp sträckan i tre områden - (X) diabasgången på Lovön, (Y) resten av Lovön samt (Z) Kungshatt, för karta se bilaga 3. I Brunnsarkivet finns bara två brunnar i område X, där diabasgången påträffas, men då den hydrauliska konduktiviteten antas skilja sig avsevärt i detta område jämfört med övriga områden anses denna indelning ändå vara relevant. I Tabell 3.1 redovisas beräknade värden på hydraulisk konduktivitet och inläckage.

Tabell 3.1 Beräknade konduktiviteter enligt ekvation (2.3).

Område	Hydraulisk konduktivitet, K [m/s]	Inläckage, q [l/min/100m]
X	$9,2 \cdot 10^{-8}$	48,7
Y	$6,9 \cdot 10^{-9}$	3,2
Z	$3,8 \cdot 10^{-9}$	1,7

3.3.2 Hydraulisk konduktivitet för injekterat berg

Då kravet på maximalt inläckage sätts in ger ekvation (2.4) de hydrauliska konduktiviteter som krävs på injekterat berg för att uppnå funktionskravet, se Tabell 3.2. Anledningen till att konduktiviteten skiljer sig mellan de olika områdena är att djupet till tunneln varierar.

Tabell 3.2 Hydraulisk konduktivitet på injekterat berg.

Område	Hydraulisk konduktivitet, K_{inj} [m/s]
X	$1,6 \cdot 10^{-9}$
Y	$1,7 \cdot 10^{-9}$
Z	$1,5 \cdot 10^{-9}$

3.3.3 Avsänkning

Avsänkningen rakt ovanför tunneln har beräknats i de tre olika delområdena utmed tunnelsträckningen. Den analytiskt beräknade avsänkningen syns i Tabell 3.3.

Tabell 3.3 Beräknad avsänkning enligt ekvation (2.9).

Område	Avsänkning, s_t [m]
X	55
Y	48
Z	50

3.4 Modellering

Följande avsnitt beskriver hur grundvattenmodelleringen har genomförts. Avsnittet innehåller en beskrivning av programvaran GMS 8.1, antaganden och indata till modellerna samt resultat av modelleringen. I nedanstående text är modell 1 en första modellering gjord med hjälp av indata som är framräknad eller uppskattad med hjälp av kartmaterial, det vill säga innan några fältundersökningar har gjorts. Med modell 2 menas den uppdaterade modelleringen som använder resultat av provborrningar från en fältundersökning.

3.4.1 Beskrivning av modelleringsprogrammet GMS 8.1

GMS står för Groundwater Modeling System och är ett datorprogram för modellering av grundvattenflöden. Programmet använder beräkningsprogram som redan finns, till exempel MODFLOW - ett modelleringsverktyg som använder finita differensmetoden

(Aquaveo 2012). MODFLOW baseras på Darcys lag och massbalans (Harbaugh 2005). GMS gör programmen mer användarvänliga genom ett enklare användargränssnitt med tydligare menyer och symboler.

Med GMS 8.1 kan modeller i såväl 2D som 3D göras. Parametrar som kan läggas in är bland annat markens hydrauliska konduktivitet, storleken på grundvattenbildningen, eventuella brunnars uttag och förekomsten av dränering. Även randvillkor, som fasta grundvattennivåer, kan läggas in. Resultatet visar bland annat vilket grundvattentryck som finns i modellens olika delar under de förutsättningar som angetts.

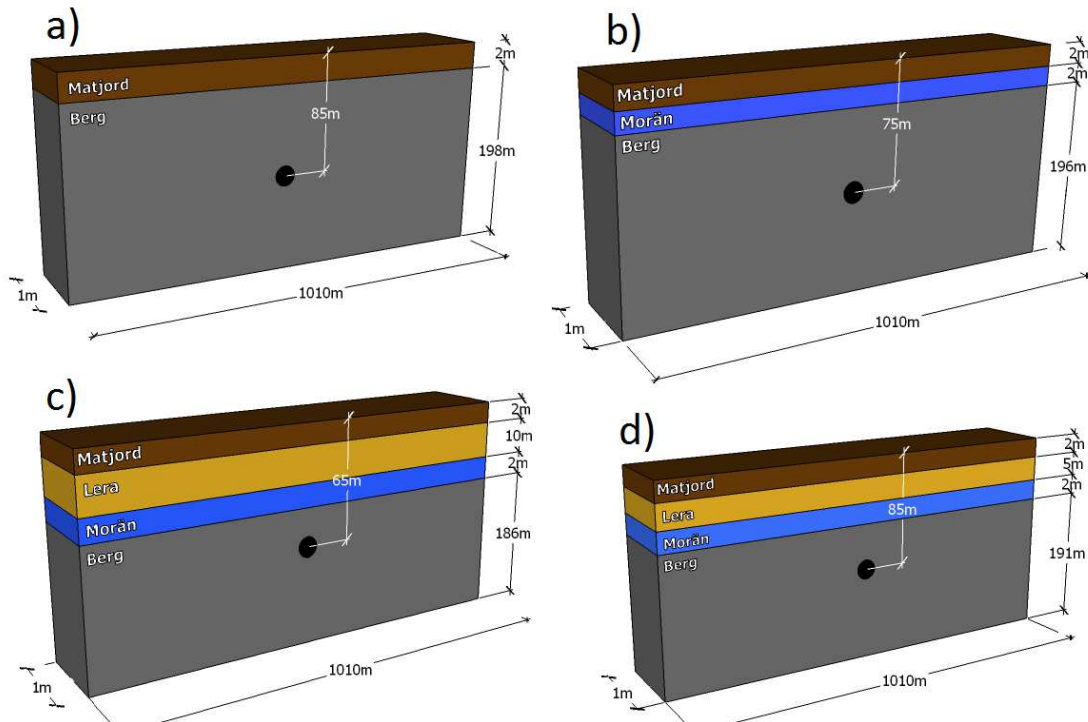
3.4.2 Modell 1 – antaganden och indata

Det antas att flödet in till tunneln är tvådimensionellt, det vill säga att till varje tunneltvårsnitt flödar vatten enbart in vinkelrätt mot tunneln. Utifrån detta antagande utformas modellerna som en meter tjocka tvärsnitt i GMS 3D-funktion. Tabell 3.4 nedan visar vilket tvärsnitt som representerar vilken hydrogeologisk typmiljö samt i vilket område miljön hittas. Bredden på tvärsnitten väljs med avseende på den förväntade influensradien, vilken är satt till ungefär fem gånger tunneldjupet. Enligt Gustafson (2009) är ett rimligt antagande att influensradien är 3-5 gånger så stor som tunneldjupet i ett opåverkat morän- och bergområde. För att vara på den säkra sidan, och för att kunna placera tunneln i mitten på tvärsnittet, väljs tvärsnittsbredden 1010 meter. Tvärsnittets kanter antas då ha en konstant grundvattenyta. På grund av att modellerna inte konvergerade med för stora skillnader i lagertjocklek, får matjorden och moränen en mäktighet på två meter istället för en meter, som bedöms stämma mer överens med verkligheten. Vidare antas också att topografin i tvärsnittet är försumbar. Detta dels för att de största skillnaderna i topografin hittas nära strandlinjerna, vilka inte finns med i tvärsnitten, och dels för att detta ger enklare modeller. I Figur 3.7 a-d visas de modellerade tvärsnitten.

Tabell 3.4 Tabellen visar vilka tvärsnitt som representerar vilken typmiljö och vilket område berget tillhör.

Tvärsnitt	Typmiljö	Område
1	1	Z
2	2	Y
3	3 och 5	Y
4	4	X

I Figur 3.7 är även tunneln utmärkt. Tunneldjupet varierar under delsträckan och således också i de olika tvärsnitten. Djupet väljs utifrån var i jordprofilen, se bilaga 2, de olika typmiljöerna hittas och deras respektive tunneldjup. Tunneln läggs sedan in som dränering i fyra celler, för att representera de två tunnelrören. Detta innebär att allt vatten som flödar in i tunnelcellerna dräneras bort, vilket stämmer bra med hur det fungerar i verkligheten. I GMS ska dränens hydrauliska konduktivitet sättas till samma som det omgivande materialet, i detta fall bergets konduktivitet. Det är dock troligt att tunnelsprängningen ökar sprickigheten i berget närmast tunneln och därmed ökar även den hydrauliska konduktiviteten. Tunneldräneringens hydrauliska konduktivitet är därför satt till 10^{-5} m/s.



Figur 3.7 Schematiska bilder över modellerade tvärsnitt. Bilderna a-d representerar tvärsnitt 1-4. Tvärsnitt 3 representerar även typmiljö 5.

Den enda skillnaden som GMS gör på olika material i marken är varierande hydraulisk konduktivitet. Bergets hydrauliska konduktivitet, både innan och efter injektering, hämtas från Avsnitt 3.3 *Beräkningsresultat*. För tvärsnitt 3 görs även en modellering för sprickzonen, typmiljö 5. Där antas bergets hydrauliska konduktivitet vara 100 gånger större än normalt på grund av sprickigheten. De olika jordarternas konduktiviteter hämtas ur Carlsson (1997). Där väljs ett medelvärde för varje jordart, det vill säga lera och sandig siltig morän. Matjorden antas ha en hydraulisk konduktivitet på 10^{-5} m/s. Se Tabell 3.5 för samtliga värden på hydraulisk konduktivitet. På grund av att inget förhållande mellan horisontell och vertikal hydraulisk konduktivitet varit känt har detta ansatts till 1:1 för samtliga modeller.

I modellerna förs även in en grundvattenbildning som motsvarar årsavrinningen på Lovön, 200 mm/år, se Avsnitt 3.2.2 *Hydrologi och hydrogeologi*. Modellerna är dock mycket känsliga för mängden grundvattenbildning. För att få modellerna att konvergera och ge ett resultat varierar grundvattenbildningen mellan 100 och 200 mm/år. I bilaga 5 framgår vilket värde som använts för vilken modell. I vissa modeller ledde grundvattenbildningen till ett lager vatten på markytan, på grund av att vattnet där infiltrerar långsammare än det tillförs. För att lösa detta problem lades dränering in i det översta marklagret, vilket resulterade i fler konvergensproblem. Därför valdes att acceptera även de modeller som ger ett lager vatten på markytan.

Tabell 3.5 Hydraulisk konduktivitet från Carlsson (1997) och Avsnitt 3.3 Beräkningsresultat.

Hydraulisk konduktivitet, K [m/s]	Tvärsnitt 1	Tvärsnitt 2	Tvärsnitt 3	Tvärsnitt 3-sprickzon	Tvärsnitt 4
matjord	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
lera	-	-	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$
sandig siltig morän	-	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$
berg före injektering	$3,8 \cdot 10^{-9}$	$6,9 \cdot 10^{-9}$	$6,9 \cdot 10^{-9}$	$6,9 \cdot 10^{-7}$	$9,2 \cdot 10^{-8}$
berg efterinjektering	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$

3.4.3 Modell 2 – Uppdatering av indata

Denna uppdatering gjordes när tabeller med de värden som Trafikverket satt in i deras modell fanns tillgängliga. Trafikverket har beräknat konduktiviteter för berget genom att ta ett antal prover för de olika bergarterna. För de dominerande bergarterna, granit till granodiorit och metagråvacka, har totalt 29 respektive 35 borrhålsektioner tagits. I den uppdaterade modellen har medianvärdet på den hydrauliska konduktiviteten för respektive bergart använts. I materialet från Trafikverket fanns även angivet de värden de använt för lerlager och jordlager. I Tabell 3.6 redovisas de materials konduktiviteter som är aktuella för den uppdaterade modellen samt i vilka tvärsnitt de används.

Tabell 3.6 Trafikverkets värden på hydraulisk konduktivitet.

