Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Bilaga C

PM hydrogeologi

Region Stockholm

PM Hydrogeologi

Bilaga C

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Region Stockholm

Titel: PM Hydrogeologi
Uppdragsledare: Catrine Söderström, WSP
Projektledare: Jörgen Niklasson, FUT
Författare: Håkan Svensson
Bilder & illustrationer: WSP, Kemakta och FUT om inget annat anges
Dokumentid: 5140-M53-22-01003
Diarienummer: FUT 2016-0027
Utgivningsdatum: 2019-06-14

Distributör: Region Stockholm, förvaltning för utbyggd tunnelbana
Box 225 50, 104 22 Stockholm. Tel: 08 737 25 00. E-post: nyatunnelbanan@sll.se

Innehållsförteckning

1 Inledning 5
1.1 Planerad vattenverksamhet 5
1.2 Avgränsningar 7
1.3 Frågeställningar 7
1.4 Utredningsmetodik grundvatten 7
1.4.1 Framtagande av utredningsområde 7
1.4.2 Kartläggning av värden samt geologiska och hydrogeologiska egenskaper 8
1.4.3 Framtagande av influensområde 9
1.4.4 Identifiering av känsliga objekt 10
1.4.5 Bedömning av grundvattenpåverkan 11
1.4.6 Framtagande av skadeförebyggande åtgärder 13
1.5 Definitioner och begrepp 14
2 Underlagsmaterial 15
2.1 Inventeringar 15
2.2 Geotekniska, geologiska och hydrogeologiska fältarbeten 16
3 Beskrivning av området 16
3.1 Översiktlig beskrivning 16
3.2 Ytvatten 17
3.3 Berggrund 18
3.4 Jordlager 24
3.4.1 Geotekniska förhållanden 25
3.5 Grundvatten 26
3.6 Vattenbalans och objekt som påverkar vattenbalansen 39
3.6.1 Klimatologi och grundvattenbildning 39
3.6.2 Markanvändning 40
3.6.3 Objekt som påverkar vattenbalansen 41
3.6.4 Vattenbalans 41
3.7 Känsliga objekt/områden 43
3.7.1 Byggnader och anläggningar 43
3.7.2 Brunnar 44
3.7.3 Natur- och kulturmiljöer 45
3.7.4 Föroreningar 45
3.7.5 Grundvattenkvalitet 48
4 Påverkan på vattenmiljön 49
4.1 Influensområde 49
4.2 Bedömning av inläckage 50
4.3 Bedömning av grundvattennivåsänkning med och utan infiltration 52
4.3.1 Översikt av anläggning 52
4.3.2 Känslig grundläggning inom influensområdet 53
4.3.3 Grundvatten i berg 54

4.3.4 Grundvatten i jord 55
4.4 Ytvatten 61
4.5 Vattenkvalitet 61
5 Skyddsinfiltration 62
6 Referenser 63
6.1 Framtagna underlagsdokument 63
6.2 Övriga referenser 63

Bilagor

Bilaga C1 Översiktskarta
Bilaga C2 Jord- och bergsektioner
Bilaga C3 Geologisk karta med karterade svaghetszoner
Bilaga C4 Hydrogeologisk karta med grundvattenmagasin och grundvattenrör
Bilaga C5 Influensområde och känsliga objekt
Bilaga C6 Hydrogeologiska beräkningar
Bilaga C7 PM sättningar
Bilaga C8 PM Föroreningar i grundvatten

1 Inledning

För att möta det ökade behovet av bostäder och kollektivtrafik i Stockholms län har staten, Region Stockholm, Stockholms stad, Nacka Kommun, Solna stad och Järfälla kommun utifrån det som kallas 2013 års Stockholmsförhandling tecknat avtal om utbyggnad av 19 kilometer ny tunnelbana, elva nya tunnelbanestationer och nybyggnation av 82 000 bostäder i länet.

Utbyggnaden av tunnelbanan innebär att fler tunnelbanetåg kommer att trafikera systemet. Därmed ökar behovet av depåkapacitet, det vill säga uppställnings- och underhållsplatser för tunnelbanetågen. Med anledning av detta kommer den befintliga Högdalsdepån i Högdalen att byggas ut. Utbyggnaden innefattar nya uppställningsplatser under och ovan jord som komplement till nuvarande platser ovan jord. Ett underjordiskt anslutningsspår byggs för att koppla ihop depån med Gröna linjens Farstagren.

Denna promemoria ingår i tillståndsansökan enligt miljöbalken för utbyggd depå Högdalen.

Syftet med denna promemoria är att beskriva förutsättningar och påverkan rörande hydrogeologi för den tillståndspliktiga vattenverksamheten. Promemorian är utformad så att informationen ska vara tillräcklig för att kunna bedöma konsekvenserna av den planerade grundvattenbortledningen och infiltrationen av vatten till grundvattenmagasinen.

Höjdangivelser i denna promemoria jämte bilagor är i rikets höjdsystem RH2000.

1.1 Planerad vattenverksamhet

Eftersom stora delar av anläggningen är belägen i berg, under grundvattenytan, kommer verksamheten att påverka grundvattnet genom ett visst grundvatteninläckage till tunnelanläggningen. I planerade anläggningar kommer inläckande grundvatten att behöva ledas bort under både bygg- och drifttid. För denna verksamhet krävs tillstånd från mark- och miljödomstolen för vattenverksamheten enligt kapitel 11 miljöbalken.

Den planerade anläggningen består av uppställningshall under mark, dubbelspårstunnel som ansluter till Gröna linjens Farstagren i öster samt dubbelspårstunnel som ansluter till befintlig Högdalsdepå i väster, se Figur 1. Uppställningshallen under mark är cirka 400 meter lång, cirka 17,4 meter bred och cirka 7,5 meter hög. Söder om uppställningshallen anläggs också ett förbifartsspår under mark, mellan de båda tunnlarna skall tvärtunnlar byggas.

Anslutning till Farstagrenen är cirka 1200 meter lång, cirka 9,9 meter bred och cirka 6,2 meter hög. Anslutningen till Högdalsdepån är cirka 520 meter lång, cirka 9,7 meter bred och cirka 6,2 meter hög.

En arbets-/servicetunnel som ansluter från Örbyleden till uppställningshallen under mark planeras. Arbetstunneln kommer att permanentas och under drifttiden övergå till att fungera som servicetunnel samt insatsväg för räddningstjänst. Längden av arbets-/servicetunneln uppgår till cirka 300 meter. Arbets-/servicetunneln är cirka 5,4 meter bred och cirka 7 meter hög.

Vid anslutningar mot markytan för anslutningsspår och arbets-/servicetunnel kommer schakt utföras i både jord och berg. Vid anslutning till Farstagrenen byggs betongtunnel och betongtråg. Vid västra anslutningsspåret byggs endast betongtunnel. Inne på befintligt depåområde planeras om- och tillbyggnation av befintliga byggnader samt ett antal nya byggnader. Nya ledningsanslutningar kommer också att krävas. Depåområdet utökas dessutom söder om befintlig

depå med en ny städ- och uppställningshall samt uppställningsspår ovan jord. I slänten mot Högdalstoppen anläggs en stödkonstruktion för stabilisering av jordmassor.

- Inom befintlig Högdalsdepå planeras schakt för ledningsanslutning till dag- och spillvattenledningar. Lägsta schaktbottennivå för ledningsanslutningen är cirka +31,5. Schaktlängd och schaktbredd kommer att uppgå till cirka 4 meter respektive cirka 2 meter. Schaktdjupet kommer att uppgå till cirka 5 meter. Vidare planeras för nybyggnation och utbyggnad av ett antal byggnader som servicehall och tvätthall. Placering av schakt är preliminära och kan komma att flyttas något i samband med detaljprojektering och beskrivning av grundvattenpåverkan i denna PM har tagit hänsyn till detta.
- Anläggning av betongtunnlar vid västra anslutningsspåren utförs genom ett cirka 15 meter djupt schakt i berg. Schaktets bredd för dubbelspårtunneln är cirka 25 meter. Lägsta schaktbottennivå för betongtunnlarna är cirka +29,5.
- Bergtunneln övergår till en betongtunnel följt av ett betongtråg som ansluter till markytan vid anslutning till Farstagrenen. Betongtunneln är cirka 115 meter lång och betongtråget är cirka 90 meter långt. Anläggning av betongtunneln utförs genom ett cirka 10 meter djupt schakt i berg. Schaktets bredd varierar mellan 14 och 17 meter. Lägsta schaktbottennivå för betongtunneln är cirka +34.
- Ett tillfälligt schakt kommer att behöva göras för en arbetsväg ned till schaktet för betongtunneln vid anslutning till Farstagrenen. Arbetsvägen passerar över bergtunneln med en schaktbottennivå på cirka +50 för att därefter ansluta till det öppna schaktet för betongtunneln på cirka +35.
- Anläggning av betongtunneln för arbets-/servicetunnel utförs genom ett cirka 16 meter djupt schakt, huvudsakligen i berg. Schaktets bredd är cirka 19 meter. Lägsta schaktbottennivå för betongtunneln är cirka +28.

De delar av anläggningen som kräver tillstånd för vattenverksamhet är:

- Spårtunnlar, tvärtunnlar och uppställningshall under mark – bortledning av grundvatten under bygg- och drifttid
- Arbets-/servicetunnel– bortledning av grundvatten under bygg- och drifttid
- Schakt för anslutningar mot markytan – bortledning av grundvatten vid jord- och bergschakt under byggtid
- Temporär grundvattenbortledning under byggtiden för schakt i jord inom depåområdet för servicehall, tvätthall och ledningar.
- Skyddsåtgärd vid risk för skadlig grundvattensänkning – infiltration

Infiltration kan bli aktuellt i samband med schakt i jord och inom områden med objekt som kan påverkas negativt till följd av förutsedd grundvattenbortledning. Skyddsinfiltration planeras att utföras vid behov, huvudsakligen under byggtiden, men kan vid speciellt känsliga områden även införas permanent under drifttiden.

Inläckande grundvatten, vilket benämns dränvatten, till bergtunnlar och schakt kommer under byggtiden att samlas upp i tillfälliga pumpgropar, tillsammans med processvatten och nederbörd. Tillsammans benämns detta vatten länshållningsvatten.

Under drifttiden kommer det inläckande grundvattnet att hanteras i en pumpstation med reningsfunktion, en så kallad VA-station, innan det pumpas ut till dagvattenledning och vidare mot recipient. VA-stationen placeras i en av anläggningens lågpunkter, belägen i arbets-/servicetunneln, dit allt inläckande dränvatten rinner/pumpas.

1.2 Avgränsningar

Denna PM Hydrogeologi beskriver nuvarande grundvattenförhållanden och förväntad påverkan till följd av den planerade vattenverksamheten. Vidare beskrivs objekt som är känsliga för grundvattenpåverkan och bedömda behov av skyddsåtgärder för att minska risken för skador.

1.3 Frågeställningar

Att leda bort grundvatten innebär att grundvattennivåer i jord och berg sjunker i tunnlarnas närhet. Sänkt grundvattennivå i jord kan i sin tur medföra sättningar i lera som kan skada mark, byggnader och anläggningar. Sänkt grundvattennivå i jord kan också medföra påverkan på grundvattenberoende vegetation. Sänkning av grundvattennivån i berg kan exempelvis medföra att energibrunnar får sänkt kapacitet. Vidare kan förändrad strömningsbild påverka mobilisering av föroreningar.

1.4 Utredningsmetodik grundvatten

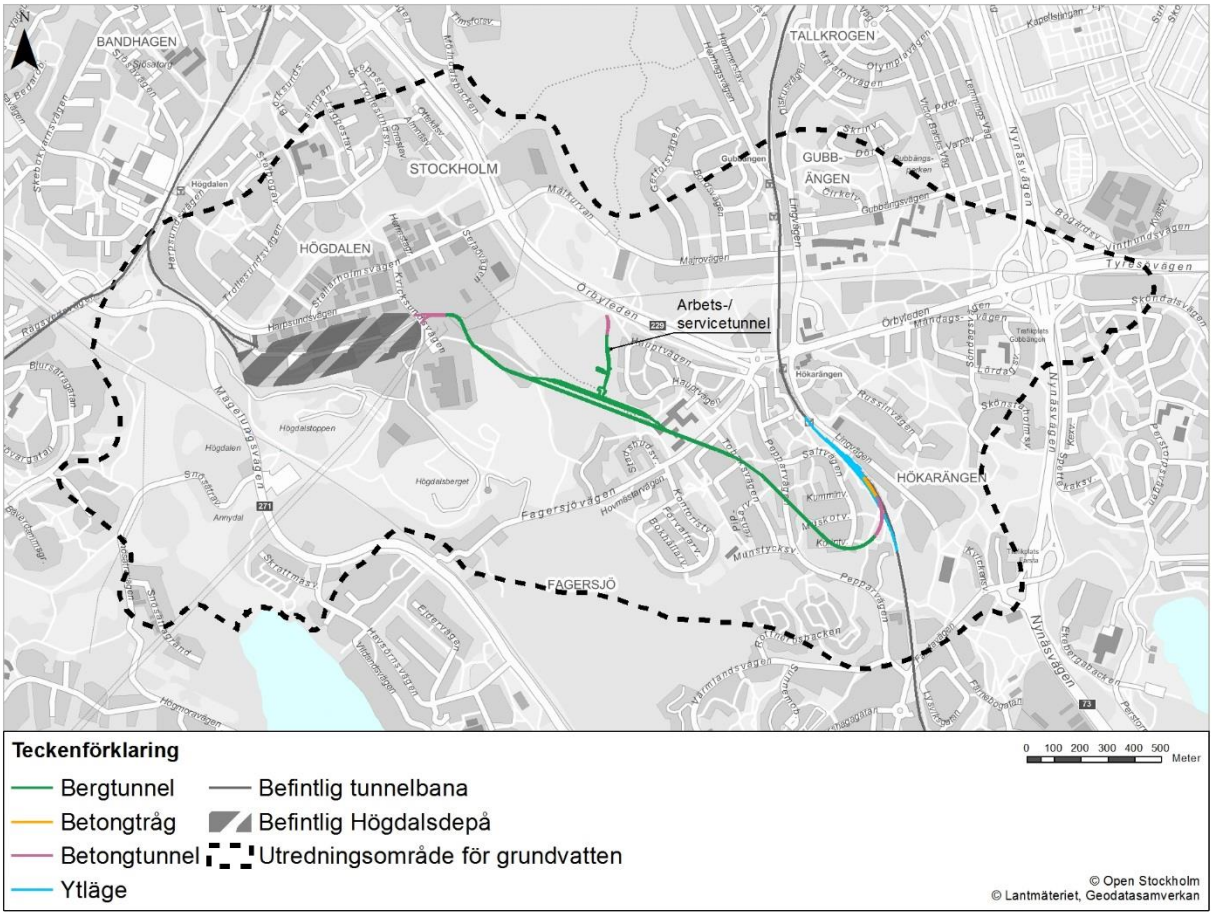
Region Stockholm har tagit fram en utredningsmetodik rörande grundvatten, som gäller både utredningar som görs för tillståndsansökan och hantering av risk för skador under byggtid och drifttid. Arbetets olika steg beskrivs nedan.

1.4.1 Framtagande av utredningsområde

Avgränsning av ett väl tilltaget område för utredningar runt varje planerad utbyggnadsgren. Utredningsområdet för den aktuella sträckan redovisas i Figur 1.

Definition av utredningsområde för grundvatten

Område inom vilket utredningar görs för att klarlägga hydrogeologiska, geologiska och geotekniska förhållanden för att kunna bedöma ett influensområde. Inom utredningsområdet utförs det även inventeringar av naturvärden, kulturvärden, byggnader och anläggningar som kan skadas till följd av vattenverksamheten.



Figur 1. Översikt av utredningsområdet för planerad anläggning.

1.4.2 Kartläggning av värden samt geologiska och hydrogeologiska egenskaper

Inom utredningsområdet har bergarter, sprickbildning, hydrogeologi, grundvattenmagasin samt kultur- och naturvärden undersökts och kartlagts.

1.4.2.1 Berggrund

Berggrunden har kartlagts genom att inledningsvis studera kartunderlag från Sveriges Geologiska Undersökning, SGU, och den byggnadsgeologiska kartan för Stockholm. SGU har bland annat karterat bergarter samt större svaghetszoner. Den byggnadsgeologiska kartan redovisar större svaghetszoner i Stockholm.

Berggrunden har också kartlagts genom att göra olika typer av förundersökningar, exempelvis sprickkarteringar. Därefter har följande borrningar och tester utförts:

- Jordbergsonderingar för att klarlägga bergytans läge. Har framför allt betydelse för att säkerställa att tunnlarna har erforderlig bergtäckning.
- Kärnborrning och kartering av upptagna borrkärnor i syfte att klarlägga bergarter, sprickor och bergets egenskaper.
- Vattenförlustmätningar för att klarlägga bergets vattenförande egenskaper.

1.4.2.2 Grundvatten i jord

Grundvatten förekommer i flera olika magasin i jordlagren inom utredningsområdet. Det förekommer grundvattenmagasin under lerfyllda dalgångar, i friktionsjorden som ligger mellan berget och leran. Denna typ av magasin kallas i fortsättningen undre grundvattenmagasin. Det förekommer även grundvatten i fyllningsmassor ovanpå lera. Denna typ av artificiella magasin kallas i fortsättningen för övre grundvattenmagasin. Undersökningar av grundvatten i jord har utförts enligt följande:

- Grundvattenmagasinens utbredning och avgränsning har bestämts genom att studera kartering av geologi och topografi, tidigare utförda borrningar, samt genom att utföra nya sonderingsborrningar.
- Grundvattennivåer har mätts i grundvattenobservationsrör. Utifrån grundvattenmätningarna har grundvattnets flödesriktning och grundvattendelare bestämts.
- Hydrauliska försök, såsom slugtester och infiltrationstest, har utförts för att kartlägga grundvattenmagasinens vattenförande egenskaper.
- Ytvattendelare har kartlagts, då de ofta sammanfaller med grundvattendelarna. Ytvattendelarna utgör också grunden för arealavgränsning vid beräkning av vattenbalanser.

1.4.2.3 Föroreningar

En övergripande inventering av potentiellt förorenade områden har gjorts baserat på länsstyrelsens MIFO-databas (Metodik för inventering av förorenade områden). Genomgång har även gjorts av resultat från tidigare miljöundersökningar från enskilda objekt eller fastigheter där föroreningen bedömts ha potential att påverka vattenkvaliteten i grundvattnet. Dessutom har provtagning av jordlager och grundvatten utförts med avseende på föroreningar.

1.4.2.4 Jordlager och sättningar

Som underlag för bedömning av skador som kan uppkomma till följd av grundvattenpåverkan har jordlagrens sättningskänslighet utretts. Det har gjorts genom att identifiera områden med lera och undersöka leran enligt följande:

- Tidigare sonderingsborrningar har samlats in i syfte att kartlägga jordlagerföljder och mäktighet av lera.
- Tidigare provtagning av leran har samlats in i syfte att kartlägga lerans egenskaper, såsom konsolideringsgrad och vattenkvot.
- Nya sonderingsborrningar och provtagning av lera har utförts inom representativa områden. Analys av lerprover har utförts på geotekniskt laboratorium.

1.4.2.5 Natur- och kulturvärden

Natur- och kulturvärden har identifierats genom att inhämta material från Stockholms kommun och länsstyrelsen.

1.4.3 Framtagande av influensområde

Vid framtagande av influensområdet används framförallt bedömningar från resultat av hydrogeologiska undersökningar och stabila hydrauliska gränser. Influensområdet bedöms utifrån att tätning utförs enligt vad som beskrivs i den tekniska beskrivningen. Vid framtagande av influensområdet beaktas emellertid inte den skyddsinfiltration som kan behöva utföras.

Influensområdet för grundvatten i jordlagren har huvudsakligen utsträckts till stabila grundvattendelare eller hydrauliska ränder. Undantag gäller för grundvattenmagasin som är så stora att någon påverkan rimligen inte kan ske ända ut till sådana gränser. I dessa fall har resultat från hydrauliska tester använts som underlag för teoretiska beräkningar av influensområdets utbredning.

Att beräkna grundvattenpåverkan i berg är komplicerat på grund av att förhållandena är så heterogena. Det kan vara svårt att identifiera stabila hydrauliska gränser. I de fall där sådana gränser saknas har en teoretisk beräkning av utbredningen utförts. I sådana beräkningar har influensområdets gräns definierats som gränsen där 0,3 meters trycknivåsänkning i djupt berg beräknas kunna ske. Eftersom beräkningarna ofta överskattar influensområdets utbredning har beräkningarna också kombinerats med erfarenheter av grundvattenpåverkan från andra projekt i Stockholm.

Definition influensområde för grundvatten

Område inom vilket det kan uppkomma grundvattenpåverkan till följd av vattenverksamheten.

1.4.4 Identifiering av känsliga objekt

Inom influensområdet har känsliga byggnader, anläggningar, ledningar, vatten- och energibrunnar, natur- och kulturvärden identifierats. Detta har utförts genom;

- inhämtning av grundläggningsdata för byggnader och anläggningar inom influensområdet,
- utvärdering av jordlagerförhållanden för identifiering av tänkbara grundvattenkänsliga områden
- inhämtning av information om de aktuella kultur- och naturvärdena.

Vid behov har inventeringar av kultur- och naturvärden genomförts för att dokumentera vilka naturvärden som kan vara känsliga för påverkan på grundvattennivåer.

1.4.4.1 Brunnar

Information om enskilda brunnar har inhämtats från SGU:s brunnsarkiv, dit brunnsborrare är skyldiga att rapportera utförda borrningar av brunnar, samt Stockholms kommun, dit fastighetsägare är skyldiga att anmäla installation av bergvärmepumpar.

1.4.4.2 Sättningar och känslig grundläggning

Sättningskänsliga jordarter har utretts inom influensområdet för grundvatten genom att identifiera områden med lera som inte redan är dränerad. Inom de känsliga områdena har en inventering av grundläggning för byggnader och anläggningar utförts. Inventeringen har utförts genom att inhämta information från Stockholm kommuns arkiv rörande grundläggning för hus, samt från ledningsägare rörande grundläggning för ledningar.

Byggnader och anläggningar som inte är fast grundlagda betraktas som känsliga för grundvattennivåsänkningar.

Klassningen har sammanställts i följande kategorier:

Grundläggningskategori	Känslig för grundvattennivåsänkning i övre magasin	Känslig för grundvattennivåsänkning i undre magasin
Grundlagd på lera	Nej	Ja
Grundlagd på träpålar	Ja	Nej
Golv eller ledning grundlagd på lera	Nej	Ja
Okänd grundläggning	Ja	Ja

1.4.4.3 Föroreningar

Negativa effekter kan uppkomma om inläckande grundvatten för med sig föroreningar. Vidare finns det risk för att ändrade grundvattenförhållanden kring tunneln påverkar eller mobiliserar föroreningar i mark och grundvatten. För att hantera och särskilja potentiellt förorenade områden samt områden där föroreningar påträffats i utförda undersökningar har områdena klassats med avseende på risk för spridning av föroreningar. Klassningen har utgått från föroreningsbilden i mark och grundvatten för de potentiellt förorenade objekt som framkom i samband med utförd inventering samt från resultat från utförda undersökningar i mark och grundvatten. Indelningen har utförts enligt följande:

- Föroreningar som är begränsat mobila i mark och föroreningar som inte har förutsättningar att nå grundvattnet har fått klassningen ”låg risk”
- Föroreningar som ligger på så långt avstånd från planerade anläggningar att förändrade grundvattenströmningar inte kan ske har fått klassningen ”låg risk”
- Föroreningar vars mobilitet kan påverkas, men där påverkan är begränsad till en större gradient (och därmed ökad strömningshastighet för grundvattnet) har fått klassningen ”mellanrisk”
- Föroreningar som kan påverkas med förändrade gradienter så att föroreningar sprids till tidigare ej förorenade områden samt föroreningar som kan läcka in i planerade anläggningar har fått klassningen ”hög risk”

De förorenade områden som fått klassningen mellanrisk och hög risk har därefter studerats vidare. I dessa fall har beräkningar och/eller bedömningar av spridning och påverkan i form av föroreningar i länshållningsvattnet utförts.

1.4.5 Bedömning av grundvattenpåverkan

De resultat som erhållits i hydrogeologiska undersökningar och geologiska karteringar ligger till grund för bedömningarna av hur grundvattnet kan påverkas vid byggande och drift av tunnelbanan. Huvudsakligen utgår bedömningarna från mätningar och fältundersökningar, kompletterat med beräkningar. De beräkningar som utförts beskrivs kortfattat nedan och mer detaljerat i bifogad beräkningsbilaga, Bilaga C6, samt PM Sättningar, Bilaga C7.

1.4.5.1 Beräkningar av sättningar

Vid beräkning av potentiella sättningar har arbetet utförts i följande steg:

- Översiktlig bedömning av lermäktighet genom studier av tidigare utförda borrningar.
- Kompletterande geotekniska markundersökningar.

- Provtagning och analys av lera i de områden där leran är som djupast och där grundvattenpåverkan kan befaras bli störst.
- Beräkning av sättningar utifrån lerans egenskaper. Beräkningarna har utförts för flera olika scenarier för grundvattennivåsänkning, både vad avser storlek och varaktighet.
- Utifrån beräkningsresultaten har generella slutsatser om olika områdens sättningskänslighet dragits.

1.4.5.2 Bedömning av inläckage

Inläckage till en bergtunnel beror av ett flertal olika faktorer, såsom bergets vattenförande förmåga, tunnelns djup, grundvattenbildning och utförande av tätning. Vid bedömning av inläckage till bergtunnlar har följande principer använts:

- Vid beräkningar har hänsyn tagits till de osäkerheter som föreligger med avseende på bergets heterogenitet och utfall av planerad tätning av tunnlarna. Konservativa parameterval har gjorts för att inte underskatta storleken på inläckaget.
- Berggrundens vattenförande förmåga har undersökts genom analys av ett stort antal bergborrade brunnar samt vattenförlustmätningar.
- Grundvattenbildningen har i beräkningarna bestämts med en metod som tar hänsyn till att grundvattenbildningen kan öka om grundvattennivån sjunker samt att grundvattenbildningen ökar vid utförande av infiltration.
- Erfarenheter från inläckage till andra berganläggningar som byggts i likartad geologisk miljö och med likartade byggmetoder utgör kompletterande underlag för bedömningen.

Bedömningar av inläckage till öppna schakt under byggtiden har utförts översiktligt. Detta eftersom grundvattennivåsänkningar effektivt kan motverkas av infiltration och storleken på inläckaget då inte har någon praktisk betydelse. Med avseende på att principiell byggmetod för öppna schakt är att schakt sker inom tätspont, kan inläckaget förutses bli litet och kortvarigt under byggtiden.

Beräkning av inläckage till tunnlar utgår från en analytisk modell som sedan har verifierats med numerisk modellering. Avsänkning av grundvattenytan ovanför en otät tunnel medför att inläckaget minskar då tryckgradienten från grundvattenytan mot tunnelcentrum minskar. Detta fångas inte upp av den analytiska modellen som förutsätter konstant grundvattenyta ovan tunneln. Numerisk analys har därför använts för att se i hur grad den analytiska modellen överpredikterar inläckaget och vid behov har korrektion gjorts.

1.4.5.3 Beräkning av grundvattennivåsänkningar

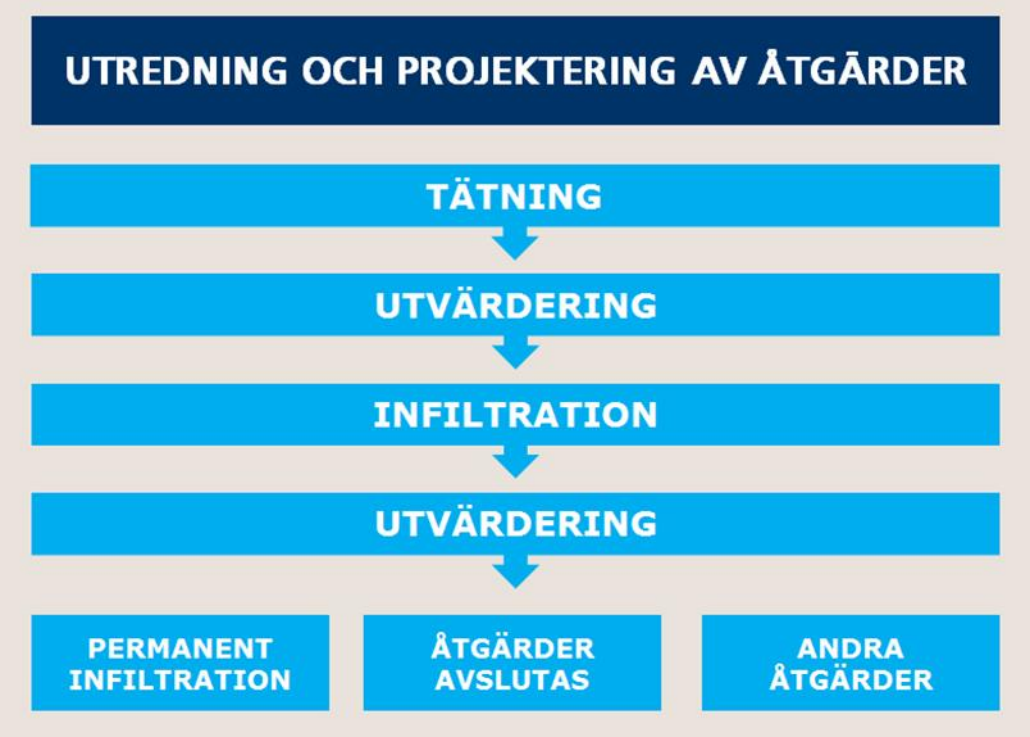
Numerisk analys har utgjort basen för beräkningarna av grundvattennivåavsänkning då analytisk teori inte kan beräkna den tredimensionella trycksänkningen kring en tunnel i ett heterogent anisotropt grundvattenmagasin. Dessa beräkningar har utgjort stöd vid avgränsning av influensområde för den planerade tunnelbanedepån.

Tunnlar i modellerna simuleras som högkonduktiva strukturer omgivna av en tät zon (injekteringszon). Den högkonduktiva strukturen dräneras ner till tunnelcentrum, skapande en trycksänkning som driver inläckaget genom injekteringszonen. Tunnlar simuleras med ekvivalenta areor och inbördes avstånd som överensstämmer med planerade anläggningar.

Numeriska beräkningar har utförts för avgränsade områden, till exempel där bergtunnelavsnitt passerar under grundvattenmagasin i jord eller genom sprickzoner i berg. En samlad bedömning för hela området görs sedan baserad på de enskilda grundvattenmagasinens utbredning samt kunskap om områdenas jord- och bergförhållanden.

1.4.6 Framtagande av skadeförebyggande åtgärder

Skador orsakade av sänkning av grundvattennivån uppkommer generellt långsamt. Strategin för de skadeförebyggande åtgärderna är att arbeta i steg, med flera olika skyddsåtgärder och med successiv utvärdering mellan varje steg. Arbetsgången rörande de skadeförebyggande åtgärderna sammanfattas i Figur 2.



Figur 2. Arbetsgången för hantering av skadeförebyggande åtgärder

I denna PM Hydrogeologi beskrivs förväntat inläckage med angivna tätningsmetoder, i huvudsak förinjektering. Vidare beskrivs förutsättningarna för infiltration, samt förväntad effekt av infiltrationen. Målsättningen med valda tätningsmetoder är att infiltrationen ska minimeras.

1.4.6.1 Tätning av tunneln

Under tunneldrivningen kommer berget kring tunneln att tätas genom kontinuerlig förinjektering. Region Stockholm har utarbetat en anvisning för projektering av förinjektering med cementbaserade bruk, vilken kommer att tillämpas. Omfattning och utförande av tätningen kommer att styras av bergets vattenförande egenskaper och risk för negativ påverkan på omgivningen.

Med den metodik som kommer att tillämpas kan det förväntas att tätningen blir så bra att omfattningen av ytterligare skadeförebyggande åtgärder blir liten. Utifrån bedömning av tätningsåtgärdernas (förinjekteringens) effekt på inläckage och grundvattenivåsänkingar har områden där skyddsinfiltration kan komma att bli aktuellt identifierats.

1.4.6.2 Skyddsinfiltration

För att upprätthålla grundvattennivåerna i områden med byggnader eller konstruktioner med grundvattenberoende grundläggning (det vill säga grundläggning helt eller delvis på lera samt grundläggning på träpålar) eller i särskilt sättningskänsliga områden kan så kallad skyddsinfiltration användas. Skyddsinfiltration är en i Stockholmsområdet väl beprövad metod som kan användas för att hålla uppe grundvattennivåer lokalt kring enskilda byggnaders trägrundläggning, eller för att upprätthålla grundvattennivåer inom större områden för att undvika sättningar. Exakta behov av skyddsinfiltration kan inte bestämmas i detta skede. Här

redovisas bedömda infiltrationsinsatser, samt förutsättningar för att kunna få erforderlig effekt av infiltrationen.

1.5 Definitioner och begrepp

I följande stycke förklaras en del av begrepp som används i denna rapport.

Begrepp	**Förklaring**
Grundvatten	Grundvatten är vatten (över atmosfärstryck) som helt fyller hålrum och sprickor både i jord och i berg. I jorden rör sig grundvattnet i hålrum mellan jordpartiklarna. Grundvatten i berg finns i sprickor och mellan sprickorna anses bergmassan vara tät.
Grundvattenbildning	Tillflöde av vatten till grundvattenzonen. Grundvatten bildas i inströmningsområden, där vatten strömmar från markvattenzonen till grundvattenzonen. I utströmningsområden sker ett omvänt flöde.
Grundvattendelare	En gräns för ett grundvattenmagasin. Det kan vara en bergtröskel under mark som delar av ett grundvattenmagasin i jordlagren eller topografiskt betingad, så kallad gravitationsvattendelare, som gör att grundvattenströmningen riktas åt olika håll.
Grundvattenmagasin	En avgränsad del av ett vattengenomsläppligt jordlager. Även berggrundens vattengenomsläppliga spricksystem brukar kallas för ett (berg-) grundvattenmagasin.
Grundvattennivå, Artesiskt grundvatten	Grundvattennivå avser grundvattenytans läge i mark där jämvikt med atmosfärstryck råder och tryckpotentialen är noll. Trycknivån kan avläsas i borrade hål, grävda gropar eller likande. Artesiskt grundvatten har en trycknivå som ligger över markytans nivå.
Hydraulisk konduktivitet	Ett mått på jordlagrets (berggrundens) förmåga att släppa igenom vatten. Ett grundvattenflöde genom ett visst tvärsnitt beror på konduktiviteten och strömningsgradienten (nivå/tryckskillnad) mellan två punkter.
Konsolidering	En volymminskning (komprimering) av (ler)jord på grund av belastning eller minskning av portrycket. När en lerjord belastas pressas vatten ut ur jorden (porvolymen minskar). Om trycknivån sänks i under- eller överliggande jordlager kommer lerjordens portryck att minska med en konsolidering som följd. En överkonsoliderad jord har tidigare varit utsatt för en större belastning eller grundvattentrycknivåsänkning än dagens förhållanden. En underkonsoliderad lerjord är utsatt för en belastning eller trycknivåsänkning men har ännu inte anpassats (konsoliderats) för rådande förhållanden.

Sättning, sättningsrörelse	Markytan sjunker på grund av att underliggande jordlager pressats samman (konsoliderats).
Sättningsbenägen jord	Finjordar som ler- och siltjordar som konsolideras (trycks ihop) av pålagd last (byggnader, fyllning) eller av sänkning av grundvattnets trycknivå.
Torrskorpelera	Avvattnad, konsoliderad lerjord vid markytan som ofta är uppsprucken.
CRS-analys, CRS försök	Ett opåverkat (ostört) lerprov utsätts för tryck för att man ska kunna bedöma lerans sättningsegenskaper, och hur mycket lerjorden kompakteras vid en dränering av porvattenhalten.
Friktionsjord	Jord vars hållfasthet till övervägande del beror på friktion mellan kornen. Grus och sand är exempel på friktionsjord.
Fyllningsjord	Utfyllnadsmassor, jord som inte är bildats i naturliga processer på platsen.
Tunnelnivå	Anges som nivå för tunnelbotten.
Byggtid	Tiden från och med tidpunkten då den tillståndsgivna grundvattenbortledningen påbörjas till och med tidpunkten för godkänd slutbesiktning av tunnelanläggningen. Region Stockholm ska underrätta mark- och miljödomstolen och tillsynsmyndigheten om när godkänd slutbesiktning föreligger
Drifttid	Tiden efter byggtidens utgång.
Influensområde grundvatten	Område inom vilket det kan uppkomma grundvattenpåverkan till följd av vattenverksamheten.

2 Underlagsmaterial

2.1 Inventeringar

Följande inventeringar har genomförts:

- Inventering av husgrundläggningar inom utredningsområdet.
- Inventering av brunnar (SGUs brunnsdatabas och Stockholms kommuns arkiv).
- Inventering av undermarksanläggningar.
- Inventering av ledningar i leromården inom influensområdet

- Inventering av tidigare utförda borrningar i jord och berg.
- Inventering av befintliga grundvattenobservationsrör.
- Inventering av potentiellt förorenade områden.

2.2 Geotekniska, geologiska och hydrogeologiska fältarbeten

Inom pågående uppdrag för utbyggd depå i Högdalen har följande undersökningar utförts:

- Geotekniska undersökningar för att utreda jordlagerföljder samt kunskapen om jordlagerföljders egenskaper.
- Geotekniska undersökningar för att komplettera kunskapen om bergnivån.
- Geotekniska undersökningar och sättningsberäkningar för att bestämma sättningsbenägenhet.
- Installation av grundvattenrör i undre och övre grundvattenmagasin för att utreda grundvattensituationen inom området.
- Infiltrationsförsök och slugtester i undre magasin i jord för att utreda det undre magasinets hydrauliska egenskaper.
- Vattenförlustmätningar i kärnborrhål och hammarborrhål för att utreda bergets vattenförande egenskaper.
- Provtagning och analys av grundvatten och jord för att utreda förekomst av föroreningar samt kemisk sammansättning.
- Grundvattennivåmätningar.
- Sättningsmätningar.

3 Beskrivning av området

3.1 Översiktlig beskrivning

Uppställningshall under mark, anslutningsspår och arbets-/ servicetunnel kommer att förläggas i berg, förutom mellan bergpåslag och anslutningspunkternas befintliga spår där anläggningen kommer att utgöras av betongkonstruktioner förlagda i jord. Vidare kommer även anslutning till markytan för arbets-/ servicetunneln att utgöras av en betongkonstruktion förlagd i jord, se Bilaga C1.

Omfattningen av projektet som beskrivs i föreliggande PM begränsas av ett utredningsområde. Inom utredningsområdet utreds hydrogeologiska, geologiska och geotekniska förhållanden för att kunna bedöma tunnelbanedepåns influensområde.

I föreliggande kapitel redovisas översiktligt områdets topografi, geologi, hydrogeologi och hydrologi.

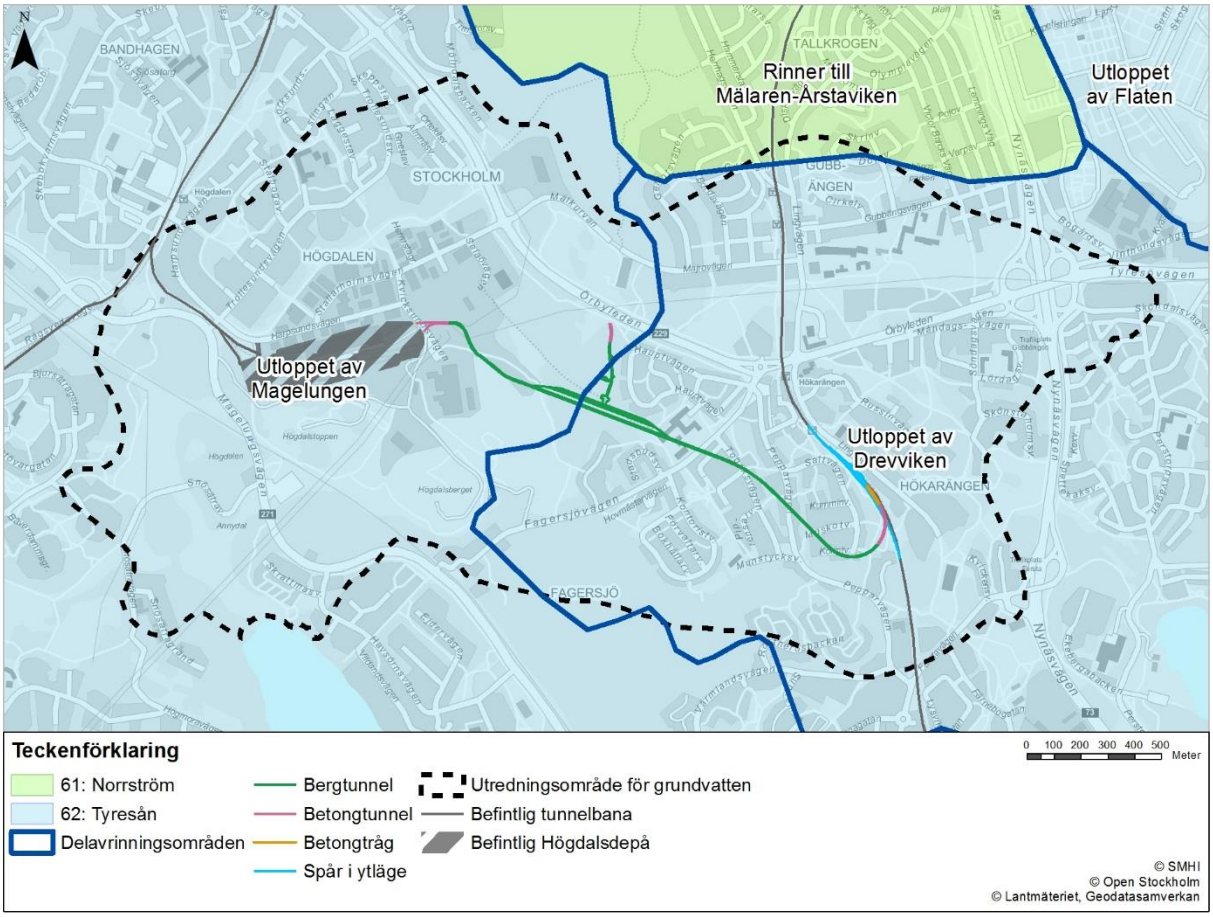
Området för tunnelbanedepån har varierande topografi där Högdalstopparna utgör den mest dominerande höjden i landskapsbilden. Norra delen av utredningsområdet domineras av

slättmark med lerfyllda sänkor på nivåer mellan +30 till +33, detta område benämns Gubbängsfältet. I norr, mot Gubbängens bostadsområde, angränsar utredningsområdet mot bergshöjder på cirka +50 till +60, Figur 1.

Den södra delen av utredningsområdet utgörs av högre belägna områden med berg i dagen som sträcker från Hökarängens bostadsområde i öst till Högdalens industriområde i väst. Nivåerna varierar generellt mellan +50 till +70 frånsett Högdalstopparna som når nivåer på cirka +100. Området mellan Hökarängen och Högdalens industriområde domineras av skogsområde. I västra delen av skogsområdet finns också en våtmark benämnd Gökdalen.

3.2 Ytvatten

Strömningsriktningar och avrinning bestäms av vattendelare. Generellt utgör höjdområden, som bergsryggar, vattendelare. Utredningsområdet är beläget inom Tyresåns huvudavrinningsområde (62) där den västra delen av utredningsområdet ligger inom det delavrinningsområde där avrinning och utlopp sker ut mot Magelungen och den östra delen av utredningsområdet där avrinning och utlopp sker mot Drevviken, Figur 3.



Figur 3. Delavrinningsområden. Den västra delen ligger inom det avrinningsområde där utlopp sker i Magelungen och den östra delen där utlopp sker i Drevviken.

Magelungens yta är cirka 230 hektar och maxdjupet är cirka 13,7 meter. Medeldjupet är cirka 5,0 meter. Magelungens omsättningstid uppges till 0,56 år (Tyresåns vattenvårdsförbund, 2001). Den kemiska statusen för Magelungen uppges till god bortsett från kvicksilver och bromerade flamskyddsmedel (PBDE) (VISS, 2017). I stort sett alla svenska vattenförekomster har högre halter av kvicksilver och PBDE än de gränsvärden som tillämpas och därför är dessa vattenförekomster undantagna statusbedömning på nationell nivå.

Drevvikens yta är cirka 560 hektar stor och maxdjupet är cirka 15,2 meter. Medeldjupet är cirka 6,7 meter. Drevvikens omsättningstid uppges till 0,84 år (Tyresåns vattenvårdsförbund, 2001). Den kemiska statusen i Drevviken klassas enligt VISS som ”uppnår ej god kemisk ytvattenstatus”. I dagsläget uppnås inte god status med avseende på tributyltenn föreningar, kvicksilver samt bromerad difenyleter. Ett undantag i form av tidsfrist till 2027 har gjorts för tribulytenn föreningar, eftersom åtgärdsarbetet och naturlig återhämtning bedöms ta lång tid. Drevviken har också förhöjda halter av PFOS, med förorenade områden och deponier inom avrinningsområdet som troliga betydande påverkanskällor. Hexabromcyklododekaner (HBCDD), som kommer från bromerade flamskyddsmedel, uppnår god kemisk status.

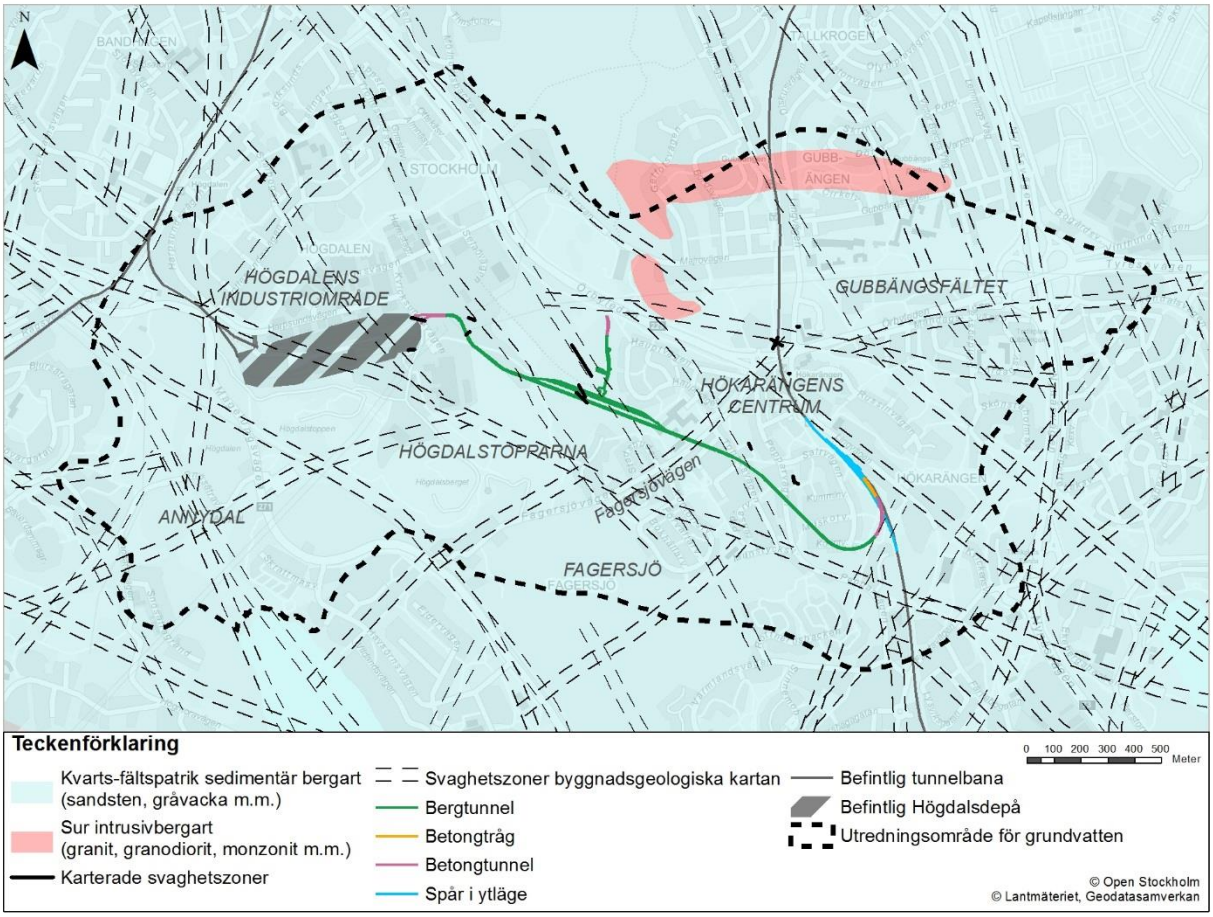
Vattenståndet för Drevviken och Magelungen uppges till cirka +20 enligt lantmäteriets terrängkarta.

3.3 Berggrund

I detta avsnitt beskrivs bergrundsgeologin längs planerade tunnelanläggningar. Beskrivningen baseras i huvudsak på undersökningar genomförda under 2016 och 2017. Mer översiktlig geologisk information baseras på uppgifter från byggnadsgeologiska kartan över Stockholm och geologiskt underlag från SGU.

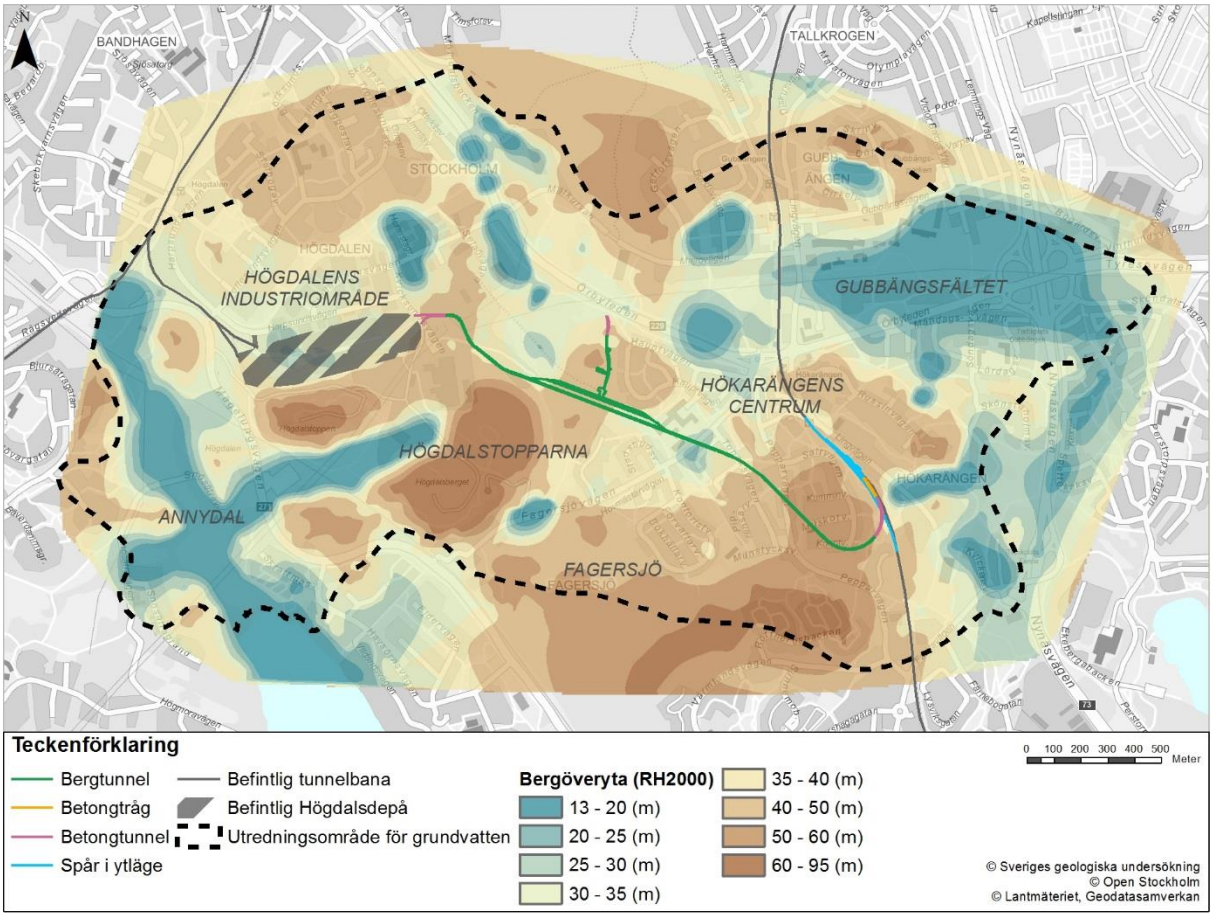
Berggrunden inom utredningsområdet utgörs av kristallin berggrund. Ådergnejs är den dominerande bergarten längs tunnelsträckningen.

Stråk med svaghetszoner förekommer längs med hela sträckningen, Figur 4 och Bilaga C3. Förekomsten av svaghetszoner baseras på byggnadsgeologiska kartan samt utförda karteringar [2]. Svaghetszonerna är till största delen orienterade i nordvästlig-sydostlig riktning. Tvärs anslutning till Farstagrenen sträcker sig enligt byggnadsgeologiska kartan en zon vid Fagersjövägen. I anslutning till uppställningshallen under mark identifieras flera zoner tvärs sträckningen av bergtunnlarna.



Figur 4. Översikt av tolkade svaghetszoner och SGU:s karta med bergarter inom utredningsområdet. Observera att SGU alltid visar ursprungsbergart, vilket betyder att bergarterna i området kan vara omvandlade men har ursprung i dessa bergarter.

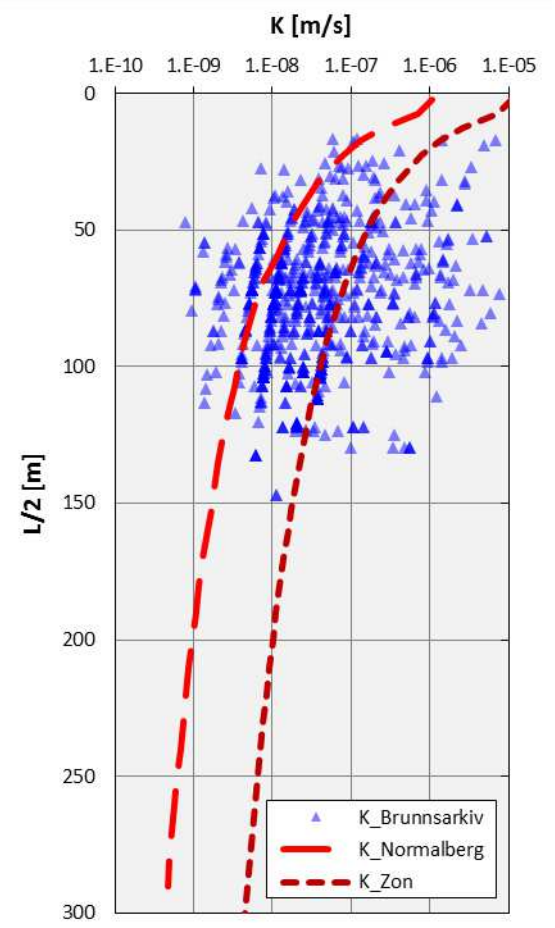
Bergytans topografi varierar med sänkor och bergsryggar. I Figur 5 visas bergöverytans tolkade nivå. Längs med den planerade tunnelbanedepån förekommer ett antal mindre sänkor. Den största sänkan motsvarar utbredningen av det så kallade Gubbängsfältet.



Figur 5. Tolkad bergöveryta inom utredningsområdet.

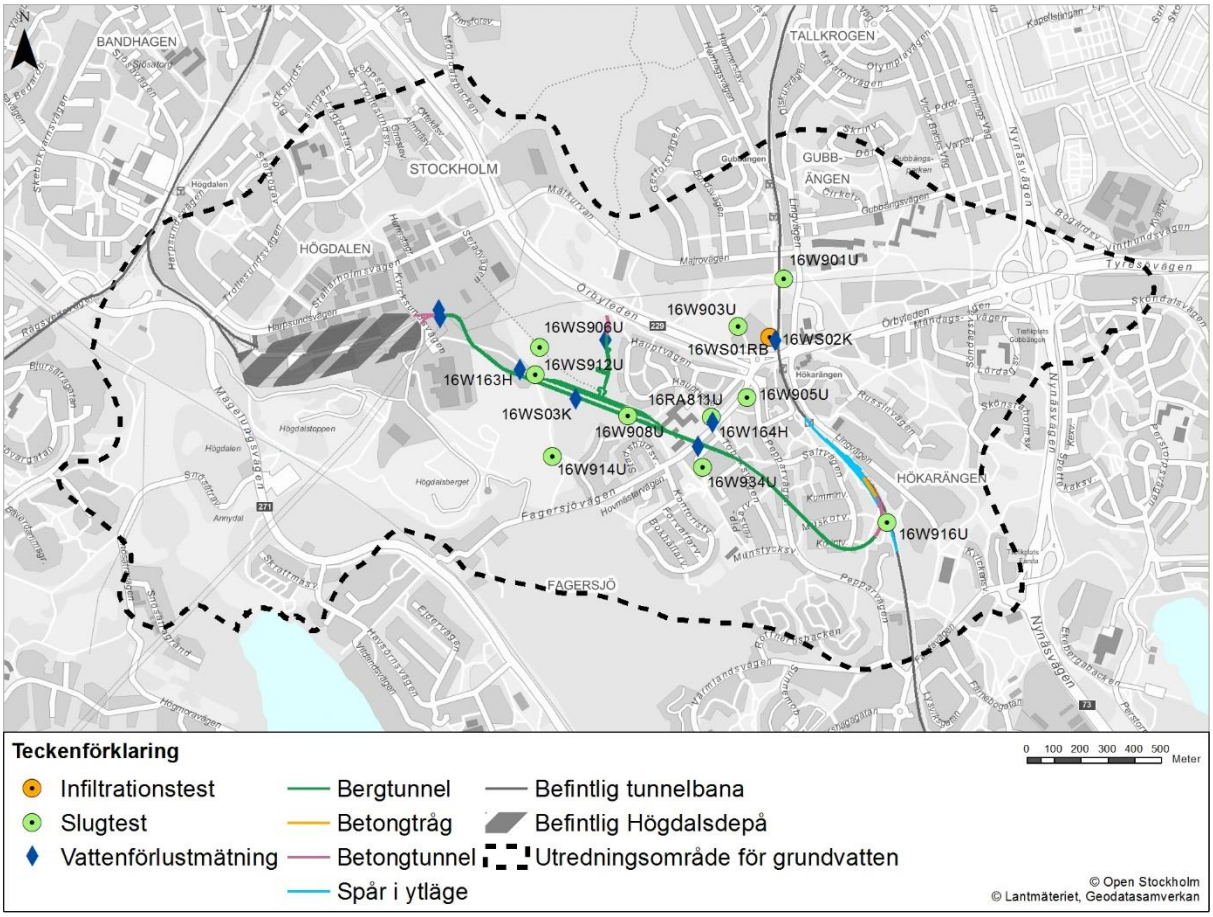
För att erhålla en övergripande bild av bergets vattenförande egenskaper inom utredningsområdet har information från SGU:s brunnsarkiv analyserats. En sammanfattning av resultatet ges nedan och en utförligare beskrivning av metodiken görs i Bilaga C6.

Analys av data från brunnsarkivet har genomförts genom studie av brunnar inom ett avstånd om cirka 3 kilometer från planerad tunnellinje. Först har en medelkonduktivitet (K) beräknats för respektive brunn och sedan har fördelningen av beräknade K-värden för olika populationer studerats indelade efter brunnsdjup. Skäl för indelning i olika populationer är att de vattenförande egenskaperna för det kristallina berget generellt kan antas uppvisa ett tätare berg mot djupet. Detta har studerats vid ett antal platser i Sverige och är även gällande för aktuellt område. Bergets djupavtagande hydrauliska konduktivitet kan beskrivas med en funktion (SKB, 2006). Resulterande funktioner för djupavtagande för konduktiviteten i berg respektive svaghetszon redovisas i Figur 6.



Figur 6 Plottade beräknade K-värden för respektive brunn mot halva brunnsdjupet samt anpassad funktion för djupavtagande K-värde för normalberg respektive zoner.

I en liten skala har bergets vattenförande egenskaper studerats genom analys av utförda vattenförlustmätningar, Figur 7 [1, 2]. Dessa undersökningar är i huvudsak inriktade på att finna förmodade vattenförande strukturer genom riktade undersökningar, varför de inte är representativa för berget i större skala. Vattenförande strukturer kan förväntas i områden som pekats ut som svaghetszoner enligt SGU och i Byggnadsgeologiska kartan samt baserat på svackor i bergöverytan.



Figur 7 Översikt av hydrogeologiska tester utförda i anslutning till sträckningen av utbyggd tunnelbanedepå i Högdalen.

Nedan görs sammanfattande beskrivningar av identifierande svaghetszoner baserat på undersökningar av bergets genomsläpplighet som kan ha betydelse för hur grundvattnet påverkas kring sträckningen för planerade bergtunnlar.

Vattenförlustmätningar har utförts i sex kärnborrhål samt i två hammarborrhål för att identifiera vattenförande strukturer.

Vattenförlustmätningarna utfördes i sektioner om sex meter där mätningar genomfördes i ett trycksteg. Analys av utförda vattenförlustmätningar har gjorts där hydraulisk konduktivitet för enskilda sektioner tolkats samt att det geometriska medelvärdet beräknats för hela borrhålslängden.

I Tabell 1 redovisas tolkade hydrauliska konduktivitetsvärden. Den utvärderade hydrauliska konduktiviteten varierar mellan $K=2{,}2\cdot10^{-10}$ till $K=1\cdot10^{-4}$ m/s för de sex kärnborrhålen, vidare förekom ett antal mätsektioner där ingen mätbar vattenförlust kunde noteras, mätgräns $2{,}2\cdot10^{-10}$ m/s. Resultaten från de tolkade konduktiviteterna visar inget tydligt generellt djupavtagande utan att måttligt genomsläppliga bergsektioner förekommer längs med hela borrhålslängderna.

Tabell 1 Kärnborrhål med tolkningar av största hydrauliska konduktivitet för en enskild mätsektion i respektive borrhål (K_{max}). Vidare redovisas det geometriska medelvärdet (K_g) av den hydrauliska konduktiviteten för hela testlängden i varje kärnborrhål. Populationen av de hydrauliska konduktiviteterna för mätsektionerna antas vara lognormalfördelad.

Kärn-borrhål	**Testad borrhåls-längd (m)**	**Total antal sektioner**	**Tolkningar och största K-värde (K_{max})**	**K_g (m/s)**
16WS02K	12	2	Två sektioner med tolkad konduktivitet där K_{min}= 3,9·10^{-7} m/s och K_{max}=4,7·10^{-7} m/s.	
16WS03K	106	17	13 sektioner med tolkad konduktivitet där K_{max}=2,6·10^{-6} m/s. Fyra sektioner ingen mätbar vattenförlust (K<2·10^{-10} m/s).	2,0·10^{-9}
17WS01KB	21	4	Fyra sektioner med tolkad konduktivitet där K_{max} =1,2·10^{-6} m/s	3,9·10^{-7}
17WS02KB	36	6	Sex sektioner med tolkad konduktivitet där K_{max} =3,7·10^{-6} m/s.	7,2·10^{-8}
17WS03KB	27	5	Fyra sektioner med tolkad konduktivitet där K_{max} =5,8·10^{-6} m/s. En sektion med ingen mätbar vattenförlust	9·10^{-8}
17WS04KB	27	5	Fem sektioner med tolkad konduktivitet där K_{max} =1·10^{-4} m/s, dock något osäker utvärdering	2,2·10^{-6}

I samtliga kärnborrhål utom 16WS02KB identifierades minst en zon med relativt stor genomsläpplighet (K> 1·10^{-6}). I den mest vattenförande zonen, i 17WS04KB, är utvärderingen dock lite osäker. Under mätningen uppkom ett flöde om 37 l/min, men övertrycket var ej stabilt.

I hammarborrhål 16W163H utfördes vattenförlustmätning i två testsektioner om sex meter. Mätning genomfördes på djupet 22 till 34 meter. I en av dessa var berget så tätt att flödet låg under mätgränsen. Den hydrauliska konduktiviteten i den testade sektionen där vattenförlust uppmättes beräknas till K=1,7·10^{-8} m/s. Resultatet visas i Tabell 2.

I hammarborrhål 16W164H var berget så tätt ner till 35 meters djup att flödet låg under mätgränsen. Därefter hade berget rasat in vilket medförde att manschetten inte kunde föras ner djupare.

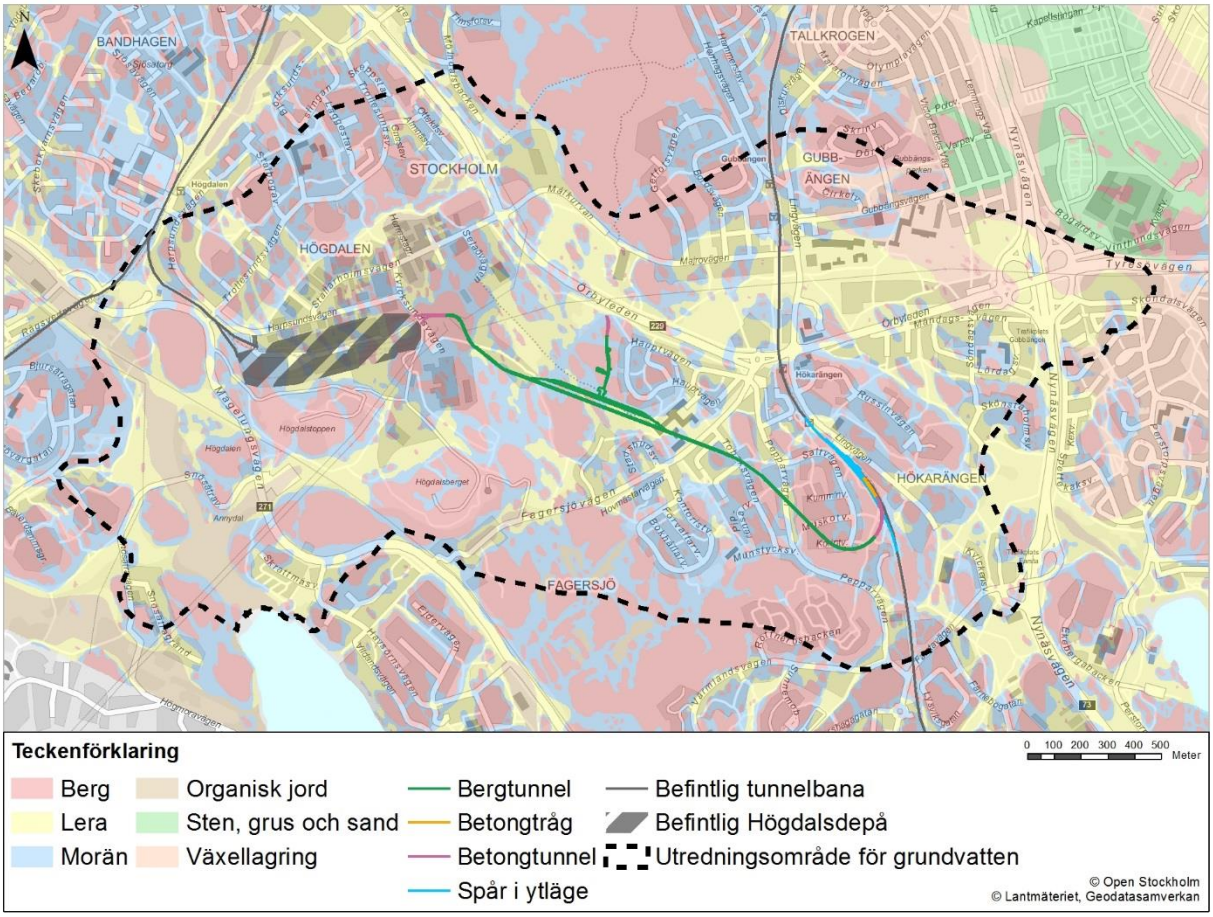
Tabell 2 Hammarborrhål med tolkningar av största hydrauliska konduktivitet för en enskild mätsektion i respektive borrhål (K_{max})

Hammar-borrhål	**Testad borrhåls-längd (m)**	**Total antal sektioner**	**Tolkningar och största K-värde (K_{max})**
16WS163H	12	2	En sektion med tolkad konduktivitet där K_{max}=1,7·10^{-8} m/s. En sektion ingen mätbar vattenförlust (K<5·10^{-9} m/s).
16WS164H	24	1	Ingen mätbar vattenförlust (K<5·10^{-9} m/s).

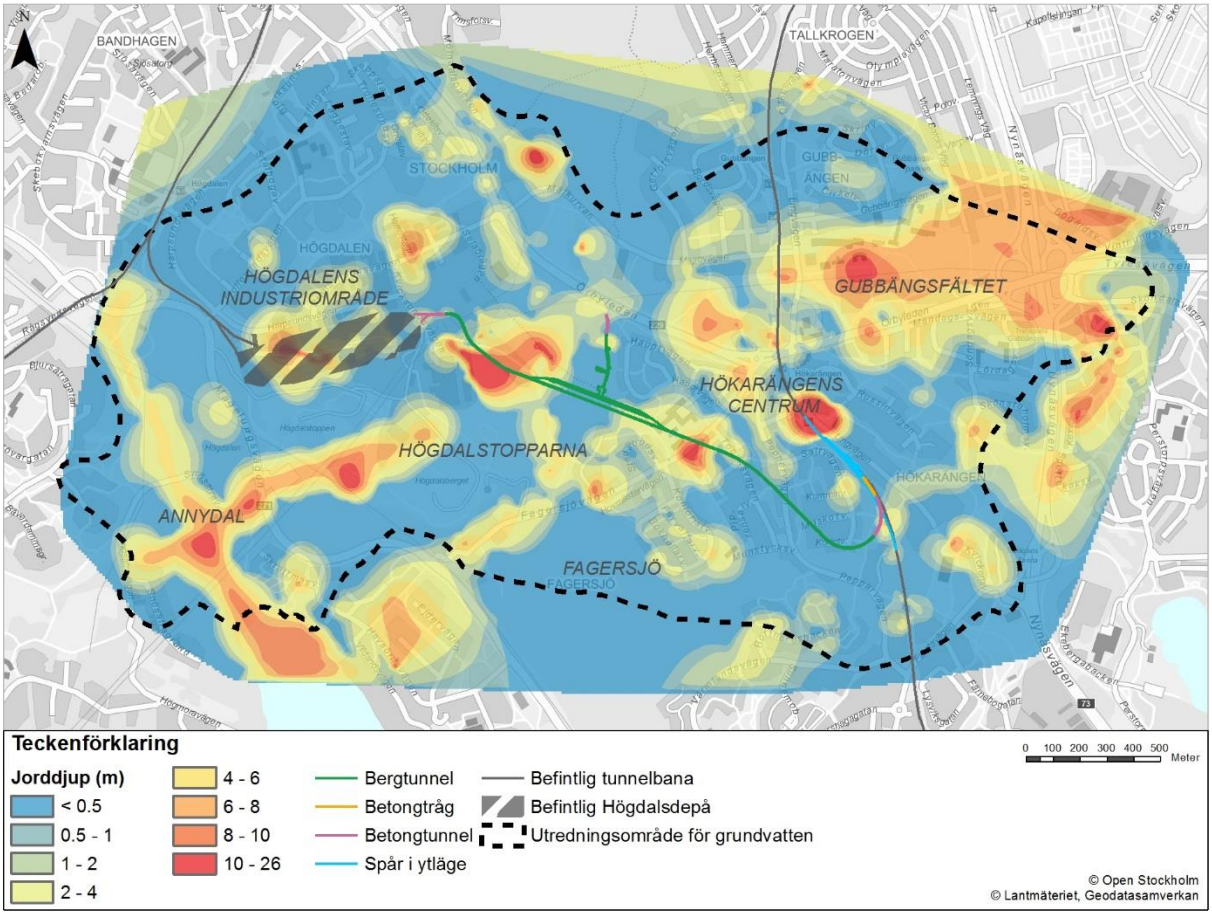
3.4 Jordlager

Områdets jordartsgeologi framgår i figur 8. De östra delarna av utredningsområdet angränsar till Stockholmsåsens isälvsavlagring som sträcker sig i nordnordvästlig riktning. Isälvsavlagringen består främst av grus och sand med inslag av sten och block. Direkt väster om åsen breder ett kuperat sprickdalslandskap ut sig med lerfyllda sänkor. Jorddjupet varierar mycket inom utredningsområdet. I figur 9 visas jorddjupskartan över utredningsområdet. I Bilaga C2 redovisas en sektion med jordmäktighet och lerdjup från Högdalstopparna till Gökdalens våtmark, tvärs över planerad spårtunnel.

Geologin inom utredningsområdet består, enligt byggnadsgeologiska kartan, främst av berg med ovanliggande friktionsjord mellan 0-10 meter. Ett större leromräde, Gubbängsfältet, finns dock i höjd med Hökarängens centrum i utredningsområdets östra del. Lerområdet sträcker sig mellan bergsområdena i östvästlig riktning. Lera förekommer även i anslutning till området för befintlig Högdalsdepå vid Högdalens industriområde. Fyllnadsmassor förekommer inom det gamla deponiområdet, Högdalstopparna, väster samt söder om den planerade tunnelbanedepån. Generellt återfinns även fyllnadsmassor ovan naturliga jordlager inom bebyggda områden. Berg i dagen samt block förekommer frekvent i området. Sydvästra delen av utredningsområdet utgörs av en större lerfylld sänka, Annydal, som består av tre förgreningar. Den södra förgreningen ligger i anslutning till sjön Magelungen



Figur 8 Jordarter inom utredningsområdet.



Figur 9 Tolkade jorddjup inom utredningsområdet.

3.4.1 Geotekniska förhållanden

I Bilaga C7 behandlas teoretiska beräkningar av eventuella sättningar som kan orsakas av grundvattensänkningar. Beräkningar baseras på geotekniska sonderingar [3]. Redovisning av sättningsbenägna områden görs inom influensområdet för grundvatten, då ingen grundvattenpåverkan bedöms uppkomma utanför influensområdet. Influensområdet redovisas i kapitel 4.

Huvudsyftet är att beskriva och bedöma hur leromården påverkas av en grundvattensänkning till följd av grundvattenbortledning i de planerade undermarksanläggningarna samt kvantifiera sättningarnas storlek. Områdesindelningen nedan motsvarar den indelning som utförts av undre grundvattenmagasin inom utredningsområdet, se avsnitt 3.5.

Beräkning av sättningsrisk (konsolideringssättningar under lång tid, 100 år) har utförts för 0,3, 1 och 3 meters antagen grundvattensänkning. Sättningsbenägna områden definieras som områden där det sannolikt förekommer minst en meter lös lera. Generellt ökar sättningsbenägenheten mot de centrala delarna av lerfyllda svackor där lermäktigheterna är större än vid randzonerna.

För lokalisering av nedan beskrivna områden, se Figur 11.

Gubbängsfältet västra

Leran i områdets nordvästra del är överkonsoliderad. Inga marksättningar bedöms pågå i denna del av området. Inom området visar utförda sättningsberäkningar dock på upp till 3 centimeter sättning vid grundvattensänkning med en meter under två år.

Leran i områdets sydöstra del är överkonsoliderad, det vill säga i anslutningen till korsningen mellan Örbyleden och befintlig tunnelbana. Inga marksättningar bedöms pågå i denna del av området. Inom området visar utförda sättningsberäkningar på 0 centimeter sättning vid grundvattensänkning med en meter under två år, för en grundvattenavsänkning på 3 meter under två år visar sättningsberäkningar på 1 centimeter.

Leran i områdets södra del är överkonsoliderad, det vill säga öster om läget för uppställningshallen under mark. Inga marksättningar bedöms pågå i denna del av området. Inom området visar utförda sättningsberäkningar på 0 centimeter sättning vid grundvattensänkning med en meter under två år, för en grundvattenavsänkning på 3 meter under två år visar sättningsberäkningar på 1 centimeter.

Leran inom de centrala delarna av magasinet, längs Örbyleden i höjd med påslaget till arbets-/servicetunneln är överkonsoliderad. Inga marksättningar bedöms pågå i denna del av området. Dock visar sättningsberäkningar på cirka 1 centimeter sättningar vid grundvattensänkning med en meter under två år, för en grundvattenavsänkning på 3 meter under två år visar sättningsberäkningar på 7 centimeter.

Generellt bedöms Gubbängsfältet ej vara sättningsbenäget. Dock är leran i områdets centrala och nordvästra del mer sättningsbenägen än övriga delar av området.

Högdalen östra

Baserat på utvärderade sonderingar bedöms lera vara kraftigt överskonsoliderad och därmed ej sättningsbenägen vid grundvattensänkning.

Högdalen norra

Jorden består av fyllning för vägar och andra hårdgjorda ytor. Leran i området bedöms generellt ha liten mäktighet och vara överkonsoliderad. Risken för skadliga marksättningar bedöms som liten.

Fagersjö

Leran i området är överkonsoliderad. Inga marksättningar bedöms pågå i denna del av området. Inom området visar utförda sättningsberäkningar på 0 centimeter sättning vid grundvattensänkning med en meter under två år, för en grundvattenavsänkning på 3 meter under två år visar sättningsberäkningar på 1 centimeter. Leran i området bedöms ej vara sättningsbenägen.

Pepparvägen och Lingvägen södra

Teoretiska beräkningar av sättningar för de båda mindre leromården har inte utförts. Dock bedöms mot bakgrund av sättningsbenägenheten generellt inom område att även leran inom Pepparvägen och Lingvägen södra inte är sättningsbenägen. Undersökningar pågår och beräknas vara klara hösten 2019.

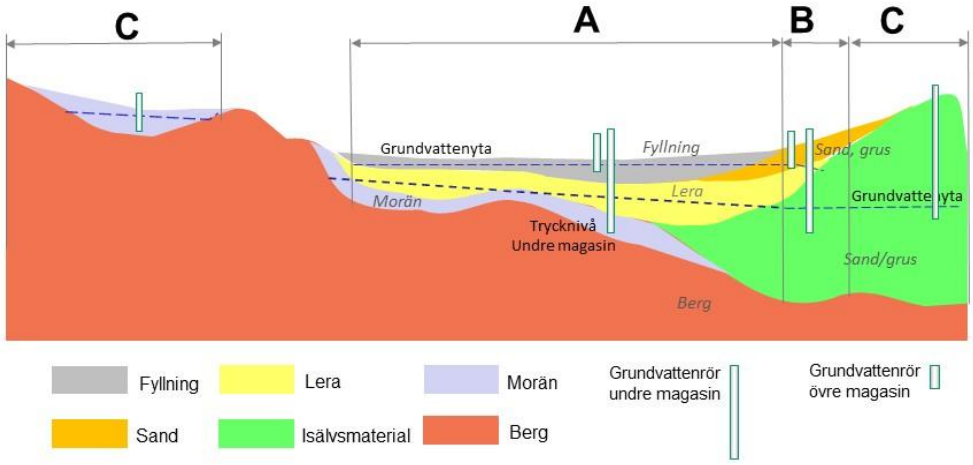
3.5 Grundvatten

Större sammanhängande förekomster av grundvatten förkommer i huvudsak i öppna sprickor i berg, i naturliga friktionsjordlager samt i mer eller mindre omfattning i fyllnadsmaterial. Sprickor

i berg uppträder som svaghetszoner eller som system av enskilda sprickor som i varierande grad kommunicerar med varandra. Då den planerade spårsträckningen till största delen går i berg kommer främst grundvattenförhållandena i berget att påverkas. Inom utredningsområdet förkommer även ett antal grundvattenmagasin i jord, bilaga C4. Grundvattenmagasinen i jord förekommer dels som slutna grundvattenmagasin i friktionsjord under lera och dels som öppna grundvattenmagasin, vanligen i ytligt liggande fyllning eller naturlig jord, se Figur 10. I de flesta fall förkommer grundvattenmagasinen i sänkor som undre grundvattenmagasin i friktionsjord överlagrad av lera.

Strömningsriktningar och avrinning bestäms av vattendelare. Generellt utgör höjdområden, i form av bergsryggar, vattendelare. Utredningsområdet kan indelas i mindre delavrinningsområden med avgränsade undre grundvattenmagasin i jord som står i liten hydraulisk förbindelse med varandra, huvudsakligen via berg. I Figur 10 visas en schematisk bild av olika typer av grundvattenmagasin.

Olika typer av grundvattenmagasin



- Inom område A finns ett övre öppet magasin i friktionsjord (fyllning) och ett undre slutet magasin i friktionsjord (isälvsmaterial på morän eller enbart morän). Trycknivån i det undre magasinet ligger lägre än grundvattenytan i det övre magasinet.
- Inom område B finns ett övre öppet magasin i friktionsjord (sand) och ett undre öppet magasin i friktionsjord (isälvsmaterial). Grundvattenytan i det undre magasinet ligger lägre än grundvattenytan i det övre magasinet.
- Inom område C finns ett öppet magasin i morän (vänster i figuren) eller isälvsmaterial (höger i figuren).

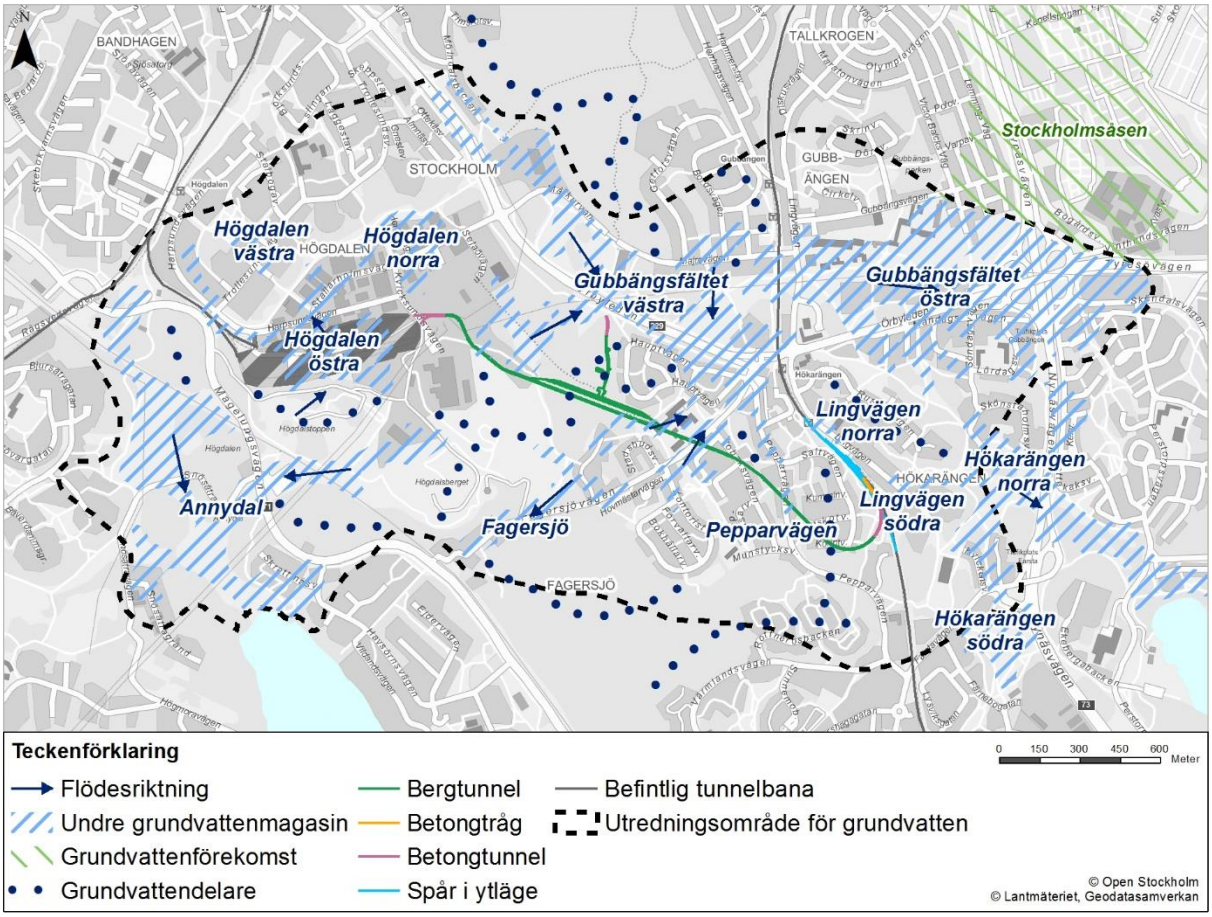
Figur 10 Schematisk figur av olika typer av grundvattenmagasin.