Material	Hydraulisk konduktivitet, K [m/s]	Tvärsnitt
Granit till granodiorit	$2,0 \cdot 10^{-8}$	1,3,4
Metagråvacka	$2,0 \cdot 10^{-8}$	2
Jordlager	$1,0 \cdot 10^{-5}$	1,2,3,4
Lerlager	$1,0 \cdot 10^{-9}$	3,4

Trafikverket har inte behandlat den hydrauliska konduktiviteten för diabasgången separat, som gjordes i denna rapportens första modell. Istället får den samma värde som granit till granodiorit. I Trafikverkets modellering har de inte heller lagt in någon morän utan gett detta lager samma konduktivitet som matjorden. På grund av att

modell 2 ibland endast konvergerade när moränens konduktivitet ersatts med matjordens och ibland endast konvergerade med moränens konduktivitet, användes det värde som gav resultat.

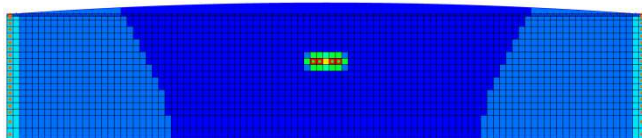
3.5 Resultat och jämförelse av modelleringar

Nedan följer en jämförelse mellan de modellresultat som uppnåts. Jämförelsen fokuserar dels på influensradiens storlek, och dels på hur väl modell 1 med uppskattade värden överensstämmer med modell 2 med uppmätta värden. I texten nedan visas bilder på utvalda tvärsnitt. I bilaga 5 finns samtliga resultat.

3.5.1 Influensradien

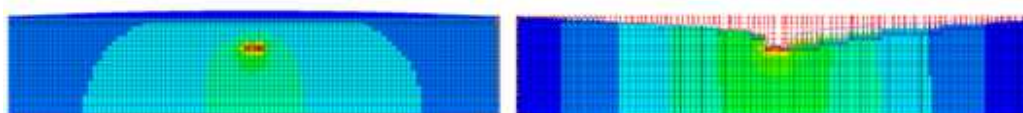
Vid denna jämförelse skiljs resultaten av de injekterade modellerna från resultaten av de oinjekterade modellerna. Jämförelsen sker alltså mellan modell 1 vid injektering och modell 2 vid injektering, och på motsvarade sätt vid oinjekterade förhållanden.

För samtliga tvärsnitt, med undantag för tvärsnitt 3, gäller att vid injektering kan endast en trycksänkning ses under och kring tunneln. Resultatet visar ingen sänkning av grundvattenytan, på grund av att regnet inte infiltrerar ner och en vattenyta över marknivån fås. Detta gör det svårt att uppskatta influensradien vid injektering. Ett exempel på ett sådant resultat är Tvärsnitt 2B, se Figur 3.8.



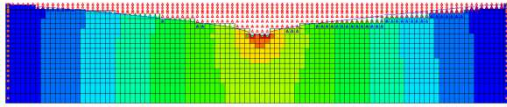
Figur 3.8 Tvärsnitt 2B.

Anledningen att ovanstående resultat inte helt gäller tvärsnitt 3 är att den injekterade modell 2 har gjorts i två varianter, se Figur 3.9. Tvärsnitt 3D har samma lagerföljd som används i modell 1, medan tvärsnitt 3E använder sig av den lagerföljd som Trafikverket använt, där moränen fått samma hydrauliska konduktivitet som matjorden. Dessa två varianter får helt olika resultat. Tvärsnitt 3D visar ingen grundvattenavsänkning, utan endast en trycksänkning och stämmer således med resultatet från övriga tvärsnitt. Tvärsnitt 3E ger dock en influensradie på minst 500 meter. Denna skillnad i resultat gör det svårt att uppskatta influensradien för tvärsnitt 3 vid injektering.



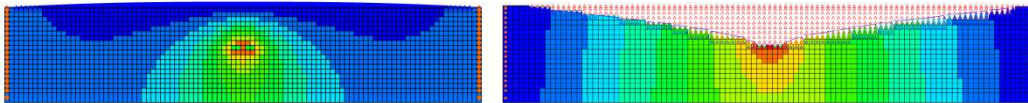
Figur 3.9 Tvärsnitt 3D och 3E.

Vad gäller influensradien för de oinjekterade modellerna, så är den lättare att uppskatta. I tvärsnitt 3, 3-sprickzon och 4 visas alla oinjekterade modeller samma resultat – influensradien når ut till modellgränserna. Som exempel visas Tvärsnitt 3A i Figur 3.10. För tvärsnitt 2 konvergerade modellen med 100 mm/år endast med Trafikverkets värden. Denna visar att influensradien blir knappt 500 meter utan injektering.



Figur 3.10 Tvärsnitt 3A.

Det är svårt att uttala sig om influensradien i tvärsnitt 1, eftersom modell 1 och 2 ger så olika resultat, se Figur 3.11. Där Trafikverkets värden har använts, Tvärsnitt 1C, fås en stor grundvattenavsänkning. Motsvarande modell med uppskattade värden, Tvärsnitt 1A, ger ingen avsänkning alls utan endast en minskning i trycknivå kring tunneln. Av denna anledning är det svårt att med säkerhet uttala sig om influensradien utan injektering. För tvärsnitt 1 har vi alltså inget resultat för influensradiens storlek.



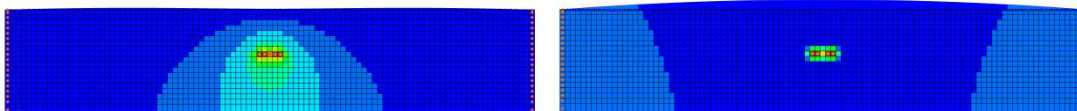
Figur 3.11 Tvärsnitt 1A och 1C.

Sammanfattningsvis kan sägas att för flertalet tvärsnitt fås en influensradie på minst 500 meter utan injektering samt att vid injektering kan ingen grundvattenavsänkning ses.

3.5.2 Jämförelse mellan modell 1 och modell 2

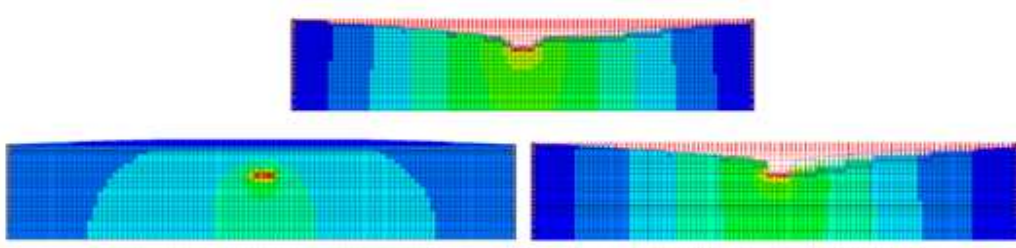
Nedanstående text är en jämförelse mellan modell 1 och modell 2. Denna jämförelse kan inte göras för tvärsnitt 3-sprickzon, då detta tvärsnitt inte har modellerats med Trafikverkets värden.

Det är svårt att ge ett generellt svar till om modellerna stämmer bra överens eller inte. I resultatet ses exempel på modeller som är väldigt lika, men också sådana som skiljer sig mycket. Exempel på det första är de injekterade modellerna Tvärsnitt 1B och Tvärsnitt 1D, se Figur 3.12.



Figur 3.12 Tvärsnitt 1B och 1D.

Även i tvärsnitt 3 gav den injekterade modell 1, Tvärsnitt 3B, liknande resultat som den injekterade modell 2 med morän, Tvärsnitt 3E, se Figur 3.13. Den injekterade modell 2 där moränens hydrauliska konduktivitet är samma som matjorden, Tvärsnitt 3D som också syns i figuren, skiljde sig dock mycket från resultatet av den injekterade modell 1, Tvärsnitt 3B.



Figur 3.13 Tvärsnitt 3B, 3D och 3E.

I tvärsnitt 4 har olika mängd grundvattenbildning använts för att modellen skulle konvergera. Detta gör att resultatet varierar mycket mellan modellerna och ingen slutsats om likheter eller skillnader mellan modell 1 och 2 kan dras.

4 Diskussion

I kommande kapitel kommer rapportens ingående delar att diskuteras för att utvärdera och ge svar på tillförlitligheten av modelleringarna. Vidare diskuteras också de analytiska beräkningarna, vilken omgivningspåverkan som riskerar uppkomma inom influensradien och hur väl modellresultatet överensstämmer med verkligheten.

4.1 Indata

Alla beräkningar och antaganden är gjorda för att indata till modelleringen ska bli så verklighetstroga som möjligt. En del antaganden och beräkningar kan dock medföra vissa osäkerheter.

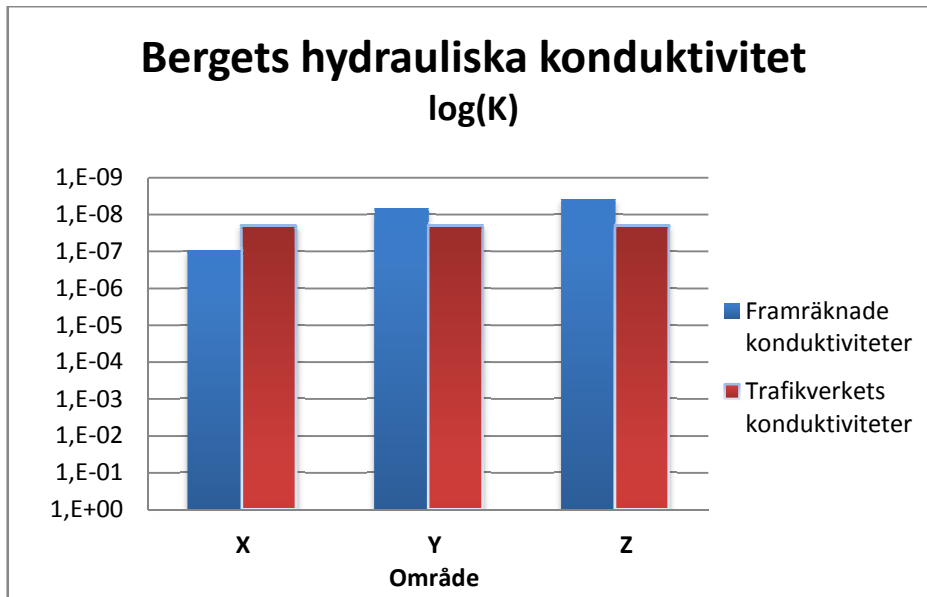
När konduktiviteterna beräknades utifrån brunnensdata valdes områden som var så representativa som möjligt. Tyvärr var antalet brunnar i områdena färre än önskvärt för en mer detaljerad indelning och beräkning. Detta medförde att Lovön endast kunde delas in i två områden. Diabasgången ansågs vara intressant ur ett hydrogeologiskt perspektiv, vilket gjorde att den inte slogs ihop med resterande del av Lovöns berg. För att få mer detaljerad information om den hydrauliska konduktiviteten i området hade fler brunnar krävts.

Utöver det ringa antalet brunnar, kunde dessutom kapaciteten skilja sig avsevärt för brunnar i samma område. De flesta brunnar var antingen i storleksordningen 50-150 eller 1500-6000 liter per timme och ytterst få låg däremellan, se bilaga 3. Detta, tillsammans med att antalet brunnar är för få, gör att ett medianvärde för uttagskapaciteten inte är så representativt.

En annan felkälla med denna metod är svårigheten att veta hur representativa brunnarna är för beräkning av berggrundens hydrauliska konduktivitet. Flertalet brunnar är hushållsbrunnar. De placeras således där vattentillgången förväntas vara god, vilket kan innebära att brunnen sätts i ett mer sprickigt område än omgivande berg. Om så är fallet är den beräknade konduktiviteten högre än genomsnittet för området.