En trycksänkning i ett slutet grundvattenmagasin under sättningsbenägen lera kan leda till marksättningar. Dessa magasin betecknas därför som känsliga och karteras specifikt.

Öppna grundvattenmagasin i fyllningsmassor finns i princip inom hela utredningsområdet. Dessa magasin betraktas inte som känsliga med avseende på sättningsrisker. Grundvattennivåerna i dessa magasin styrs till stor del av dränerande stråk i den urbana miljön, hårdgörningsgrad av mark samt förekomst av så kallat lokalt omhändertagande av vatten (LOD-anläggningar). Många

av dessa magasin är inte varaktiga under året utan är periodvis torra. Normalt har grundvattenytans läge i dessa magasin ingen koppling till risk för sättningar och liten koppling till växttillgängligt vatten. Inom vissa områden med ytligt liggande grundvattenyta kan en koppling till växttillgängligt vatten finnas. Detta är dock ovanligt i den urbana miljön. Öppna magasin pekas därför inte ut specifikt i grundvattenkarteringen, med undantaget för Stockholmsåsen (grundvattenförekomst).

Grundvattenmagasinen i naturlig jord visas översiktligt i Figur 11 samt i Bilaga C4. Nedan beskrivs grundvattenmagasinen inom de olika delområdena.



Figur 11 Områdesindelning och grundvattenmagasin i jord, tolkade vattendelare och flödesriktningar inom utredningsområdet.

Gubbängsfältet östra

Området utgörs av ett sammanhängande undre magasin i jord som angränsar till Stockholmsåsen i öst. Området är delvis uppbrutet av områden med berghällar och tunt jordtäcke på berg. Jorddjupet uppgår till som mest 13 meter i undersökta punkter. Överst utgörs jorden i området till stor del av lera och/eller fyllning, med lermäktigheter på upp till 8 meter. Under leran har friktionsjord med cirka 3-4 meters mäktighet påträffats. Området avgränsas i norr och syd av bergshöjder. I väster avgränsas området enligt byggnadsgeologiska kartan av ett långsträckt moränområde uppbrutet av områden med berg i dagen.

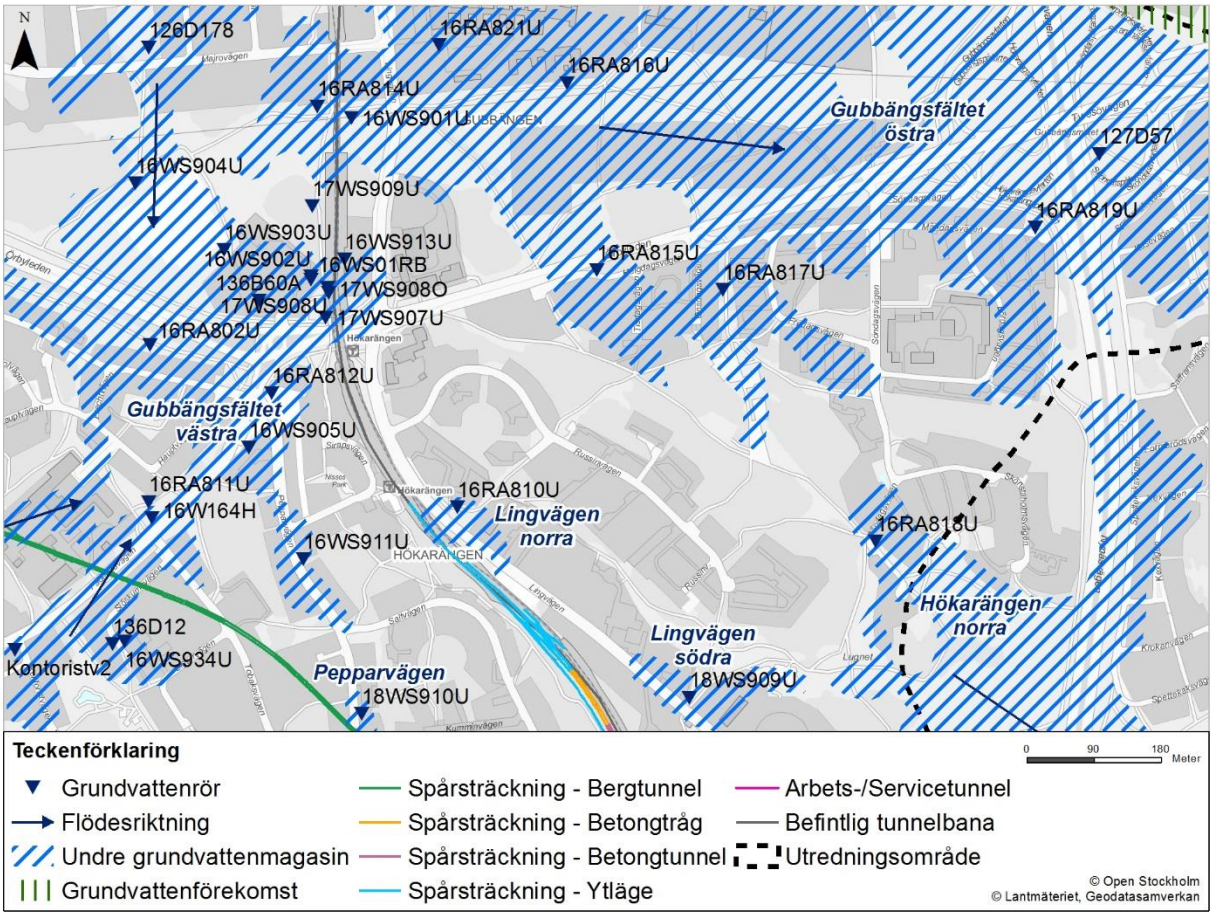
Bergytan i moränområdena påträffas cirka 1-2 meter under markytan [1].

Grundvattennivåuppgifter inom området har registrerats från olika grundvattenrör sedan 1970-talet. Nya grundvattenrör har installerats under 2016 till 2019 i området. I Figur 12 visas placeringen av de grundvattenrör vars mätserier redovisas i diagram i Figur 13

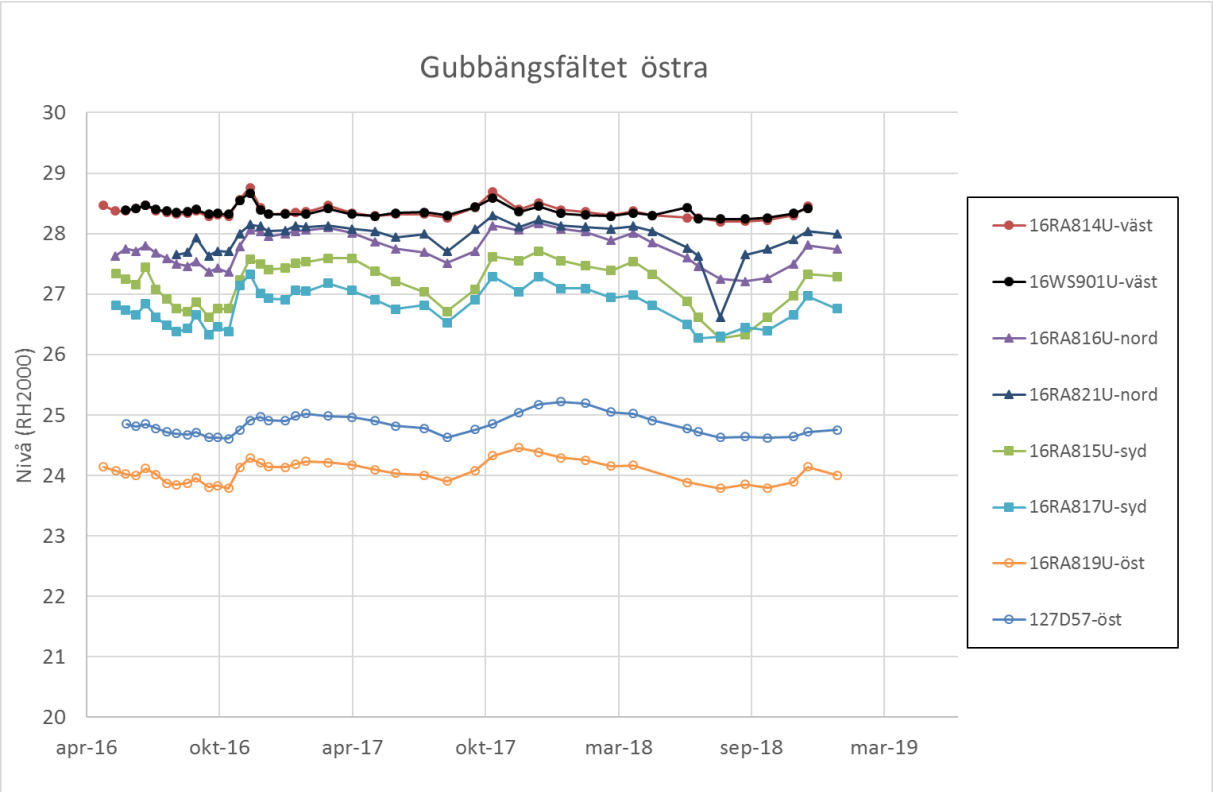
Grundvattennivån i den västra delen är cirka +28 (16RA814U), Figur 12 och Figur 13. I den norra och södra delen ligger grundvattennivån på cirka +28 (16RA821U) respektive cirka +27 (16RA817U). I den östra delen uppmätts nivåer på cirka +25 (127D57).

Baserat på uppmätta grundvattenvattennivåer bedöms strömningsriktningen ske öster ut.

Enligt utfört slugtest i den västra delen av området har den hydrauliska konduktiviteten i undre magasin beräknats till $K=3 \cdot 10^{-6}$ m/s vid rör 16WS901U [1], Figur 7.



Figur 12 Grundvattenrör i jordmagasin inom östra delen av utredningsområdet.

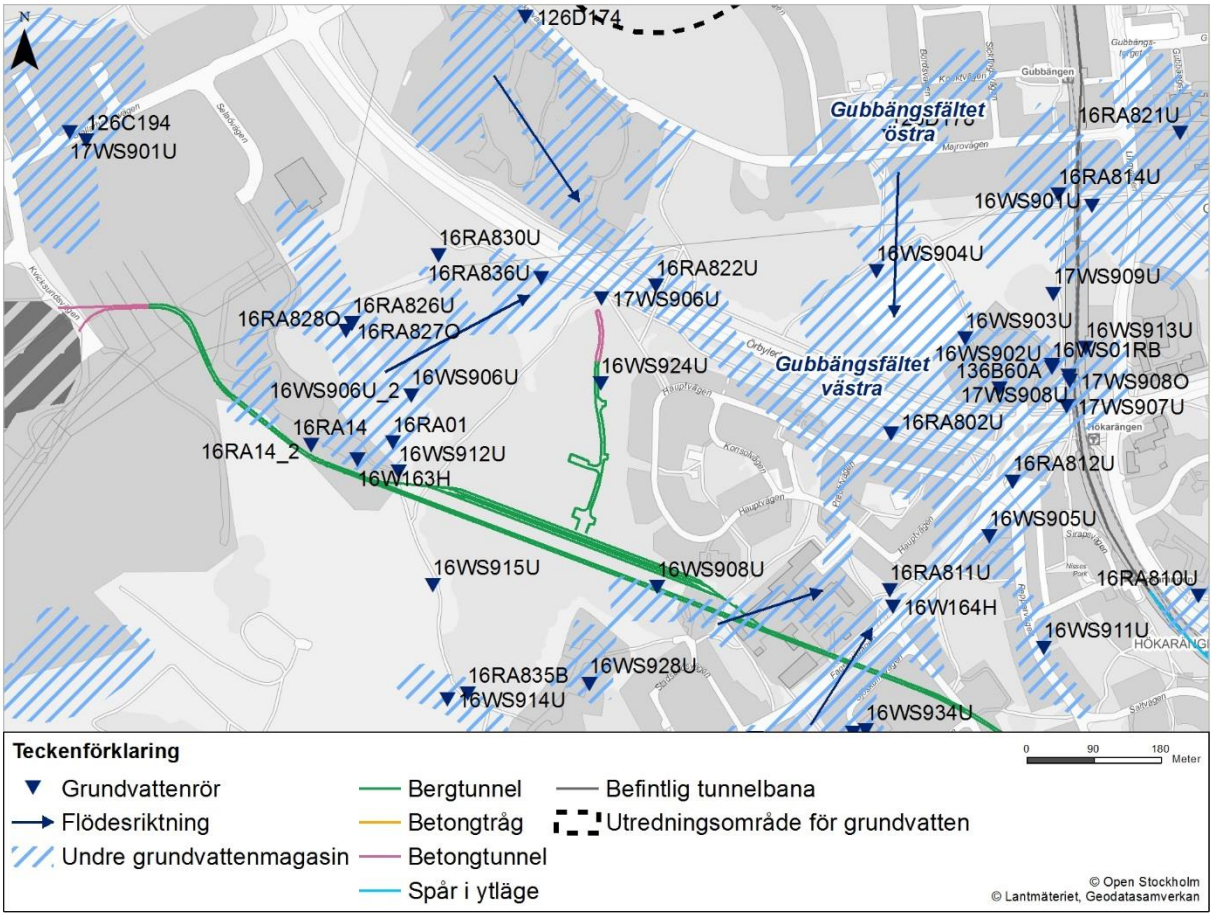


Figur 13 Nivåmätningar i det undre grundvattenmagasinet Gubbängsfältet östra.

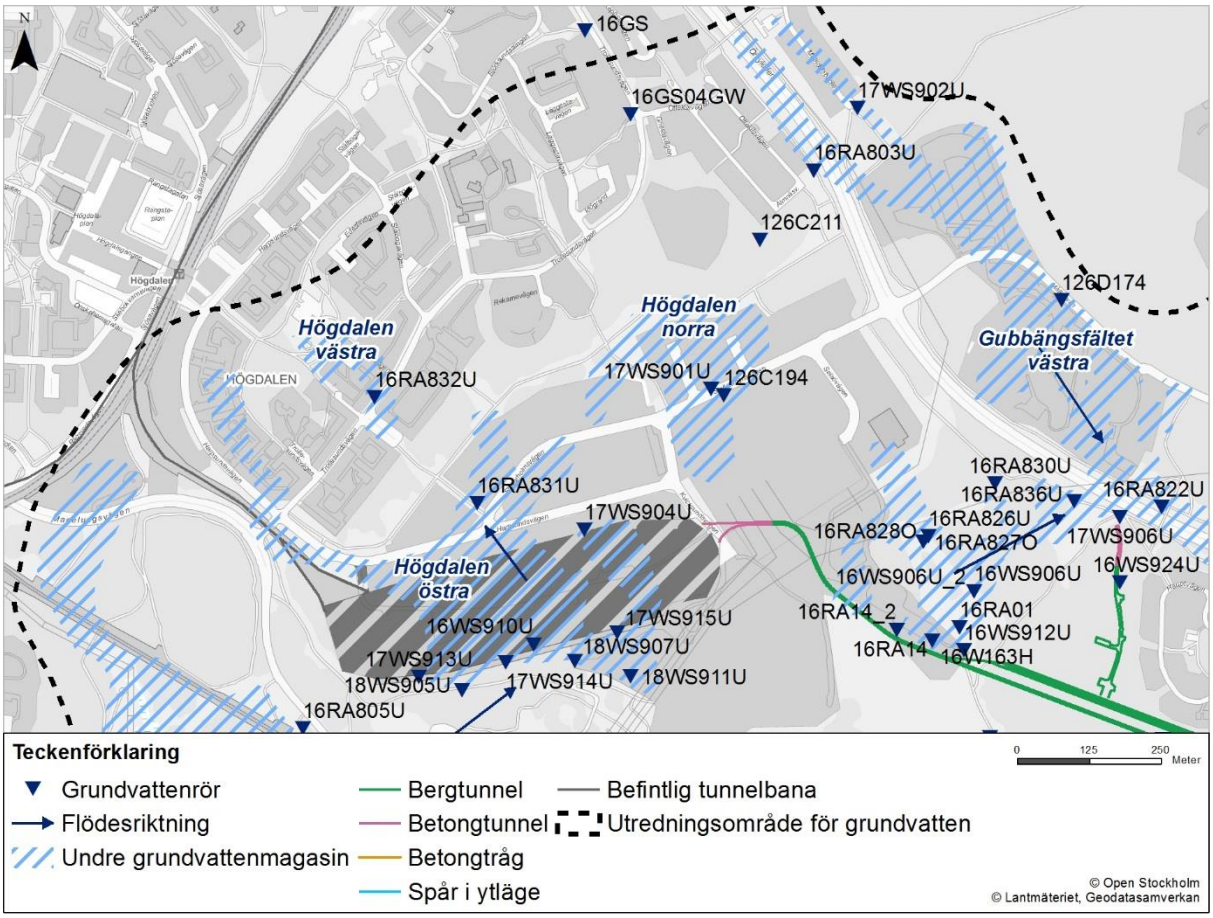
Gubbängsfältet västra

Grundvattenmagasinet ligger i den centrala delen av ett större sammanhängande lerfyllt område. Magasinet förgrenar sig dels i en södergående lerfylld svacka belägen direkt väster om Hökarängens centrum, och dels i en lerfylld svacka i nordvästlig riktning längs med Örbyleden. Jorddjupet uppgår till som mest cirka 10 meter i undersökta punkter. Överst utgörs jordlagren i området till stor del av lera och/eller fyllning, med lermäktigheter på upp till 7 meter. Under leran har friktionsjord med ett par meters mäktighet påträffats. Magasinet begränsas i norr av uppstickande bergshöjder i anslutning till Gubbängen området väster om Gubbängen och söderut av det stråk av höga berglägen som sträcker längs med Örbyledens södra sida.

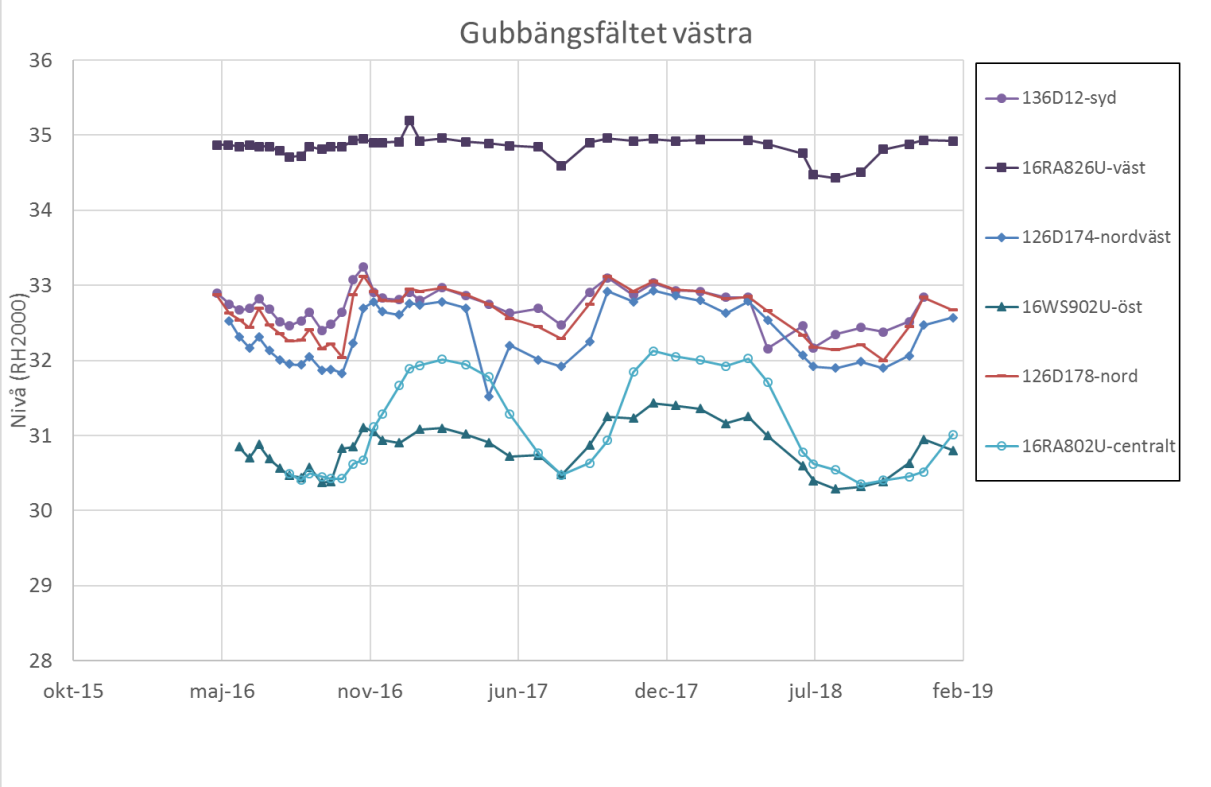
Grundvattennivån i den nordvästra delen är cirka +32 (126D174), Figur 15 och Figur 16. I den norra och södra delen ligger grundvattennivån på cirka +33 (126D178) respektive cirka +33 (136D12). I den östra delen uppmätts nivåer på cirka +31 (16WS902). Strömningsriktningen bedöms vara riktad åt öst, Figur 14 och Figur 15.



Figur 14 Grundvattenrör i jordmagasin inom de centrala delarna av utredningsområdet.



Figur 15 Grundvattenrör i jordmagasin inom de norra och västra delarna av utredningsområdet.



Figur 16 Nivåmätningar i det undre grundvattenmagasinet Gubbängsfältet västra.

Grundvattennivåerna mellan de närbelägna delarna Gubbängsfältet västra respektive Gubbängsfältet östra skiljer sig åt med cirka 2,2 till 4,1 meter, Figur 13 och Figur 16. Magasinen skiljs åt av ett avlångt moränområde, med en genomsnittligt bredd på cirka 50-100 meter, uppbrutet av uppstickande områden med berg i dagen. Enligt sonderingar utförda tvärs bergmoränryggen uppgår jorddjupet till mellan 0 till 2 meter. Magasinen har troligen en viss kontakt med varandra, om än begränsad. Dock kan kontakt och grundvattenströmning mellan magasinen ske genom berggrunden då bergundersökningar visar på förekomst av vattenförande ytligt berg [1, 2].

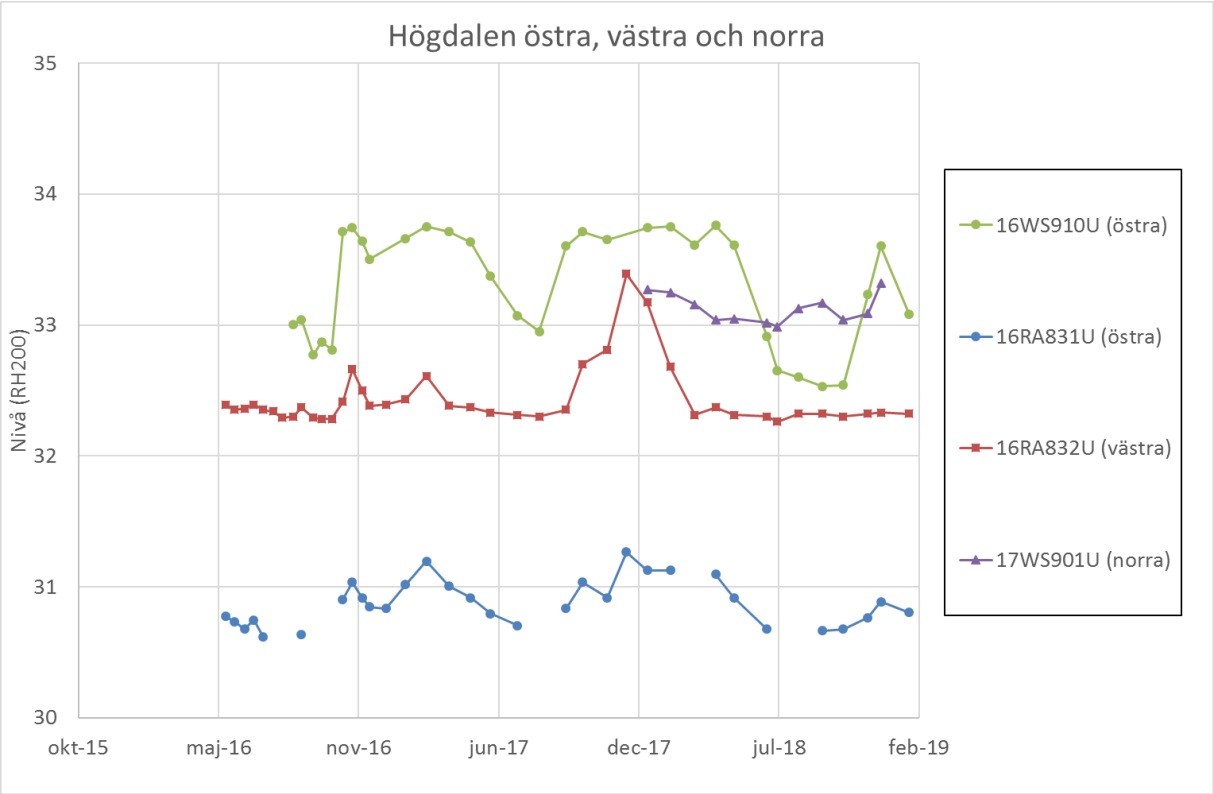
I området, direkt väster om korsningen mellan Örbyleden och befintlig tunnelbana, har ett infiltrationstest utförts. Baserat på testet bedömdes en hydraulisk konduktivitet i det undre magasinet på mellan $K=4\cdot10^{-8}$ till $K=4\cdot10^{-7}$ m/s. Flera slugtester har även utförts i grundvattenrör inom magasinet. Baserat på utförda slugtester har hydrauliska konduktiviteter i det undre magasinet Gubbängsfältet västra beräknats till mellan $K=2\cdot10^{-7}$ till $K=2\cdot10^{-5}$ m/s, Figur 7 [1].

Högdalen norra

Högdalen norra är en mindre isolerad lerfylld svacka. Sonderingar i området omfattar provpunkter där jordlagerföljden endast består av lera och djupet är cirka 5 meter. Men här finns även sonderingspunkter med djup överstigande 10 meter och där huvuddelen utgörs av friktionsjord eller växelvisa lager av lera och friktionsjord [1]. Grundvattennivåer har uppmätts i området från och med 2018 där grundvattennivån uppgår till cirka +33 (17WS901U), Figur 15. Svackan avgränsas åt alla håll av områden med berg i dagen och bedöms inte ha kontakt med andra magasin.

Högdalen västra

Högdalen västra är en mindre, isolerad svacka. Överst utgörs jorden i området till stor del av lera och/eller fyllning. Därunder förekommer lera till som mest 6 meters djup i undersökta punkter. Under leran har friktionsjord med cirka 1-4 meters mäktighet påträffats. Enligt jordartskartan förekommer organiskt material inom områdets sydvästra del. Grundvattennivåer har uppmätts i området från och med 2016 där grundvattennivån uppgår till +32,4 (16RA832U), Figur 15 och Figur 17. Svackan avgränsas åt alla håll av områden med berg i dagen och bedöms inte ha kontakt med andra magasin.



Figur 17 Nivåmätningar i de undre grundvattenmagasinen Högdalen östra och Högdalen västra. Avbrott i mätserie för 16RA831 beror på torrt grundvattenrör.

Högdalen östra

Grundvattenmagasinet utgörs av en lerfylld sänka som är belägen i anslutning till befintlig Högdalsdepå. Området är uppbrutet av flertalet mindre moränryggar med berg i dagen i nordvästlig-sydostlig riktning. Vidare finns en mindre förgrening av magasinet som sträcker västerut. Baserat på sonderingar redovisade i geoarkivet utgörs markprofilen vid depån generellt av fyllnadsjord ovan lera och fiktionsjord, alternativt saknas lera och friktionsjorden ligger direkt på berg [1]. Centralt inom området påträffas jorddjup på cirka 11 meter där cirka 2 meter fyllnadsjord överlagrar 7 meter lera följt av ett friktionsjordlager på berg. Jorddjupet är dock generellt mindre i den östra delen av magasinet. Grundvattennivåer i den södra delen är cirka +33 (16WS910U), Figur 17 och Figur 15. I den norra delen ligger grundvattennivån på cirka +31 (16RA831U). Strömningsriktningen bedöms vara riktad åt norr. Svackan avgränsas åt alla håll av områden med berg i dagen och bedöms inte ha kontakt med andra magasin.

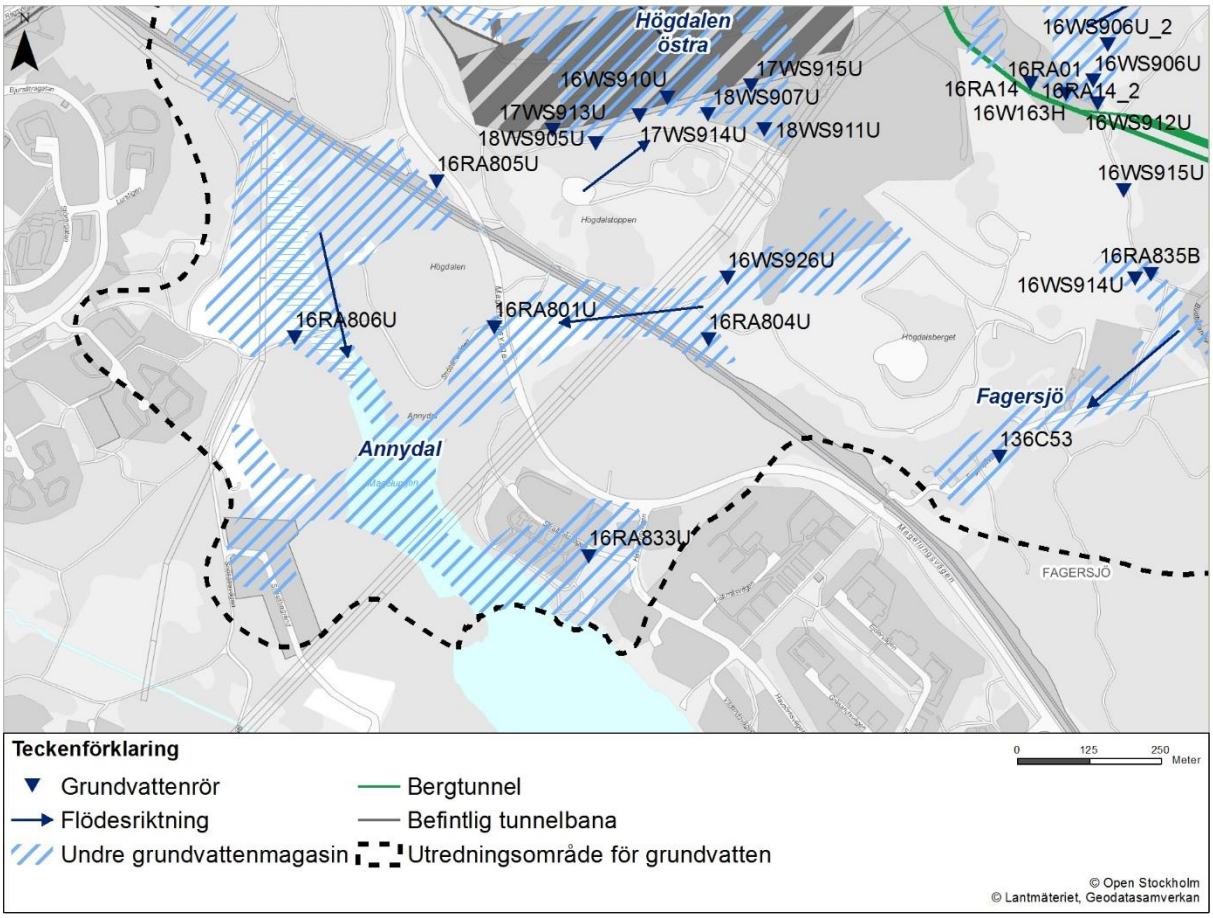
Fagersjö

Fagersjömagasinet utgörs av en mindre isolerad lerfylld sänka belägen sydväst om Hökarängens centrum. Sänkan sträcker längs med Fagersjövägen i sydvästlig riktning. Inom sänkan återfinns ställvis mindre områden med berg i dagen.

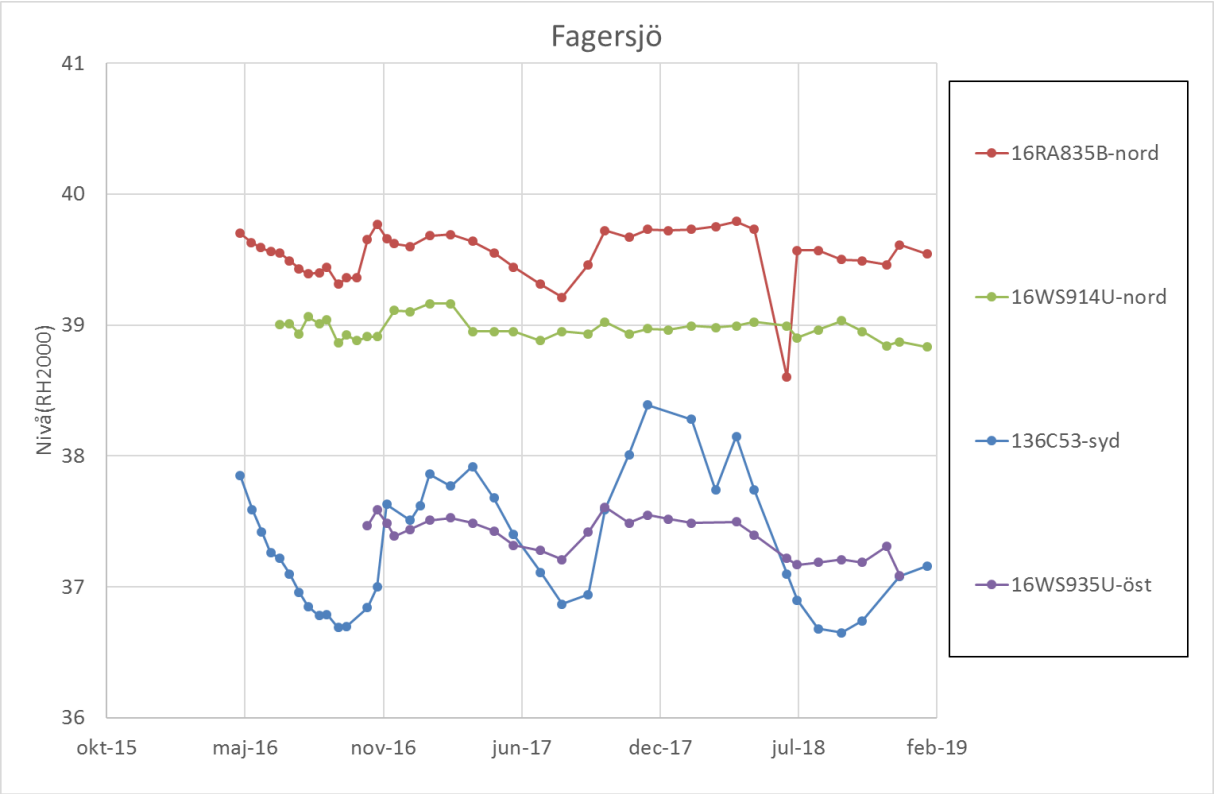
Enligt utförda sonderingar konstateras jorddjup på 10 meter. Lera förekommer till som mest 6 meters djup i undersökta punkter. Under leran har friktionsjord med cirka 1-4 meters mäktighet påträffats.

Grundvattennivåer i den södra delen och östra delen ligger kring +37 (136C53) respektive +37 (16WS935U), Figur 18 och Figur 19. I den norra delen av magasinet ligger grundvattennivån kring +39 respektive +40 (16WS914U och 16RA835U). Strömningsriktningen bedöms vara riktad huvudsakligen åt sydväst.

Enligt utförda slugtest har en hydraulisk konduktivitet i området beräknats till $K=1\cdot10^{-8}$ m/s vid rör 16WS914U, Figur 7 [1].



Figur 18 Grundvattenrör i jordmagasin inom den sydvästra delen av utredningsområdet.



Figur 19 Nivåmätningar i det undre grundvattenmagasinet Fagersjö.

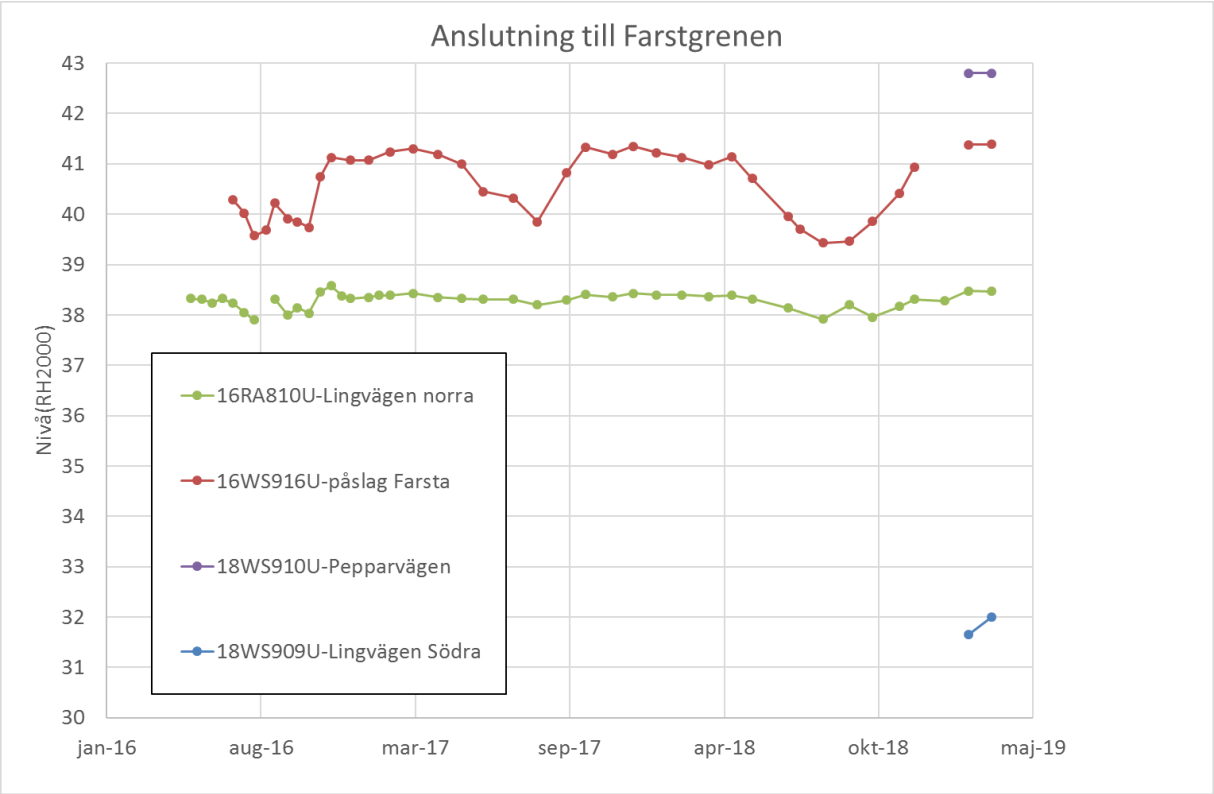
Grundvattenmagasin – anslutning till Farstagrenen

Längs anslutningstunneln samt i området kring påslaget till Farstagrenen förkommer ett antal mindre grundvattenmagasin.

Pepparvägen är en mindre isolerad lersvacka. Jorddjupet uppgår till cirka 7 meter där översta metern utgörs av 1 meter fyllning följt av 3 meter lera överlagrat ett 3 meter mäktigt lager av friktionsjord. Grundvattennivån uppgår till cirka +43 (18WS910U), Figur 20.

Lingvägen norra är en mindre, isolerad lersvacka. Jorddjupet uppgår totalt till 2 meter där översta metern utgörs av fyllning följt av 0,5 meter lera överlagrat ett tunt lager friktionsjord. Grundvattenivån uppgår till cirka +38 (16RA832U), Figur 20. Svackan avgränsas åt alla håll av områden med berg i dagen och bedöms inte ha kontakt med andra magasin.

Lingvägen södra är en mindre isolerad lersvacka. Jorddjupet uppgår till cirka 7 meter där översta metern utgörs av 1 meter fyllning följt av 3 meter mäktiga växelvisa lager av lera och fin friktionsjord överlagrat ett 2 meter mäktigt lager av friktionsjord. Grundvattenivån uppgår till cirka +32 (18WS909U). Magsinet bedöms vara isolerat då det i huvudsak omsluts av bergmoränområden.



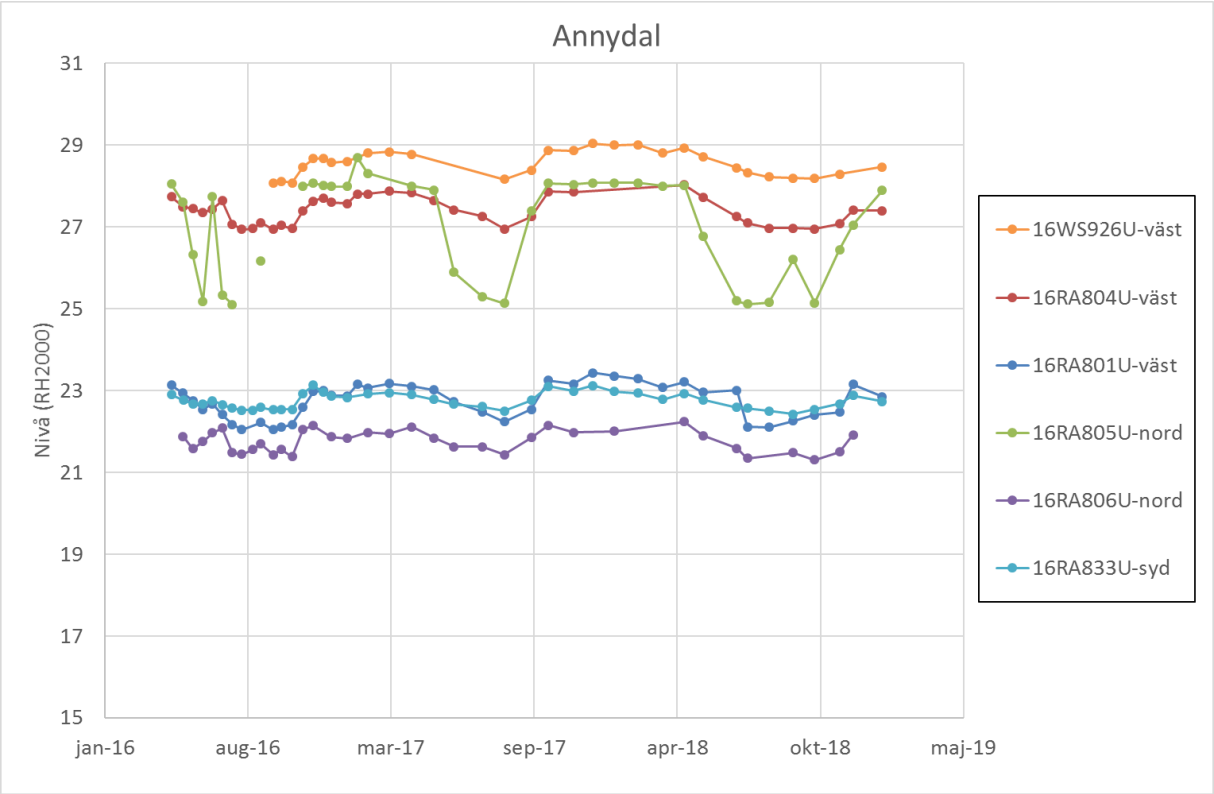
Figur 20 Nivåmätningar i det undre grundvattenmagasinen vid anslutning till Farstagrenen.

Annydal

Magasinet i Annydal utgörs av tre förgreningar med lerfyllda sänkor söder om befintlig Högdalsdepå. Den södra grenen ligger i anslutning till sjön Magelungen. Utförda sonderingar visar här att jorddjupet är 7 meter, där 6,5 meter lera överlagrar ett friktionsjordlager på 0,5 meter. Grundvattennivån ligger på cirka +23 (16RA833), Figur 18 och Figur 21.

Sonderingar utförda i den norra förgreningen som sträcker i nordostlig riktning mot befintligt Högdalsdepå visar på jorddjup på som mest cirka 15 meter, där i huvudsak lera överlagrar cirka 1 meter friktionsjord. I denna gren ligger grundvattennivån kring +28 respektive +27 (16WS926U och 16RA804U) baserat på mätningar under 2016 och 2017. Längre söderut visar sonderingar på cirka 6 meters jorddjup med en lagerföljd av 2 meter fyllnadsjord, 2,5 meter lera och 1,5 meter friktionsjord ovanpå berg. Grundvattennivån ligger här på cirka +23 (16RA801U).

Sonderingar i den norra grenen som stryker i nordvästlig riktning från Magelungen visar på 4 meter jorddjup med en lagerföljd av 1 meter fyllnadsjord, 2 meter lera och 1 meter friktionsjord ovanpå berg. Grundvattennivån ligger här på cirka +27 (16RA805). Längre söderut, närmare Magelungen, visar sonderingar på cirka 2 meters jorddjup som till huvuddelen utgörs av friktionsjord ovanpå berg. Grundvattennivån ligger här på cirka +22 (16RA806U).

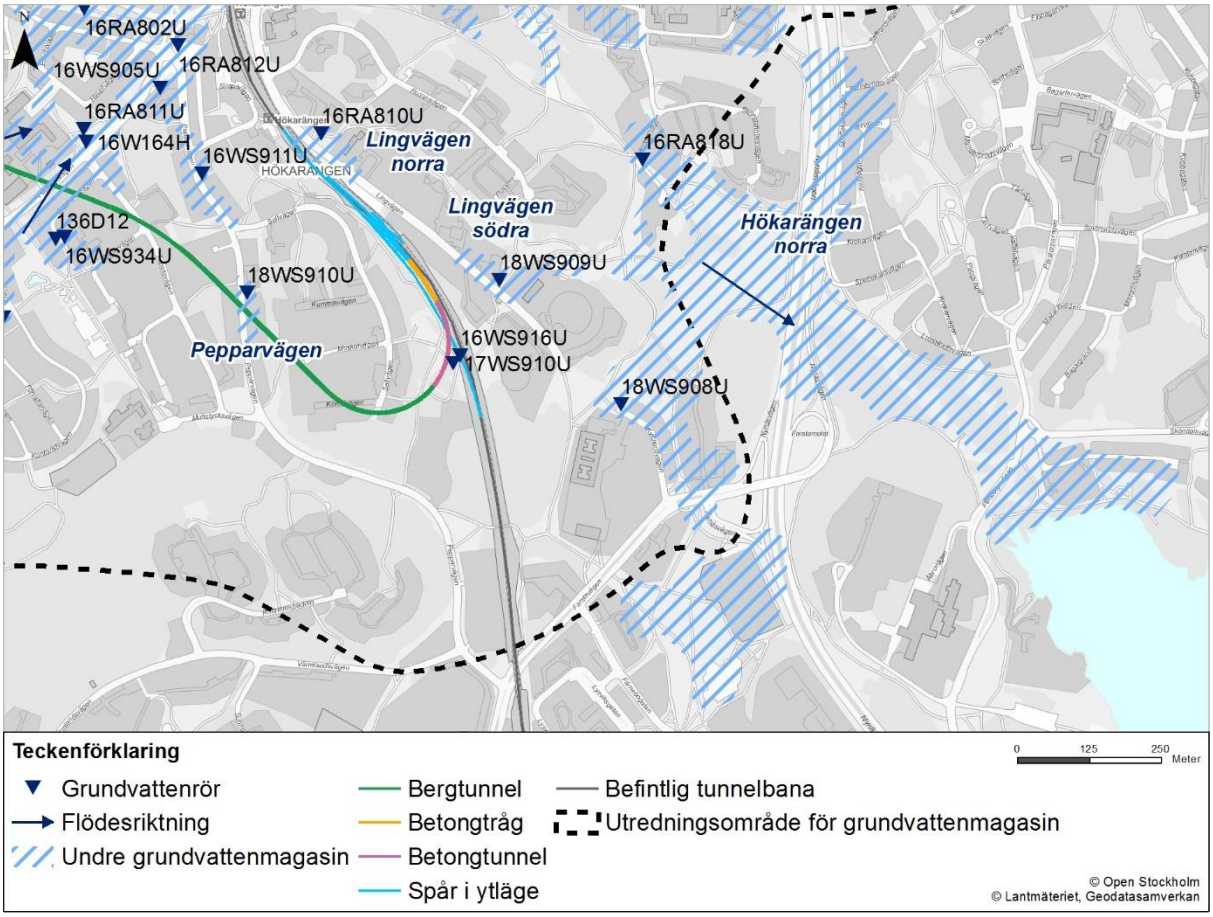


Figur 21 Nivåmätningar i det undre grundvattenmagasinet Annydal. Avbrott i mätserie för 16RA805 beror på torrt grundvattenrör.

Hökarängen norra

Magasinet är beläget öster om Hökarängens centrum och breder ut sig österut tvärs Nynäsvägen och vidare mot Drevviken. Sonderingar redovisade i geoarkivet visar på jorddjup i de västra delarna på cirka 4 meter med en lagerföljd av 1 meter friktionsjord, 3,5 meter lera och 0,5 meter friktionsjord ovanpå berg. Centralt inom området visar sonderingar på ett jorddjup på cirka 4 meter följt av 1,5 meter friktionsjord, 3 meter lera och 0,5 meter friktionsjord ovanpå berg. Mätningar i områdets västra delar visar på en grundvattennivå på cirka +23 (137C462), Figur 22.

Magasinet är avgränsat västerut av höga berglägen, med ställvis tunt moräntäcke, där trycknivåer på cirka +40 meter har uppmätts (16WS916U). Även norrut begränsas magasinet av ett östvästligt stråk av höjdområden med friktionsjord och berg i dagen. Området bedöms därför vara väl avgränsat mot övriga magasin inom utredningsområdet.



Figur 22 Grundvattenrör i jordmagasin inom den sydöstra delen av utredningsområdet.

3.6 Vattenbalans och objekt som påverkar vattenbalansen

En vattenbalans har upprättats för planerad utbyggnad av tunneldepån i Högdalen, se Bilaga C6. Syftet med vattenbalansen är att utgöra en grund för en hydraulisk förståelse av grundvattenmagasinen. Vattenbalansen ger en översiktlig bild av storleksordningen på grundvattenflödet genom magasinen. Resultatet ger underlag för bedömning av grundvattenmagasinens känslighet för grundvattenbortledning till planerade undermarksanläggningar.

3.6.1 Klimatologi och grundvattenbildning

För att uppskatta hur stor del av nederbörden som kan bidra till grundvattenbildning har en klimatologisk vattenbalans upprättats för att beräkna nettonederbörden (den del av nederbörden som inte avdunstar). Beräkning av nettonederbörden baseras på uppgifter från SMHI gällande nederbörd, avrinningsdata och avdunstning.

I Stockholm uppgår nederbörden till 600 – 650 mm/år. Avdunstning och växtupptag uppgår generellt till 400 – 500 mm/år (SMHI, 2015). I vattenbalansberäkningarna antas en generell nettonederbörd på 190 mm/år.

I urbaniserade områden begränsas grundvattenbildningen av hårdgjorda ytor, exempelvis hustak, asfaltsytor och markplattor.

Vatten tillförs grundvattenmagasinen i jord och berg dels som nybildning som beror av nettonederbörden och dels som grundvattentillskott från andra magasin, exempelvis vid strömning mellan ett övre och undre grundvattenmagasin.

I urbana områden kan även ett betydande tillskott ske via läckande VA-ledningar.

Som det visats i flera studier är jordarternas begränsning av nybildningen av grundvatten mycket liten. Kalt bergs beskaffenhet, sprickfrekvens och lutningsförhållanden gör det dock. Men andel berg i dagen inom aktuellt område är begränsat förekommande, därtill till stor del täckt av hårdgjorda ytor som ofta är mer styrande (tätare) än det underliggande berget.

Grundvattenbildning till berg kan endast förekomma där det finns en grundvattenyta som ligger nere i berg. I alla andra fall sker nybildning till ett övre magasin i jord som täcker berget och därefter sker en grundvattenströmning till berg från detta övre magasin. Det är då huvudsakligen den hydrauliska gradienten som, tillsammans med vattengenomsläppligheten, bestämmer tillskottets storlek.

Läckage genom lera utgör normalt ett mycket litet tillskott till ett undre magasin. Läckage genom friktionsjord i randzoner jord/berg utgör normalt det dominerande tillskottet. Läckage genom berg till ett undre magasin utgör vanligen ett mindre tillskott för magasin med måttlig areell utbredning. För stora magasinsutbredningar kan tillskottet via berg vara större.

Vid en grundvattensänkning, till exempel genom grundvattenbortledning från ett undre magasin, resulterar trycksänkningen i det undre magasinet normalt i ett ökat tillskott av grundvatten till magasinet, vanligen genom ökad strömning från övre magasin och även (oftast till mindre del) genom ökad strömning från underliggande berg. En annan effekt av trycksänkning i ett undre magasin är att utflödet av grundvatten från magasinet kan minska. Ovanstående principer är även giltiga för grundvattenmagasin i berg. För övre grundvattenmagasin i urban miljö medför en grundvattensänkning oftast att andel ytligt grundvatten som avgår till dränerande stråk (väg- och husdräneringar, kringfyllnad i ledningsgravar) minskar. Samma effekt är även giltig för dränerande konstruktioner i djupare magasin, det vill säga att en trycksänkning i anslutning till sådana konstruktioner medför att grundvattenbortledningen (inläckaget) minskar. En avsänkning av grundvattenytans läge, där denna ligger relativt ytligt och därmed kan vara styrd av dränerande stråk, kan enligt resonemang ovan ses som att ”grundvattenbildningen” till magasinet ökar, även om det i egentlig mening snarare är att utdräneringen av grundvatten minskar. Vad gäller läckande, ej trycksatta, VA-ledningar, så kan en grundvattensänkning dock leda till ökad grundvattenbildning. Detta genom att ett inläckage till en otät VA-ledning kan omvandlas till ett utläckage från densamma. Av betydelse är således att beakta att det för magasin där nivån till större eller mindre del styrs av befintliga dränerande konstruktioner finns en viss ”buffert” vid en måttligt ökad grundvattenbortledning. Denna buffert utgörs av det grundvatten som dräneras till befintliga konstruktioner och denna buffert minskar effekten (nivåsänkningen) av en ökad grundvattenbortledning.

3.6.2 Markanvändning

Markanvändningen inom området varierar mellan urbaniserat till naturmark. Generellt utgörs området Hökarängens centrum av bostäder och handel. Högdalens industriområde utgörs i huvudsak av industriella verksamheter samt spårområdet i anslutning till den befintliga Högdalsdepån.

Större sammanhängande naturliga infiltrationsytor utgörs av Gubbängsfältet som sträcker sig längs med Örbyleden från Nynäshamnsvägen i öst till Högdalen i väst, samt det större grönområde som utgör Annydalsänkan. Vidare sker infiltration på de höglänta områden som sträcker från Hökarängen i öst till Högdalens industriområde i väst, det vill säga omfattande Högdalstopparna samt grönområdet kring Fagersjö.

Infiltration sker även vanligen på innergårdar, exempelvis i anslutning till bostadsbebyggelsen söder om Hökarängens centrum. I övrigt sker begränsad infiltration på hårdgjorda ytor som trottoarer och vägar och ingen infiltration på takytor. LOD-system (Lokalt Omhändertagande av Dagvatten) kan dock föra takvatten till grundvattenmagasinen. Markanvändningen inom utredningsområdet fördelar sig enligt nedanstående.

- Grönområde 52%
- Ort med mindre/större område av grönt 31%
- Industri och handel 11%
- Större vägnät 1%
- Övrigt (åkermark, våtmark, mm) 4%

Fördelningen av markanvändning baseras på Svenska Marktäckedata (SMD) som redovisar vegetation och markanvändning (Naturvårdsverket, 2017).

Med avseende på hydrogeologin i området medför urbaniseringsgraden att normal infiltration och grundvattenbildning försvåras då markytor är täckta av gator eller byggnader, så kallade hårdgjorda ytor. Avrinnande vatten vid nederbörd fångas upp via dagvattensystem och leds bort.

3.6.3 Objekt som påverkar vattenbalansen

Inga befintliga undermarksanläggningar i berg och jord som kan påverka grundvatten-förhållandena inom utredningsområdet har identifierats.

3.6.4 Vattenbalans

En vattenbalans har upprättats för planerad utbyggnad av tunneldepån i Högdalen. Detaljerade beräkningar redovisas i Bilaga C6.

Grundvattenbortledning från planerade bergtunnlar baseras på de inläckageberäkningar som redovisas i kapitel 4 samt i Bilaga C6.

En klimatologisk vattenbalans har upprättats för att beskriva hur mycket vatten som rör sig genom området till följd av nederbörd över detsamma. Den klimatologiska vattenbalansen säger att avrinningen är lika med skillnaden mellan nederbörd och avdunstning. Avrinningen kan även betecknas nettonederbörd.

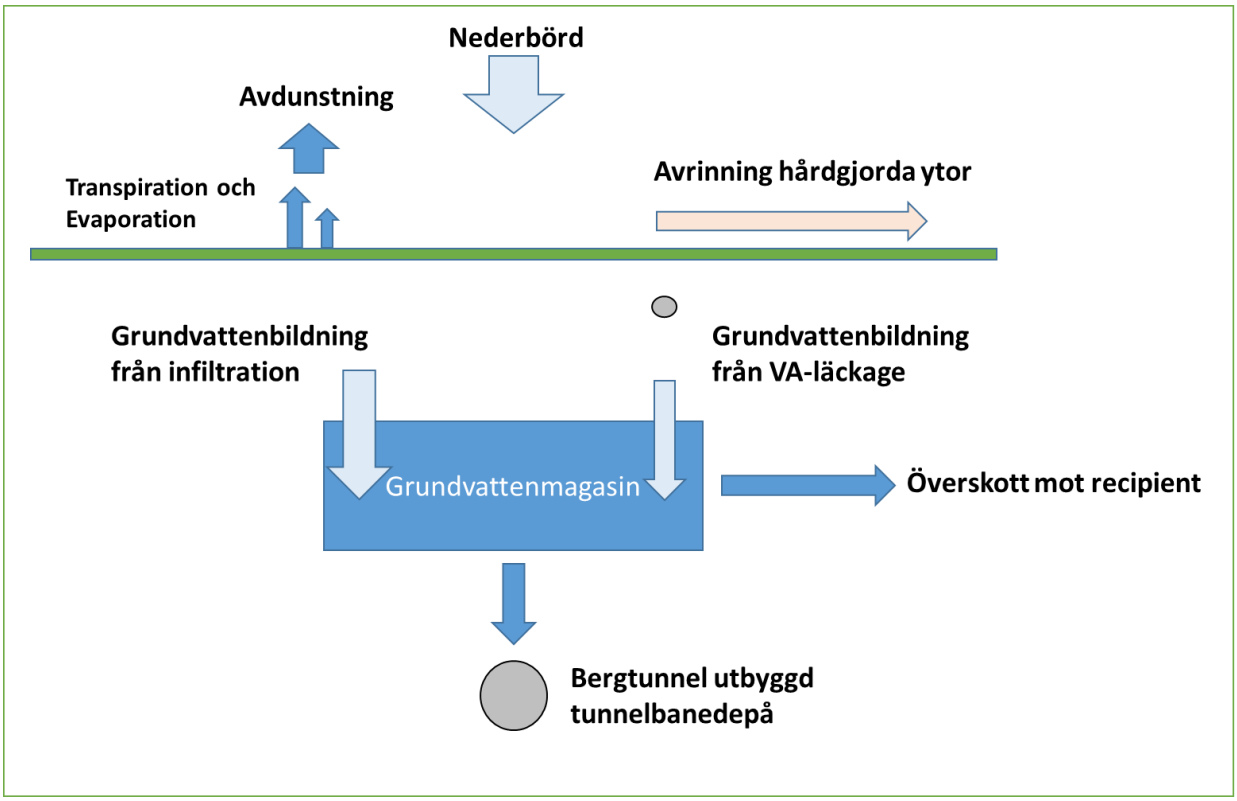
Vatten tillförs grundvattenmagasinen i jord och berg dels som nybildning som beror på nettonederbörden och dels som grundvattenflöde från andra magasin, exempelvis vid strömning från ett övre till undre grundvattenmagasin. I urbana områden tillkommer även tillskott från otäta VA-ledningar, Figur 23.

Hårdgörning av ytor begränsar till stor del infiltrationen och del av nederbörden bortförs som dagvatten utan att ha infiltrerat.

Strömning av grundvatten sker direkt eller indirekt mellan samtliga grundvattenmagasin, övre och undre magasin i jord samt berg. Bortledningen av grundvatten från planerade bergtunnlar medför en lokal omfördelning av vattenströmning mellan magasinen. Läckage från VA-ledningar har även beaktats vid beräkningarna.

Den tillgängliga mängden vatten att omfördela genom minskad dränering till olika befintliga anläggningar eller ändrat läckage från VA-ledningar är svår att bestämma. Dock kan en vattenbalans som visar att en stor del av tillgängligt vatten bortleds peka ut avrinningsområden där en ökad risk för grundvattensänkning kan finnas.

Vattenbalansberäkningarna i Bilaga C6 visar att det, medräknat dränering till den planerade anläggningen, finns ett vattenöverskott inom samtliga områden.



Figur 23. Schematisk skiss av vattenbalans.

3.7 Känsliga objekt/områden

3.7.1 Byggnader och anläggningar

Inventering av grundläggning har utförts genom studie av Stockholm kommuns arkiv. Bedömningarna av känslighet är mycket konservativa, då alla leromården förutsätts vara sättningskänsliga, även om provtagningen visar att de inte är det.

Redovisning av grundläggning görs inom influensområdet (Bilaga C5), då ingen grundvattenpåverkan bedöms uppkomma utanför influensområdet. Influensområdet redovisas i kapitel 4.

Jordartskartan har legat till grund för bedömningarna av vilka fastigheter som är sättningskänsliga och inte. Som underlag har den byggnadsgeologiska kartan över Stockholm använts. I de fall jordartskartan visat att en fastighet ligger på berg i dagen har grundläggning på berg angetts utan vidare eftersökningar i arkiven. I de fall det finns uppgifter om jordart i bygglovsarkivet som skiljer sig från jordartskartan har uppgifterna från arkivet använts. Detta då en platsspecifik undersökning är mer trovärdig än jordartskartan.

Förutom jordartskartan har utbredningen av undre grundvattenmagasin legat till grund för bedömningarna av sättningskänsliga byggnader och anläggningar. I de områden utredningar visat att det finns ett undre grundvattenmagasin finns också lera, varför dessa områden kan betraktas som sättningsbenägna. Jordartskartan visar endast ytjordarter och i vissa fall kan exempelvis sand eller fyllning överlagra lera. Leran kan dessutom ingå i växellagring med t.ex. sand och/eller silt. Områden där jordartskartan anger växellagring eller fyllning samtidigt som ett undre grundvattenmagasin identifierats anses alltså vara sättningskänsliga områden.

Ett objekt som är grundlagt på lera eller på träpålar kan påverkas om grundvattennivån förändras. Påverkan på grundläggningen kan i huvudsak ske på två sätt:

- Om grundvattennivån sjunker i ett undre magasin kan det medföra att ovanliggande lerlager konsolideras och marksättningar uppstår. Detta förutsätter att grundvattennivån från början är högre än lerlagrets underkant.
- En avsänkning i ett öppet magasin kan medföra skador på grundvattenberoende grundläggning, exempelvis är trägrundläggning känsligt för luftens syre, förutsatt att sänkningen blottlägger tidigare vattenövertäckt grundläggning. Om grundvattennivån sjunker i ett öppet magasin kan det därför medföra att träpålar och rustbäddar (korsvis anordnade lager av virke som underlag för murverk) torrläggs och utsätts för luftens syre med följd att trä bryts ner snabbare och sättningar kan uppstå.

I Bilaga C5 redovisas byggnader inom influensområdet på områden med lera. Inga byggnader med trägrundläggning har identifierats inom området. Alla byggnader som redovisas inom leromården påverkas inte av grundvattennivåsänkningar. Anledningen till detta är att det för flera fastigheter finns en grundläggning som inte är grundvattenberoende. I vissa fall saknas grundläggningsuppgifter och dessa tas då med i sammanställningen av försiktighetsskäl. Byggnader med en grundläggning som inte är grundvattenberoende kan ha anslutande servisledningar som är grundvattenberoende. Vidare kan sägas att spårområden grundlagda på lera potentiellt är sättningskänsliga. Större spårområden på leromården finns i anslutning till befintlig Högdalsdepå. Dock kan lerjord vara fast lagrad, så kallad torrskorpa, och därmed inte sättningsbenägen. Om grundvattennivån ligger under lerans underkant är leran redan konsoliderad och ytterligare nivåsänkning påverkar inte lerlagret.

Endast två byggnader med grundläggning på lera har konstaterats inom influensområdet. En industribyggnad inom fastigheten Stillbilden 2, ligger inom området för det undre grundvattenmagasinet Högdalen norra. Vidare är en mindre komplementbyggnad belägen inom Hökarängen i södra delen av det undre grundvattenmagasinet Gubbängsfältet västra.

Beträffande byggnader med okänd grundläggningen konstateras att cirka 30 byggnader samt ett antal mindre komplementbyggnader med okänd grundläggning förekommer i varierande grad inom samtliga grundvattenmagasin inom influensområdet. Större områden med byggnader där grundläggningsuppgifter saknas är de södra delarna av Fagersjösänkan samt Högdalen östra.

Avseende känsliga ledningar avses ledningar av följande typ och dimension inom områden med identifierade grundvattenmagasin:

- Vatten ≥ 300 mm
- Spillvatten ≥ 400 mm
- Fjärrvärme alla dimensioner
- Fjärrkyla alla dimensioner
- Gas alla dimensioner

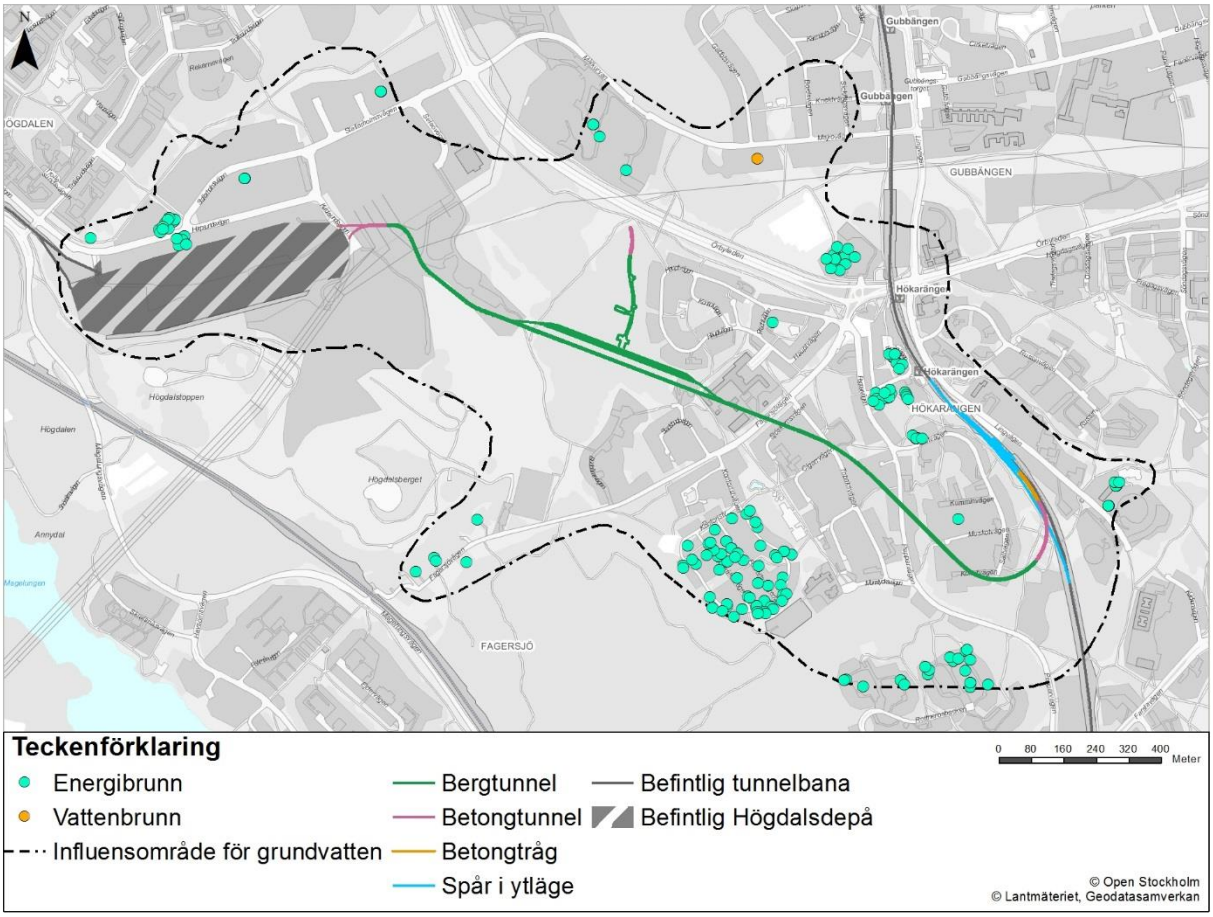
Inom området för befintlig Högdalsdepå finns fjärrvärmeledningar. Norr om befintlig Högdalsdepå finns fjärrvärme- och spillvattenledningar längs Harpsundsvägen och Stallarholmsvägen.

I södra delen av influensområdet, längs Fagersjövägen, finns fjärrvärmeledningar. Väster om arbets-/servicetunneln finns gas- och fjärrvärmeledningar.

I området kring Hökarängens centrum finns gas-, fjärrvärme, spill- och vattenledningar. Vid Majrovägen, norr om Gubbängsfältet, finns gas-, fjärrvärme-, vatten- samt kombinerade ledningar.

3.7.2 Brunnar

Uppgifter om dricksvattenbrunnar och energibrunnar inom utredningsområdet har insamlats från SGU:s brunnsarkiv samt Stockholms kommun. Det är i huvudsak energibrunnar som identifierats. Inom influensområdet finns cirka 200 identifierade energibrunnar. En brunn, betecknade enligt SGUs brunnsarkiv som enskild vattenbrunn, är belägen i de norra delarna av Gubbängsfältet västra. Då energibrunnar överför värme mellan omgivande berggrund och kollektorslangarna genom vattnet i brunnen är vattennivån i brunnen central för effektutbytet. Det innebär att en permanent grundvattennivåsänkning minskar effektutbytet.



Figur 24 Översikt av brunnar inom influensområdet.

3.7.3 Natur- och kulturmiljöer

Inga grundvattenberoende naturområden har identifierats inom influensområdet. Inventering av naturområden redovisas närmare i miljökonsekvensbeskrivningen (Bilaga B i tillståndsansökan). Träd och markvegetation utnyttjar främst markvatten. Markvattenhalten är ett mått på markens fuktighet från markytan ner till grundvattnet. Då växterna utnyttjar markvattnet inverkar de även på grundvattenbildningen och avrinningen till vattendrag. Vid perioder då marken är väldigt torr sugs nästan all nederbörd upp och väldigt lite bildar grundvatten eller avrinning. Växter med rötter som når ner djupt ner i jordprofilen, där grundvattenytan ligger ytligt så att rötterna kan nå kapillärt stigande vatten (kapillärvattenzonen), kan påverkas av en avsänkning av grundvattenytans läge. Sker avsänkningen hastigt och i kombination med en torrperiod kan växtligheten bli extra känsliga. Fleråriga växter anpassar sig dock vanligen till nya förhållanden inom någon eller några växtsäsonger.

Kulturmiljöer omfattar kulturhistorisk värdefull bebyggelse och fornlämningar. Kulturhistoriskt värdefulla byggnader hanteras inte specifikt utan hanteras i samband med redovisning av grundläggning av byggnader. En sammanställning av inventerade byggnader redovisas i bilaga C5. Inga fornlämningar finns inom influensområdet.

3.7.4 Föroreningar

3.7.4.1 Potentiellt förorenade områden

En övergripande inventering av potentiellt förorenade områden har gjorts inom utredningsområdet, baserad på länsstyrelsens MIFO-databas (Metodik för Inventering av Förorenade Områden). Inom MIFO tilldelas potentiellt förorenade objekt olika riskklasser med

syfte att prioritera åtgärdsinsatser. I denna PM Hydrogeologi har en särskild bedömning gjorts avseende risken för att MIFO-objekten skulle kunna påverka vattenkvaliteten i samband med byggande och drift av den utbyggda tunnelbanedepån. Genomgång har även gjorts av resultat från tidigare miljöundersökningar för enskilda objekt eller fastigheter där föroreningen bedömts kunna riskera att försämra vattenkvaliteten på länshållningsvatten under byggtiden och/eller dränvatten under drifttiden.

Inom influensområdet finns cirka 40 potentiellt förorenade områden upptagna i MIFO-databasen, Figur 25. Negativa effekter som kan uppkomma i anslutning till dessa områden på grund av den planerade sträckningen är dels att inläckande grundvatten för med sig föroreningar och påverkar vattenkvaliteten i det avledda vattnet. Vidare finns risk att ändrade grundvattenförhållanden kring tunneln påverkar eller mobiliserar föroreningar i mark och grundvatten. Exempelvis kan spridning ske genom infiltration direkt till övre grundvattenmagasin alternativt via randzoner till undre grundvattenmagasin.

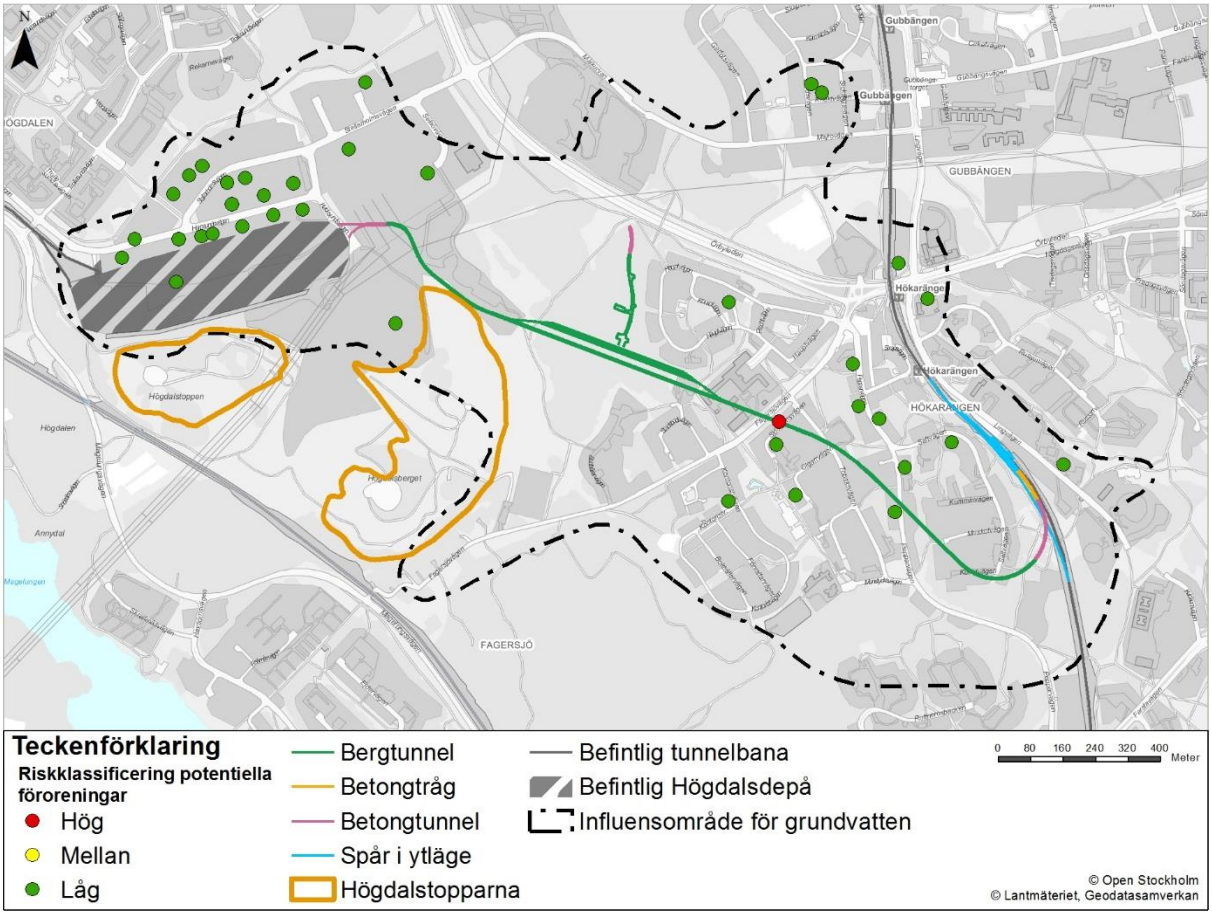
För att hantera och särskilja alla MIFO-objekt har områdena klassats med avseende på risk för spridning av föroreningar på sådant sätt att det kan påverka vattenkvaliteten under byggtiden och/eller dränvatten under drifttiden. Klassningen baserats på följande parametrar:

- Prioritering av förorening med avseende på mobilitet i mark
- Lokalisering av förorening i jord, avstånd till anläggningen från potentiellt förorenat område
- Potential för spridning av förorening till grundvattnet
- Förorening i övre magasin utan kontakt med planerade anläggningar, avstånd till anläggningen från potentiellt förorenat område
- Förorening i övre magasin med kontakt med planerade anläggning, avstånd till anläggningen från potentiellt förorenat område
- Förorening i undre magasin, avstånd till anläggningen från potentiellt förorenat område
- Förorening i grundvatten i berg, avstånd till anläggningen från potentiellt förorenat område

Baserat på uppgifterna om bransch i MIFO-databasen prioriteras en branschspecifik föroreningstyp för respektive område. Föroreningens mobilitet är viktad med avseende på lokalisering i jord i förhållande till tunnelsträckningen och ger risk för att föroreningen vållar föroreningsproblem i jord vid anläggandet av jordschakt. Potential för att förorening når grundvattnet, viktad med vilket typ av grundvattenmagasin som spridning sker i samt avståndet till anläggningen, ger risk för att föroreningen når bergtunnlar och schakt via grundvattnet. Den sammanvägda risken är summan av risk för föroreningsproblem i jord och risk för föroreningsspridning i grundvattnet till anläggningen.

Baserat på det sammanvägda riskvärdet delas områdena in i tre riskklasser, hög risk, mellanrisk och låg risk, där risk avser risk för spridning på sådant sätt att det kan påverka vattenkvaliteten på länshållningsvattnet under byggtiden och/eller dränvatten under drifttiden, figur 25.

Risk för föroreningsspridning i grundvattnet till anläggningen innebär även en risk för förflyttning av förorening till icke förorenade områden. De parametrar som riskklassningen utgår ifrån (föroreningens mobilitet, avstånd till anläggningen och de hydrogeologiska förhållanden som råder vid föroreningen, exempelvis att föroreningen är belägen i undre magasin) utgör även grund för bedömning om risk finns att rådande föroreningssituationen kan förvärras.



Figur 25 Översikt av potentiellt förorenade områden enligt länsstyrelsen MIFO-databas inom influensområdet. Objekten har riskklassats (hög, mellan, låg) med avseende risk för spridning av förorening på sådant sätt att det kan påverka vattenkvaliteten på länshållningsvatten under byggtiden och/eller dränvatten under drifttiden.

Ett objekt tilldelas klassen med hög risk för att vattenkvaliteten i tunnelvattnet påverkas. I Tabell 3 redovisas MIFO-objekt som hamnar inom klassen hög. Dock bör framhållas objektet har MIFO-statusen ”Identifiering” eller att det är avslutat. Det innebär att det, baserat på tillgänglig information, inte funnits skäl att prioritera aktuellt objekt för åtgärder eller undersökningar. Vidare innebär ett objekts upptagande i MIFO-databasen per automatik inte att marken eller grundvattnet är förorenat utan att verksamheten varit av sådan art att risken finns för förorening av mark och/eller vatten.

Tabell 3 Potentiellt förorenade områden inom området kring utbyggd tunnelbanedepå där risk finns för påverkan av vattenkvaliteten i tunnelvattnet

PrimärBransch (MIFO)	Status (MIFO)	Sammanvägd risk
Grafisk industri	Identifiering - avslutad - ingen åtgärd	Hög

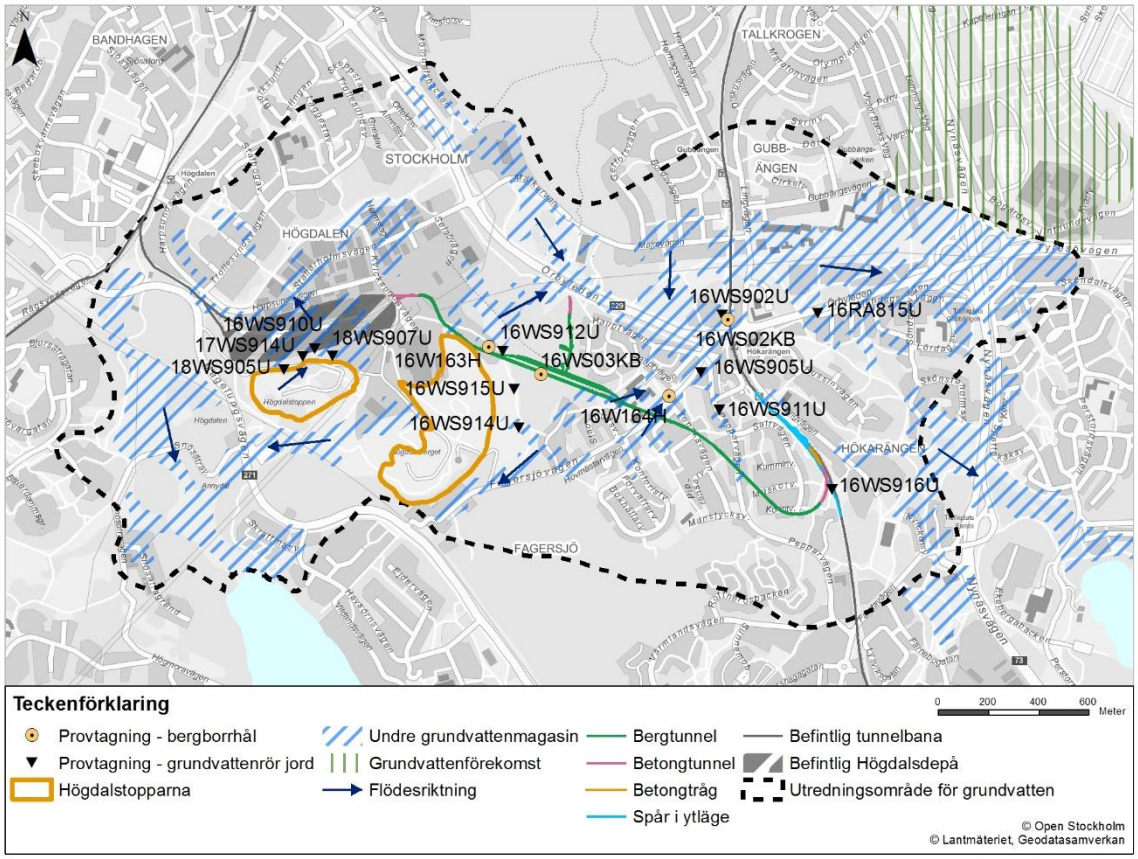
Söder om Högdalens industriområde förekommer även en gammal deponi (Högdalstopparna). Deponin bedöms innehålla blandat heterogent avfall med föroreningar av varierat ursprung. Det finns i dagsläget inga historiska uppgifter om vilken typ av avfall som lagts i deponin.

Dock konstateras att grundvatten i jord vid sluttfot av Högdalstopparna är förorenad av bl a PAH och metaller. På grund av närheten till befintliga Högdalsdepån där schakt för byggnader och

stödkonstruktion planeras att utföras medför således hög risk för att vattenkvaliteten i länshållningsvattnet i schakt påverkas.

3.7.5 Grundvattenkvalitet

Grundvattnets kvalitet längs med den planerade sträckningen av tunnelbanedepån har undersökts genom provtagning i kärnborrhål, brunnar och grundvattenrör [4], Figur 26. Genomgång har gjorts av resultat från tidigare miljöundersökningar för enskilda objekt eller fastigheter där risk finns att föroreningar kan försämra vattenkvaliteten på länshållningsvatten under byggtiden och/eller dränvatten under drifttiden.