Trafikverkets undersökningar sker i ett större område som täcker hela sträckan för Förbifart Stockholm. Endast ett kärnborrhål är taget på Lovön. Men eftersom berget är bildat under samma period och varit med om samma rörelser kan värdena anses vara representativa även för delsträcka 2.

Beräkningarna för hydrauliska konduktiviteter enligt Gustafsons metod för utvärderingar av brunnarkivets data, se Avsnitt 2.4.1 *Beräkning av inläckage och hydraulisk konduktivitet för berg*, ger konduktiviteter som är tätare än vad Trafikverkets fältundersökningar har visat. Detta gäller ej på område X, diabasgången, som fått ett högre värde än Trafikverket, se Figur 4.1. Trafikverket har bara ett borrhål på Lovön och därför kan en brunnsvärdering med fler brunnar inom området nära diabasgången ge ett mer representativt värde. Dessutom antas berget vara mer uppsprucket där diabasgången går och berget bör därför vara mer genomsläppligt än vad omgivande berg är, vilket Trafikverket inte tar hänsyn till. Även tillförlitligheten för den framräknade konduktiviteten i detta område kan dock ifrågasättas på grund av att endast två brunnar fanns att tillgå.



Figur 4.1 Jämförande diagram på framräknade värden och Trafikverkets uppmätta värden på hydraulisk konduktivitet. Observera att skalan är logaritmerad.

I område Z, Kungshatt, finns endast sju hushållsbrunnar tillgängliga i Brunnsarkivet. Dessa brunnar har en liten uttagskapacitet, vilket kan vara orsaken till att vi här får ett tätare berg än Trafikverket.

I Figur 4.1 ses dock att skillnaderna mellan de beräknade konduktiviteterna och Trafikverkets uppmätta konduktiviteter är små och att samtliga värde ligger i samma storleksordning som kristallint berg, se Avsnitt 2.1.3 *Grundvatten i berg*.

4.2 Svårigheter med modelleringen

När modelleringen påbörjades var planen att göra en 3D-modell för Lovön och Kungshatt, där topografin kunde tas hänsyn till och de olika typmiljöernas konduktiviteter kunde läggas in i celler som motsvarade deras verkliga position på öarna. Modellen blev 900 meter bred med tunneln i mitten och topografin fördes in i intervaller om fem meter. Modellens kantceller fick konstant grundvattennivå vars värde berodde på topografin.

Vid försök att köra denna modell möttes många svårigheter. När programmet kördes utan tunnel inlagd fick modellen en stor förändring av grundvattenytans läge. Utan något vattenuttag, i form av tunnel eller brunn, tömdes modellens övre celler helt på vatten. Vi anser inte att detta motsvarar verkligheten, eftersom grundvattenytan normalt följer topografin.

Möjliga orsaker till denna reaktion hos modellen kan bland annat ha varit för stora höjdskillnader i terrängen. Ett försök gjordes med mindre nivåskillnader, men det gav inte bättre resultat. En annan möjlig anledning är skillnaden mellan cellernas bredd, längd respektive höjd. Enligt Jonasson (2007) kan en stor skillnad i cellernas höjd och längd ge numeriska problem för en finit differensmodell. I modellen fanns celler med en höjd på fem meter, medan längden och bredden var 175 meter. Dessutom varierade cellhöjden stort, från fem till 60 meter.

På grund av tidsbrist kunde inte alla orsaker undersökas och istället för att fortsätta med 3D-modellen beslutades att förenkla modelleringen. För att lösa problemet som

topografin medförde valdes att göra en meter breda 3D-snitt där topografin inte togs hänsyn till. Denna förenkling är möjlig då flödet i huvudsak sker i två dimensioner.

Även modellerna med 3D-snitt fick problem med cellstorleken. För att få programmet att konvergera krävdes att alla celler var minst två meter höga. Detta innebar att matjordens mäktighet inte kunde sättas till en meter, vilket hade varit ett rimligare värde än de två meter som nu fördes in. Eftersom modellen är 200 meter hög är det troligt att denna anpassning ändå inte har så stor inverkan på modelleringens resultat.

Som nämnts i Avsnitt 3.4.2 *Modell 1 – antaganden och indata*, var mängden nederbörd som lades in i modellen ofta avgörande för om modellen konvergerade. I samma avsnitt förklaras hur detta problem försökte åtgärdas genom att lägga in dränering i det övre marklagret för att simulera avrinningen. Även detta dräneringslager medförde konvergensproblem, vilket ledde till att årsavrinningen, som kan antas motsvara grundvattenbildningen, fördes in i modellen istället för nederbörden. Denna var dock så stor att cellerna i översta lagret svämmade över och vattenytan hamnade många meter över markytan. För att få ett mer rimligt resultat varierades grundvattenbildningen mellan hela och halva årsavrinningen och det värde som fick modellen att konvergera användes. Försök gjordes även med några olika värden på grundvattenbildning, men inget konsekvent samband kunde hittas som förklarade modellens konvergenssvårigheter med avseende på mängden grundvattenbildning.

Programmet var inte alltid konsekvent med när vattenytan hamnade över marknivå och när det istället blev en avsänkningstratt. I Tvärsnitt 3B, bilaga 5, fås en avsänkningstratt. I Tvärsnitt 3G (sprickzon), där enda förändringen är bergets större vattengenomsläpplighet, fås istället en vattenyta över markytan. Detta resultat är inte rimligt. Sprickzonen borde få en större avsänkning än det tätare berget.

Ett annat orimligt resultat är programmets beräknade värde på inläckaget till tunneln. I en del av de injekterade modellerna fås ett högre värde på inläckaget jämfört med samma tvärsnitt utan injektering, trots att de har samma grundvattenbildning. Som exempel kan nämnas Tvärsnitt 1C och Tvärsnitt 1D i bilaga 5.

Eftersom samtliga modelltvärsnitt är symmetriskt utformade kan ett symmetriskt resultat förväntas från modelleringen. En del av modellerna har dock fått ett osymmetriskt utseende trots att de konvergerat, se exempelvis Tvärsnitt 2D i bilaga 5. Detta resultat antas inte rimligt. Det tunna blå strecket som markerar vattenytan i modellresultatet är dock symmetriskt. Om detta påverkat inläckaget i dränerna vet vi inte, men det har troligtvis inverkan. Därmed blir dessa modeller ännu svårare att uttala sig om.

Sammanfattningsvis har många konvergensproblem uppkommit under modelleringens gång. Cellstorleken har anpassats efter vad GMS kan hantera och grundvattenbildningen har varierats inom rimliga värden för att få beräkningen att konvergera. I vissa fall har modellerna gett resultat som inte alls speglar verkligheten. Vi tror att samtliga av dessa problem hade kunnat åtgärdas på bättre sätt om mer tid hade funnits.

4.3 Numerisk modell – Analytisk modell

Vid den analytiska beräkningen av avsänkningen togs ingen hänsyn till jordlagret ovanpå berget. Endast bergets konduktivitet ingick i beräkningen. För typmiljö 1 och 2 antas detta vara en acceptabel förenkling av verkligheten, eftersom dessa typmiljöer

består av antingen berg i dagen eller endast har ett tunt moränskikt på bergytan. Typmiljö 3 och 4 innehåller däremot ett lerlager ovanpå berget. Detta lerlager har en så stor mäktighet att det kan antas påverka avsänkningen och eventuellt ge upphov till dubbla grundvattenytan, som beskrivs i Avsnitt 2.2.1 *Varför fås en grundvattenavsänkning vid tunneldrivning?*. Om den dubbla grundvattenytan medför att avsänkningen i berget blir mindre är oklart. Berget utgör dock större delen av avståndet mellan markyta och tunnel, medan jordlagren är tunnare. Sett ur det perspektivet kan en beräkning enbart baserad på berget ge en rimlig approximation.

I beräkningen av avsänkningen togs ingen hänsyn till grundvattenbildning, vilket innebär att den verkliga avsänkningen kan antas bli lite mindre än den beräknade.

Den analytiskt beräknade avsänkningen ligger i samma storleksordning som avsänkningarna i GMS-modellerna. De modeller som visar en grundvattenavsänkning har en avsänkningstratt som når hela vägen ner till tunneln, det vill säga en avsänkning på 65-85 meter. Vid den analytiska beräkningen fås ett resultat på ungefär 50 meter. Båda dessa resultat visar på en stor avsänkning som inte kan accepteras.

4.4 Modell 1 – Modell 2

De resultat som modelleringen gav var antingen en avsänkningstratt ned till tunneln eller en vattenyta några meter över marknivå. Ingen av modellerna gav ett resultat med en mindre grundvattenavsänkning. Frågan är om detta beror på svårigheterna med GMS eller om resultatet verkligen speglar verkligheten. Vi tror att resultaten hade varit mer tillförlitliga och mer konsekventa om det hade varit möjligt att lägga in dränering i övre marklagren. Då hade det högre värdet på nederbörden kunnat användas istället och vattentrycket i tvärsnittet hade inte påverkats av en grundvattenyta över marknivå.

Trots att våra beräknande indata till modell 1 stämmer relativt bra överens med Trafikverkets uppmätta indata, är det svårt att uttala sig om hur väl de olika modellerna stämmer överens. På grund av alla svårigheter med modelleringen görs bedömningen att modellerna inte är tillräckligt tillförlitliga för att kunna avgöra om en första uppskattning utifrån kartmaterial ger samma modelleringsresultat som en modellering utifrån resultat från fältundersökningar.

4.5 Influensradie

Som nämnts i Avsnitt 5.3 *Resultat och jämförelse av modelleringar*, är det svårt att bedöma influensradiens storlek i vissa tvärsnitt på grund av ett lager vatten ovanför markytan. Av denna anledning kan influensradien endast uppskattas utifrån de modelleringsresultat som uppvisar en avsänkning. I samtliga av dessa modeller ligger grundvattenytan under marknivå i hela eller nästan hela modellbredden. Detta motsvarar en influensradie på omkring 500 meter. I de modeller som har en avsänkning i hela modellen är det dessutom svårt att veta om avsänkningen skulle fortsatt längre ut om modellen vore större, vilket i så fall skulle ge en influensradie på över 500 meter. Eftersom modellkanterna har konstant grundvattenyta kan inte avsänkningstratten gå längre ut. Om mer tid funnits hade försök med en bredare modell gjorts för att utvärdera om den konstanta grundvattennivån begränsar avsänkningen.

Som nämnts i Avsnitt 3.4.2 *Modell 1 – antaganden och indata* är det rimligt att anta en influensradie på 3-5 gånger tunneldjupet. Då tunneln som djupast ligger 85 meter under markytan borde influensradien som mest vara cirka 425 meter. En influensradie på 500 meter anser vi då inte vara helt orimlig, eftersom värdet ligger relativt nära antagandet. En influensradie långt över 500 meter avviker dock så mycket från antagandet att det anses vara mindre rimligt med en influensradie i den storleken.

4.6 Modell – verklighet

I modelleringen har den horisontella hydrauliska konduktiviteten satts lika med den vertikala hydrauliska konduktiviteten. Detta antagande gjordes på grund av bristande information om hur förhållandet mellan dessa konduktiviteter såg ut. För jordlager brukar visserligen den horisontella konduktiviteten vara större än den vertikala konduktiviteten. Detta för att det ofta finns täta horisontella skiktningar. I berg leds vatten i sprickorna och således i den riktning sprickorna är orienterade i. I Avsnitt 2.1.3 *Grundvatten i berg* tas upp att sprickigheten och dess riktning kan variera mellan bergarter. Därmed hade andra antaganden om förhållandet mellan horisontell och vertikal hydraulisk konduktivitet kunnat göras, om sprickriktningen för respektive bergart var känd. Vi anser dock att antagandet om lika stor horisontell som vertikal konduktivitet är acceptabelt med tanke på vilken information som fanns tillgänglig.