Figur 26 Översikt av grundvattenrör, hammarborrhål och kärnborrhål där provtagning och analys utförts i grundvattnet

Provtagningen har även genomförts i provpunkter nedströms potentiellt förorenade områden som tilldelats riskklassen hög risk. Analyser har utförts av oljeföroreningar (exempelvis PAH), metaller, klorerade alifater, PCB och dioxin. De analyser som utförts visar att prover från grundvattenrör satta i övre magasinet i anslutning till Högdalstoppen innehåller höga halter av PAH:er medan halterna minskar betydligt i grundvatten i jord med ökat avstånd från deponin. Vidare konstateras förekomst av högfluorerade ämnen (PFAS) vid norra släntfot av deponin. Analyser av PAH i grundvatten i berg nedströms Högdalstoppen visar på generellt låga halter eller halter under rapporteringsgränsen. Detta kan troligen förklaras med att PAH till största del binds till partikulärt material och fastläggs i marken och därmed har begränsad rörlighet. För grundvatten i jord observeras förhöjda halter av arsenik och nickel huvudsakligen i området nordost om Högdalstopparna. I berggrundvattnet visar analyserna förhöjda halter av nickel och zink. Speciellt avviker zink i kärnborrhålet 16WS02KB, Figur 26. Zinkhalten i hammarborrhålet 16W164H ligger dock under rapporteringsgränsen. Någon verksamhet som kan orsaka förhöjda zinkhalter kan inte påvisas, vidare ligger halten av zink i närliggande rör i grundvatten i jord under

rapporteringsgränsen. Analyser av klorerade alifater, PCB och dioxin visar generell låga halter i undersökta punkter inom utredningsområdet.

En utförligare beskrivning av föroreningspåverkan i grundvattnet längs tunnelsträckningen ges i Bilaga C8.

4 Påverkan på vattenmiljön

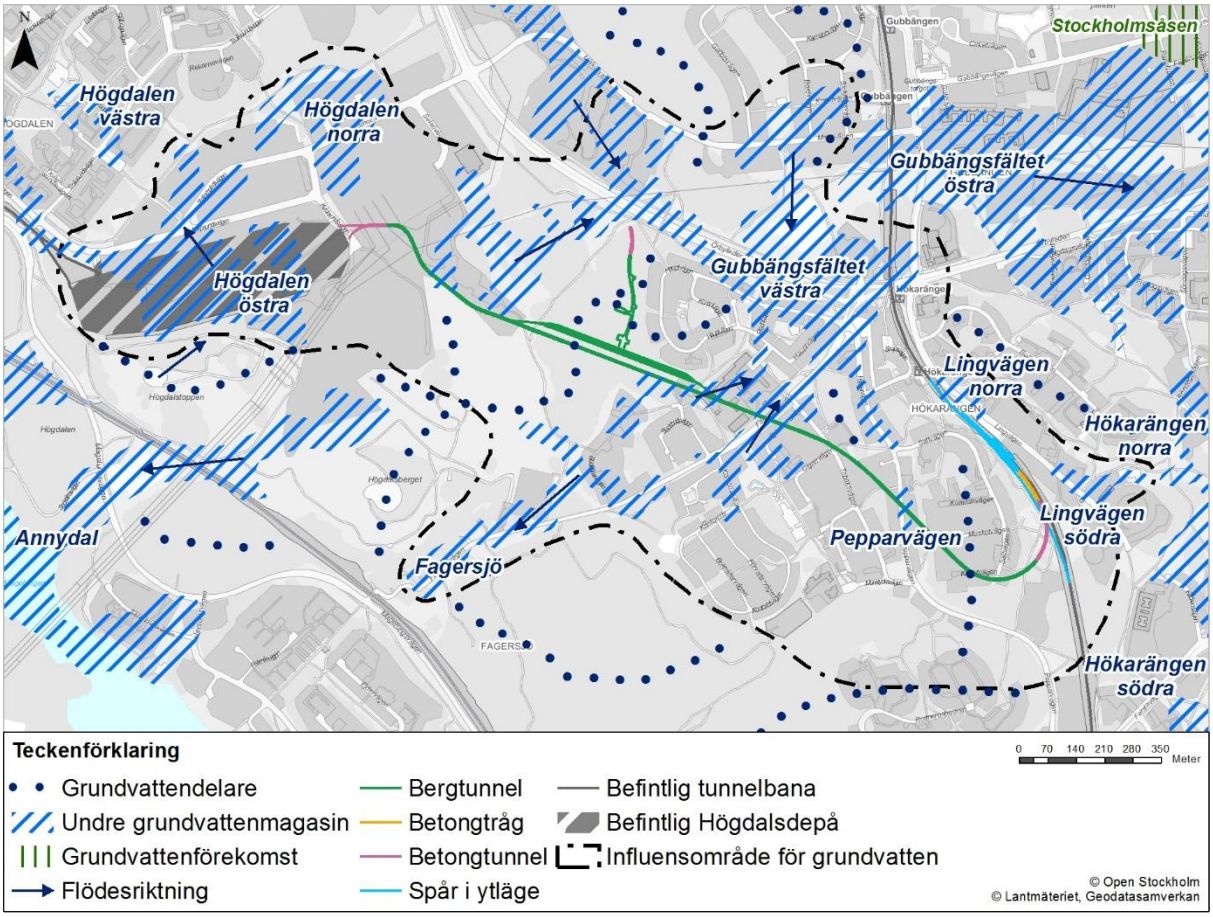
Som tidigare nämnts begränsas projektet av ett utredningsområde. Inom utredningsområdet utreds hydrogeologiska, geologiska och geotekniska förhållanden för att kunna bedöma den planerade tunnelbanedepåns influensområde. Med influensområde avses det område inom vilket det kan uppkomma grundvattennivåpåverkan till följd av vattenverksamheten.

I detta kapitel görs uppskattningar och beräkningar av influensområdet där även exempelvis inläckage till tunnlar, vattenbalans, berggrundens och jordlagrens vattenförande förmåga ingår som underlag. Detaljerade beräkningar redovisas i bilaga C6.

4.1 Influensområde

Numeriska beräkningar har utförts för inläckage och grundvattennivåsänkning. Beräkningar genomförs för avgränsade områden, till exempel där bergtunnelavsnitt passerar under grundvattenmagasin i jord eller genom sprickzoner i berg. En samlad bedömning för hela området görs sedan baserad på de enskilda grundvattenmagasinens utbredning. I den samlade bedömningen ingår kunskap om områdenas jord- och bergförhållanden. Influensområdets utbredning är konservativt framtaget varför ingen grundvattenpåverkan bedöms uppkomma utanför influensområdet.

I figur 27 visas utbredningen av influensområdet.



Figur 27 Influensområde för planerade anläggningar utifrån valda kriterier och givna förutsättningar.

4.2 Bedömning av inläckage

Beräkning av inläckage till injekterade tunnlar i berg har gjorts efter analytisk modell presenterad i bland annat Gustafson (2009).

Det är väl känt att det för en ytligt förlagd tunnel inte kommer att beräknas korrekt inläckage analytiskt eftersom grundvattenytan ovanför tunneln kommer att sänkas av medan den analytiska modellen förutsätter konstant grundvattenyta ovanför tunneln.

Giltigheten i de analytiska modellerna har tidigare inför tillståndsprövningen av tunnelbanan till Arenastaden testats genom simulering av relevanta akviferuppsättningar och tunnelgeometrier i numeriska modeller (Stockholms läns landsting, 2017).

Beräkningarna visar att korrektionsparametern (det vill säga kvoten mellan numerisk och analytiskt beräknat inläckage) ökar med stigande vattentryck vid tunnelcentrum, det vill säga att det råder större överensstämmelse mellan analytisk och numerisk modell för en djupare tunnel än för en ytligare tunnel. Beräkningar av korrektionsfaktorer utförda för enkelspår/dubbelspårtunnlar beräknades till cirka 90 %. Det bedöms att de hydrogeologiska förutsättningarna mellan tunnelbana till Arenastaden och planerade anläggningar för utbyggd depå i Högdalen är relativt lika varför en korrektionsfaktor vid inläckageberäkningarna antas till cirka 90 %.

Normalberget samt svaghetszoner har ansatts med en djupberoende hydraulisk konduktivitet. Det antas att normalberget kan tätas ned till $K_i=5\cdot10^{-9}$ m/s medan svaghetszoner med större vattenföring kan tätas ned till $K_i=3\cdot10^{-8}$ m/s. I den tillämpade analytiska modellen ingår även en så kallad ”skin-faktor” som tar hänsyn till att berget med tiden får en minskad hydraulisk konduktivitet beroende på bland annat spänningsomlagringar och utfällningar, vilket leder till ett minskat inläckage. För beräkningarna av inläckage antas dock en skin-faktor på noll, det vill säga en nybyggd tunnel.

Det beräknade specifika inläckaget varierar mellan 1-39 l/min/100 meter tunnel med medelvärdet cirka 10 l/min/100 meter tunnel. Totala inläckaget för samtliga bergtunnlar beräknas till cirka 257 l/min med fördelning enligt Tabell 4.

Motsvarande beräknade flöden med hänsyn tagen till korrektion för avsänkt grundvattenyta inom bergsområden är ett medelinläckage om 9,5 l/min/100 meter tunnel och ett totalt inläckage om 236 l/min för hela sträckan.

Med samma angreppssätt som för spårtunnlar och uppställningshall under mark har även inläckage beräknats för arbets-/servicetunneln.

Tabell 4 Beräkning av inläckaget till bergtunnlar för utbyggd tunnelbanedepå i Högdalen

Tunnel	Okorrigerat		Korrigerat	
	Specifikt medelinläckage (l/min, 100 m)	**Totalt inläckage (l/min)**	**Specifikt medelinläckage (l/min, 100 m)**	**Totalt inläckage (l/min)**
Anslutning till Farstagrenen, uppställningshall under mark, anslutning till Högdalsdepån	10,3	257	9,5	236
Arbets-/servicetunnel	7,6	23	7,0	21
Totalt	10	280	9,2	257

Sammanfattningsvis bedöms det totala inläckaget till anläggningen inte överskrida 257 l/min.

Jämförelse med Citybanan

Som stöd för resonemang kring inläckage och genomsläpplighet i berg i anslutning till en bergtunnel har en utvärdering gjorts av de inläckagemätningar som utförts inom ramen för kontrollprogrammet för Citybanan i Stockholm. Jämförelsen mellan den planerade utbyggnaden av depå i Högdalen och Citybanan bedöms som relevant då Citybanan är förlagd i kristallint berg normalt för Stockholmsområdet. Mätningar för Citybanans sträckning under centrala Stockholm ger ett medelinläckage på cirka 5 l/min och 100 meter tunnel (TMO, 2016). Baserat på känd tunnelgeometri och trycknivåer har beräkningar utförts av skinfaktor och konduktivitet i berg efter injektering som kan förväntas för att ge det uppmätta inläckaget.

Beräkningarna utförs med tre olika värden för skinfaktor och konduktivitet i berg efter injektering, eftersom dessa är mycket svåra att uppskatta. Beräkningarna är genomförda analytiskt enligt ekvation (1) (Gustafson, 2009). Denna ekvation beräknar inläckaget baserat på tunnelns djup och radie.

$$q = \frac{2\pi K_b H}{\ln\left(\frac{2H}{r}\right) + \left(\frac{K_b}{K_i} - 1\right)\ln\left(1 + \frac{t}{r}\right) + \xi} \quad (1)$$

där q är inläckage per tunnelmeter, H är vattentrycket (meter vattenpelare till medeltunnelcentrum), r är tunnelns radie (meter), K_b är bergets konduktivitet, K_i är injekteringszonens konduktivitet, t är injekteringszonens mäktighet och ξ är en ”skin-faktor” som tar hänsyn till att berget närmast tunneln med tiden får en minskad konduktivitet beroende på bland annat spänningsomlagringar och utfällningar. Resultatet av beräkningarna visas i Tabell 5.

Tabell 5 Beräkning av inläckage i Vasatunneln 2, Citybanan, för tätad tunnel.

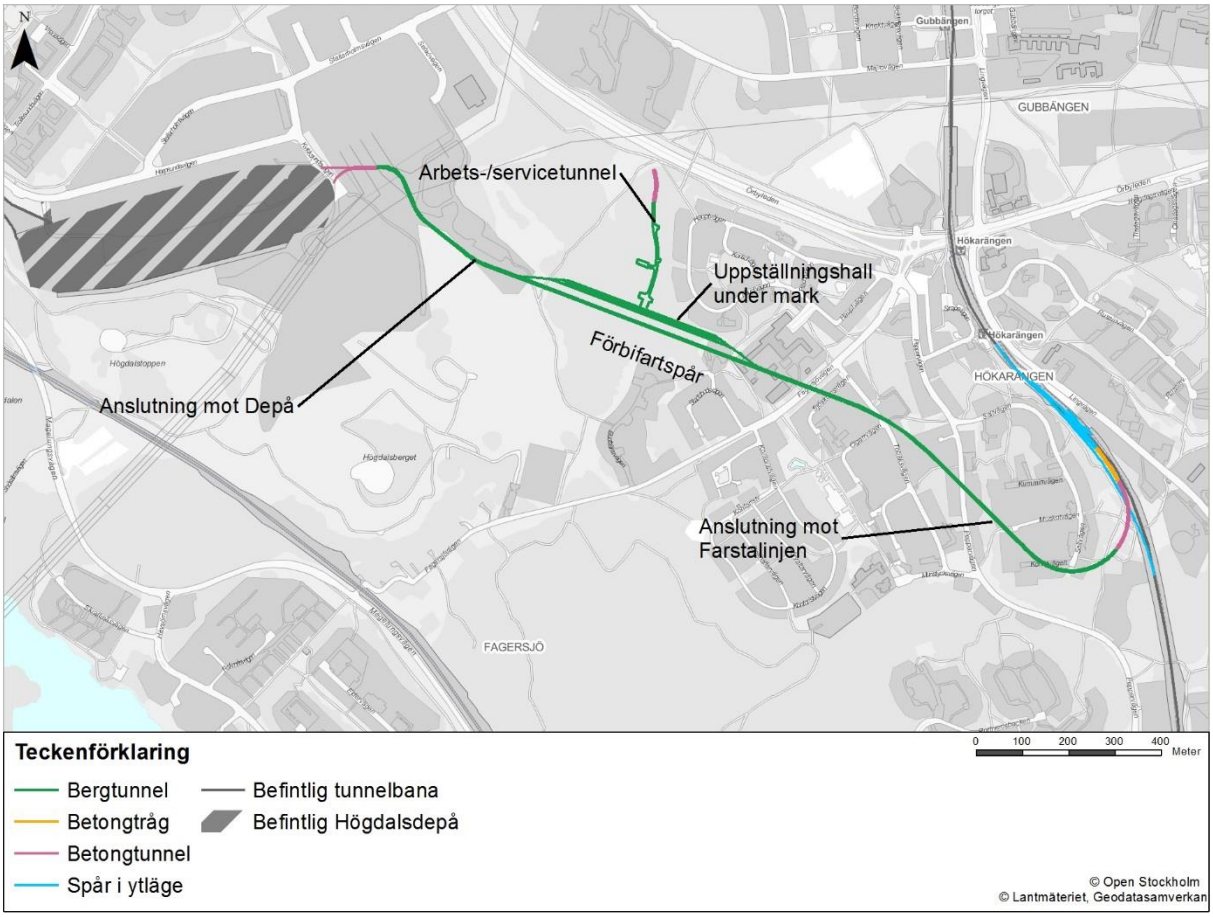
Skinfaktor	Konduktivitet i injekterad zon			
	$K_i=1\cdot10^{-9}$ m/s	$K_i=5\cdot10^{-9}$ m/s	$K_i=1\cdot10^{-8}$ m/s	
1	3,4	9,0	11,3	l/min, 100 m
3	2,8	**5,8**	**6,7**	l/min, 100 m
5	2,4	4,3	4,8	l/min, 100 m

För injekterad tunnel är skinfaktorn underordnad betydelsen av den uppnådda konduktiviteten i den injekterade zonen (K_i). Sammanfattningsvis konstateras att det uppmäta inflödet i Citybanans tunnel (5 l/min och 100 meter tunnel) kan erhållas vid till exempel $K_i=5\cdot10^{-9}$ m/s, vilket är i samma storleksordning som flödet som förväntas kunna uppnås för planerade bergtunnlar för utbyggd depå i Högdalen.

4.3 Bedömning av grundvattennivåsänkning med och utan infiltration

4.3.1 Översikt av anläggning

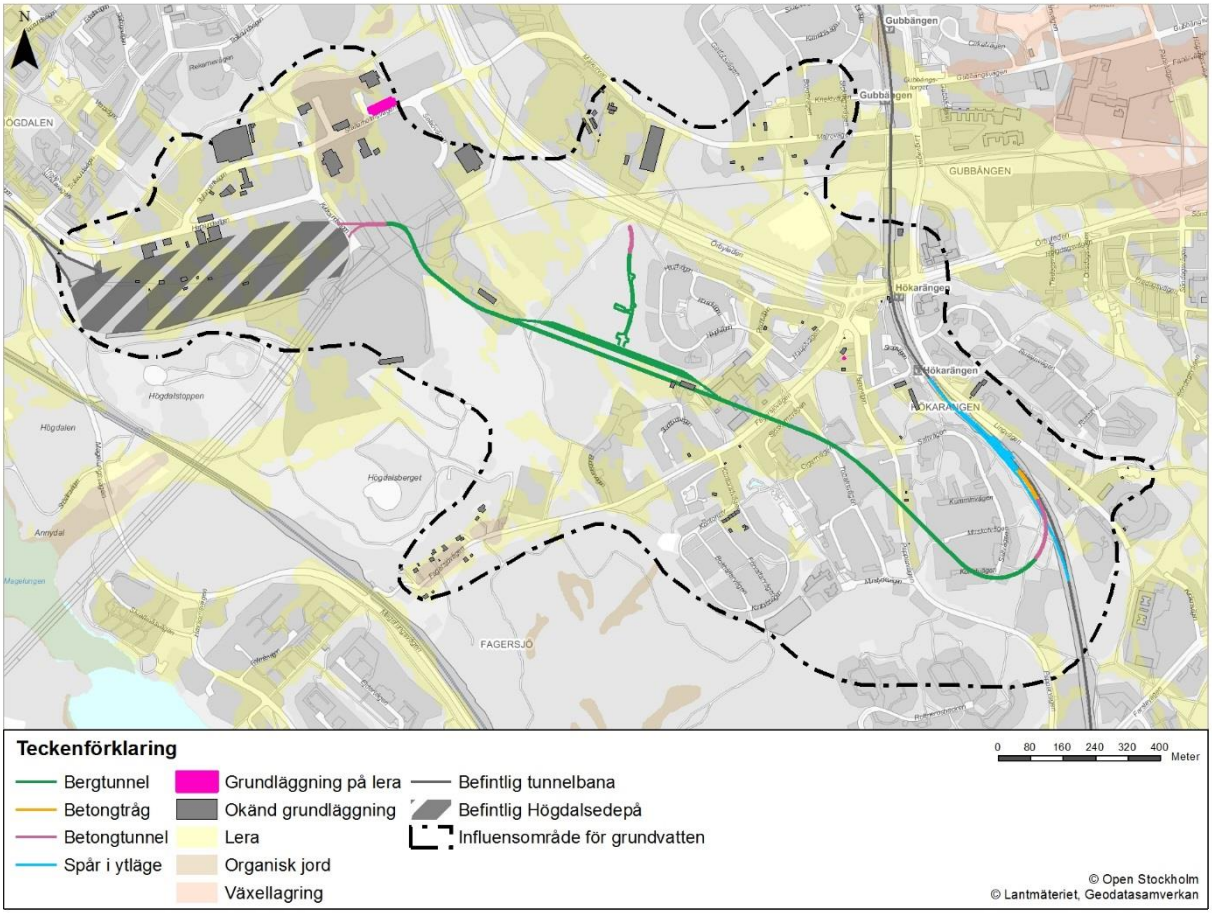
Under byggtiden och drifttiden för planerade anläggningar kan grundvattennivåsänkning ske i berg och jord, Figur 28. Grundvattennivåpåverkan i berg på grund av byggandet av bergtunnel har tidigare beskrivits i kapitel 4.1. I anslutning till påslag till anslutningstunnlar och arbets-/servicetunnel kommer även ett antal schakt för betongtråg och betongtunnlar att utföras från markytan.



Figur 28 Översikt av planerade bergtunnlar och övriga anläggningsdelar

4.3.2 Känslig grundläggning inom influensområdet

En beskrivning av byggnader med känslig grundläggning redovisas översiktligt i avsnitt 3.7.1 samt i Figur 29. Mer detaljerad information om grundläggning redovisas i Bilaga C5. Påverkan på grundvattenberoende grundläggning beskrivs i avsnitt om grundvattenpåverkan i jord i följande avsnitt.



Figur 29 Grundvattenkänsliga objekt inom influensområdet.

4.3.3 Grundvatten i berg

Grundvattentrycksänkning i berg kan påverka vattennivån i energibrunnar och därmed effektutbytet med omgivande berg.

Trycksänkningens storlek i berg är direkt knuten till tunneldjup, bergets konduktivitet samt det injekterade bergets konduktivitet. I bergtunnlarna antas att det ursprungliga grundvattentrycket sänks av till tunnelbotten. Trycksänkningen i berget kring tunnlarna kommer att minska med ökande avstånd från tunnelcentrum. Trycksänkningen på ett visst avstånd från tunneln beror av de hydrogeologiska förhållanden som råder samt på hur väl tunneln tätats.

I tunnellinjen gäller därmed generellt att där tunneldjupet är stort så blir trycksänkningen lokalt stor. I anslutning till uppställningshallen under mark där bergtäckningen är stor, blir trycksänkningen i berg i tunneln upp till cirka 25 meter, medan trycksänkningen där tunneldjupet är mindre, exempelvis vid påslagen för anslutningstunnlarna, som mest uppgår till några meter.

Horisontellt från tunneln minskar trycksänkningen i berg med avståndet. Vid området kring uppställningshallen under mark, där tunneldjupet är som störst, uppskattas trycksänkningen till ett fåtal meter på ett avstånd av 100 meter från tunneln.

Trycksänkningen i de översta delarna av berget ovan tunnelsträckningen beror till stor del på bergtäckningen, det vill säga avståndet mellan bergöverytan och tunneln, och tunnels täthet. Då bergtäckningen längs huvuddelen av tunneln är relativt stor bedöms trycksänkningen i de översta delarna av berget endast uppgå till som mest ett fåtal meter.

De beräknade trycksänkningarna i berg kan inte likställas med motsvarande avsänkning i en brunn. Det beror på att brunnen har kontakt med sprickor i berget på olika djup och att dessa sprickor kan vara mer eller mindre vattenförande. Det mest vattenförande berget kommer att vara styrande för vattennivån i brunnen. För en brunn med kontakt med sprickor i såväl ytligt som djupt berg blir den förväntade effekten av en trycksänkning i djupt berg att den (lilla) strömningen inne i brunnen minskar något medan vattennivån i brunnen kvarstår oförändrad, styrd av kontakt med mer ytligt liggande sprickor.

En beräknad trycksänkning i djupt berg indikerar således endast att det identifierats att det skulle kunna uppkomma en trycksänkning i djupt berg. Vidare att detta, under vissa speciella förutsättningar, även skulle kunna medföra en sänkning av vattennivån i en brunn.

Av de identifierade brunnarna inom influensområdet ligger endast en brunn inom 100 meter från tunnelsträckningen.

Risk för vattennivåsänkning som kan försämra effektutbyte i energibrunnar bedöms som liten och endast resultera i **små negativa effekter**. Om en nivåsänkning sker kan åtgärder exempelvis vara att fördjupa befintlig brunn eller fylla den med värmeledande material.

4.3.4 Grundvatten i jord

4.3.4.1 Effekter från bergtunnlar

Områden där skador på grundvattenberoende objekt bedöms kunna uppkomma om grundvattennivåsänkning tillåts är i huvudsak i anslutning till de identifierade undre grundvattenmagasinen längs stäckningen av planerade tunnlar. Specifikt bedöms områden med större lerdjup och sättningsbenägen lera komma att sätta sig om inte infiltration utförs. Då större delen av sträckningen av bergtunnlarna går genom områden med berg i dagen alternativt tunt jordtäcke berörs endast ett fåtal områden med lerfyllda sänkor.

Tunnel för anslutning till Farstagrenen

Tunneln för anslutning till Farstagrenen sträcker väster om grundvattenmagasinet Hökarängen norra. Då området direkt i anslutning till spårsträckningen är beläget i ett område med höga berglägen är det den horisontella avsänkningen i berg som kan påverka magasinet. För bedömning av trycksänkning i berget kring tunneln har numeriska beräkningar utförts för ett typfall för en sektion där tunnelsträckningen når ett relativt stort djup med ett vattentryck på cirka 18 meter. Beräkningarna pekar på att ett avstånd för icke försumbar påverkan i djupt berg kan sättas till cirka 160 till 210 meter från tunnellinjen i plan. Trycksänkningen i de översta delarna av berget ovan tunnelsträckningen beror till stor del på bergtäckningen, det vill säga avståndet mellan bergöverytan och tunneln.

Närmaste avstånd från en tunnelsektion, där vattentrycket är större eller lika med 18 meter, till Hökarängen norra är större än 300 meter varför ingen påverkan på Hökarängen norra bedöms sannolik. Dock förekommer en mindre isolerad lerfylld sänka, magasinet Lingvägen södra, mellan Hökarängen norra och påslaget till tunnellinjen. Närmaste avstånd mellan tunnellinje och sänkan är cirka 80 till 100 meter. Tunneldjupet ligger här mellan +40 till +42 vilket kan jämföras med marknivån i den isolerade sänkan på cirka +35. Då tunneldjupet här är mindre än för

beräkningsfallet och därmed trycksänkningen i berg mindre bedöms påverkan från bergtunnlarna på den mindre sänkan även bli begränsad.

Längre västerut passerar tunneln för anslutning till Farstagrenen det mindre magasinet Pepparvägen samt de sydöstra delarna av magasinet Gubbängen västra, det vill säga området sydväst om Hökarängens centrum.

I anslutning till det undre magasinet Gubbängen västra har jorddjup på cirka 10 meter påträffats med lermäktigheten på cirka 6 meter. Beräkningar har utförts för ett fall med ett inläckage till spårtunneln på cirka 10 l/min och 100 meter tunnel. Det antas att spårtunneln passerar en genomsläpplig zon med bergutgång. Beräkningarna resulterar i en trycksänkning på flera meter i det undre magasinet. Påverkan på magasinet bedöms försumbar på ett avstånd på mer än 100 meter. Då utbredningen av magasinet i detta område till stora delar är begränsat (mindre än 100 meter) på grund av höga berglägen bedöms påverkan även här blir begränsad. Leran i området är överkonsoliderad samt att inga marksättningar bedöms pågå i denna del av området, det vill säga sättningsbenägenheten bedöms som låg. Vidare har inga byggnader i området identifierats med grundvattenberoende grundläggning.

Avseende grundvattenmagsinet vid Pepparvägen konstateras ett jorddjup på cirka 7-8 meter med en lermäktighet på ca 2-3 meter lera. Då Pepparvägen är en mindre isolerad svacka och utbredningen av magasinet till stora delar är begränsat bedöms påverkan även här blir begränsad.

Teoretiska beräkningar av sättningar för Pepparvägen har inte utförts. Dock bedöms mot bakgrund av sättningsbenägenheten generellt inom område att även leran inom Pepparvägen inte är sättningsbenägen. Inga byggnader i området identifierats med grundvattenberoende grundläggning.

Tunneln för anslutning till Högdalsdepån

Tunneln för anslutning till Högdalsdepån och uppställningshallen under mark sträcker i huvudsak genom områden med höga berglägen och tunna jordlager. Dock passerar tunneln ett mindre område med mäktigare jordlager längs med randzonen till de sydvästra delarna av magasinet Gubbängsfältet västra. Sträckan är belägen i anslutning till området norr om Högdalstopparna där varierande jordmäktigheter (2 till 12 meter) förekommer. Jordlagren utgörs här i huvudsak av fyllnadsjord direkt på berg alternativ underlagrad av naturlig friktionsjord. Norr om spårlinjen överlagras friktionsjorden av lera med succesivt ökande lermäktigheter, från cirka 2 till 5 meter i anslutning till spårlinjen, upp till 12 meter på större avstånd från spårlinjen. I Bilaga C2.2 redovisas en tvärprofil för det aktuella området där jordlagerföljden framgår. Förutom Högdalstopparna utgörs området av grönområden samt en mindre våtmark, kallad Gökdalen. Trycksänkningen i undre magasin i jord bedöms uppgå till några meter ovan tunnellinjen med successivt avtagande på större avstånd från tunnellinjen. Påverkan på magasinet bedöms försumbar på ett avstånd på mer än 100 meter. Gökdalen är belägen drygt 70 meter från tunnellinjen och den hydrauliska kontakten är begränsad mellan våtmarken och det undre magasinet på grund av det tätande lerlagret. Därför bedöms inte vattennivån i Gökdalen påverkas vid grundvattensänkning. Inga grundvattenberoende byggnader har identifierats i området.

Söder om uppställningshallen under mark är Fagersjömagasinet beläget. Magasinet utgörs av en mindre isolerad lerfylld sänka. Sänkan sträcker längs med Fagersjövägen i sydvästlig riktning. Svackan avgränsas åt alla håll av berg. Närmaste avstånd mellan tunnellinjen och magasinet är cirka 220 meter. Någon grundvattenpåverkan i det undre magasinet på grund av trycksänkning kring bergtunneln bedöms inte uppstå.

Norr om tunnelpåslaget till anslutning till Högdalsdepån är Högdalen norra belägen, en mindre isolerad lerfylld svacka. Svackan avgränsas åt alla håll av områden med berg i dagen och bedöms inte ha kontakt med andra magasin. Inom området har en industribyggnad grundlagd på lera

identifierats, fastigheten Stillbilden 2. Närmaste avstånd mellan tunnellinjen och magasinet är cirka 120 meter. Trycksänkningen i undre magasin i jord bedöms komma att uppgå till några meter ovan tunnellinjen med successivt avtagande på större avstånd från tunnellinjen. Påverkan på undre magasin bedöms försumbar på ett avstånd på mer än 100 meter. Någon grundvattenpåverkan i det undre magasinet Högdalen norra på grund av trycksänkning kring bergtunneln bedöms inte uppstå.

I anslutning till befintlig Högdalsdepå är grundvattenmagasinet Högdalen östra belägen. Svackan avgränsas åt alla håll av områden med berg i dagen och bedöms inte ha kontakt med andra magasin. Närmaste avstånd mellan tunnellinjen och magasinet är cirka 240 meter. Någon grundvattenpåverkan i det undre magasinet på grund av trycksänkning kring bergtunneln bedöms inte uppstå.

Arbets-/servicetunnel

Arbets-/servicetunneln sträcker i huvudsak genom områden med höga berglägen och tunna jordlager och berör inte direkt något grundvattenmagsin. Dock är närmaste undre grundvattenmagasin, det vill säga Gubbängsfältet västra, beläget cirka 50 meter norr om planerat påslag. Örbyleden är belägen inom Gubbängsfältet västra. Då tunneldjupet här är mindre än för beräkningsfallet och därmed trycksänkningen i berg mindre bedöms påverkan från bergtunnlarna på Gubbängsfältet västra bli begränsad.

Avsänkningen av grundvattennivåer i jord bedöms resultera i **små eller inga negativa effekter.**

4.3.4.2 Effekter från öppna schakt

Nedan görs en genomgång av schakt till markytan som utförs för anläggande av utbyggd depå i Högdalen och de effekter på grundvattennivån som kan förväntas. Schakt beskrivs i Figur 30 till Figur 31. Schakt i jord under grundvattnets trycknivå utförs inom tät spont. Berget tätas med ridåinjektering och mellan spontfot och berg kan exempelvis jetinjektering utföras.

En bedömning har utförts av maximal hydraulisk omgivningspåverkan utan skyddsinfiltration i övre magasin kring schakt i jord utförda inom tätkonstruktion. Bedömningarna grundar sig på konservativa val för styrande parametrar. Vissa parametrar har varierats inom rimliga spann (exempelvis grundvattenbildning och jordlagrens vattenförande egenskaper) för att visa på hur detta inverkar på beräkningsresultaten.

Störst omgivningspåverkan kan beräknas vid antagande om ett måttligt vattenförande material utanför schakt och liten nybildning. Vid mer konduktivt material utanför schakt blir nivåpåverkan liten. Vid tätare material utanför tätkonstruktion blir avsänkningen nära tätkonstruktionen större, men avsänkningstratten blir samtidigt brantare. Dessa förhållanden ramar in spannet för ett rimligt influensavstånd kring schakt i jord inom tätkonstruktion.

Sammantaget visar analysen att planerat utförande av schakt i jord skulle kunna medföra en tillfällig avsänkning av grundvattenytans läge i jord som sträcker sig, konservativt satt, cirka 20-30 meter ut från tätkonstruktionens yttre begränsningslinje. Mätbar förändring, definierad som 0,1 meter, bedöms inte vara spårbar på avstånd överstigande cirka 15 meter från tätkonstruktionens yttre begränsningslinje. Närmast schakt beräknas trycksänkningen kunna uppgå till som mest cirka 0,5 meter för att sedan minska med avståndet från tätkonstruktionen. Öppna grundvattenmagasin i fyllningsmassor kan i princip finnas inom hela utredningsområdet. Många

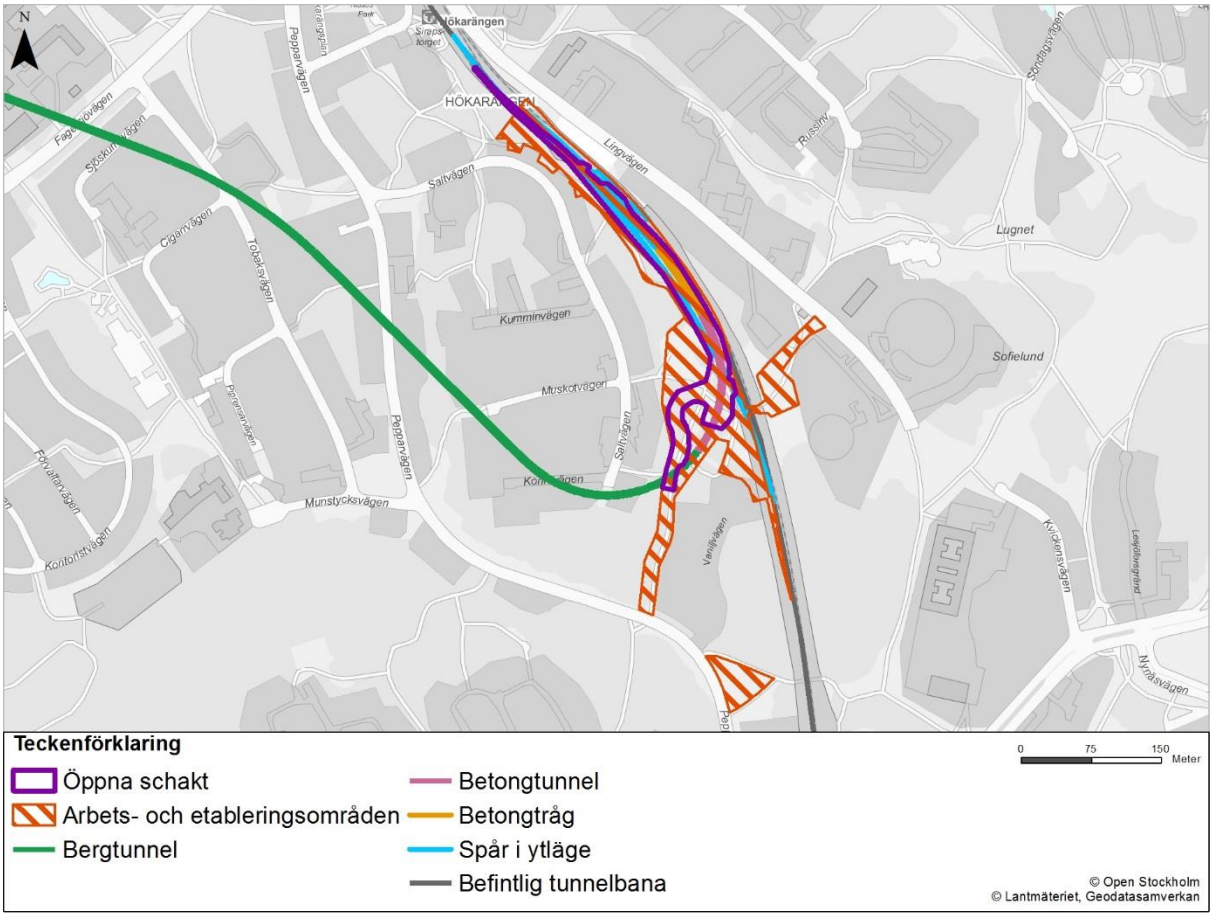
av dessa magasin är dock inte varaktiga under året utan är periodvis torra. Normalt har grundvattenytans läge i dessa magasin ingen koppling till risk för sättningar varför effekter med avseende på trycksänkning i dessa bedöms som små.

Schakt i jord genom undre magasin medför att en trycksänkning uppstår lokalt inom schakt beroende på schaktat djup under grundvattennivån. Trots att tätkonstruktioner kommer ett visst läckage att uppstå och trycksänkning i undre magasin utanför planerade schakt kan därför inte uteslutas. Omfattningen av omgivningspåverkan i ett undre magasin kring schaktet är beroende på hur väl tätningen lyckas. Bedömning av effekter från och storlek på inläckage till öppna schakt blir därför mycket osäkra. Eventuell grundvattennivåsänkning som uppstår i samband med schakt kommer åtgärdas genom infiltration.

Anslutning till Farstagrenen

Schakt kommer i huvudsak att utföras i berg för betongtråg och betongtunnel innan bergpåslag vid anslutning till Farstagrenen, Figur 30. Schakt är belägen i ett område med huvudsak berg i dagen alternativt tunt jordtäcke på berg. Grundvattennivån ligger här på cirka +40. Inga undre grundvattenmagasin eller grundvattenkänsliga objekt har identifierats i närområdet. I närmaste undre grundvattenmagasin, det vill säga Lingvägen södra, cirka 80 meter öster om planerat schakt har nivåer på cirka + 32 uppmätts.

Det maximala schaktdjupet uppgår till cirka 10 meter, schaktbottennivån ligger som djupast på cirka +34. Förutsatt att schakt utförs med planerade tätkonstruktioner bedöms att påverkan på omgivande grundvattennivåer blir liten.



Figur 30 Översikt av anläggningsdelar, öppna schakt och arbets- och etableringsområden vid anslutning till Farstagrenen.

Anslutning till Högdalsdepån

Schakt kommer i huvudsak att utföras i berg för betongtunnel innan bergpåslag vid anslutning till Högdlsdepån, Figur 31. Schakten är belägen i ett område med huvudsak berg i dagen alternativt tunt jordtäcke på berg, längs med sträckningen för schakt konstateras jorddjup på mellan 0,5 till 2 meter. Inga grundvattenmagasin i jord eller grundvattenkänsliga objekt har identifierats i området. Inga grundvattennivåer i berg har uppmätts. I närmaste undre grundvattenmagasin, det vill säga Högdalen östra cirka 100 meter väster om planerat schakt och Gubbängsfältet västra cirka 150 meter öster om planerat schakt, har nivåer på cirka +33 respektive +35 uppmätts.

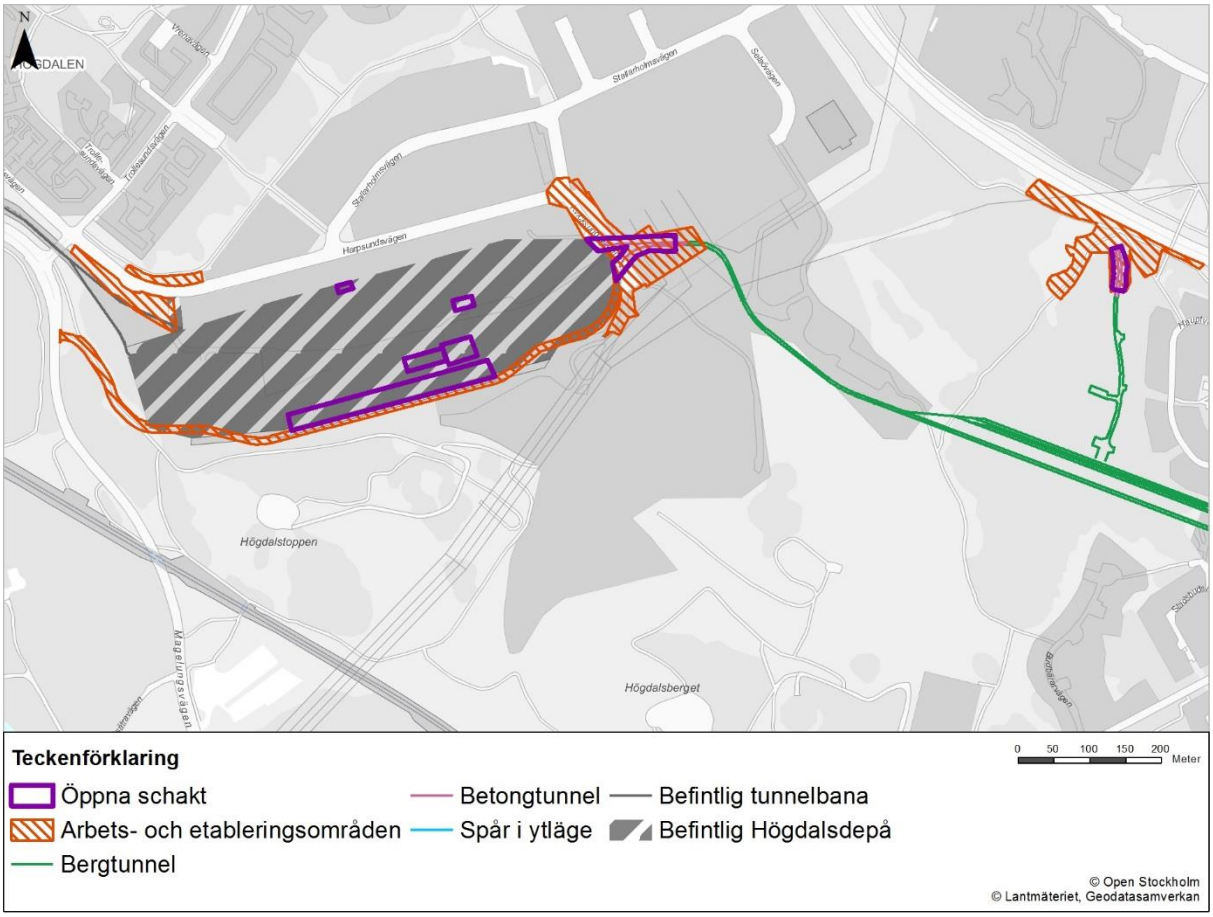
Det maximala schaktdjupet uppgår till cirka 15 m, schaktbottennivån ligger som djupast på cirka +29,5. Förutsatt att schakt utförs med planerade tätkonstruktioner bedöms att påverkan på grundvattenmagasinen blir liten.

Arbets-/servicetunnel

Utgrävningen för den öppna schakten för betongtunneln är till största del i berg, Figur 31. I närmaste undre grundvattenmagasin, det vill säga Gubbängsfältet västra cirka 20 meter norr om planerat schakt, har nivåer på cirka +31 respektive +33 uppmätts. Örbyleden är belägen inom Gubbängsfältet västra. Det maximala schaktdjupet uppgår till cirka 16 m, schaktbottennivån ligger som djupast på cirka +28. Trots planerade tätkonstruktioner finns risk att visst läckage uppstår och trycksänkning i undre magasin utanför schakt kan inte uteslutas utan infiltration. Med infiltration bedöms dock påverkan på grundvattenmagasinet som liten.

Inom befintlig Högdalsdepå

Inom befintlig Högdalsedepå kommer ett antal byggnader att byggas om och till samt ett fåtal nya byggnader att tillkomma. Nya ledningsanslutningar som kan kräva schakt under grundvattennivå planeras också. Placering av schakt är preliminära och kan komma att flyttas något i samband med detaljprojekteringt, men med täta schaktkonstruktioner förväntas påverkan bli liten. Känsliga objekt saknas inom depåområdet och leran är överkonsoliderad. Söder om befintlig depå planeras nya uppställningsspår och en stödkonstruktion mot slänten från Högdalstoppen. Grundvattennivån i detta område är under blötare perioder nära markytan och grundvattenbortledning kommer därför troligen att vara nödvändig under byggskedet. Eftersom magasinet naturligt torkar ut med jämna mellanrum bedöms grundvattenbortledningen inte innebära någon påverkan.



Figur 31 Översikt av anläggningsdelar, öppna schakt och arbets- och etableringsområden vid anslutning till Högdalsdepån, arbets-/servicetunneln samt befintlig Högdalsdepå. Preliminära lägen för öppna schakt i jord, där grundvattenbortledning sker under byggtiden. Schakten inom depåområdet kan komma att flyttas något i samband med detaljprojektering.

En stor del av öppna schakt för tunnelpåslag till anslutningsspårens bergtunnlar och arbets- /servicetunneln förläggs i områden med berg i dagen eller tunt jordtäcke på berg. Schakt i jord under grundvattennivån kommer att utföras inom tät konstruktion. Detta medför att risk för påverkan på grundvattenmagasin bedöms som liten och att anläggandet av schakt bedöms resultera i **små eller inga negativa effekter**.

4.3.4.3 Effekter från övriga anläggningar inom befintlig depå

För att möjliggöra byggnation av planerade tunnelbanespår inom depåns södra del behöver dränering samt fördröjningsmagasin anläggas för att möjliggöra avledning av dagvatten samt grundvatten som periodvis tränger ut längs med släntfoten till Högdalstoppen. Detta för att förhindra översvämning av spårområde vid skyfall och höga grundvattennivåer. Djup till dränerande nivåer är begränsad varför påverkan på det undre grundvattenmagasinrt bedöms bli liten.

Inom befintligt depåområde finns sedan tidigare en pump som dränerar källaren i en av verkstadsbyggnaderna. Syftet med pumpen är att länshålla grundvatten när grundvattennivåerna är höga, för att motverka att översvämning sker. Inga skador kan ske till följd av bortledningen.

Då inga grundvattenberoende objekt finns inom befintlig depå bedöms avsänkningen av grundvattennivåer i jord resultera **inga negativa effekter.**

4.4 Ytvatten

Inom influensområdet finns inga ytvatten där hydrogeologisk påverkan kommer att ske från planerad undermarksanläggning. Den mindre våtmark, kallad Gökdalen, som är belägen öster om Högdalens industriområde underlagras av lera. Då den hydrauliska kontakten är begränsad mellan våtmarken och det undre magasinet på grund av lerlagret bedöms inte Gökdalen påverkas av eventuell avsänkning kring tunnelsträckningen. Vidare tillförs vatten på konstgjord väg idag till våtmarken för att motverka uttorkning.

Avsänkningen av grundvattennivåer i jord och berg bedöms resultera i **inga negativa effekter** för ytvatten.

4.5 Vattenkvalitet

Som redovisats i kapitel 3.7.5 har höga halter av PAH i grundvatten i jord i anslutning till Högdalstopparna konstaterats. Dock visar undersökningar av grundvatten i berg att halterna är låga. Det bedöms därför ske en begränsad spridning av PAH till grundvatten i berg. För dioxin har inga halter över rapporteringsgränsen detekterats. PCB har detekterats i grundvatten i berg, dock i låga halter. Beträffande klorerade alifater bedöms halterna som låga i både grundvatten i berg och jord längs hela sträckningen.

För metaller konstateras generellt måttlig förhöjda metallhalter i grundvatten i jord. Måttliga halter konstateras även i grundvatten i berg i anslutning till Högdalstopparna.

Risken för mobilisering av föroreningar motverkas genom att täta tunnlarna för att minimera påverkan på omgivande grundvattenmagasin. Ett litet inläckage till tunnlarna innebär begränsad avsänkning av grundvattennivån vilket medför att risken för en grundvattenströmning mot tunnelsträckningen minskas.

Då strömningsriktningen bedöms ske i nordostlig till nordvästlig riktning från Högdalstopparna kommer inte eventuell påverkan på trycknivåerna på grund av dränering till planerad bergtunnel att förändra strömningsriktningen. Föroreningen kommer därför inte att sprida sig till ett tidigare opåverkat område. Dock kan en avsänkning medföra en ökad hydraulisk gradient och därmed ett ökat grundvattenflöde genom jord och berg.

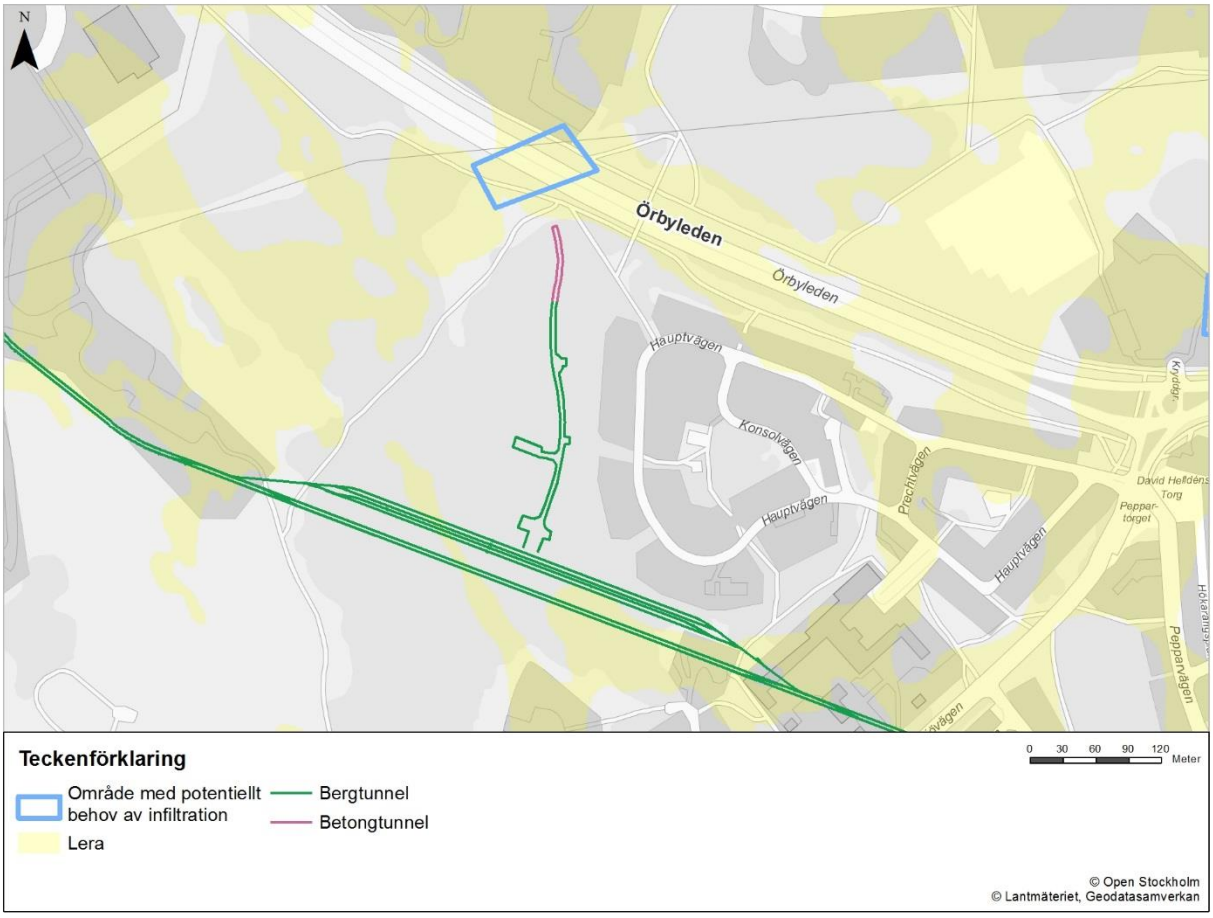
Då risk finns för främst förhöjda metallhalter och PAH i anslutning till Högdalstopparna bör rening ske av länshållningsvatten, exempelvis genom sedimentering i utjämnings-/avsättningsmagasin, under byggtid och dräneringsvatten under drifttid.

5 Skyddsinfiltration

För att undvika skadliga sänkningar av grundvattennivåer kan skyddsinfiltration förberedas i områden där det förekommer objekt som är känsliga för grundvattenpåverkan. Behov av skyddsinfiltation har främst identifierats i anslutning till schakt för arbets-/servicetunnel vid Örbyleden.

Under byggtiden bedöms skyddsinfiltration behövas i samband med anläggandet av temporära schakt i jord som krävs vid anläggandet av betongtunnel. Lokalisering av område med behov av infiltration visas i Figur 32. När väl schakt är anlagda blir dessa konstruktioner täta varför skyddsinfiltration för schakt kan avslutas eller minskas i omfattning.

Behov av skyddsinfiltration motiveras i detta fall av närheten till Örbyleden som är belägen inom området för det undre magasinet Gubbängen västra. Skyddsinfiltration är en effektiv åtgärd för att motverka skada om en grundvattenpåverkan blir större än vad som prognosticerats eller inte fullt ut kan hanteras med noggrann tätning. Skulle en påverkan uppkomma utöver eventuell påverkan i anslutning till schakt för arbets-/servicetunnelvid Örbyleden kan skyddsinfiltration vara aktuellt även inom andra delar av redovisat influensområde.



Figur 32 Översikt av område med potentiellt behov av infiltration.

6 Referenser

6.1 Framtagna underlagsdokument

[1] Förundersökningsrapport Hydrogeologi, Dokumentid 5320-G52-24-04001

[2] Förundersökningsrapport Berg, Dokumentid 5320-B51-24-04001

[3] Förundersökningsrapport Geoteknik, Dokumentid 5320-G51-24-04001

[4] Förundersökningsrapport Miljögeoteknik, Dokumentid 5320-N51-24-04032

6.2 Övriga referenser

Naturvårdsverket (2017): Miljödataportalen, WMS-tjänst, Svenska Marktäckedata (SMD) redovisar vegetation och markanvändning med en indelning som bygger på EU:s klassificeringssystem för CORINE Land Cover, http://mdp.vic-metria.nu/miljodataportalen/, Naturvårdverket

SGU (1984): Beskrivning och bilagor till hydrogeologiska kartan över Stockholms län, Serie Ah nr 6, Sveriges geologiska undersökning

Tyresåns vattenvårdsförbund (2001): Beskrivning av Magelungen och Drevviken, www.tyresan.se, Tyresåns vattenvårdsförbund

Gustafson G. (2009): Hydrogeologi för bergbyggare, Förlag Forskningsrådet, Formas 2009-12-01, ISBN 978-91-540-6029-0, Beteckning T2:2009

Miljöförvaltningen i Stockholm (2013): Grundvatten i Stockholm 2011-2012, Miljöförvaltningen, Stockholm stad, ISBN 978-91-85125-49-4

Naturvårdsverket (2009): Undersökning av föroreningar i berggrund, Rapport 5930, Kunskapsprogrammet Hållbar Sanering, Naturvårdsverket

Rodhe A, Lindström G, Rosberg J, Pers C (2006): Grundvattenbildning i svenska typjordar – översiktlig beräkning med en vattenbalansmodell, Rapport Serie A, Nr 66, Luft- och vattenlära, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet

Ryd, E. (2017): Samband mellan kapacitet vid borrning och transmissivitet i kristallint och sedimentärt berg. Uppsala universitet, september 2017.

SMHI (2011): Regional klimatsammanställning – Stockholms län, rapport Nr 2010-78, SMHI

SMHI (2015): Hemsida; klimatdata, normalårsavrinning 1961-1990, årsnederbörd medelvärde 1961-1990, årsavdunstning medelvärde 1961-1990, www.smhi.se

SGU (1997). Grundvatten i Stockholm, Tillgång, sårbarhet, kvalitet. Utfört på uppdrag av Stockholms miljöförvaltning

SGU (2010): Grundvattennivåer och vattenförsörjning vid ett förändrat klimat, SGU-rapport 2010:12, SGU

Stockholms läns landsting (2017): Miljöprövning för tunnelbana till Arenastaden, Bilaga C, PM Hydrogeologi, Dokumentid 3140-M35-22-0025, Diarienummer FUT 2016-0025, Bilaga till

ansökan om tillstånd enligt miljöbalken till bortledande av grundvatten med anledning av anläggande och drift av tunnelbana till Arenastaden station m.m, Stockholms läns landsting

SKB(2006): Storregional grundvattenmodellering –fördjupad analys av flödesförhållanden i östra Småland, Jämförelse av olika konceptuella beskrivningar, rapport R-06-64, Svensk Kärnbränslehantering AB

Stockholm vatten (2014): Stockholm framtids avloppsrening, teknisk beskrivning, grundläggning av utloppsledningar, Henrikdalsverket, bilaga E, Stockholm 2014-07-01

TMO (2016): Utdrag (oktober 2016) ur trafikverkets mätdatabas för omgivningspåverkan, Trafikverket

Trafikverket (2011a): E4 Förbifart Stockholm, FS1, Konsortiet Förbifart Stockholm, PM Hydrogeologi, Tillståndsansökan Miljöbalken, Systemhandling, 2011-06-01, 0G14H032, Trafikverket

Trafikverket (2011b): E4 Förbifart Stockholm, FS1, Konsortiet Förbifart Stockholm, PM Hydrogeologi, Bilaga 5, Hydrogeologiska beräkningar, Tillståndsansökan Miljöbalken, Systemhandling, 2011-06-01, 0G14H017, Trafikverket

Vårt uppdrag är att genomföra tunnelbanans utbyggnad och övriga åtgärder inom ramen för 2013 års Stockholmsförhandling. Det innebär planering, projektering och byggnation av ny tunnelbana och nya stationer på fyra sträckor. För att kunna genomföra utbyggnaden behöver också depåkapaciteten ökas och nya tåg köpas in. Byggstarten för utbyggnad av depåkapacitet Högdalen planeras under 2020 och byggtiden beräknas pågå cirka 6 år.

Region Stockholm
Förvaltning för utbyggd tunnelbana
Box 22550, 104 22 Stockholm
Telefon: 08-737 25 00

Region Stockholm

5140-M53-22-01003_bilaga C1

PM Hydrogeologi

Bilaga C1
Översiktskarta

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Datum: 2019-06-14

Skala (A3): 1:13 000

0 100 200 300 400 500 Meter

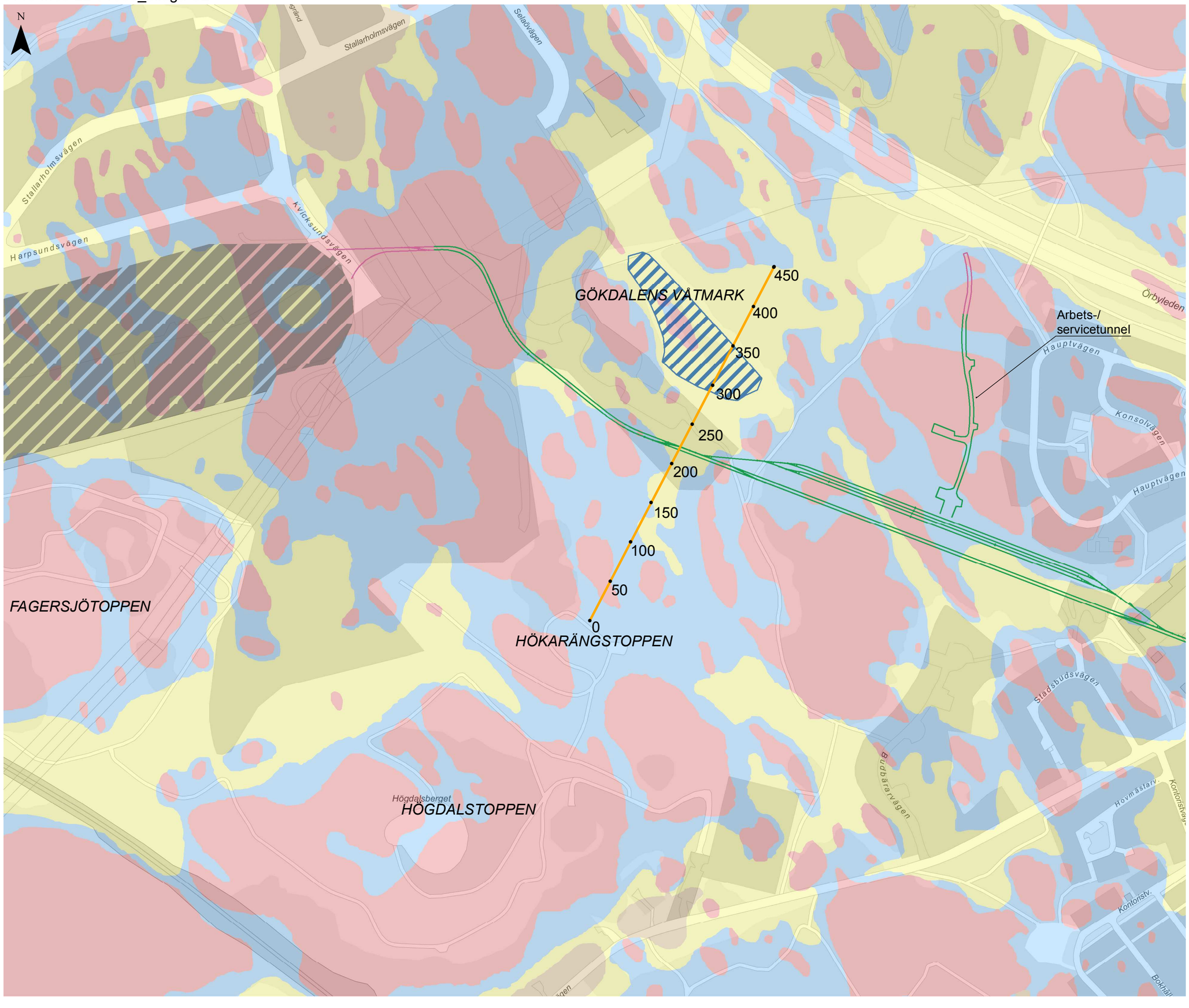
© Lantmäteriet, Geodatasamverkan
© Open Stockholm

Teckenförklaring

- Bergtunnel
- Betongtråg
- Betongtunnel
- Spår i ytläge
- Befintlig tunnelbana
- Befintlig Högdalsdepå
- Utredningsområde för grundvatten

Arbets-/
servicetunnel

Region Stockholm



PM Hydrogeologi

Bilaga C2
Plankarta tvärsektion
Hökarängstoppen - Gökdalens våtmark

Sida 1 av 2

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Datum: 2019-06-14

Skala (A3): 1:4 000

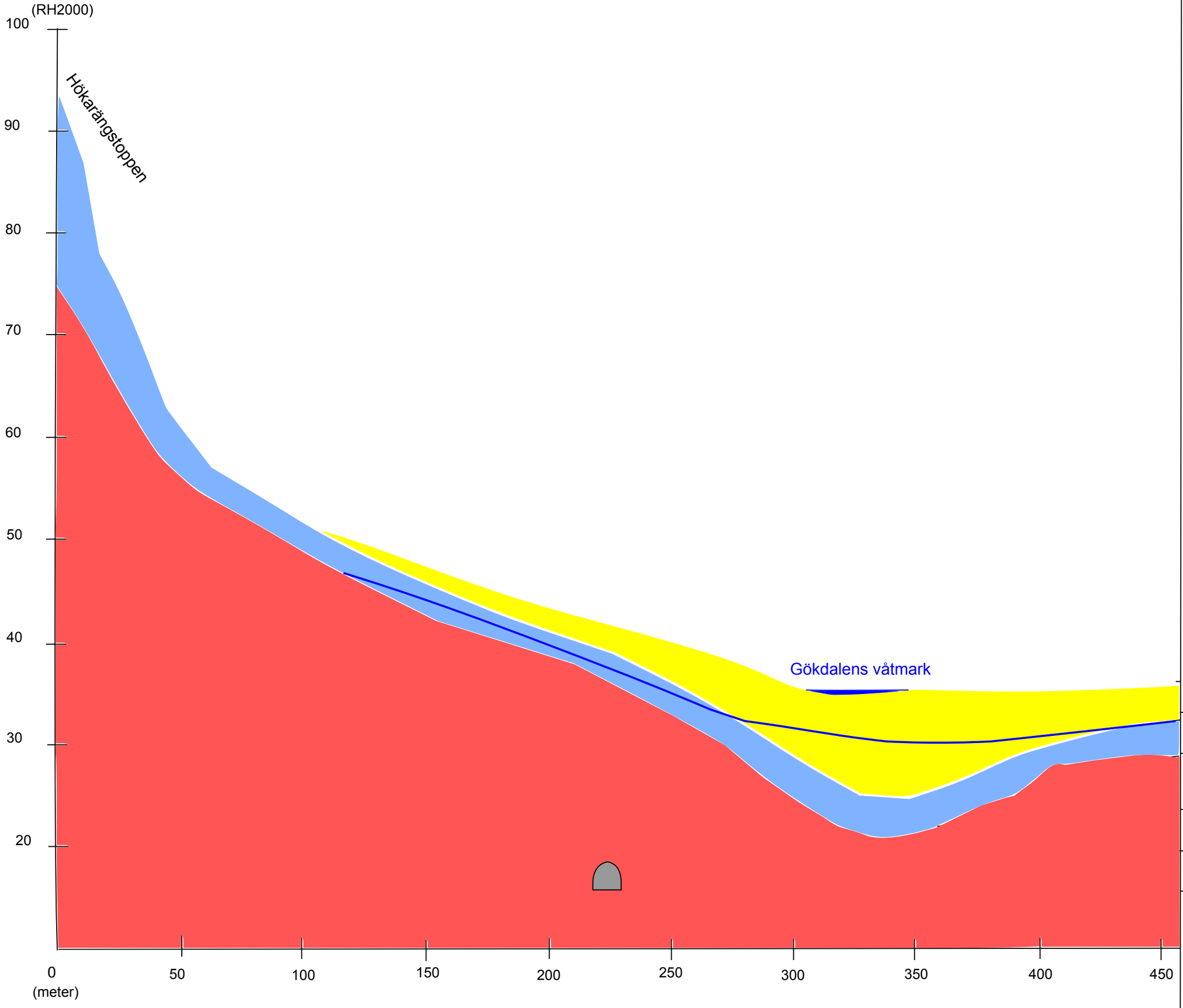
0 50 100 150 200 Meter

© Lantmäteriet, Geodatasamverkan
© Open Stockholm

Teckenförklaring

- Tvärsektion
- Våtmarksområde
- Bergtunnel
- Betongtråg
- Betongtunnel
- Befintlig Högdalsdepå
- Berg i dagen
- Lera/Mindre mäktig
- Morän/Huvudsakligen
- Organisk jord
- Sten, grus och sand
- Växellagring

Region Stockholm



PM Hydrogeologi

Bilaga C2
Tvärsektion Hökarängstoppen - Gökdalens våtmark
Sida 2 av 2

Teckenförklaring

- Berg
- Morän
- Lera
- Grundvattennivå undre magasin
- Spårtunnel

Miljöprövning för Utökad depåkapacitet Högdalen

Region Stockholm

Organisation	Rit/Konst	Format
WSP	JA	A3
FUT ort	Datum	
Stockholm	20190614	

Utökad depåkapacitet Högdalen
Bilaga C2.2
Tvärsektion Hökarängstoppen - Gökdalens våtmark

5140-M53-22-01003_bilaga C3

PM Hydrogeologi

Bilaga C3
Geologisk karta med svaghetszoner

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Datum: 2019-06-14

Skala (A3): 1:13 000

0 100 200 300 400 500 Meter

© Sveriges geologiska undersökning
© Lantmäteriet, Geodatasamverkan
© Open Stockholm

Teckenförklaring

- Kvarts-fältspatrik sedimentär bergart (sandsten, gråvacka m.m.)
- Ultrabasisk, basisk och intermediär omvandlad bergart (amfibolit, eklogit m.m.)
- Sur intrusivbergart (granit, granodiorit, monzonit m.m.)
- Karterade svaghetszoner
- Svaghetszoner byggnadsgeologiska kartan
- Bergtunnel
- Betongtunnel
- Betongtråg
- Spår i ytläge
- Befintlig tunnelbana
- Befintlig Högdalsdepå
- Utredningsområde för grundvatten

Region Stockholm

PM Hydrogeologi

Bilaga C4.1
Hydrogeologisk karta med grundvattenmagasin

Sida 1 av 2

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Datum: 2019-06-14

Skala (A3): 1:13 000

0 100 200 300 400 500 Meter

© Lantmäteriet, Geodatasamverkan
© Open Stockholm

Teckenförklaring

- Flödesriktning
- Undre grundvattenmagasin
- Grundvattenförekomst
- Bergtunnel
- Betongtråg
- Betongtunnel
- Spår i ytläge
- Befintlig tunnelbana
- Befintlig Högdalsdepå
- Berg
- Lera
- Morän
- Organisk jord
- Sten, grus och sand
- Växellagring
- Utredningsområde för grundvatten

Region Stockholm

PM Hydrogeologi

Bilaga C4.2
Grundvattenrör

Sida 2 av 2

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Datum: 2019-06-14

Skala (A3): 1:13 000

0 100 200 300 400 500 Meter

© Lantmäteriet, Geodatasamverkan
© Open Stockholm

Teckenförklaring

- Grundvattenrör i övre magasin
- Grundvattenrör i undre magasin
- Grundvattenrör i berg
- Bergtunnel
- Betongtunnel
- Betongtråg
- Spår i ytläge
- Befintlig tunnelbana
- Befintlig Högdalsdepå
- Berg
- Lera
- Morän
- Organisk jord
- Sten, grus och sand
- Växellagring
- Utredningsområde för grundvatten

Region Stockholm

PM Hydrogeologi

Bilaga C5
Influensområde och känsliga objekt

Sida 1 av 11

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Datum: 2019-06-14

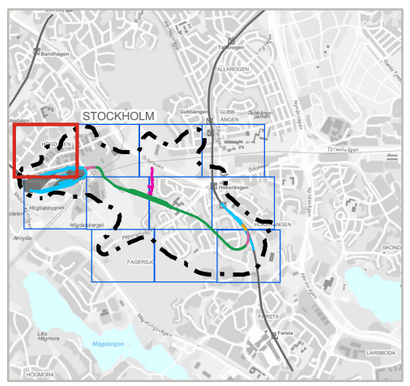
Skala (A3): 1:2000

0 50 100 Meter

© Lantmäteriet, Geodatasamverkan
© Open Stockholm

Teckenförklaring

- Energibrunn
- Vattenbrunn
- Grundläggning på lera
- Okänd grundläggning
- Övriga byggnader
- Befintlig tunnelbana
- Befintlig Högdalsdepå
- Fastighetsgräns
- Lera
- Organisk jord
- Influensområde för grundvatten



Region Stockholm

PM Hydrogeologi

Bilaga C5
Influensområde och känsliga objekt

Sida 2 av 11

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Datum: 2019-06-14

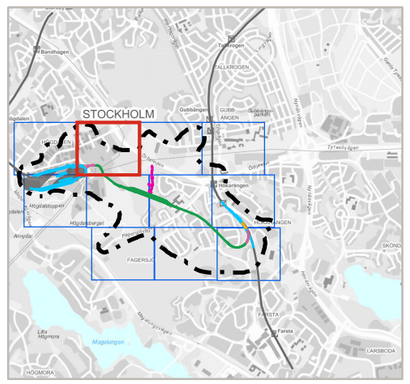
Skala (A3): 1:2000

0 50 100 Meter

© Lantmäteriet, Geodatasamverkan
© Open Stockholm

Teckenförklaring

- Energibrunn
- Vattenbrunn
- Grundläggning på lera
- Okänd grundläggning
- Övriga byggnader
- Spårsträckning - Bergtunnel
- Spårsträckning - Betongtråg
- Spårsträckning - Betongtunnel
- Befintlig tunnelbana
- Befintlig Högdalsdepå
- Fastighetsgräns
- Lera
- Organisk jord
- Influensområde för grundvatten



Region Stockholm

PM Hydrogeologi

Bilaga C5
Influensområde och känsliga objekt

Sida 3 av 11

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Datum: 2019-06-14

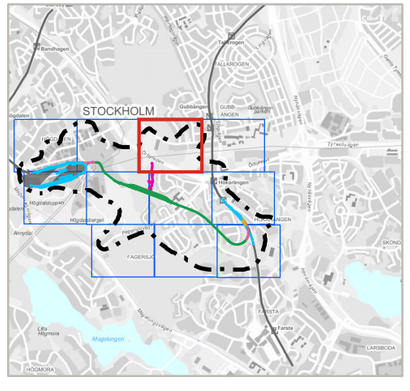
Skala (A3): 1:2000

0 50 100 Meter

© Lantmäteriet, Geodatasamverkan
© Open Stockholm

Teckenförklaring

- Energibrunn
- Vattenbrunn
- Grundläggning på lera
- Okänd grundläggning
- Övriga byggnader
- Befintlig tunnelbana
- Befintlig Högdalsdepå
- Fastighetsgräns
- Lera
- Organisk jord
- Influensområde för grundvatten



Region Stockholm

PM Hydrogeologi

Bilaga C5
Influensområde och känsliga objekt

Sida 4 av 11

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Datum: 2019-06-14

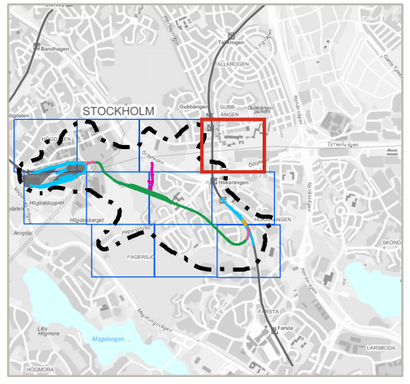
Skala (A3): 1:2000

0 50 100 Meter

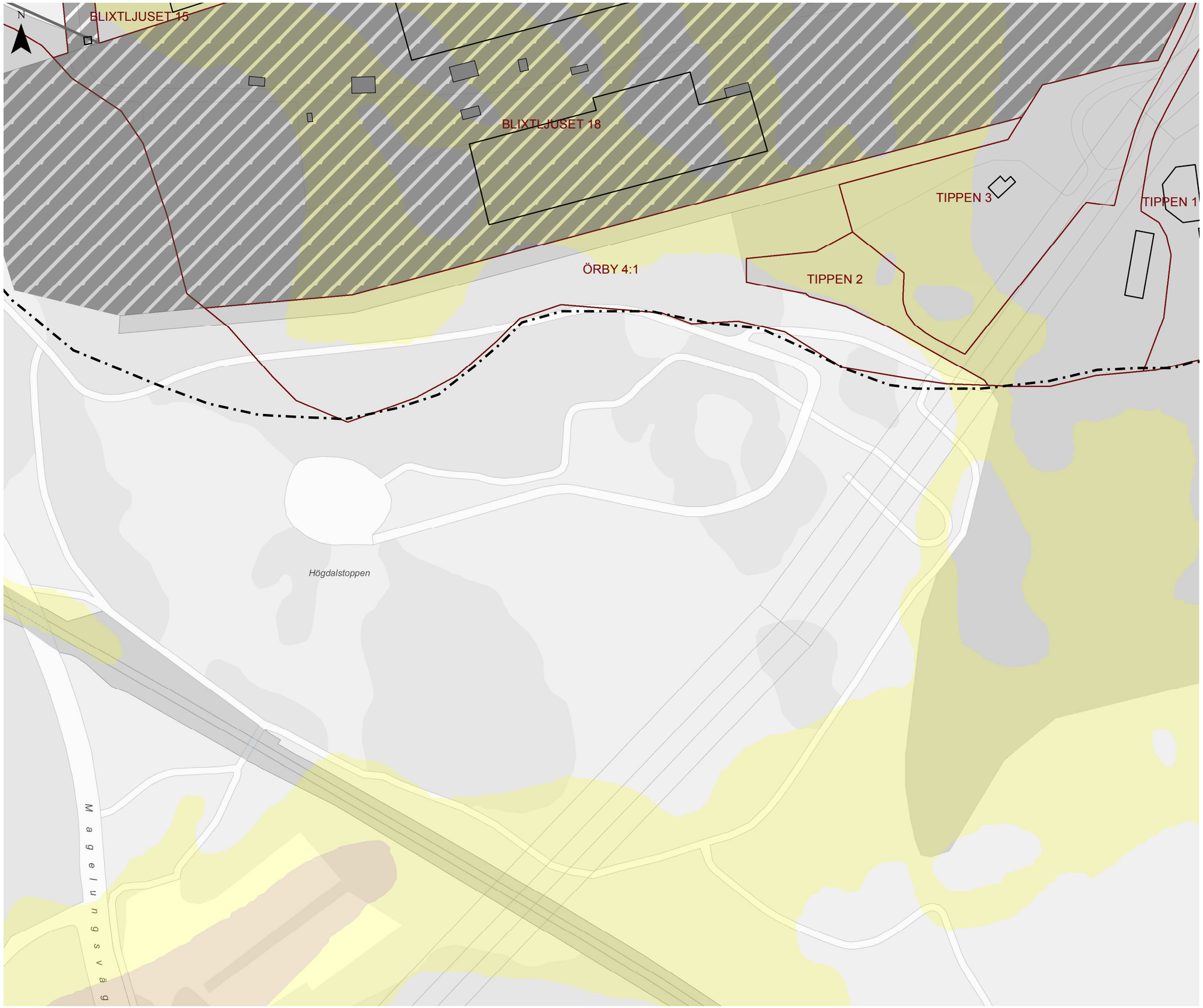
© Lantmäteriet, Geodatasamverkan
© Open Stockholm

Teckenförklaring

- Energibrunn
- Vattenbrunn
- Grundläggning på lera
- Okänd grundläggning
- Övriga byggnader
- Befintlig tunnelbana
- Befintlig Högdalsdepå
- Fastighetsgräns
- Lera
- Organisk jord
- Influensområde för grundvatten



Region Stockholm



PM Hydrogeologi

Bilaga C5
Influensområde och känsliga objekt

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Datum: 2019-06-14

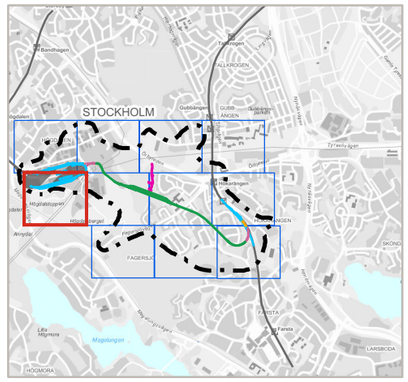
Skala (A3): 1:2000

0 50 100 Meter

© Lantmäteriet, Geodatasamverkan
© Open Stockholm

Teckenförklaring

- Energibrunn
- Vattenbrunn
- Grundläggning på lera
- Okänd grundläggning
- Övriga byggnader
- Befintlig tunnelbana
- Befintlig Högdalsdepå
- Fastighetsgräns
- Lera
- Organisk jord
- Influensområde för grundvatten



Region Stockholm

TIPPEN 2

TIPPEN 1

TIPPEN 4

ÖRBY 4:1

GUBBÄNGEN 1:1

GÅRDSKARLEN 3

GÅRDSKARLEN 2

GÅRDSKARLEN 1

FARSTA 2:1

FASTIGHETSSKÖTAREN 1

Högdalsberget

PM Hydrogeologi

Bilaga C5
Influensområde och känsliga objekt

Sida 6 av 11

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Datum: 2019-06-14

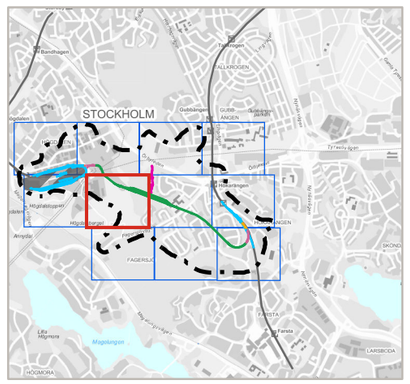
Skala (A3): 1:2000

0 50 100 Meter

© Lantmäteriet, Geodatasamverkan
© Open Stockholm

Teckenförklaring

- Energibrunn
- Vattenbrunn
- Grundläggning på lera
- Okänd grundläggning
- Övriga byggnader
- Spårsträckning - Bergtunnel
- Befintlig tunnelbana
- Befintlig Högdalsdepå
- Fastighetsgräns
- Lera
- Organisk jord
- Influensområde för grundvatten



Region Stockholm

PM Hydrogeologi

Bilaga C5
Influensområde och känsliga objekt

Sida 7 av 11

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Datum: 2019-06-14

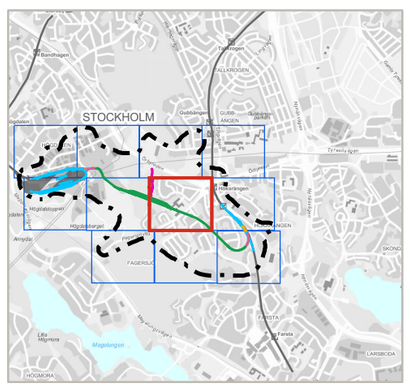
Skala (A3): 1:2000

0 50 100 Meter

© Lantmäteriet, Geodatasamverkan
© Open Stockholm

Teckenförklaring

- Energibrunn
- Vattenbrunn
- Grundläggning på lera
- Okänd grundläggning
- Övriga byggnader
- Spårsträckning - Bergtunnel
- Befintlig tunnelbana
- Befintlig Högdalsdepå
- Fastighetsgräns
- Lera
- Organisk jord
- Influensområde för grundvatten



Region Stockholm

PM Hydrogeologi

Bilaga C5
Influensområde och känsliga objekt

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Datum: 2019-06-14

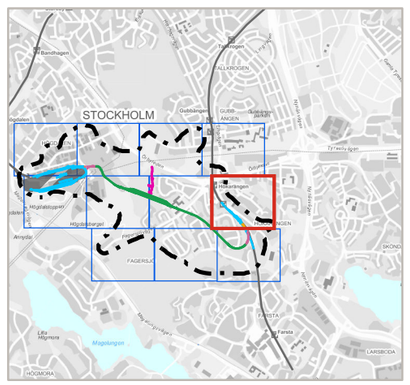
Skala (A3): 1:2000

0 50 100 Meter

© Lantmäteriet, Geodatasamverkan
© Open Stockholm

Teckenförklaring

- Energibrunn
- Vattenbrunn
- Grundläggning på lera
- Okänd grundläggning
- Övriga byggnader
- Spårsträckning - Bergtunnel
- Spårsträckning - Betongtråg
- Spår i ytläge
- Befintlig tunnelbana
- Befintlig Högdalsdepå
- Fastighetsgräns
- Lera
- Organisk jord
- Influensområde för grundvatten



Region Stockholm

PM Hydrogeologi

Bilaga C5
Influensområde och känsliga objekt

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Datum: 2019-06-14

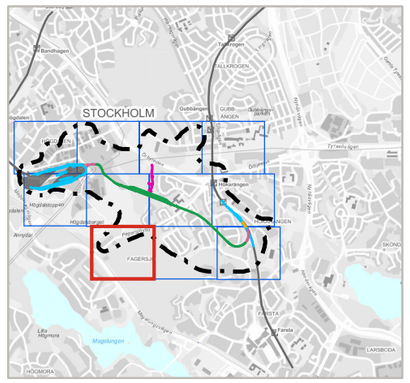
Skala (A3): 1:2000

0 50 100 Meter

© Lantmäteriet, Geodatasamverkan
© Open Stockholm

Teckenförklaring

- Energibrunn
- Vattenbrunn
- Grundläggning på lera
- Okänd grundläggning
- Övriga byggnader
- Befintlig tunnelbana
- Befintlig Högdalsdepå
- Fastighetsgräns
- Lera
- Organisk jord
- Influensområde för grundvatten



Region Stockholm

PM Hydrogeologi

Bilaga C5
Influensområde och känsliga objekt

Sida 10 av 11

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Datum: 2019-06-14

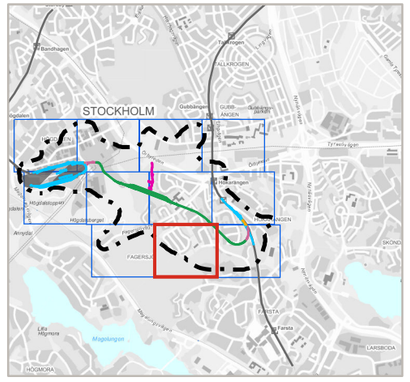
Skala (A3): 1:2000

0 50 100 Meter

© Lantmäteriet, Geodatasamverkan
© Open Stockholm

Teckenförklaring

- Energibrunn
- Vattenbrunn
- Grundläggning på lera
- Okänd grundläggning
- Övriga byggnader
- Spårsträckning - Bergtunnel
- Befintlig tunnelbana
- Befintlig Högdalsdepå
- Fastighetsgräns
- Lera
- Organisk jord
- Influensområde för grundvatten



Region Stockholm

PM Hydrogeologi

Bilaga C5
Influensområde och känsliga objekt

Sida 11 av 11

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Datum: 2019-06-14

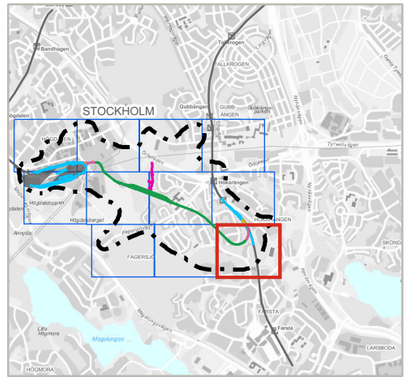
Skala (A3): 1:2000

0 50 100 Meter

© Lantmäteriet, Geodatasamverkan
© Open Stockholm

Teckenförklaring

- Energibrunn
- Vattenbrunn
- Grundläggning på lera
- Okänd grundläggning
- Övriga byggnader
- Spårsträckning - Bergtunnel
- Spårsträckning - Betongtråg
- Spårsträckning - Betongtunnel
- Spår i ytläge
- Befintlig tunnelbana
- Befintlig Högdalsdepå
- Fastighetsgräns
- Lera
- Organisk jord
- Influensområde för grundvatten



Region Stockholm

PM Hydrogeologi

Bilaga C6

Hydrogeologiska beräkningar

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Region Stockholm

PM Hydrogeologi

Bilaga C6

Hydrogeologiska beräkningar

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Region Stockholm

Titel: PM Hydrogeologi Bilaga C6 Hydrogeologiska beräkningar
Uppdragsledare: Catrine Söderström
Projektledare: Jörgen Niklasson
Författare: Håkan Svensson och Patrik Lissel
Bilder & illustrationer: FUT/WSP/Kemakta om inget annat anges
Dokumentid: 5140-M53-22-01003_bilaga C6
Diarienummer: FUT 2016-0027
Utgivningsdatum: 2019-06-14

Distributör: Region Stockholm, förvaltning för utbyggd tunnelbana
Box 225 50, 104 22 Stockholm. Tel: 08 737 25 00. E-post: nyatunnelbanan@sll.se

Innehållsförteckning

1 Inledning....4
2 Bergets genomsläpplighet....4
2.1 Allmänt....4
2.2 SGU:s brunnsarkiv....4
2.3 Vattenförlustmätningar....9
3 Beräkning av inläckage till bergtunnlar....13
4 Vattenbalanser....18
4.1 Klimatologisk vattenbalans....18
4.2 Vattenbalans grundvatten....18
5 Beräkning av influensområde....22
5.1 Metodik....22
5.2 Beräkningar....23
5.3 Resultat....23
6 Referenser....26
6.1 Framtagna underlagsdokument....26
6.2 Övriga referenser....26

1 Inledning

Denna PM är en bilaga till PM Hydrogeologi, Bilaga C, som ingår i miljöprövningen för utbyggd depå i Högdalen.