I Figur 3.5 ses i vilken riktning tunneln korsar sprickzonerna. Beroende på hur sprickzonen korsas kan grundvattenavsänkningen förväntas sprida ut sig i olika riktningar i förhållande till tunneln. På södra delen av Lovön korsar tunneln två sprickzoner nästan vinkelrätt. Detta innebär att avsänkningen kan sprida ut sig tvärs tunnelriktningen. På dessa platser fås en bred avsänkningstratt. Längre norrut på Lovön går tunneln parallellt mellan två sprickzoner och en del av sträckan befinner sig tunneln nära den östra sprickzonen, utan att korsa den. Här antas avsänkningen sprida ut sig längs sprickzonen då vatten förväntas flöda genom sprickzonen och mot tunneln. Detta kan innebära att vi får en avlång avsänkningstratt som följer sprickzonen, vilket kan leda till att grundvattenavsänkningar uppstår längre bort från inläckaget än den tidigare nämnda influensradien. Det är därför viktigt att ha sprickzonernas utsträckning i åtanke då ett observationsprogram, ett program för hur grundvattenavsänkningarna ska kontrolleras under tunneldrivningen, utformas.

4.7 Omgivningspåverkan

Som nämnts tidigare går det inte att dra slutsatser om influensradierna för de modeller som täcks av vatten. Däremot fås en influensradie på omkring 500 meter för de modellresultat som visar en avsänkning. Genom att studera omgivningen inom influensområdet för tunnelsträckningen, diskuteras vilken omgivningspåverkan som riskerar att uppkomma i området om avsänkningen blir lika stor som i modellerna.

På Kungshatt finns flera sjöar inom influensområdet. Sjöarna ligger i dalar omgivna av berg, vilket bör innebära att vattentillförseln är god. Detta i kombination med att berget på Kungshatt är tätt gör att sjöarna, enligt Avsnitt 2.2.1 *Varför fås en grundvattenavsänkning vid tunneldrivning?*, har en begränsande inverkan på grundvattenavsänkningarna. Enligt samma avsnitt har en grundvattenavsänkning i berget en ringa effekt på jordlagret om detta är mindre genomsläppligt jämfört med berget. Eftersom leran är mindre genomsläpplig än berget på både Kungshatt och

Lövön kan dubbla grundvattenytor uppstå. Detta kan medföra att jordlagren knappt påverkas av avsänkningen. Däremot kan dubbla grundvattenytor göra att vissa brunnar riskerar att hamna i den omättade zonen i bergets övre del. Även sättningar riskeras eftersom lera sakta dräneras underifrån. Vi förutsätter dock i följande stycken att det bara finns en grundvattenyta.

Som nämnts i Avsnitt 2.3.5 *Påverkan på vegetation* är vegetationen olika känslig i olika områden beroende på om det är ett in- eller utströmningsområde. Större delarna av Lovön och Kungshatt bör vara inströmningsområden eftersom det är vanligast och det bara finns ett fåtal våtmarksområden och vattendrag. Inströmningsområden är enligt samma avsnitt inte så känsliga för grundvattenavsänkningar. Om grundvattennivån däremot är hög från början kan en avsänkning minska mängden växttillgängligt vatten i den omättade zonen. Hur mycket växterna påverkas beror alltså på hur högt grundvattnet står i utgångsläget, för vilket uppgifter saknas.

Stora delar av Lovön är täckta av lera. Som beskrivs i Avsnitt 2.3.5 *Påverkan på vegetation* använder växter i lerjordar med artesiskt vatten inte det artesiska vattnet och påverkas därmed inte av en grundvattenavsänkning. På Lovön finns det emellertid våtmark i form av kärr. Som beskrivits i nämnt avsnitt är kärr helt beroende av grundvattnet. Det innebär att denna våtmark riskerar att torkas ut helt. Befintlig vegetation dör då ut och ersätts först på lång sikt av andra växter. Det kan dock hända att detta kärr är ett försumpningskärr, vilket betyder att det i så fall kan ha en tät gyttjebotten. Detta skulle göra att kärret är mindre känsligt för en grundvattenavsänkning och påverkan skulle inte bli lika stor.

I Avsnitt 3.2.1 *Topografi och bebyggelse* togs upp att det på Lovöns södra spets finns ett Natura 2000-område. Området ligger utanför den influensradie som fås i modellerna, men dock i närheten av en sprickzon som tunneln korsar relativt nära Natura 2000-området. Här finns risk att avsänkningen sprider sig längs sprickzonen till Natura 2000-området. Det är därför av vikt att här kontrollera grundvattenavsänkningen under tunneldrivningen, för att försäkra sig om att växtligheten inte tar skada.

Risken för sättningar orsakade av grundvattenavsänkningen beror på om området täcks av kohesionsjord eller ej, eftersom kohesionsjordar är mycket sättningsbenägna. Lovön är som tidigare nämnts till stora delar täckt av lera. Det innebär att byggnaderna som ligger i lerområden riskerar att få sättningssskador. En byggnad som ligger på lera är Lovö kyrka som har ett stort historiskt värde. Den ligger dock precis i utkanten av influensområdet, där sättningarna bör vara relativt små, och vi tror därför inte att den kommer att få några betydande skador. Drottningholm ligger långt utanför den influensradie som fås i modellerna och borde således inte utsättas för sättningar. Däremot finns risk att grundvattenavsänkningen sprids längs sprickzoner och på så sätt når fram till slottet. Detta borde därför också finnas med i observationsprogrammet. Även herrgårdar och fritidshus som ligger på Lovöns lerfält riskerar att få sättningssskador.

I Avsnitt 2.2.4 *Ruttande träpålar* beskrivs även hur hus med träpålar riskerar få stomskador om träpålarna ruttar som en konsekvens av grundvattenavsänkningar. Husen bör dock endast vara pålade om de ligger på platser där det finns en sättningsrisk. Detta gör att det återigen är husen i lertäckta områden som riskerar skador, givet att de är grundlagda på träpålar.

På såväl Lovön som Kungshatt finns brunnar som kan riskera att bli uttorkade om grundvattennivån i avsänkningstratten sjunker under deras filternivå. Detta kan

påverka vissa hushålls vattenförsörjning. Lovön och Kungshatt tillhör det område som enligt Avsnitt 2.3.3. *Upptäckning och inträngning av saltvatten* ligger under högsta marina gränsen, vilket innebär att det även finns risk att salt grundvatten tränger upp om en brunn silar.

5 Slutsats och rekommendationer

Syftet med denna rapport var att uppskatta kommande grundvattenavsänkning orsakad av tunneldrivning utan att ha tillgång till material från platsundersökningar och utvärdera metoden. De modeller som tagits fram har dock inte gett konsekventa resultat varför de ses som mindre tillförlitliga. Svårigheten med modelleringen tror vi i första hand berodde på bristande kunskap om modelleringsprogrammet och tidsbrist, och inte på vilka värden vi satte in eller hur vi delade in våra typmiljöer. Tvärtom tror vi att typmiljöerna representerade området på ett bra sätt och att bestämningen av hydraulisk konduktivitet, med hjälp av data från Brunnsarkivet, gav en god uppskattning av områdets konduktivitet. Vi tycker även att den analytiska beräkningen av avsänkningen var ett bra sätt att kontrollera om modellens avsänkning var rimlig.

Bestämning av hydraulisk konduktivitet baserat på brunn-data är helt beroende av hur många brunnar som finns att tillgå i Brunnsarkivet. Därför är ett större antal brunnar inom projektområdet viktigt för att få säker indata. Metoden gav i denna rapport värden på konduktivitet som låg relativt nära Trafikverkets uppmätta värden. Antalet brunnar anses därför vara tillräckligt för en första uppskattning av den hydrauliska konduktiviteten. Däremot krävs fältundersökningar för att få säkrare data.

Om resultatet från modellerna ändå används, dras slutsatsen att influensradien blir minst 500 meter över hela området. En sådan influensradie ger framförallt risk för sättningsskador på Lovön och sinande brunnar på såväl Lovön som Kungshatt. En så stor påverkan vore oacceptabel och injektering är därför nödvändig.

Vi rekommenderar att prover tas horisontellt tvärs genom sprickzonerna för att utvärdera hur stor vattenföringen är i och kring sprickzonerna. Eftersom avsänkningen kan spridas långt längs en sprickzon är det viktigt att utforma ett observationsprogram som även tar hänsyn till detta.

6 Referenser

Skriftliga referenser

- Andréasson, P-G. (2009) *Geobiosfären en introduktion*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Axelsson, C-L. och Folin, S. (2000) *Grundvattensänkning och dess effekter vid byggnation och drift av ett djupförvar*. Stockholm: SKB (R-00-21).
- Aquaveo (2012) *Why MODFLOW with GMS?*. <http://www.aquaveo.com/modflow> (2012-04-20).
- Carlsson, L. och Gustafson, G. (1997) *Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetod*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.
- Eriksson, M. och Stille, H. (2005) *Cementinjektering i hårt berg*. Stockholm: Litografia AB.
- Funehag, J. och Emmelin, A. (2011) *Injektering av TASS-tunneln. Design och resultat från förinjekteringen*. SKB (R-10-39).
- Fredén, C. (Red.) (2009) *Berg och Jord*. Tredje utgåvan. Bromma: Sveriges Nationalatlas.
- Gustafson, G. (2009) *Hydrogeologi för bergbyggare*. Stockholm: Formas.
- Harbaugh, A. (2005) MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey. Modular Ground-Water Model - the Ground-Water Flow Process. I *Book 6. Modeling techniques, Section A. Ground Water*, red. Leahy, P. Kapitel A16. Reston: U.S. Geological Survey.
- Jonasson, S. (2007) *Modeller för transport och spridning av föroreningar fas 2*. Bromma: CM Digitaltryck AB. (Naturvårdsverket rapport: 5692).
- Knutsson, G. och Morfeldt, C. (1973) *Vatten i jord och berg*. Andra upplagan. Stockholm: Ingenjörsläroverket AB.
- Knutsson, G. och Morfeldt, C. (1993) *Grundvatten: teori och tillämpning*. Stockholm: AB Svensk Byggtjänst.
- Kungshättans Sportstugeförening. *Fakta*. kungshatt.se (2012-02-22).
- Lewin Pihlberg, S. och Risberg, G. (2006) *Övervakning av saltvatteninträngning i brunnar*. <http://www.havochvatten.se/download/18.64f5b3211343cffddb280004879/%C3%96vervakning+av+saltvattenintr%C3%A4ngning+i+brunnar.pdf> (2012-04-23).
- Lindblom, U. (2010) *Bergbyggnad*. Stockholm: Liber AB.
- Rhode, A. et al. (2006) *Grundvattenbildning i svenska typjordar - översiktlig beräkning med en vattenbalansmodell*. Uppsala universitet: Uppsala (Report series A, No. 66).
- Möller, H. och Stålhös, G. (1965) *Beskrivning till geologiska kartbladet Stockholm NV*. Stockholm: SGU.
- Nationalencyklopedin A *Fältkapacitet*. <http://www.ne.se> (2012-03-16).
- Nationalencyklopedin B *Inströmningsområde*. <http://www.ne.se> (2012-04-10).
- Nationalencyklopedin C *Utströmningsområde*. <http://www.ne.se> (2012-04-10).