Syftet med denna PM är att redovisa hydrogeologiska beräkningar som ligger till underlag för bedömning av planerade anläggningars påverkan rörande grundvattenpåverkan för den tillståndspliktiga vattenverksamheten.

2 Bergets genomsläpplighet

2.1 Allmänt

Detta kapitel utgör en redovisning av utvärderingen av bergets genomsläpplighet (hydraulisk konduktivitet) inom område för sträckning av planerade anläggningar. Sammanställning har dels gjorts av material från SGU:s brunnsarkiv samt från vattenförlustmätningar i kärnborrhål.

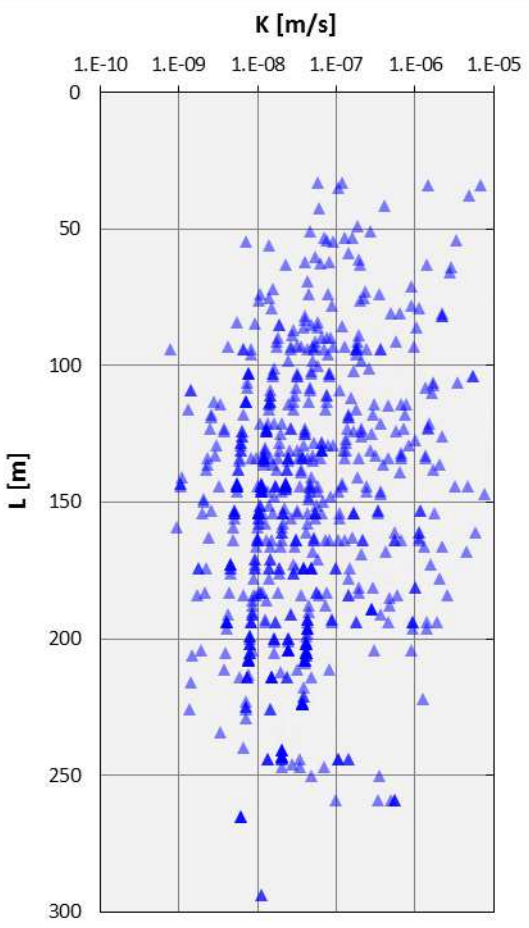
2.2 SGU:s brunnsarkiv

Analys av data från brunnsarkivet har genomförts genom studie av brunnar inom en radie om cirka 3 kilometer från planerad tunnellinje.

Först har en medelkonduktivitet (K) beräknats enligt (Ryd 2017) för respektive brunn som har beräkningsbar data (892 st) och sedan har fördelningen av beräknade K-värden för olika populationer studerats indelade efter brunnsdjup.

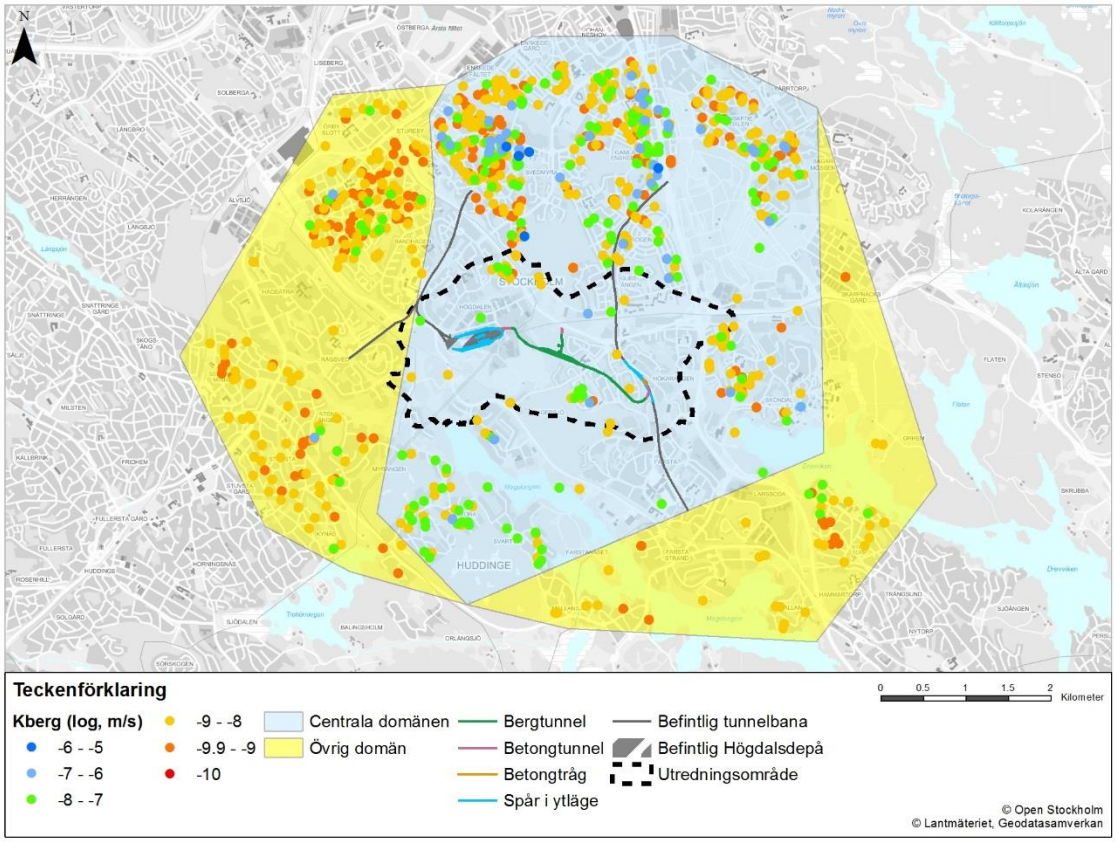
Skäl för indelning i olika populationer är att de vattenförande egenskaperna för det kristallina berget generellt kan antas uppvisa ett tätare berg mot djupet (djupavtagande K). Detta har studerats vid ett antal platser i Sverige och är även gällande för aktuellt område, vilket framgår av datapopulationen för alla brunnar figur 1.

Mönstret i figur 1 avspeglar dock inte det korrekta djupavtagandet, eftersom varje punkt här representerar ett medelvärde av allt berg ovanför punkten. Det har i andra projekt redovisats liknande plottar men mot halva brunnsdjupet som ett ”representativt djup” (SKB, 2000). Sådana plottar visar inte heller det korrekta djupavtagandet, möjligen dock med en något bättre visuell passning (se exempel i figur 8).



Figur 1. Plottade beräknade K-värden för respektive brunn mot L, vilket här representerar bedömd vattenförande mäktighet i genomborrat berg för respektive brunn.

Före analys av fördelningar för olika brunnsdjup har respektive datavärde plottats i GIS för att se om det går att utskilja något mönster som skulle kunna ge stöd för indelning i olika hydrogeologiska domäner, figur 2. Plottningen ger stöd för en indelning i två domäner, där det centrala området kan förutses ha generellt högre konduktivitet än områden väster och öster om detsamma. Mot bakgrund av SGU:s WMS-tjänst om uttagskapacitet i berg ansluter den centrala domänen väl till SGU:s område i norr med ”goda uttagsmöjligheter” i relation till omgivande områden med ” mindre goda uttagsmöjligheter”.



Figur 2. Beräknade K-värden för respektive brunn samt domänindelning (blå=centrala och gul=övrigt).

Den efterföljande analysen görs på brunnar inom den centrala domänen. Denna population bearbetas så att brunnar med samma koordinat (eller närliggande), vilka tolkats som borrhålslager, slås samman till ett representativt värde för lagret (geometriska medelvärdet av K för ingående brunnar i borrhålslagret). Detta ger en slutlig population om 758 värden inom domänen.

Som tidigare nämnts ger figur 1 inte en korrekt bild av djupavtagandet för den hydrauliska konduktiviteten då varje punkt representerar allt berg ovanför det plottade djupet och K-värdet medelkonduktiviteten för detta berg. Därför används här en metod där den sammantagna populationen indelas i olika delmängder efter brunnsdjup (d). Varje delmängd analyseras därefter för att beräkna en storskalig hydraulisk konduktivitet (K_{3D}) för respektive studerad population (Gustafson, 2009).

De studerade populationerna har här valts till;

- brunnar med mindre djup i berg (d) än 240 m,
- brunnar med mindre djup i berg (d) än 160 m,
- brunnar med mindre djup i berg (d) än 100 m samt
- brunnar med mindre djup i berg (d) än 60 m.

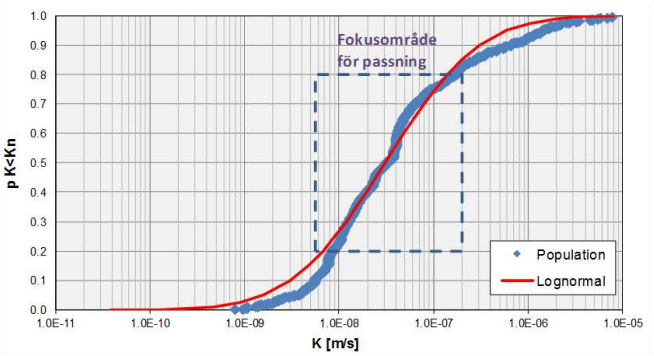
Populationerna är (förväntat) lognormalfördelade (se exempel figur 3-figur 5). En sammanställning av fördelningarna visar att det finns ett statistiskt säkerställt djupavtagande K (figur 6).

På populationen

n	715	st	Antal värden i populationen
K_a	3.6E-07	m/s	Aritmetiskt medelvärde
σ_K	1.9E-06	m/s	Standardavvikelse
μ_{lnK}	17.1	ln m/s	Logmedelvärde
σ_{lnK}	1.83		Logstandardavvikelse
K_g	3.9E-08	m/s	Geometriskt medelvärde
K_{3D}	6.8E-08	m/s	Effektiv hydraulisk konduktivitet för "stor skala" enligt Matherons förmodan: $K_{3D}=K_g \exp(\sigma_{lnK}^2/6)$

Anpassad lognormalfördelning

μ_{lnK}	17.3	ln m/s	Logmedelvärde
σ_{lnK}	1.80		Logstandardavvikelse
K_g	3.1E-08	m/s	Geometriskt medelvärde
K_{3D}	5.3E-08	m/s	Effektiv hydraulisk konduktivitet för "stor skala" enligt Matherons förmodan: $K_{3D}=K_g \exp(\sigma_{lnK}^2/6)$



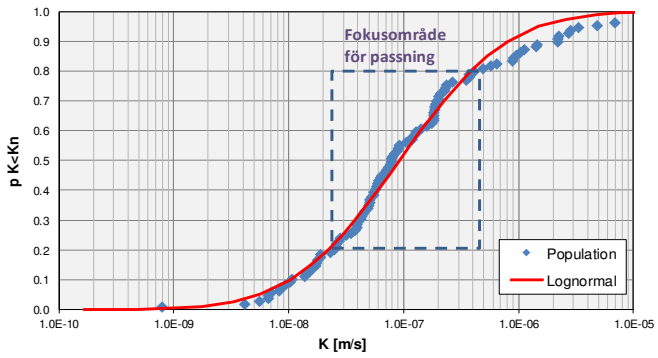
Figur 3. Fördelning av beräknade statistiska parametrar för brunnar med d<240 m. Streckad rektangel avser fokusområde för lognormalpassning.

På populationen

n	108	st	Antal värden i populationen
K_a	1.1E-06	m/s	Aritmetiskt medelvärde
σ_K	4.3E-06	m/s	Standardavvikelse
μ_{lnK}	16.0	ln m/s	Logmedelvärde
σ_{lnK}	1.92		Logstandardavvikelse
K_g	1.1E-07	m/s	Geometriskt medelvärde
K_{3D}	2.0E-07	m/s	Effektiv hydraulisk konduktivitet för "stor skala" enligt Matherons förmodan: $K_{3D}=K_g \exp(\sigma_{lnK}^2/6)$

Anpassad lognormalfördelning

μ_{lnK}	16.2	ln m/s	Logmedelvärde
σ_{lnK}	1.70		Logstandardavvikelse
K_g	9.2E-08	m/s	Geometriskt medelvärde
K_{3D}	1.5E-07	m/s	Effektiv hydraulisk konduktivitet för "stor skala" enligt Matherons förmodan: $K_{3D}=K_g \exp(\sigma_{lnK}^2/6)$



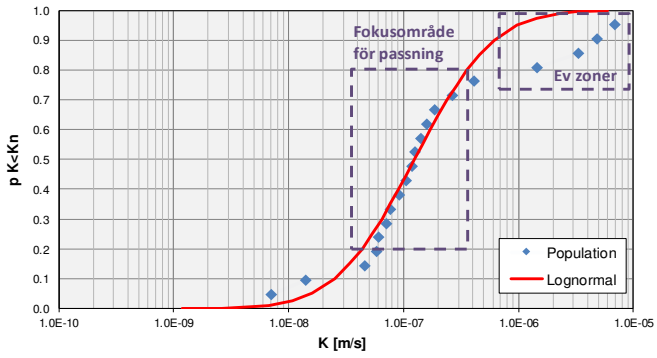
Figur 4. Fördelning av beräknade statistiska parametrar för brunnar med d<100 m.

På populationen

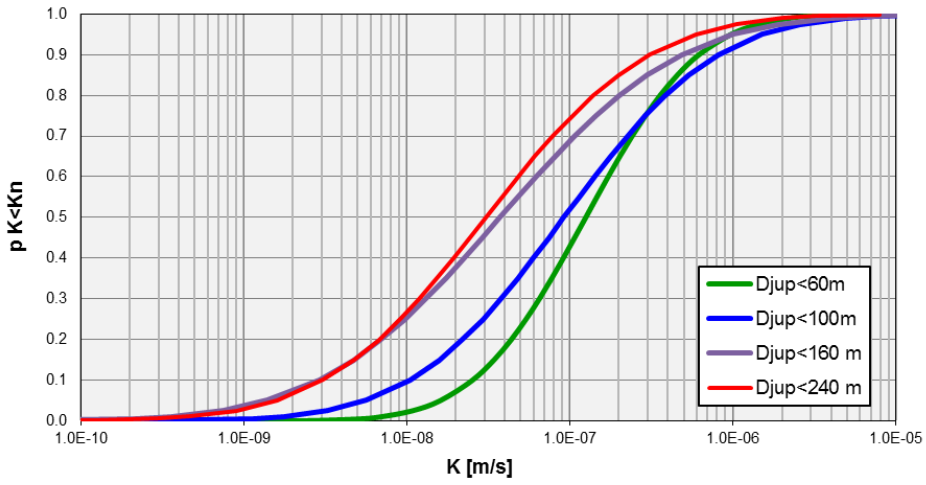
n	20	st	Antal värden i populationen
K_a	9.2E-07	m/s	Aritmetiskt medelvärde
σ_K	1.9E-06	m/s	Standardavvikelse
μ_{lnK}	15.5	ln m/s	Logmedelvärde
σ_{lnK}	1.80		Logstandardavvikelse
K_g	1.8E-07	m/s	Geometriskt medelvärde
K_{3D}	3.0E-07	m/s	Effektiv hydraulisk konduktivitet för "stor skala" enligt Matherons förmodan: $K_{3D}=K_g \exp(\sigma_{lnK}^2/6)$

Anpassad lognormalfördelning

μ_{lnK}	15.9	ln m/s	Logmedelvärde
σ_{lnK}	1.25		Logstandardavvikelse
K_g	1.2E-07	m/s	Geometriskt medelvärde
K_{3D}	1.6E-07	m/s	Effektiv hydraulisk konduktivitet för "stor skala" enligt Matherons förmodan: $K_{3D}=K_g \exp(\sigma_{lnK}^2/6)$



Figur 5. Fördelning av beräknade statistiska parametrar för brunnar med d<60 m.



Figur 6. Sammanställning av anpassade lognormalfördelningar för studerade populationer.

Bergets djupavtagande hydrauliska konduktivitet kan beskrivas med en potensfunktion enligt ekvation 1 nedan (SKB, 2006).

$$K_{ber} = Cd^{L} \qquad \text{(ekv 1)}$$

där

C = konstant som väljs på ett sådant sätt att K vid djupet 5 meter ges ett värde om 1,5 x beräknat K för underliggande 5 meter, dvs vid d <5 meter antas att K inte följer potenstrenden

d = djup i berg

L = konstant för trend djupavtagande K

För bestämning av konstanter (C och L) som ger ett djupavtagande som stämmer med utvärderad population används K_{3D}-värdena för de olika delpopulationerna som passningsparametrar (kolumn A, figur 7) till det beräknade K-värdet med potensfunktionen ($K_{_Normalberg}$, kolumn G). Passningen görs manuellt genom en transmissivitetssummering av respektive studerad bergmäktighet där medelvärdet för konduktiviteten för studerad mäktighet antas till $\Sigma T/b_{tot}$ (kolumn B), ekvation 2.

$$K_{medel}=\Sigma T/b_{tot} \qquad \text{(ekv 2)}$$

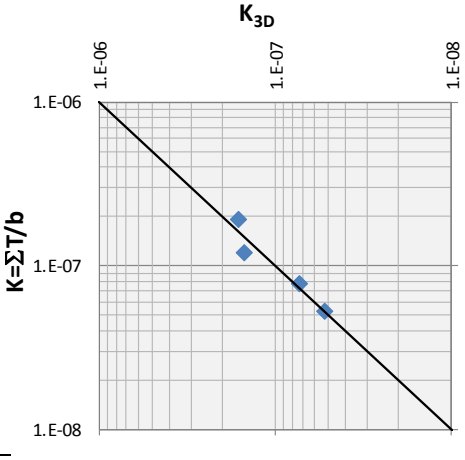
där

T = Transmissivitet (dT=deltransmissivitet för respektive mäktighet b)

b = mäktighet för vald diskretisering i vertikalled

K för de översta 5 metrarna antas inte följa potenstrenden utan ges ett värde om 1,5 x beräknat K för underliggande 5 meter. K-värde för zoner har antagit till 10 ggr K-värde för normalberg (högre C-konstant).

A	B	C	D	E	F	G	H
K_{3D}	K=ΣT/b	dT	b	d, djup	midpoint	$K_{_Normalberg}$	$K_{_Zon}$
[m/s]	[m/s]	[m^2/s]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	
		5.4E-06	5	5	2.5	*1E-06*	*1E-05*
		3.6E-06	5	10	7.5	7E-07	7E-06
		1.3E-06	5	15	12.5	3E-07	3E-06
		6.6E-07	5	20	17.5	1E-07	1E-06
		4.0E-07	5	25	22.5	8E-08	8E-07
		2.7E-07	5	30	27.5	**5E-08**	5E-07
		1.9E-07	5	35	32.5	**4E-08**	4E-07
		1.4E-07	5	40	37.5	3E-08	3E-07
		1.1E-07	5	45	42.5	2E-08	2E-07
		9.0E-08	5	50	47.5	2E-08	2E-07
		7.4E-08	5	55	52.5	1E-08	1E-07
		6.1E-08	5	60	57.5	1E-08	1E-07
1.6E-07	**1.9E-07**	5.6E-08	5	65	**60**	1E-08	1E-07
		7.2E-08	10	75	70	7E-09	8E-08
		5.6E-08	10	85	80	6E-09	6E-08
		4.5E-08	10	95	90	4E-09	5E-08
1.5E-07	**1.2E-07**	3.7E-08	10	105	**100**	4E-09	4E-08



Figur 7. Princip för beräkning av konstanterna C och L mot passningsparametrar K_{3D} (tabellutsnitt).

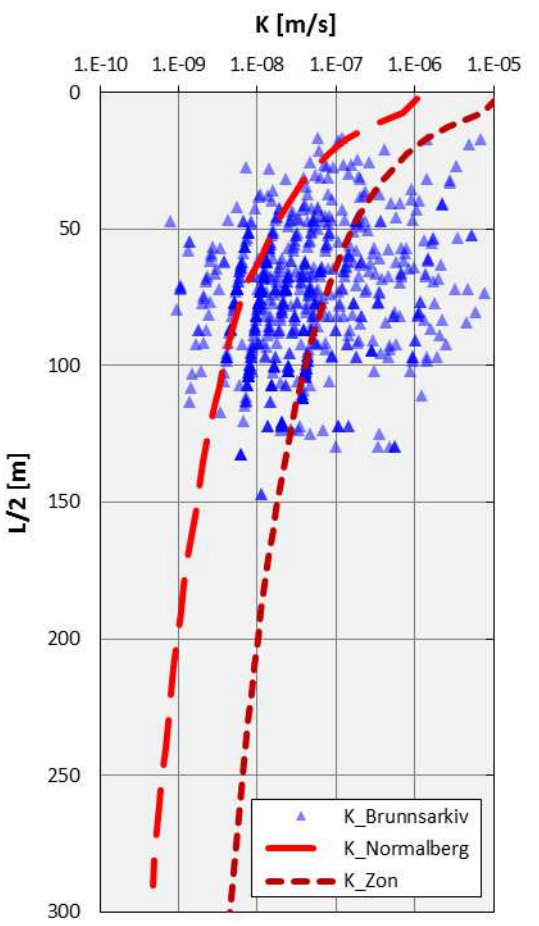
Olika värden på C och L kan ge i princip lika god passning mot K_{3D}-värdena, varför det slutliga valet av konstanter även inbegriper en rimlighetsbedömning av konduktiviteter på större djup.

I detta fall har det bedömts att det sannolikt inte är tätare berg på 250 meters djup än cirka $K=5 \cdot 10^{-10}$ m/s.

Valda konstanter för normalberg är $C=4{,}1 \cdot 10^{-5}$ och L=-2,0, resulterande i funktion för djupantagande K enligt figur 8. För zoner har antagits $C=4{,}1 \cdot 10^{-4}$ och L=-2,0.

Osäkerheten i metoden ligger till stor del i den av brunnsborraren bedömda brunnskapaciteten (påverkar beräknat K_{medel} för brunnen). Fördelen med metoden är det stora dataunderlaget och den ”slumpartade” spridningen av datapunkter, jämfört med riktade undersökningar mot svaghetszoner.

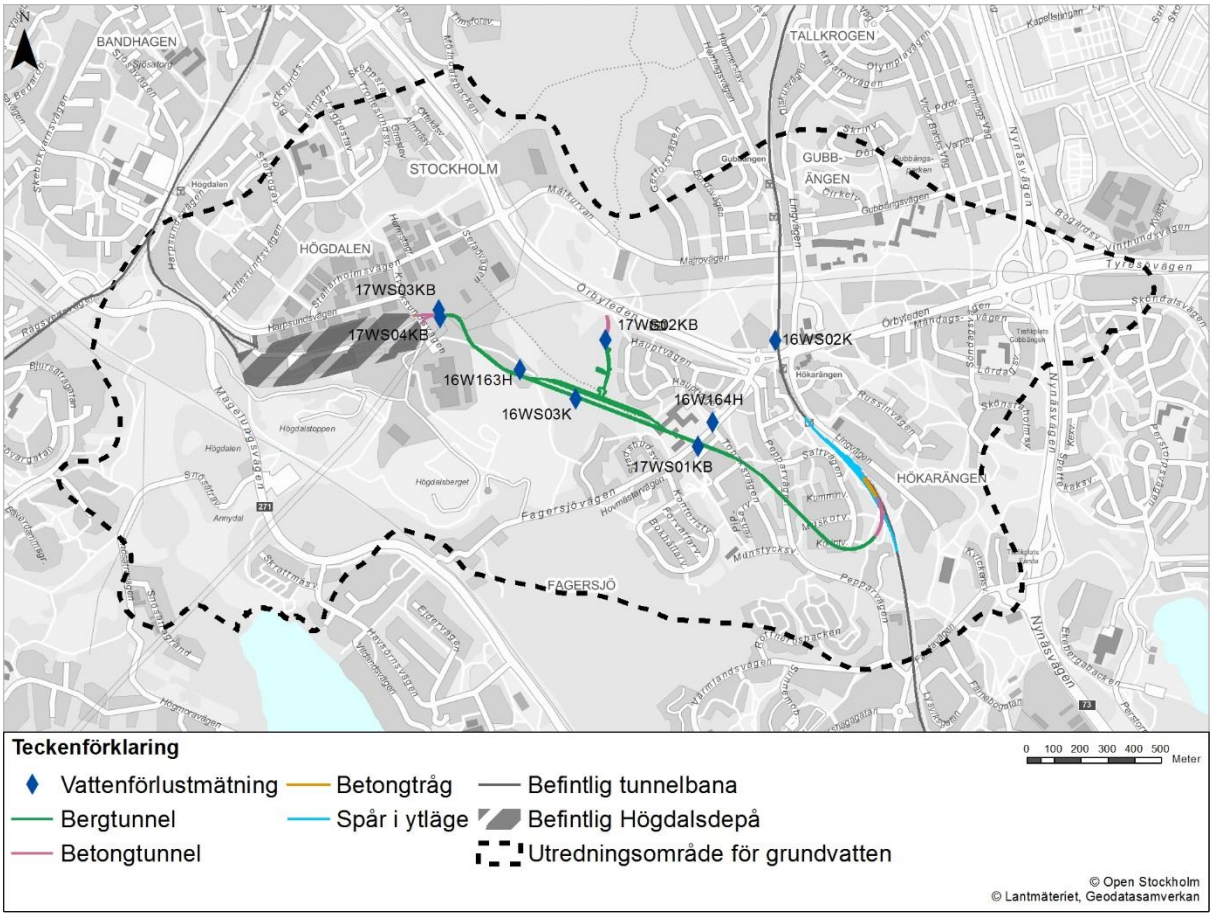
En annan osäkerhet som brukar anföras för data från brunnsarkivet är den bias som introduceras för de fall man borrar efter vatten. Då är det vanligt att man avbryter borrning då man nått en viss kapacitet eller överger borrning vid ett visst djup om sökt kapacitet inte erhållits. Detta kan ge en skev bild av permeabilitetens djupavtagande. Men i den urbana miljön kring Högdalen är borrning efter vatten sällan förekommande och den absoluta merparten av brunnarna är energibrunnar. För dessa finns inte ovanstående invändning.



Figur 8. Plottade beräknade K-värden för respektive brunn mot halva brunnsdjupet samt anpassad funktion för djupavtagande K-värde för normalberg respektive zoner.

2.3 Vattenförlustmätningar

Inom projektet har vattenförlustmätningar utförts i två kärnborrhål och två hammarborrhål, figur 9. Dessa borrhål ska ses som riktade undersökningar med syfte att finna svaghetszoner i berget. Det kan därmed förväntas att vattenförlustmätningar i dessa borrhål ska visa på en högre genomsläpplighet i berget än den beräknade storskaliga effektiva konduktiviteten baserad på data från SGU:s brunnsarkiv.

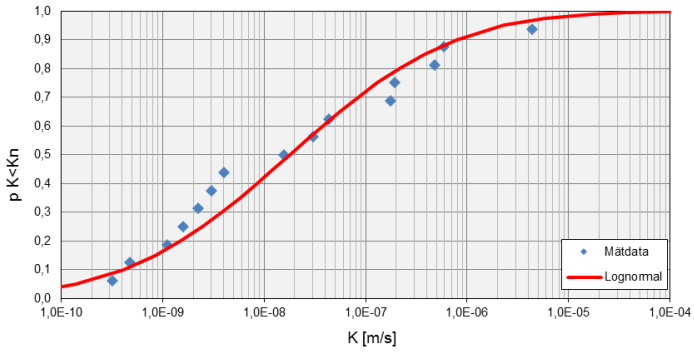


Figur 9 Planlägen för utförda vattenförlustmätningar i kärnborrhål och hammarborrhål.

Vattenförlustmätningarna i kärnborrhålen är utförda som enstegstest i testsektioner om 6 meter. Utrustning har använts som medger beräkning av K-värden ner till som lägst $K=2{,}2\cdot10^{-10}$ m/s. Detaljerad information om utförande och tolkning av data redovisas i [1].

Populationen av samtliga utvärderade K-värden är (förväntat) lognormalfördelad och har ett beräknat geometriskt medelvärde om $K_g=1{,}8\cdot10^{-8}$ m/s för den anpassade lognormalfördelningen jämte övriga statistiska parametrar enligt figur 10.

K_a	3,9E-07 m/s	Aritmetisk medelvärde
σ_K	1,1E-06 m/s	Standardavikelse
μ_{lnK}	-17,8 ln m/s	Logmedelvärde
σ_{lnK}	3,0	Logstandardavikelse
K_g	1,8E-08 ln m/s	Geometriskt medelvärde
K_{3D}	7,6E-08 ln m/s	Effektiv hydraulisk konduktivitet för "stor skala" enligt Matherons förmodan: $K_{3D}=K_g \exp(\sigma_{lnK}^2/6)$



Figur 10 Anpassad lognormalfördelning till population av beräknade K-värden från utförda vattenförlustmätningar i kärnborrhål 16WS02K och 16WS03K.

Tabell 1 Kärnborrhål med tolkningar av största hydrauliska konduktivitet för en enskild mätsektion i respektive borrhål (K_{max}). Vidare redovisas det geometriska medelvärdet (K_g) av den hydrauliska konduktiviteten för hela testlängden i varje kärnborrhål. Populationen av de hydrauliska konduktiviteterna för mätsektionerna antas vara lognormalfördelad.

Kärn-borrhål	**Testad borrhåls-längd (m)**	**Total antal sektioner**	**Tolkningar och största K-värde (K_{max})**	**K_g (m/s)**
16WS02K	12	2	Två sektioner med tolkad konduktivitet där K_{min}= 3,9·10^{-7} m/s och K_{max}=4,7·10^{-7} m/s.	
16WS03K	106	17	13 sektioner med tolkad konduktivitet där K_{max}=2,6·10^{-6} m/s. Fyra sektioner ingen mätbar vattenförlust (K<2·10^{-10} m/s).	2,0·10^{-9}
17WS01KB	21	4	Fyra sektioner med tolkad konduktivitet där K_{max} =1,2·10^{-6} m/s	3,9·10^{-7}
17WS02KB	36	6	Sex sektioner med tolkad konduktivitet där K_{max} =3,7·10^{-6} m/s.	7,2·10^{-8}
17WS03KB	27	5	Fyra sektioner med tolkad konduktivitet där K_{max} =5,8·10^{-6} m/s. En sektion med ingen mätbar vattenförlust	9·10^{-8}
17WS04KB	27	5	Fem sektioner med tolkad konduktivitet där K_{max} =1·10^{-4} m/s, dock något osäker utvärdering	2,2·10^{-6}

I samtliga kärnborrhål utom 16WS02KB identifierades minst en zon med relativt stor genomsläpplighet (K> 1·10^{-6}). I den mest vattenförande zonen, i 17WS04KB, är utvärderingen dock lite osäker. Under mätningen uppkom ett flöde om 37 l/min, men övertrycket var ej stabilt.

I hammarborrhål 16W163H utfördes vattenförlustmätning i två testsektioner om 6 meter. Mätning genomfördes på djupet 22 till 34 meter. I en av dessa var berget så tätt att flödet låg under mätgränsen. Den hydrauliska konduktiviteten i den testade sektionen där vattenförlust uppmättes beräknas till K=1,7·10^{-8} m/s. Resultatet visas i 2.

I hammarborrhål 16W164H var berget så tätt ner till 35 meters djup att flödet låg under mätgränsen. Därefter hade berget rasat in vilket medförde att manschetten inte kunde föras ner djupare.

Tabell 2 Hammarborrhål med tolkningar av största hydrauliska konduktivitet för en enskild mätsektion i respektive borrhål (K_{max}).

Hammar-borrhål	**Testad borrhåls-längd (m)**	**Total antal sektioner**	**Tolkningar och största K-värde (K_{max})**
16WS163H	12	2	En sektion med tolkad konduktivitet där $K_{max}=1{,}7\cdot10^{-8}$ m/s. En sektion ingen mätbar vattenförlust ($K<5\cdot10^{-9}$ m/s).
16WS164H	24	1	Ingen mätbar vattenförlust ($K<5\cdot10^{-9}$ m/s).

3 Beräkning av inläckage till bergtunnlar

Beräkning av inläckage till injekterade tunnlar i berg har gjorts efter analytisk modell presenterad i (Gustafson, 2009).

$$q = \frac{2\pi K_b H}{\ln\left(\frac{2H}{r}\right) + \left(\frac{K_b}{K_i} - 1\right)\ln\left(1 + \frac{t}{r}\right) + \xi} \qquad \text{(ekv 3)}$$

Med beteckningar enligt nedan.

q *Inläckage till tunnel per längdmeter*
r *Ekvivalent tunnelradie*
H *Grundvattentryck vid tunnelcentrum*
K_b *Bergets hydrauliska konduktivitet*
K_i *Injekteringszonens hydrauliska konduktivitet*
t *Injekteringszonens mäktighet*
ξ *Skinfaktor*

För system bestående av flera parallella tunnlar har ekvivalent tunneldiameter beräknats enligt (Olsson, 2005).

$$d_{eff} = \sqrt{L \cdot d} \qquad \text{(ekv 4)}$$

Där d_{eff} är den ekvivalenta tunneldiametern för det beaktade tvärsnittet, L är tvärsnittets längd och d är den ekvivalenta medeldiametern för ingående tunnlar i det beaktade tvärsnittet.

Det är väl känt att det för en ytligt förlagd tunnel inte kommer att beräknas korrekt inläckage analytiskt eftersom grundvattenytan ovanför tunneln kommer att sänkas av medan den analytiska modellen förutsätter konstant grundvattenyta ovanför tunneln.

Giltigheten i de analytiska modellerna har inför tillståndsprövningen av projektet tunnelbana till Arenastaden testats genom simulering av relevanta akviferuppsättningar och tunnelgeometrier i numeriska modeller (Stockholms läns landsting, 2017). Beräkningarna visar att korrektionsparametern (det vill säga kvoten mellan numerisk och analytiskt beräknat inläckage) ökar med stigande vattentryck vid tunnelcentrum, det vill säga att det råder större överensstämmelse mellan analytisk och numerisk modell för en djupare tunnel än för en ytligare tunnel. Beräkningar av korrektionsfaktorer utförda för enkelspår-/dubbelspårtunnlar beräknades till cirka 90 %. Det bedöms att de hydrogeologiska förutsättningarna mellan tunnelbana till Arenastaden och planerade anläggningar för utbyggd depå i Högdalen är relativt lika varför en korrektionsfaktor vid inläckageberäkningarna antas till cirka 90 %.

I den tillämpade analytiska modellen ingår även en så kallad ”skin-faktor”, som tar hänsyn till att berget med tiden får en minskad hydraulisk konduktivitet beroende på bland annat spänningsomlagringar och utfällningar vilket leder till ett minskat inläckage. För beräkning av inläckage har antagits en skinfaktor om 0 (noll). Detta kan anses vara motiverat då maximalt inläckage söks i beräkningarna och inte något framtida inläckage då skin hunnit utbildas. Vidare har antagits att injekteringszonens mäktighet är 8 meter [2]. I den analytiska modellen har en

djupberoende hydraulisk konduktivitet ansatts för normalberg och svaghetszoner enligt avsnitt 2.2. Övriga parametrar varierar längs sträckan vilket beskrivs närmare nedan.

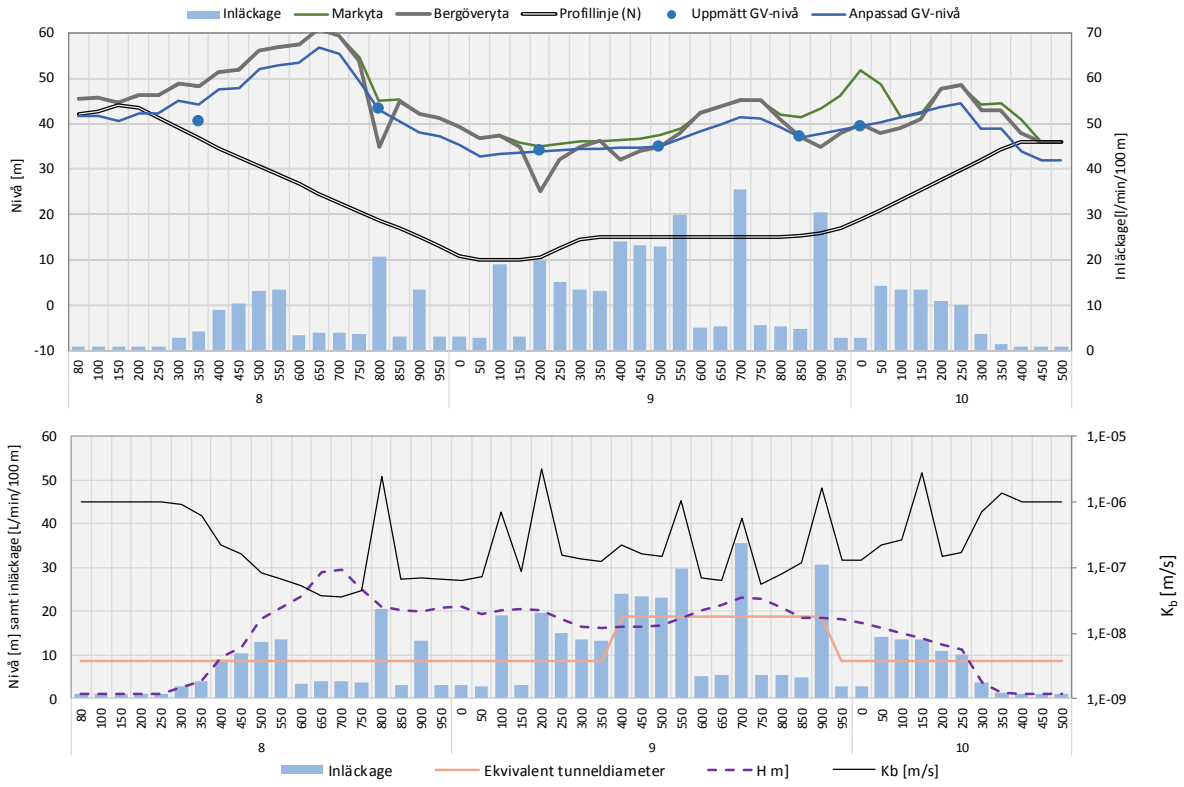
Beräknat inläckage (okorrigerat) till tunnelanläggningen framgår av figur 11 och figur 12. Beräkningar har delats in två sträckor. Dels huvudsträckan omfattande anslutning till Farstagrenen, uppställningshallen och anslutning till Högdalsdepånn. Den andra sträckan utgörs av arbets-/servicetunneln som ansluter från Örbyleden till uppställningshallen.

Det övre diagrammet i Figurerna utvisar spårlinjen med markyta, bergöveryta och grundvattenyta. Det undre diagrammet visar variation i styrande parametrar för beräknat inläckage. Det framgår härav att det antas att det i svackor i bergöverytan förekommer berg med större vattenförande förmåga (svaghetszoner med högre K-värde).