- Nationalencyklopedin D *Krosszon*. <http://www.ne.se> (2012-02-21).
- Olofsson, B. (1991) *Impact on groundwater conditions by tunnelling in hard crystalline rocks*. Stockholm: Kungliga Tekniska Högskolan. (Doktorsavhandling institutionen för mark- och vattenteknik).
- SMHI *Klimatdata*. <http://www.smhi.se/klimatdata> (2012-02-23).
- Stejmar Eklund, H. (2002) *Hydrogeologiska typmiljöer. Verktyg för bedömning av grundvattenkvalitet, identifiering av grundvattenförekomster samt underlag för riskhantering längs vägar*. Göteborg: Chalmers, Geologiska institutionen Publ A 101.
- Stockholms Länsmuseum. *Kulturmiljö: Lovö*.
<http://www.stockholmslansmuseum.se/faktabanken> (2012-02-22).
- Sällfors, G. (2009) *Geoteknik Jordmateriallära Jordmekanik*. Fjärde upplagan. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.
- Trafikverket (2010) *Moment vid tunneldrivning*.
<http://www.trafikverket.se/Privat/Projekt/Stockholm/Citybanan/Byggnation/Moment-vid-tunneldrivningen> (2012-02-27).
- Trafikverket (2011a) *Tunnlar*.
<http://www.trafikverket.se/Privat/Projekt/Stockholm/Forbifart-stockholm/Tunnlar> (2012-02-27).
- Trafikverket (2011b) *För en region i utveckling*.
<http://www.trafikverket.se/Privat/Projekt/Stockholm/Forbifart-stockholm/Bakgrund/For-en-region-i-utveckling> (2012-01-31).
- Trafikverket (2011c) *Bakgrund*.
<http://www.trafikverket.se/Privat/Projekt/Stockholm/Forbifart-stockholm/Bakgrund/> (2012-01-31).
- Trafikverket (2011d) *Nytt samråd om Natura 2000-området Edeby ekhage på Lovö, Ekerö kommun*. <http://www.trafikverket.se/Privat/Projekt/Stockholm/Forbifart-stockholm/Aktuellt/2011-09/nytt-samrad-om-natura-2000> (2012-02-13).
- Trafikverket (2012a) *Om Projektet*.
<http://www.trafikverket.se/Privat/Projekt/Stockholm/Forbifart-stockholm/Om-projektet> (2012-01-24).
- Trafikverket (2012b) *Byggnation Citybanan*.
<http://www.trafikverket.se/Privat/Projekt/Stockholm/Citybanan/Byggnation> (2012-02-27).
- Vägverket (2000) *Tätning av bergtunnlar – förutsättningar, bedömningsgrunder och strategi vid planering och utformning av tätningsinsatser*. Publikation 2000:101.
<http://publikationswebbutik.vv.se> (2012-02-19).
- Vägverket (2001) *Effektivare nord-sydliga förbindelser i stockholmsområdet, Förstudie - förslagshandling*. Publikation ÖVR 2001:0152. <http://www.trafikverket.se> (2012-03-12).

Kartor

- Länskartor (2012) <http://www.gis.lst.se/lanskartor> (2012-02-27).

SGU (1965) *Geologiska kartbladet Stockholm NV*.

SGU (2001) *Berggrundskartan 10I Stockholm*.

SGU (2002) *Bergkvalitetskartan 10I Stockholm*.

SGU (2012a) *Brunnsarkivet* (2012-02-27).

SGU (2012b) *Grundvattenkarta* (2012-03-10).

VISS (2012) *Vattenkartan* (2012-05-05).

Bilder

Trafikverket (2012c)

<http://www.trafikverket.se/Privat/Projekt/Stockholm/Citybanan/Byggnation/Moment-vid-tunneldrivningen/> (2012-02-20)

Trafikverket (2012d) http://www.trafikverket.se/PageFiles/53330/faktablad_Lovo.pdf (2012-03-16)

Trafikverket (2012e) *Förbifart Stockholm*. www.trafikverket.se/Pressrum/Bilder-filmer-och-artiklar/Bilder/Vagprojekt/Forbifart-Stockholm (2012-05-02).

7 Bilagor

Bilaga 1: Ordlista

Bilaga 2: Jord- och bergprofil

Bilaga 3: Karta över brunnar

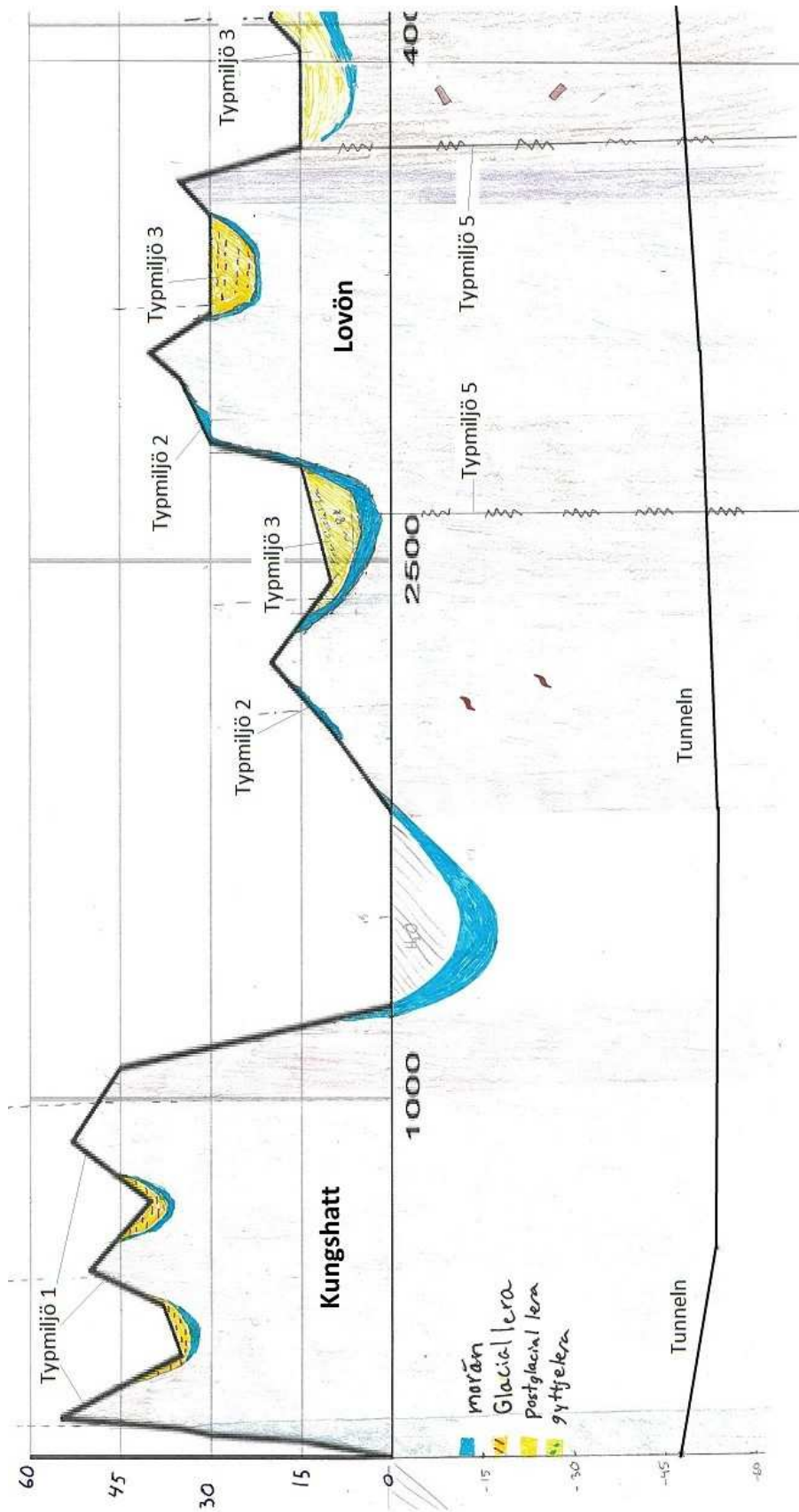
Bilaga 4: Beräkningar

Bilaga 5: Modelleringsresultat

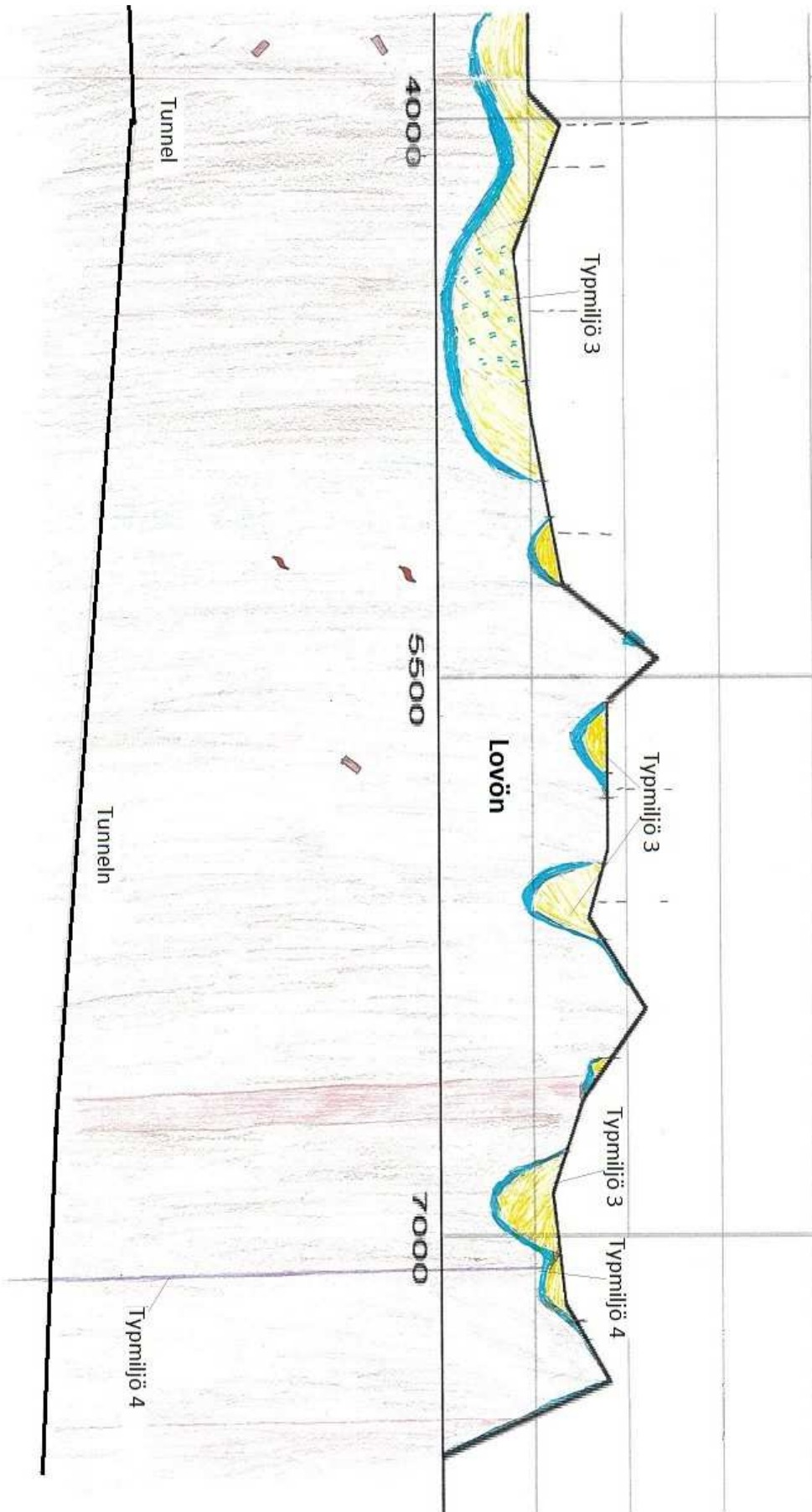
Bilaga 1: Ordlista

Akvifer	Geologiska bildningar som är så permeabla att grundvatten kan utvinnas i användbar mängd.
- öppen	En akvifer som har en fri grundvattenyta.
- slutna	En akvifer där mer genomsläppligt material överlagras av tätare material, vilket innebär att det inte finns någon fri grundvattenyta.
- läckande	En blandning av en öppen och en slutna akvifer. De överlagras och/eller underlagras av tätare material.
Artesiskt vatten	Grundvatten där vattentrycket är högre än markytan.
Fältkapacitet	Den maximala mängd vatten som en jordart kan hålla.
Hydraulisk konduktivitet	En jord- eller bergarts vattengenomsläpplighet.
Infiltrationszoner	Olika zoner i jorden genom vilka vatten från nederbörd kan infiltrera och bilda grundvatten.
Injekttering	En tätningmetod där ett tätningemedel sprutas in i det berg som önskas tätas.
Inströmningsområde	Områden där en påfyllnad av grundvatten sker.
Kristallin bergart	Långsträckta områden där berggrunden krossats på grund av kraftiga rörelser utmed ett plan eller en zon i jordskorpan.
Orogenes	Bergskedjeutveckling.
Permeabilitet	Ett poröst ämnes genomsläpplighet för vätska och gas.
Transmissivitet	Ett jord- eller bergslagers förmåga att leda vatten.
Utströmningsområde	Områden där ett utflöde av grundvatten sker.
Ytbergart	Bergart som bildats på jordytan genom sedimentära eller vulkaniska processer.

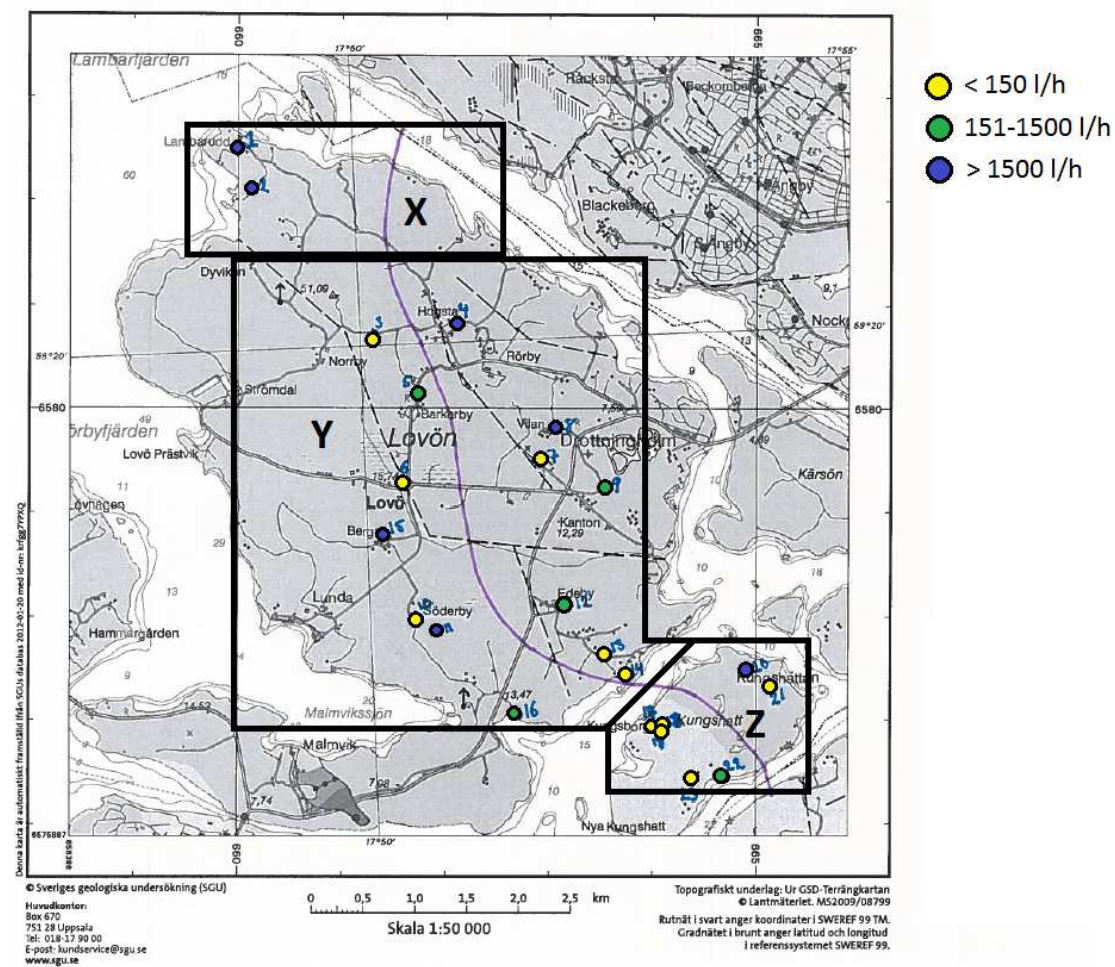
Bilaga 2: Jord- och bergprofil



Bilaga 2: Jord- och bergprofil



Bilaga 3: Karta över brunnar



Bilaga 4: Beräkningar

Konduktivitetsberäkning baserad på brunnsdata												
Område	Brunns ID	Total Djup m	Djup till berg m	Foderrör m	Diameter mm	Vattenmängd /h	Brunnstyp	Brunnsdjup				
X	1	130	2,5	3	138	1800	Energibrunn	127				
X	2	79	0,5	3	135	5000	Hushåll, Fritidshus	76				
Y	3	100	2	3	135	50	Hushåll, Fritidshus	97				
Y	4	100	1	6	114	2000	Hushåll, Fritidshus	94				
Y	5	200	3,5	6	200	200	Hushåll, Fritidshus	194				
Y	6	39,7	0		125	150		39,7				
Y	7	200	8,5	6	100	25	Energibrunn	194				
Y	8	66,5			100	6000		66,5				
Y	9	180	3,5	6	135	200		174				
Y	10	100			135	150		100				
Y	11	44	2	2	135	5000	Hushåll, Fritidshus	42				
Y	12	60	2	3	115	600	Hushåll, Fritidshus	57				
Y	13	140	4	6,5	114	20	Energibrunn	133,5				
Y	14	120	2	5	114	50	Energibrunn	115				
Y	16	78	1,5	3	135	800						
Y	15	88,2	0,6		125	1800		88,2				
Z	17	90	3	12	113	100	Hushåll, Fritidshus	78				
Z	18	90	4,5	4,5	114	100	Hushåll, Fritidshus	85,5				
Z	19	90	0		111	70	Hushåll, Fritidshus	90				
Z	20	87	1	1	135	1500	Hushåll, Fritidshus	86				
Z	21	100	1	1,5	135	140	Hushåll, Fritidshus	98,5				
Z	22	61	9	9	135	800	Hushåll, Fritidshus	52				
Z	23	115,6	3,7		110	30		115,6				
Område	Q50 [l/h]	Q50 [m ³ /s]	d50 [m]	H [m]	R0 [m]	rw [m]	T [m ³ /s/m]	q [m ³ /s/m]	q [l/min*100m]	K [m ² /s]		
X	3400	0,0009444	101,5	85	425	0,069	9,30x10 ⁻⁰⁶	8,12x10 ⁻⁰⁶	48,72	9,17x10 ⁻⁰⁸		
Y	200	0,0000556	90	80	400	0,065	6,17x10 ⁻⁰⁷	5,39x10 ⁻⁰⁷	3,23	6,86x10 ⁻⁰⁹		
Z	100	0,0000278	86	100	500	0,057	3,23x10 ⁻⁰⁷	2,89x10 ⁻⁰⁷	1,73	3,76x10 ⁻⁰⁹		

Beräkning av hydraulisk konduktivitet för injekterat berg						
	qkrav (l/min/100m)	qkrav [m ³ /s/m]	H, djup till tunneln [m]	rt [m]	K [m/s]	
X	2	$3,33 \times 10^{-07}$	85	12,39	$1,63 \times 10^{-09}$	
Y	2	$3,33 \times 10^{-07}$	80	12,39	$1,70 \times 10^{-09}$	
Z	2	$3,33 \times 10^{-07}$	100	12,39	$1,48 \times 10^{-09}$	

Uppskattning av avsänkning, analytisk metod						
Uppskattning avsänkning	K [m/s]	R0 [m]	A [m ²]	rt [m]	q [m ³ /s/m]	st [m]
Område X	$9,17 \times 10^{-08}$	425	120,62	8,76	$8,12 \times 10^{-06}$	54,71
Område Y	$6,86 \times 10^{-09}$	400	120,62	8,76	$5,39 \times 10^{-07}$	47,75
Område Z	$3,76 \times 10^{-09}$	500	120,62	8,76	$2,89 \times 10^{-07}$	49,53

Bilaga 5: Modelleringsresultat

Tvårsnitt 1, Kungshatt, berg i dagen

1A: Beräknade värden på bergets konduktivitet, grundvattenbildning 100 mm/år, ingen injektering.

1B: Beräknade värden på bergets konduktivitet och injekterat berg, grundvattenbildning 100 mm/år, injekterat.

1C: Trafikverkets värden på bergets konduktivitet, grundvattenbildning 100 mm/år, ingen injektering.

1D: Trafikverkets värden på bergets konduktivitet och injekterat berg, grundvattenbildning 100 mm/år, injekterat.

Tvårsnitt 2, Lovön, morän på berg

2A: Beräknade värden på bergets konduktivitet, grundvattenbildning 200 mm/år, ingen injektering.

2B: Beräknade värden på bergets konduktivitet och injekterat berg, grundvattenbildning 100 mm/år, injekterat.

2C: Trafikverkets värden på bergets konduktivitet och ansatt värde på morän, grundvattenbildning 100 mm/år, ingen injektering.

2D: Trafikverkets värden på bergets konduktivitet och injekterat berg samt ansatt värde på morän, grundvattenbildning 100 mm/år, injekterat.

Tvårsnitt 3, Lovön, lera och morän på berg

3A: Beräknade värden på bergets konduktivitet, grundvattenbildning 100 mm/år, ingen injektering.

3B: Beräknade värden på bergets konduktivitet och injekterat berg, grundvattenbildning 100 mm/år, injekterat.

3C: Trafikverkets värden på bergets konduktivitet och morän = matjord, grundvattenbildning 100 mm/år, ingen injektering.

3D: Trafikverkets värden på bergets konduktivitet och injekterat berg samt morän = matjord, grundvattenbildning 100 mm/år, injekterat.

3E: Trafikverkets värden på bergets konduktivitet och injekterat berg samt ansatt värde på morän, grundvattenbildning 100 mm/år, injekterat.

3F: Sprickzon, ansatt värde på bergets konduktivitet till 100 gånger mindre tätt mot beräknad konduktivitet, grundvattenbildning 100 mm/år, injekterat.

Tvårsnitt 4, Lovön, diabasgången, lera och morän på berg

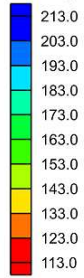
3A: Beräknade värden på bergets konduktivitet, grundvattenbildning 200 mm/år, ingen injektering.

3B: Beräknade värden på bergets konduktivitet och injekterat berg, grundvattenbildning 100 mm/år, injekterat.

3C: Trafikverkets värden på bergets konduktivitet och morän = matjord, grundvattenbildning 100 mm/år, ingen injektering.

3D: Trafikverkets värden på bergets konduktivitet och injekterat berg samt morän = matjord, grundvattenbildning 100 mm/år, injekterat.

Vattenyta (m)

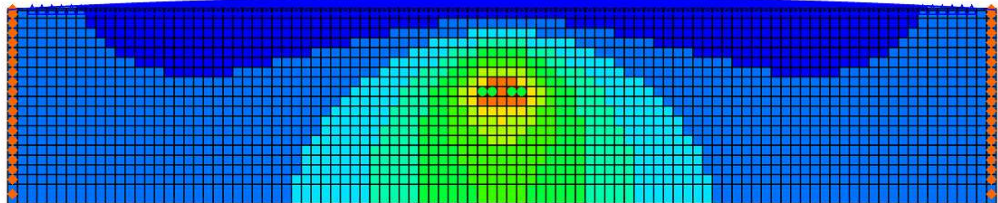


- △ Cell över grundvattenyta
- △ Vattenfylld cell

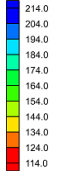
Tvärsnitt 1A

Kungshatt, berg i dagen
med beräknade värden på bergets konduktivitet

Grundvattenbildning: 100 mm/år
Ingen injektering
Inläckage: 4,82 l/(min*100m)



Vattenyta (m)

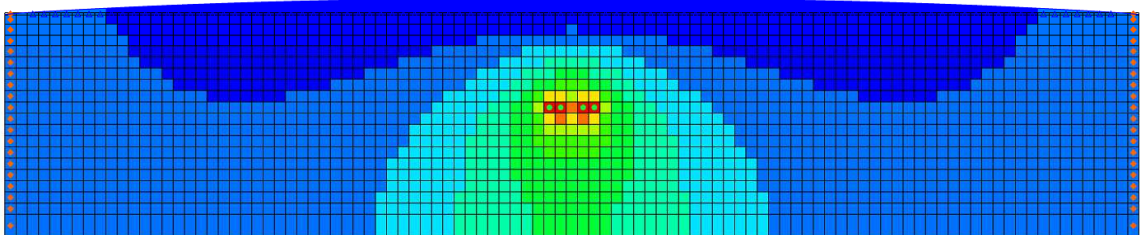


- △ Cell över grundvattenyta
- △ Vattenfylld cell

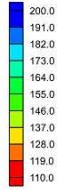
Tvärsnitt 1B

Kungshatt, berg i dagen
Med beräknade värden på bergets konduktivitet
och på injekterat berg

Grundvattenbildning: 100 mm/år
Injekterat
Inläckage: 3,72 l/(min*100m)



Vattenyta (m)

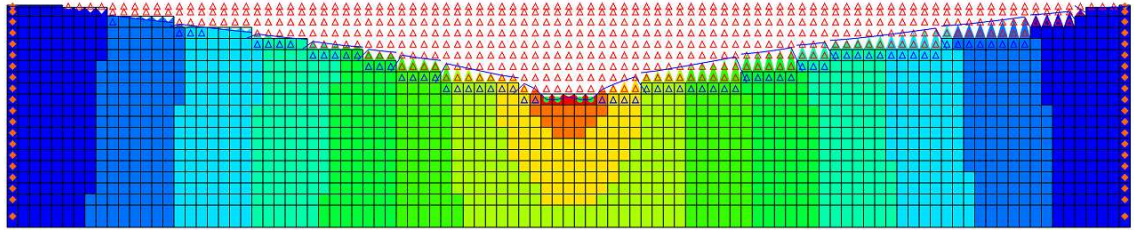


- △ Cell över grundvattenyta
- △ Vattenfylld cell

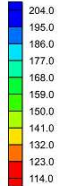
Tvärsnitt 1C

Kungshatt, berg i dagen
Med Trafikverkets värden på bergets konduktivitet

Grundvattenbildning: 100 mm/år
Ingen injektering
Inläckage: 5,24 l/(min*100m)



Vattenyta (m)

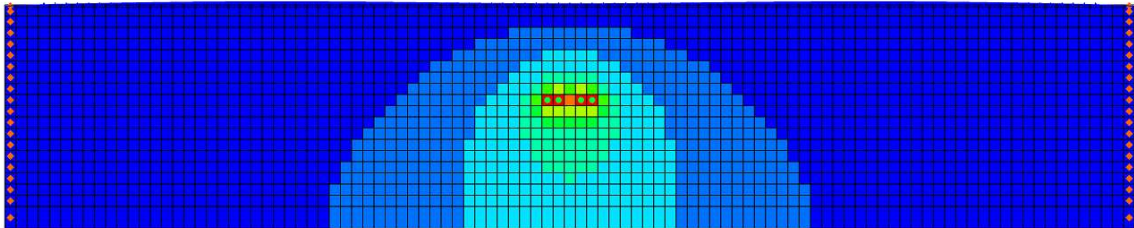


- △ Cell över grundvattenyta
- △ Vattenfylld cell

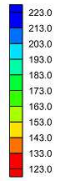
Tvärsnitt 1D

Kungshatt, berg i dagen
Med Trafikverkets värden på bergets konduktivitet
och injekterat berg

Grundvattenbildning: 100 mm/år
Injekterat
Inläckage: 11,04 l/(min*100m)



Vattenyta (m)

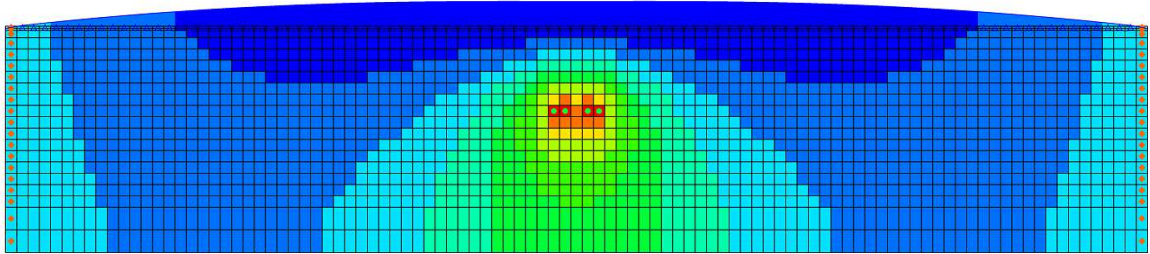


- △ Cell över grundvattenyta
- △ Vattenfylld cell

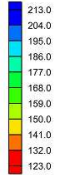
Tvärsnitt 2A

Lövön, morän på berg
Med beräknade värden på bergets konduktivitet

Grundvattenbildning: 200 mm/år
Ingen injektering
Inläckage: 9,54 l/(min*100m)



Vattenyta (m)

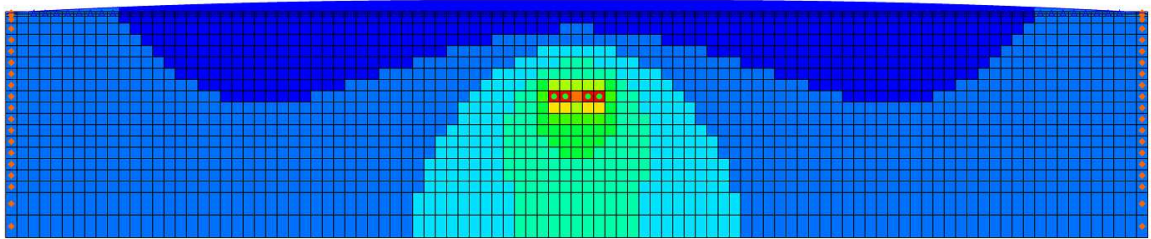


- △ Cell över grundvattenyta
- △ Vattenfylld cell

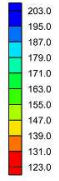
Tvärsnitt 2B

Lövön, morän på berg
Med beräknade värden på bergets konduktivitet
och på injekterat berg

Grundvattenbildning: 100 mm/år
Injekterat
Inläckage: 5,06 l/(min*100m)



Vattenyta (m)

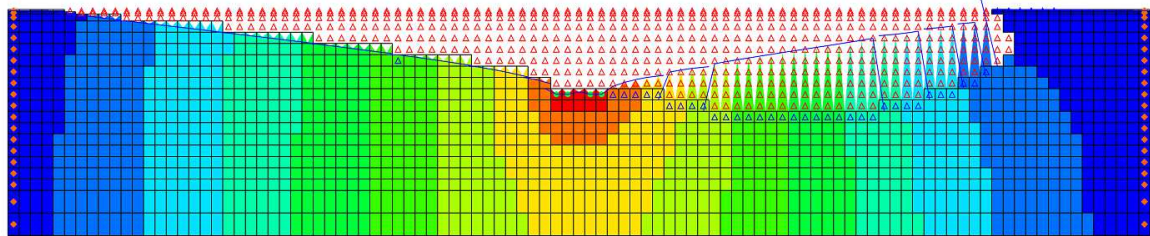


- △ Cell över grundvattenyta
- △ Vattenfylld cell

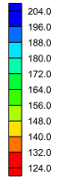
Tvärsnitt 2C

Lövön, morän på berg
Med Trafikverkets värde på bergets konduktivitet
och ansatt värde på morän

Grundvattenbildning: 100 mm/år
Ingen injektering
Inläckage: 4,51 l/(min*100m)



Vattenyta (m)

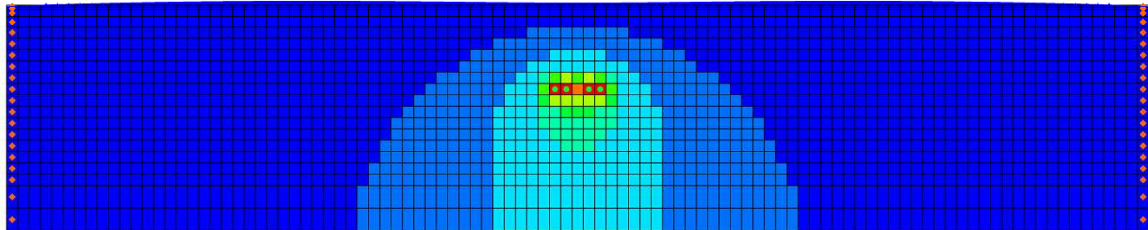


- △ Cell över grundvattenyta
- △ Vattenfylld cell

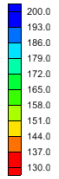
Tvärsnitt 2D

Lövön, morän på berg
Med Trafikverkets värde på bergets konduktivitet
och injekterat berg samt ansatt värde på morän

Grundvattenbildning: 100 mm/år
Ingen injektering
Inläckage: 10,14 l/(min*100m)



Vattenyta (m)

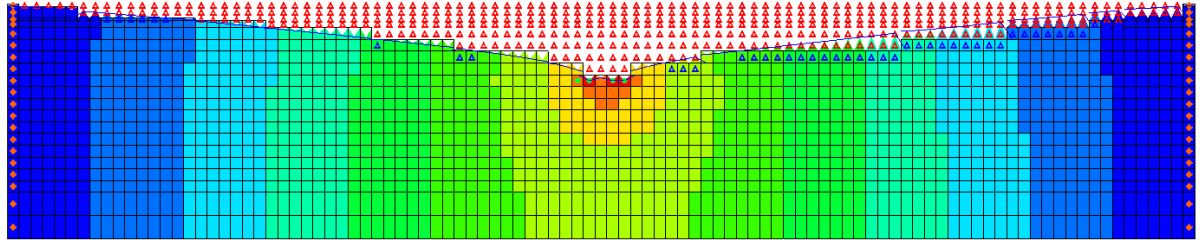


- △ Cell över grundvattenyta
- △ Vattenfylld cell

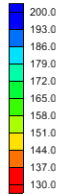
Tvärsnitt 3A

Lövön, lera och morän på berg
Med beräknat värde på bergets konduktivitet

Grundvattenbildning: 100 mm/år
Ingen injektering
Inläckage: 1,43 l/(min*100m)



Vattenyta (m)

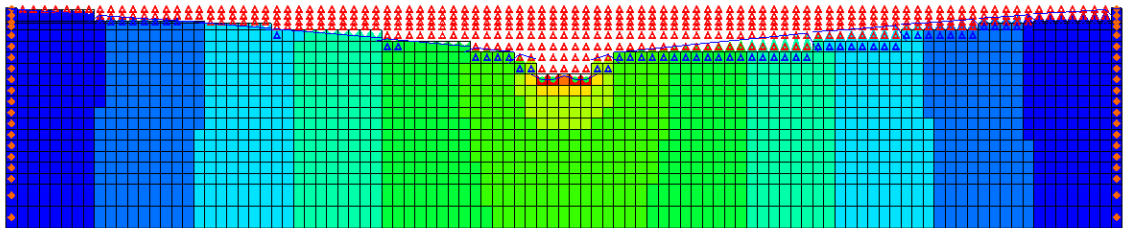


- △ Cell över grundvattenyta
- △ Vattenfylld cell

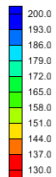
Tvärsnitt 3B

Lövön, lera och morän på berg
Med beräknat värde på bergets konduktivitet
och injekterat berg

Grundvattenbildning: 100 mm/år
Injekterat
Inläckage: 1,21 l/(min*100m)



Vattenyta (m)

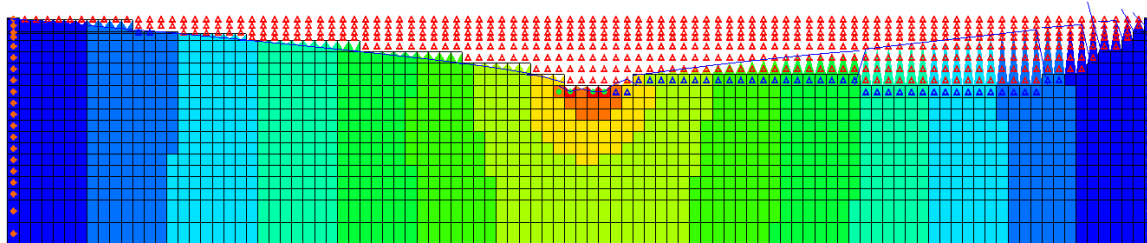


- △ Cell över grundvattenyta
- △ Vattenfylld cell

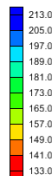
Tvärsnitt 3C

Lövön, lera och morän på berg
Med Trafikverkets värde på bergets konduktivitet
och med morän = matjord

Grundvattenbildning: 100 mm/år
Ingen injektering
Inläckage: 3,93 l/(min*100m)



Vattenyta (m)

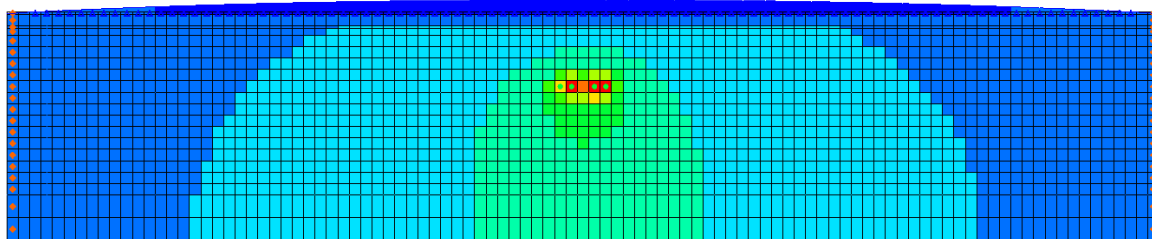


- △ Cell över grundvattenyta
- △ Vattenfylld cell

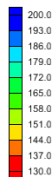
Tvärsnitt 3D

Lövön, lera och morän på berg
Med Trafikverkets värde på bergets konduktivitet
och injekterat berg samt morän = matjord

Grundvattenbildning: 100 mm/år
Injekterat
Inläckage: 7,74 l/(min*100m)



Vattenyta (m)

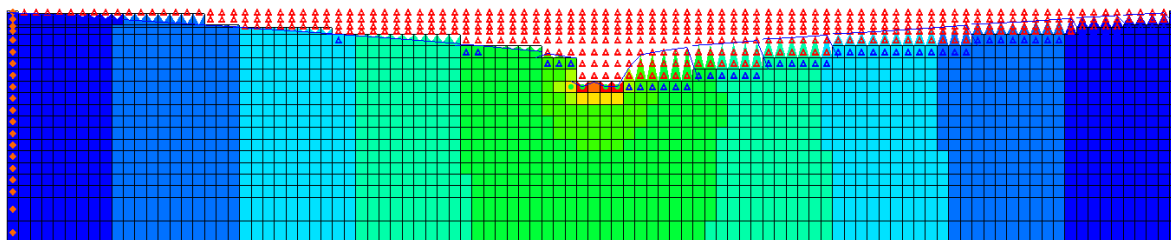


- △ Cell över grundvattenyta
- △ Vattenfylld cell

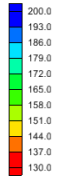
Tvärsnitt 3E

Lövön, lera och morän på berg
Med Trafikverkets värde på bergets konduktivitet
och injekterat berg samt ansatt värde på morän

Grundvattenbildning: 100 mm/år
Injekterat
Inläckage: 2,95 l/(min*100m)



Vattenyta (m)

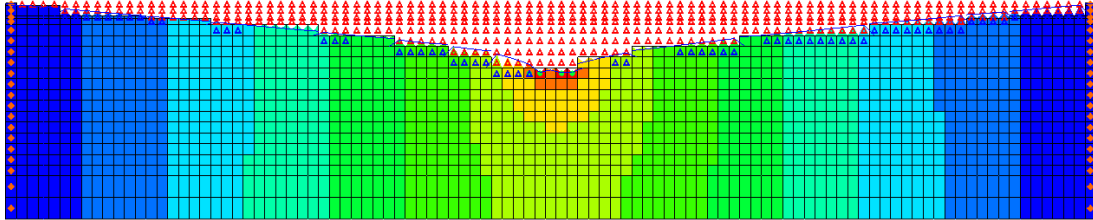


- △ Cell över grundvattenyta
- △ Vattenfylld cell

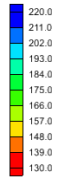
Tvärsnitt 3F (sprickzon)

Lövön, lera och morän på berg
Med ansatt värde på bergets konduktivitet till 100 gånger mindre tätt mot beräknad konduktivitet

Grundvattenbildning: 100 mm/år
Ingen injektering
Inläckage: 139,2 l/(min*100m)



Vattenyta (m)

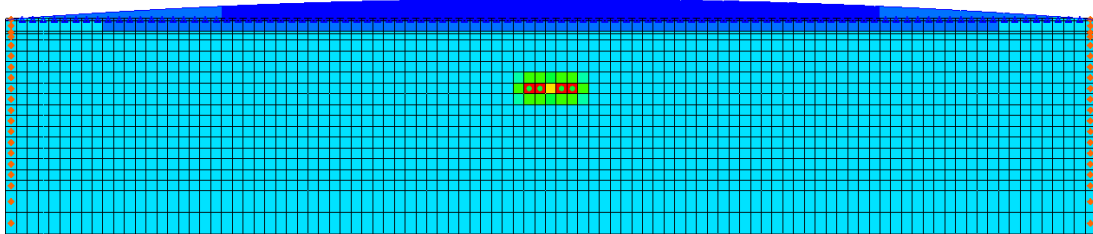


- △ Cell över grundvattenyta
- △ Vattenfylld cell

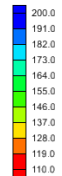
Tvärsnitt 3G (sprickzon)

Lövön, lera och morän på berg
Med ansatt värde på bergets konduktivitet till 100 gånger mindre tätt mot beräknad konduktivitet och beräknat värde på injekterat berg

Grundvattenbildning: 100 mm/år
Injekterat
Inläckage: 7,38 l/(min*100m)



Vattenyta (m)

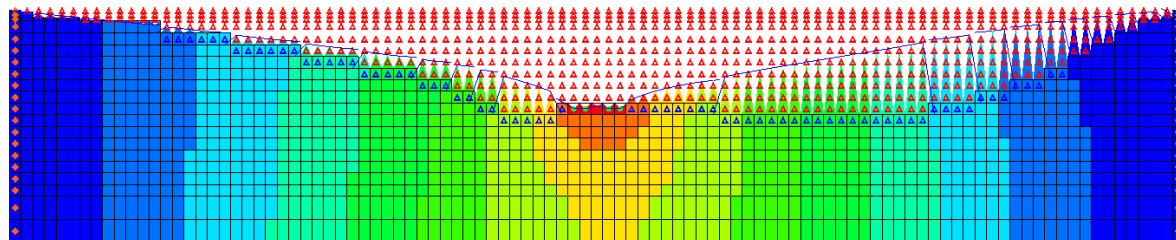


- △ Cell över grundvattenyta
- △ Vattenfylld cell

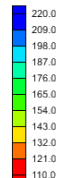
Tvärsnitt 4A

Lovön, diabasgången, lera och morän på berg
Med beräknat värde på bergets konduktivitet

Grundvattenbildning: 200 mm/år
Ingen injektering
Inläckage: 21,24 l/(min*100m)



Vattenyta (m)

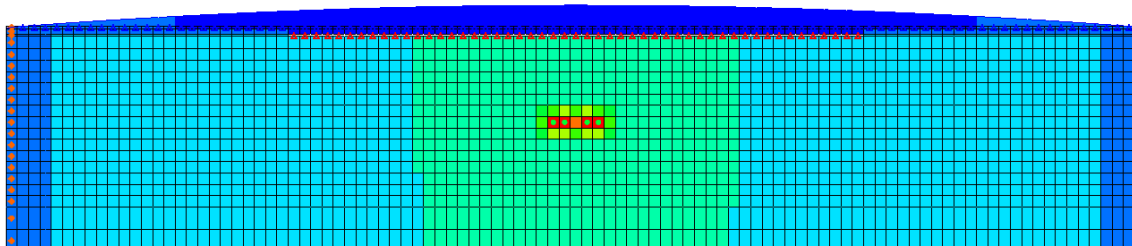


- △ Cell över grundvattenyta
- △ Vattenfylld cell

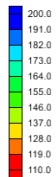
Tvärsnitt 4B

Lovön, diabasgången, lera och morän på berg
Med beräknat värde på bergets konduktivitet
och injekterat berg

Grundvattenbildning: 100 mm/år
Injekterat
Inläckage: 7,32 l/(min*100m)



Vattenyta (m)



△ Cell över grundvattenyta

△ Vattenfylld cell

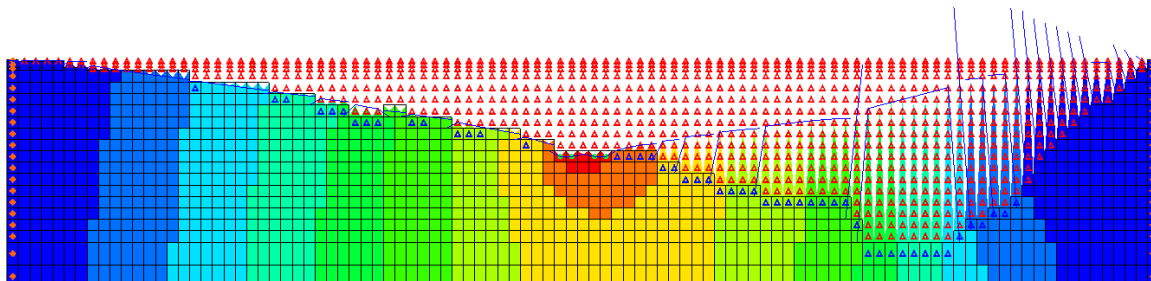
Tvärsnitt 4C

Lövön, diabasgången, lera och morän på berg
Med Trafikverkets värde på bergets konduktivitet
och med morän = matjord

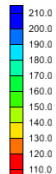
Grundvattenbildning: 100 mm/år

Ingen injektering

Inläckage: 4,15 l/(min*100m)



Vattenyta (m)



△ Cell över grundvattenyta

△ Vattenfylld cell

Tvärsnitt 4D

Lövön, diabasgången, lera och morän på berg
Med Trafikverkets värde på bergets konduktivitet
och injekterat berg samt morän = matjord

Grundvattenbildning: 100 mm/år

Injekterat

Inläckage: 10,44 l/(min*100m)