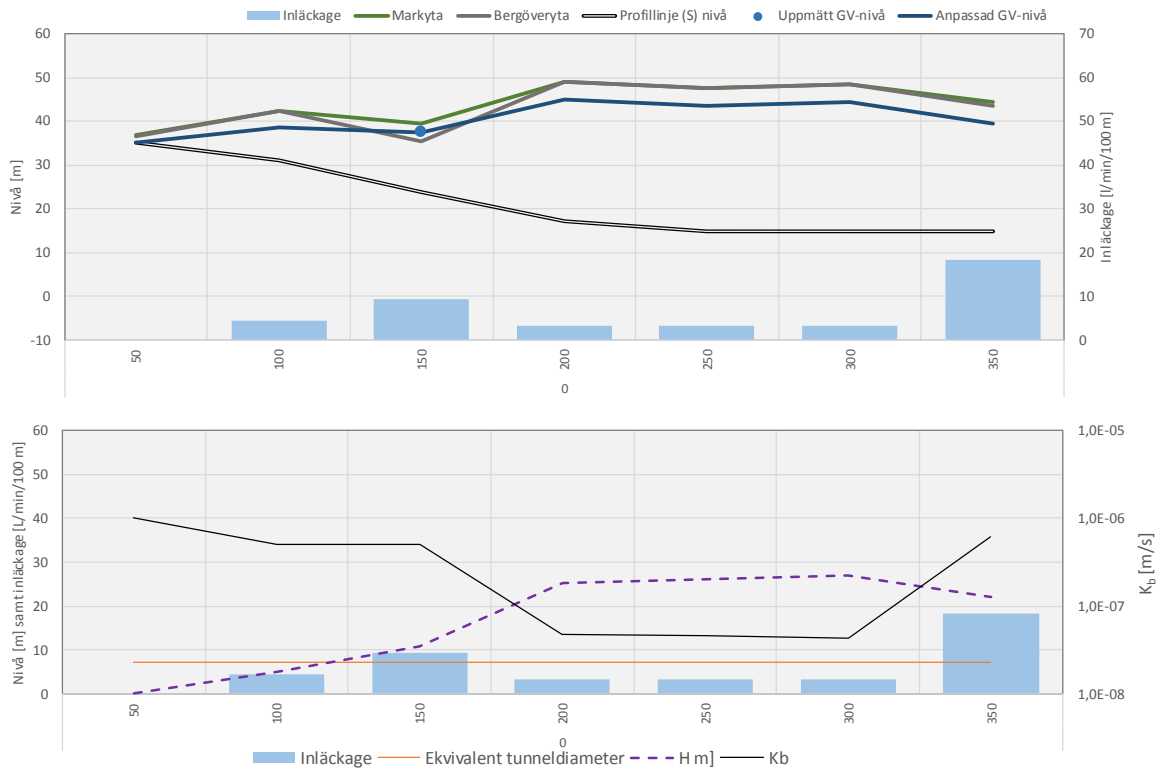
Baserat på typiska krav på acceptabelt grundvatteninflöde till tunnlar och andra bergutrymmen bedöms att injektering inte behöver utföras om den hydrauliska konduktiviteten i bergmassan längs en injekteringsskärm är i intervallet K_b <1·10^{-8} m/s respektive K_b <3·10^{-8} m/s, där det högre värdet avser förhållanden där grundvattentrycket är mindre än cirka 10 meter [2].

Det antas att normalberget tätas ned till K_i=5·10^{-9} m/s medan svaghetszoner med större vattenföring tätas ned till K_i=3·10^{-8} m/s.

K_i redovisas inte i diagrammet, men då K_i följer K_b kan förstås hur inläckaget beror på K_b och K_i. I övrigt är grundvattentrycket H starkt styrande för inläckaget och i mindre grad den ekvivalenta tunneldiametern d_{eff}.



Figur 11 Övre diagrammet visar profillinje längs anslutning till Farstagrenen, uppställningshallen och anslutning till Högdalsdepån med markyta, bergöveryta, grundvattenyta samt beräknat inläckage. Nedre diagrammet visar, förutom beräknat inläckage, variation i huvudsakligen styrande parametrar för beräknat inläckage.



Figur 12 Övre diagrammet visar profillinje längs med arbets-/servicetunneln med markyta, bergöveryta, grundvattenyta samt beräknat inläckage. Nedre diagrammet visar, förutom beräknat inläckage, variation i huvudsakligen styrande parametrar för beräknat inläckage.

Det beräknade specifika inläckaget varierar mellan 1-39 l/min/100 meter spårtunnel med medelvärdet 10 l/min/100 meter tunnel. Totala inläckaget för samtliga bergtunnlar beräknas till cirka 250 l/min med fördelning enligt tabell 2.

Motsvarande beräknade flöden med hänsyn tagen till korrektion för avsänkt grundvattenyta ger ett medelinläckage om 9,5 l/min/100 meter spårtunnel och ett totalt inläckage om 236 l/min för hela sträckan. Sammanfattningsvis kan således konstateras att korrektionen i detta fall är relativt måttlig, då korrektionsfaktorn i sig är måttlig och till och med liten för större värden på q_n som normalt kan knytas till stora värden på vattentrycket (H).

Totalt för spårtunnel och arbets-/servicetunnel beräknas ett flöde, med hänsyn tagen till korrektion för avsänkt grundvattenyta, ett medelinläckage om 9 l/min/100 meter spårtunnel och ett inläckage om 257 l/min.

Ett framtida beräknat inläckage, efter det att merparten av skin hunnit utbildas, exempelvis 5 år efter färdigställande, kan beräknas till i medeltal 7,1 l/min/100 meter tunnel (totalt 199 l/min) vid en antagen skinfaktor om 3.

Tabell 2 Beräkning av inläckaget till planerade bergtunnlar.

Tunnel	Okorrigerat		Korrigerat	
	Specifikt medelinläckage (l/min, 100 m)	**Totalt inläckage (l/min)**	**Specifikt medelinläckage (l/min, 100 m)**	**Totalt inläckage (l/min)**
Anslutning till Farstagrenen, uppställningshall under mark, anslutning till Högdalsdepån	10,3	257	9,5	236
Arbets-/servicetunnel	7,6	23	7,0	21
Totalt	10	280	9,2	257

Sammanfattningsvis bedöms det totala inläckaget till anläggningen inte överskrida 257 l/min.

Jämförelse med Citybanan

Som stöd för resonemang kring inläckage och genomsläpplighet i berg i anslutning till en bergtunnel har en utvärdering gjorts av de inläckagemätningar som utförts inom ramen för kontrollprogrammet för Citybanan i Stockholm. Jämförelsen mellan den planerade utbyggnaden av depå i Högdalen och Citybanan bedöms som relevant då Citybanan är förlagd i kristallint berg normalt för Stockholmsområdet. Mätningar för Citybanans sträckning under centrala Stockholm ger ett medelinläckage på cirka 5 l/min och 100 meter tunnel (TMO, 2016). Baserat på känd tunnelsgeometri och trycknivåer har beräkningar utförts av skinfaktor och konduktivitet i berg efter injektering som kan förväntas för att ge det uppmätta inläckaget.

Beräkningarna utförs med tre olika värden för skinfaktor och konduktivitet i berg efter injektering, eftersom dessa är mycket svåra att uppskatta. Beräkningarna är genomförda analytiskt enligt ekvation (1) (Gustafson, 2009). Denna ekvation beräknar inläckaget baserat på tunnelns djup och radie.

$$q = \frac{2\pi K_b H}{\ln\left(\frac{2H}{r}\right) + \left(\frac{K_b}{K_i} - 1\right)\ln\left(1 + \frac{t}{r}\right) + \xi} \qquad (1)$$

där q är inläckage per tunnelmeter, H är vattentrycket (meter vattenpelare till medeltunnelcentrum), r är tunnelns radie (meter), K_b är bergets konduktivitet, K_i är injekteringszonens konduktivitet, t är injekteringszonens mäktighet och ξ är en ”skin-faktor” som tar hänsyn till att berget närmast tunneln med tiden får en minskad konduktivitet beroende på bland annat spänningsomlagringar och utfällningar. Resultatet av beräkningarna visas i **Fel! Hittar inte referenskälla.**.

Tabell 3 Beräkning av inläckage i Vasatunneln 2, Citybanan, för tätad tunnel.

Skinfaktor	Konduktivitet i injekterad zon			
	$K_i=1\cdot10^{-9}$ m/s	$K_i=5\cdot10^{-9}$ m/s	$K_i=1\cdot10^{-8}$ m/s	
1	3,4	9,0	11,3	l/min, 100 m
3	2,8	5,8	6,7	l/min, 100 m

5	2,4	4,3	4,8	l/min, 100 m

För injekterad tunnel är skinfaktorn underordnad betydelsen av den uppnådda konduktiviteten i den injekterade zonen (K_i). Sammanfattningsvis konstateras att det uppmäta inflödet i Citybanans tunnel (5 l/min och 100 meter tunnel) kan erhållas vid till exempel $K_i=5\cdot10^{-9}$ m/s, vilket är i samma storleksordning som flödet som förväntas kunna uppnås för planerade bergtunnlar för utbyggd depå i Högdalen.

4 Vattenbalanser

En vattenbalans har upprättats för planerade anläggningar. Syftet med vattenbalansen är att utgöra en grund för en hydraulisk förståelse av grundvattenmagasinen. Vattenbalansen ger en översiktlig bild av storleksordningen på grundvattenflödet genom magasinen. Resultatet ger underlag för bedömning av grundvattenmagasinens känslighet för grundvattenbortledning till planerade undermarksanläggningar.

4.1 Klimatologisk vattenbalans

En klimatologisk vattenbalans har upprättats för att beskriva hur mycket vatten som rör sig genom området till följd av nederbörd över detsamma.

Den klimatologiska vattenbalansen säger att avrinningen (Q) är lika med skillnaden mellan nederbörd (P) och avdunstning (ET) enligt ekvation 5. Avrinningen kan även betecknas nettonederbörd, P_n.

$$Q=P-ET \qquad \text{(ekv 5)}$$

Den uppmätta nederbörden är i princip alltid mindre än den verkliga. Detta beror på vindförluster, vidhäftningsförluster, mätfel etc. SMHI har beräknat storleken på dessa mätfel varpå en korrigerad nederbörd (P_k) istället kan användas i vattenbalansberäkningen (SMHI, 2003). Avdunstningen är inte en parameter som mäts utan den blir en ”restterm” i ekvationen. SMHI har en översiktlig kartering som kan visa på storleksordningen av avdunstningen. Avrinningen är bättre känd genom uppmätning av flöden från större avrinningsområden.

Den korrigerade nederbörden för vald representativ mätstation (station 9821) är enligt SMHI 592 mm/år för referensnormalperioden 1961-1990. Genom uppräkning till medelvärde för period 1991-2013 har värdet 605 mm/år valts som representativt för nuvarande förhållanden inom aktuellt område.

Avdunstningen uppges i SMHI:s översiktliga kartering till 400-500 mm/år och avrinningen till cirka 6 l/s/km², motsvarande 190 mm/år.

Den klimatologiska vattenbalansen kan därmed tecknas (P_k-ET=P_n): 605 – 415 = <u>190 mm/år</u> som en bästa uppskattning av nuvarande förhållanden.

Nettonederbörden (P_n=190 mm/år) är den andel vatten som finns potentiellt tillgänglig för grundvattenbildning. Detta beskrivs närmare i nästföljande kapitel.

4.2 Vattenbalans grundvatten

Vatten tillförs grundvattenmagasinen i jord och berg dels som nybildning som beror på nettonederbörden och dels som grundvattenflöde från andra magasin, exempelvis vid strömning från ett övre till ett undre grundvattenmagasin. I urbana områden tillkommer även tillskott från otäta VA-ledningar. Läckage från VA-ledningar antas här till 30 mm/år. Detta tillskott antas gälla för områden med bebyggelse.

Som det visats i flera studier (exempelvis i projekt Västlänken) så begränsar jordarterna i obetydlig grad nybildningen av grundvatten. Kalt bergs beskaffenhet, sprickfrekvens och

lutningsförhållanden kan dock göra det. Ofta medför det att det uppkommer lokal tillfällig ytavrinning på berget och det avrunna vattnet infiltrerar istället nedanför bergblottningen.

Markanvändningen inom området varierar mellan urbaniserat till naturmark. Generellt utgörs området Hökarängens centrum av bostäder och handel. Högdalens industriområde utgörs i huvudsak av industriella verksamheter samt spårområdet i anslutning till befintligt depåområde.

Naturliga infiltrationsytor utgörs av Gubbängsfältet som sträcker sig längs med Örbyleden från Nynäshamnsvägen i öst till Högdalen i väst, samt det större grönområde som utgör Annydalsänkan. Vidare sker infiltration på de höglänta områden som sträcker från Hökarängen i öst till Högdalens industriområde i väst, det vill säga omfattande Högdalstopparna samt grönområdet kring Fagersjö.

Infiltration sker även vanligen på innergårdar, exempelvis i anslutning till bostadsbebyggelsen söder om Hökarängens centrum. I övrigt sker begränsad infiltration på hårdgjorda ytor som trottoarer och vägar och ingen infiltration på takytor. LOD-system (Lokalt Omhändertagande av Dagvatten) kan dock föra takvatten till grundvattenmagasinen. Markanvändningen inom hela utredningsområdet fördelar sig enligt nedanstående.

- Grönområde 52%
- Ort med område av grönt 31%
- Industri och handel 11%
- Större vägnät 1%
- Övrigt (åkermark, våtmark,mm) 4%

Fördelningen av markanvändning baseras på Svenska Marktäckedata (SMD) som redovisar vegetation och markanvändning (Naturvårdsverket, 2017). Dock varierar markanvändningen lokalt inom området, exempelvis utgör andelen grönområde kring Fagersjö cirka 80 % medan området kring Högdalen utgörs av 40 % grönområde.

Med avseende på hydrogeologin i området medför urbaniseringsgraden att normal infiltration och grundvattenbildning försvåras då markytor är täckta av gator eller byggnader, så kallade hårdgjorda ytor. Avrinnande vatten vid nederbörd fångas upp via dagvattensystem och leds bort. För hårdgjorda ytor antas att 50 % av nettonederbörden avgår som dagvatten och resterande del bildar grundvatten.

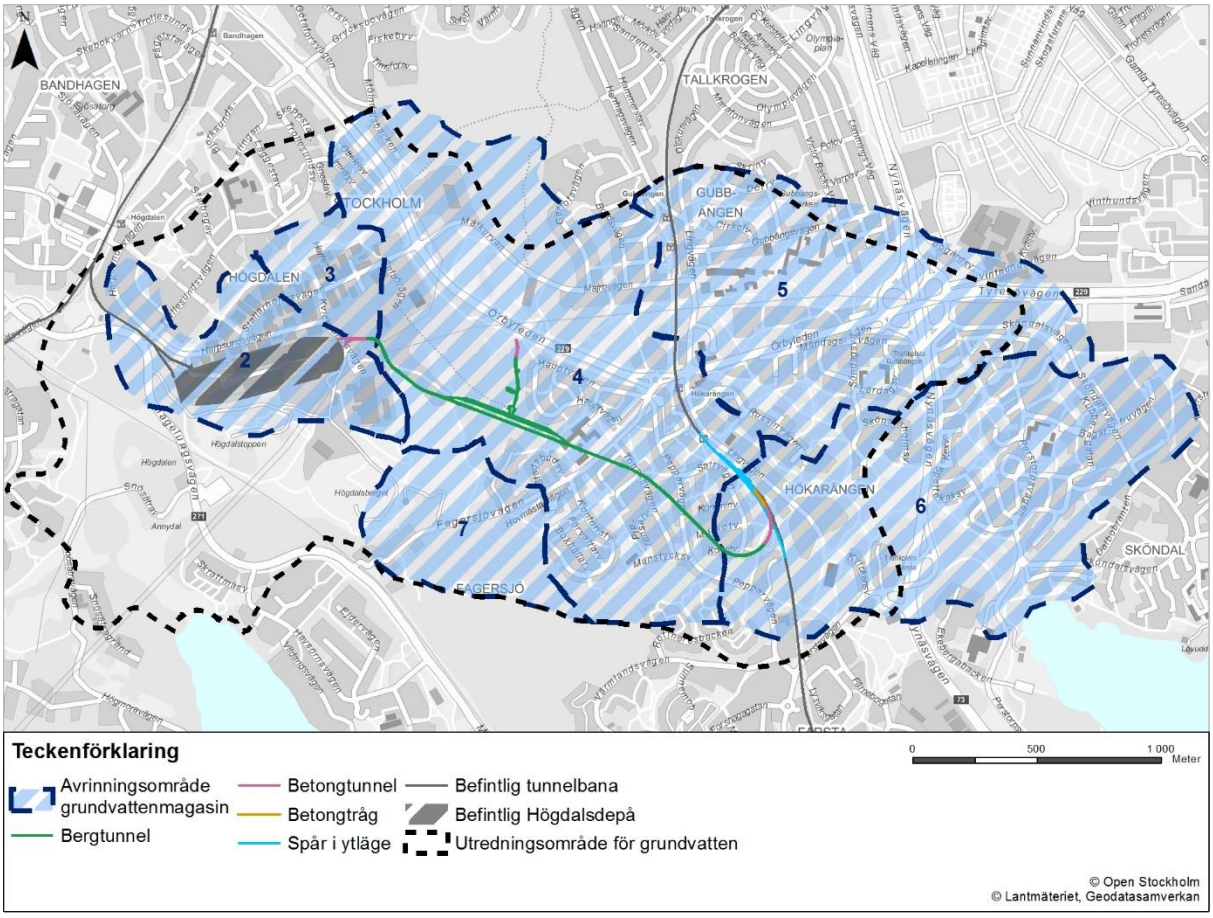
Grundvattenbildning till berg kan principiellt endast förekomma där det finns en grundvattenyta som ligger nere i berg. I andra fall sker nybildningen till ett övre magasin i jord som täcker berget och därefter sker en grundvattenströmning till berg från detta övre magasin. Det är då huvudsakligen den hydrauliska gradienten som, tillsammans med vattengenomsläppligheten i jord och berg, bestämmer tillskottets storlek.

På samma sätt betraktas grundvattenbildning till ett undre magasin. Läckage genom lera utgör normalt ett mycket litet tillskott till ett undre magasin. Likaså utgör läckage genom berg till undre magasin vanligen ett mindre tillskott för magasin med måttlig areell utbredning. För stora magasinsutbredningar kan tillskottet via berg vara större. Läckage genom friktionsjord i randzoner mellan jord och berg utgör normalt det dominerande tillskottet. Dock är det den hydrauliska gradienten som, tillsammans med vattengenomsläppligheten, bestämmer tillskottets storlek. Om en trycksänkning sker i det undre magasinet så ökar den hydrauliska gradienten och därmed grundvattenströmningen. Således ökar tillskottet till det undre magasinet från omgivande berg och övre magasin om trycknivån i det undre magasinet sänks.

Nybildningen av grundvatten påverkas dock inte då denna är knuten till storlek på nederbörd, infiltrationskapacitet knuten till hårdgörningsgrad i den urbana miljön samt läckage från VA-system.

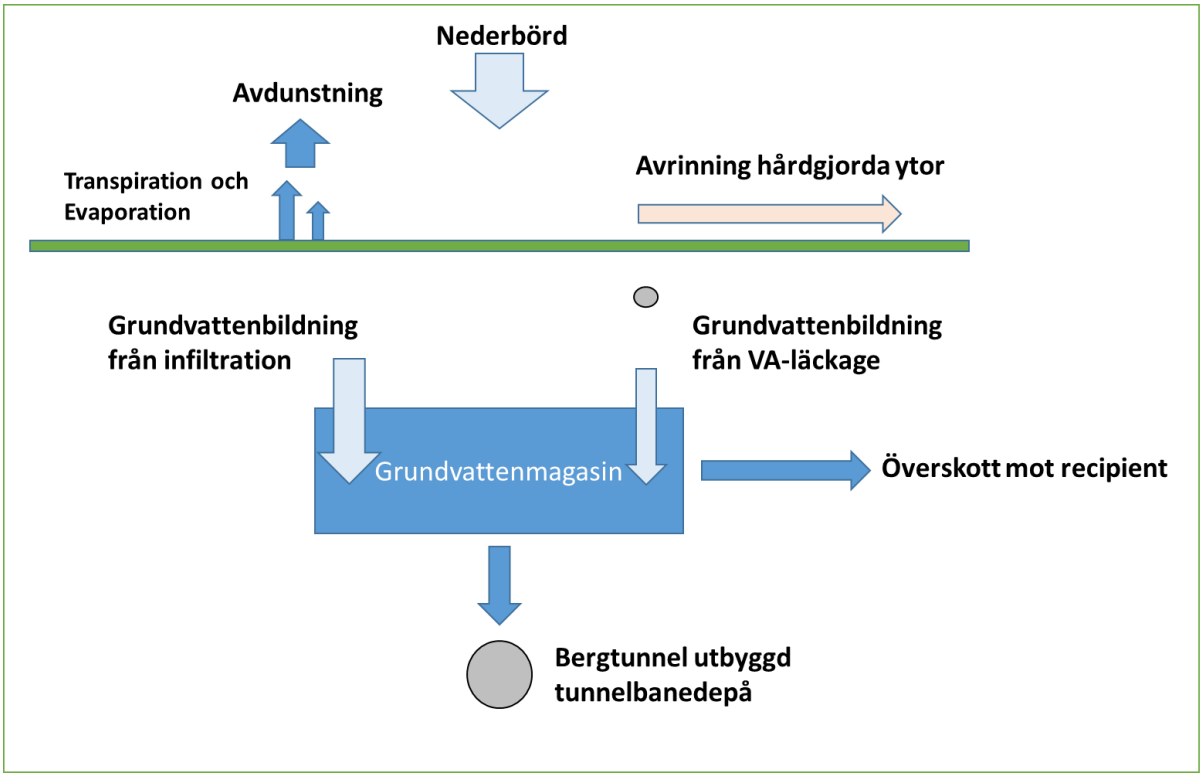
Att väsentliga delar av nybildat grundvatten bortförs av dräneringssystem och att denna andel dräneringsvatten minskar om den andel som tillförs grundvattenmagasin i berg eller undre magasin i jord ökar är även givet. Det betyder däremot inte att grundvattenbildningen ökar då trycknivån i berget eller det undre magasinet sänks, bara att delar av det bildade grundvattnet avrinner på andra sätt, till berg eller undre magasin i stället för till ytliga dräneringar.

Bortledning av grundvatten sker direkt eller indirekt från samtliga grundvattenmagasin, övre och undre magasin i jord samt berg. Bortledningen medför en lokal omfördelning av vattenströmning mellan magasinen. Separata vattenbalanser för respektive magasin upprättas inte här utan en vattenbalans genomförs för vattenbalansområden omfattande de olika magasinsområdena som identifierats. Utredningsområdet har delats in i sju vattenbalansområden, se Figur 13. Dock har vattenbalansberäkningar endast utförts för område 2, 3, 4 och 6 då påverkan på övriga områden bedöms försumbar.



Figur 13 Vattenbalansområden för grundvattenmagasin längs tunnelsträckningen. Magasinen är markerade med siffror som refererar till Tabell 3, 4 och 5.

I beräkningarna har läckage från trycksatta VA-ledningar även beaktats vid beräkningarna. I Figur 14 redovisas en konceptuell bild av vattenbalansens olika delar.



Figur 14 Schematisk skiss av vattenbalans.

Dräneringen till bergtunnlarna utgår från de analytiska beräkningarna i kapitel 3. Följande inläckagevärden för berörda avrinningsområden har använts, Tabell 3.

Tabell 3 Inläckage till tunnelsträckningen, indata till vattenbalans.

Inläckage till tunnel		
Vattenbalansområde	**Tunneldel**	**Inläckage (l/min)**
6. Hökarängen	Spårtunnel 8+100 till 8+600	31
4. Gubbängsfältet västra	Spårtunnel 8+650 till 10+250 Arbets-/servicetunnel	222
3. Högdalen norra	Spårtunnel 10+300 till 10+350	2,6
2. Högdalen östra	Spårtunnel 10+400 till 10+500	1,6
Totalt		**257**

I Tabell 4 och Tabell 5 redovisas resultat av beräkningarna av vattenbalansen.

Tabell 4 Vattenbalansberäkningar för området, innan etablering av utbyggd tunnelbanedepå.

Vattenbalans-område	Area (m²)	Grundvatten-bildning (l/min)	VA-läckage (l/min)	Dränering bergtunnel (l/min)	Differens IN-UT (l/min)
6. Hökarängen	1460800	370	50	0	420
4. Gubbängsfältet västra	1953500	561	46	0	607
3. Högdalen norra	190600	48	7	0	55
2. Högdalen Östra	527500	135	17	0	153

Tabell 5 Vattenbalansberäkningar för området medräknat utbyggd tunnelbanedepå.

Vattenbalansområde	Grundvattenbildning, VA-läckage (l/min)	Dränering bergtunnel (l/min)	Differens IN-UT (l/min)
6. Hökarängen	420	31	389
4. Gubbängsfältet västra	607	222	385
3. Högdalen norra	55	2,6	52
2. Högdalen Östra	153	1,6	151

Vattenbalansberäkningarna visar att det, medräknat dränering till planerade bergtunnlar, finns ett vattenöverskott inom samtliga områden.

5 Beräkning av influensområde

5.1 Metodik

Avgränsning av influensområde för grundvatten utgår från principen att alla känsliga slutna grundvattenmagasin i jord som ligger med geografisk kontakt (i plan) med planerade anläggningar (spårtunnlar, arbets- /servicetunnel och schakt) ingår i influensområdet.

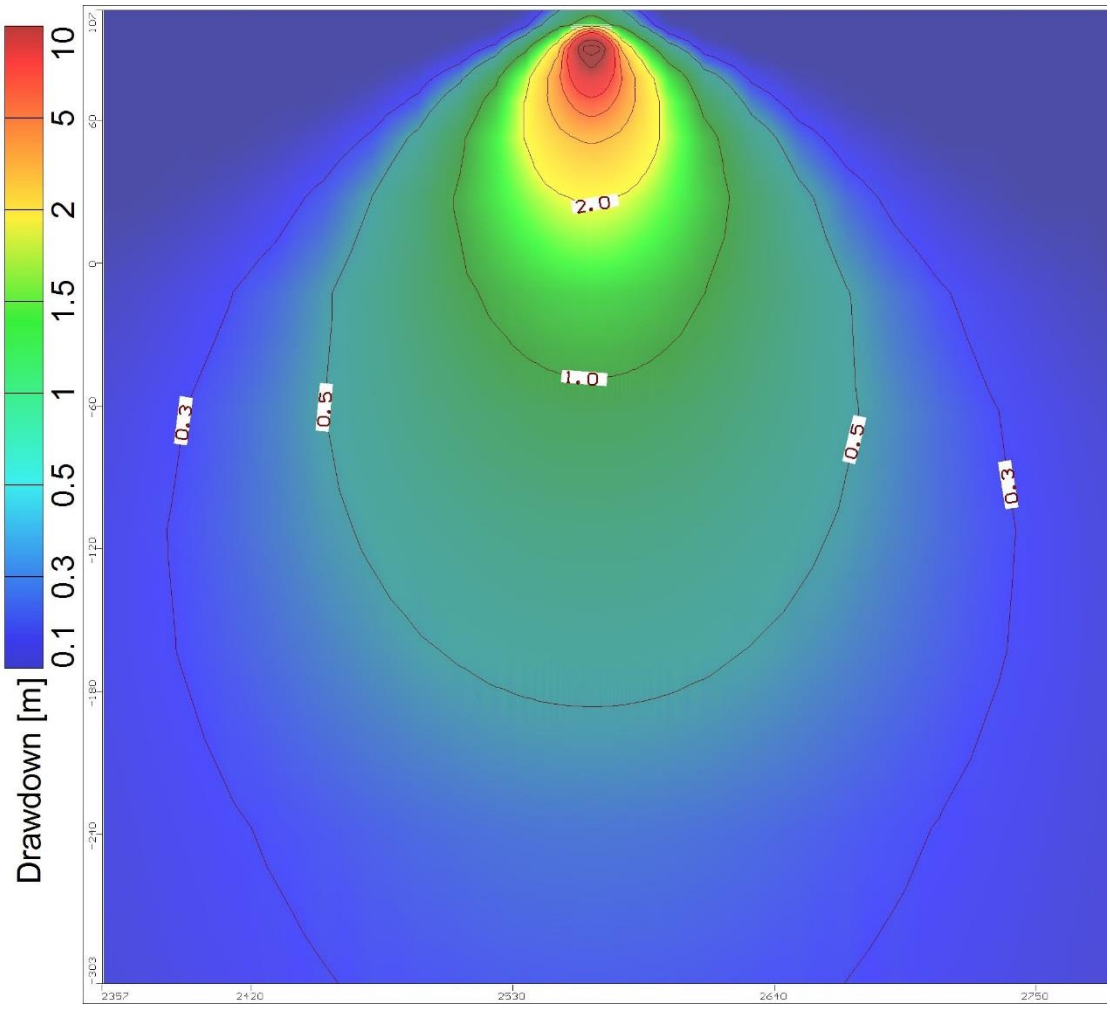
Där sådana magasin saknas (bergsområden) görs en konservativ bedömning av avstånd där trycksänkningen i berg anses ha en försumbar effekt på grundvattenförhållanden. Att beräkna grundvattenpåverkan i berg är komplicerat beroende på att förhållandena är så heterogena. Det kan vara svårt att identifiera stabila hydrauliska gränser. Där sådana gränser saknas kan teoretiska beräkningar av utbredningen utföras där gränsen definierats som en teoretiskt beräknad trycksänkning om 0,3 meter i djupt berg.

I föreliggande fall bedöms dock influensområdet i de delar som inte avgränsas av slutna grundvattenmagasin kunna avgränsas med stabila grundvattendelare.

5.2 Beräkningar

Som stöd för utbredningen av influensområdet i berg har numeriska beräkningar utförts för ett typfall för en sektion där vattentrycket är cirka 18 meter som är det genomsnittliga trycket längs de djupare delarna av anslutning till Farstagrenen.

Beräkningar pekar på att ett avstånd för icke försumbar påverkan i djupt berg kan sättas till cirka 160 meter (normalberg) respektive cirka 210 meter (zon) från tunnellinjen i plan, enligt figur 15.



Figur 15 Tvärsektion av trycksänkningsutbredning i djupt berg kring tunnel vid typfall med 18 meter vattentryck vid tunnelcentrum och ett inläckage på cirka 10 l/min/100 meter tunnel. Trycksänkningsutbredning i ytligare berg har betydligt mindre utbredning från tunneln och blir således inte dimensionerande.

5.3 Resultat

För den slutliga sammanvägda bedömningen av influensområde har nedanstående kriterier med följande undantag varit styrande:

- Alla känsliga slutna grundvattenmagasin i jord som ligger med geografisk kontakt (i plan) med planerade anläggningar (spårtunnlar, arbets- och servicetunnel och schakt) ingår i influensområdet.

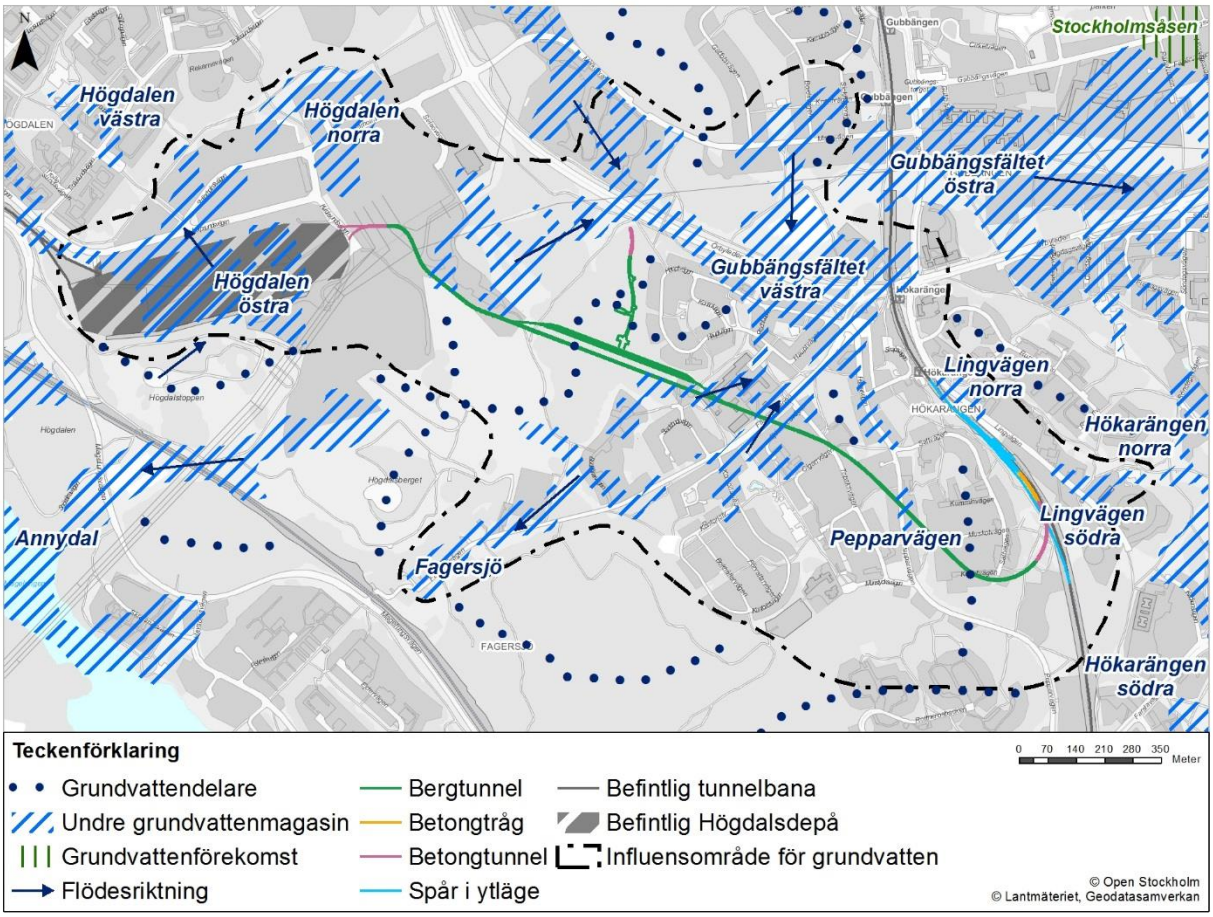
    - Undantaget sådana magasinsområden där det av grundvattenhydrauliska skäl uppenbart inte kan ske någon påverkan.
- Där känsliga slutna grundvattenmagasin saknas dras gränsen vid stabila hydrauliska gränser.

För den sammanvägda bedömningen av influensområde finns tre områden där särskilda bedömningar har gjorts:

Området sydost om anläggningen utgörs av ett långsträckt höjdområde med berg i dagen och kan definieras som en stabil hydraulisk gräns. Trycksänkningen i berget kring tunnlarna kommer att minska med ökande avstånd från tunnelcentrum. I tunnellinjen gäller generellt att där tunneldjupet är stort så blir trycksänkningen lokalt stor. I anslutning till de västra delarna av anslutning till Farstagrenen där bergtäckningen är stor, blir trycksänkningen i berg i tunneln upp till cirka 30 meter, medan trycksänkningen där tunneldjupet är mindre, exempelvis vid påslaget för bergtunneln, som mest uppgår till ett fåtal meter. Avståndet mellan de djupa delarna av anslutningen till Farstagrenen och höjdområdet i sydost uppgår till ca 350-450 meter. Det stora avståndet mellan bergtunneln och den hydrauliska gränsen medför en naturlig avgränsning av influensområdet.

I influensområdets nordvästra och västra delar övergår grundvattenmagasinen Gubbängsfältet västra respektive Högdalen östra från sammanhängande områden till avsmalnande grenar av lerfyllda sänkor. Dock kan konstateras att jorddjupet i dessa grenar ställvis är grunt varför den hydrauliska kontakten med de centrala delarna av magasinen bedöms vara begränsad. Detta i kombination med det stora avståndet (600-800 meter) från sänkorna till bergtunnlar medför att influensområdet kan avgränsas tvärs grundvattenmagasinens utbredning.

I figur 16 visas den samlade bedömningen av influensområdet.



Figur 16 Influensområde för utbyggd depå i Högdalen utifrån valda kriterier och givna förutsättningar.

6 Referenser

6.1 Framtagna underlagsdokument

[1] Förundersökningsrapport Hydrogeologi, Dokumentid 5320-G52-24-04001

[2] Anvisning för projektering av injektering med cementbaserade bruk, systemhandlingsskedet, Dokumentid 1331-P11-47-00007

6.2 Övriga referenser

Gustafson, G. (2009): Hydrogeologi för bergbyggare. Forskningsrådet Formas T2:2009.

Moye, D. G. (1967): Diamond drilling for foundation exploration. Civ. Eng. Trans. 7th. Inst. Eng. Australia.

Ryd, E. (2017): Samband mellan kapacitet vid borrning och transmissivitet i kristallint och sedimentärt berg. Uppsala universitet, september 2017.

SCB (2002): Grönområden, grönytor och hårdgjorda ytor i tätorter, Studier utförda av SCB på uppdrag av Boverket.

SGU (1984): Beskrivning och bilagor till hydrogeologiska kartan över Stockholms län, Serie Ah nr 6, Sveriges geologiska undersökning

SKB (2000): Förstudie Östhammar. Slutrapport. Rapport R-00-24 . Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB (2006): Storregional grundvattenmodellering – fördjupad analys av flödesförhållanden i östra Småland, Jämförelse av olika konceptuella beskrivningar, rapport R-06-64, Svensk Kärnbränslehantering AB

SMHI (2003): Korrektion av nederbörd enligt enkel klimatologisk metodik, Hans Alexandersson, Nr 111, SMHI

Stockholms läns landsting (2017): Miljöprövning för tunnelbana till Arenastaden, Bilaga C, PM Hydrogeologi, Dokumentid 3140-M35-22-0025, Diarienummer FUT 2016-0025, Bilaga till ansökan om tillstånd enligt miljöbalken till bortledande av grundvatten med anledning av anläggande och drift av tunnelbana till Arenastaden station m.m, Stockholms läns landsting

TMO (2016): Utdrag (oktober 2016) ur trafikverkets mätdatabas för omgivningspåverkan, Trafikverket

Trafikverket (2011): E4 Förbifart Stockholm, FS1 konsortiet förbifart Stockholm, PM Hydrogeologi, Tillståndsansökan miljöbalken, Systemhandling 2011-06-01, 0G14H032, Trafikverket

Vårt uppdrag är att genomföra tunnelbanans utbyggnad och övriga åtgärder inom ramen för 2013 års Stockholmsförhandling. Det innebär planering, projektering och byggnation av ny tunnelbana och nya stationer på fyra sträckor. För att kunna genomföra utbyggnaden behöver också depåkapaciteten ökas och nya tåg köpas in. Byggstarten för utbyggnad av depåkapacitet Högdalen planeras under 2020 och byggtiden beräknas pågå cirka 6 år.

Region Stockholm
Förvaltning för utbyggd tunnelbana
Box 22550, 10422 Stockholm
Telefon: 08-737 25 00

Region Stockholm

PM Hydrogeologi

Bilaga C7

PM Sättningar

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Region Stockholm

PM Hydrogeologi

Bilaga C7

PM Sättningar

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Region Stockholm

Titel: PM Hydrogeologi – Bilaga C7 PM Sättningar
Uppdragsledare: Catrine Söderström, WSP
Författare: Katarina Bryngelsson Farkas / Jonathan Olsson
Projektledare: Jörgen Niklasson
Bilder & illustrationer: WSP
Dokumentid: 5140-M53-22-01003_bilaga C7
Diarienummer: FUT 2016-0027
Utgivningsdatum: 2019-06-14

Distributör: Stockholms läns landsting, förvaltning för utbyggd tunnelbana
Box 225 50, 104 22 Stockholm. Tel: 08 737 25 00. E-post: nyatunnelbanan@sll.se

Innehållsförteckning

1 Bakgrund 5
2 Gemensamt hela sträckan 5
2.1 Urval av områden 5
2.2 Marksättningars utbildande 6
2.3 Beteckningar och höjdsystem 8
3 Indata för beräkningar 8
3.1 Allmänt 8
3.2 Beräkningsgång och programvara 8
3.3 Portryck och grundvattensänkning 9
3.4 Redovisningens omfattning 9
3.5 Sättningsparametrar 9
4 Beräkningsresultat 10
4.1 Gubbängsfältet östra 10
4.1.1 Generellt 10
4.1.2 Topografi 10
4.1.3 Jordlagerförhållanden 11
4.1.4 Utförda undersökningar 11
4.1.5 Sättningsegenskaper/Beräkningsresultat 11
4.1.6 Bedömning 13
4.2 Gubbängsfältet västra 13
4.2.1 Generellt 13
4.2.2 Jordlagerförhållanden 13
4.2.3 Utförda undersökningar 14
4.2.4 Sättningsegenskaper/Beräkningsresultat 14
4.2.5 Bedömning 19
4.3 Högdalen östra 20
4.3.1 Generellt 20
4.3.2 Topografi 20
4.3.3 Jordlagerförhållanden 20
4.3.4 Utförda undersökningar 20
4.3.5 Sättningsegenskaper/Beräkningsresultat 20
4.3.6 Bedömning 20
4.4 Högdalen norra 20
4.4.1 Generellt 20
4.4.2 Topografi 20
4.4.3 Jordlagerförhållanden 20
4.4.4 Utförda undersökningar 21
4.4.5 Sättningsegenskaper/Beräkningsresultat 21
4.4.6 Bedömning 21
4.5 Fagersjö 21
4.5.1 Generellt 21

4.5.2 Topografi 21
4.5.3 Jordlagerförhållanden 21
4.5.4 Utförda undersökningar 21
4.5.5 Sättningsegenskaper/Beräkningsresultat 21
4.5.6 Bedömning 22
4.6 Hökarängen norra 22
4.6.1 Generellt 22
4.6.2 Topografi 22
4.6.3 Jordlagerförhållanden 22
4.6.4 Utförda undersökningar 23
4.6.5 Sättningsegenskaper/Beräkningsresultat 23
4.6.6 Bedömning 23
5 Sammanfattning av beräkningar 23
6 Referenslista 25
6.1 Framtagna underlagsdokument 25
6.2 Övriga referenser 25

Bilagor

Bilaga C7.1. Översiktskarta undersökningspunkter.

1 Bakgrund

Denna PM är en bilaga till PM Hydrogeologi, Bilaga C, som ingår i miljöprövningen för utökad depåkapacitet i Högdalen.

Syftet med denna PM är att analysera risker för sättningar vid grundvattensänkningar inom lerområden samt översiktligt beskriva markförhållanden och jordförhållanden inom utredningsområdet. Den innehåller beskrivning av och teoretisk bedömning hur lerområden påverkas samt kvantifiering av sättningarnas storlek till följd av den grundvattenbortledning som kan uppkomma när de nya tunnelbaneanläggningarna är i drift. Detta görs huvudsakligen genom teoretiskt beräknade sättningar orsakade av antagna förändrade grundvattentryck inom influensområdet för grundvatten.

2 Gemensamt hela sträckan

Dokumentet behandlar uteslutande mark- och jordrörelser, som kan uppkomma genom konsolidering av kohesionsjordar, orsakade av grundvattennivåsänkning vid byggnation av planerade tunnlar och öppna schakt samt drift av tunnelanläggningarna. Då konsolideringsförloppen är tidsmässigt utdragna kan även tidigare eventuella grundvattennivåförändringar fortfarande orsaka pågående sättningar. En bedömning av huruvida sättningar pågår har gjorts inom området.

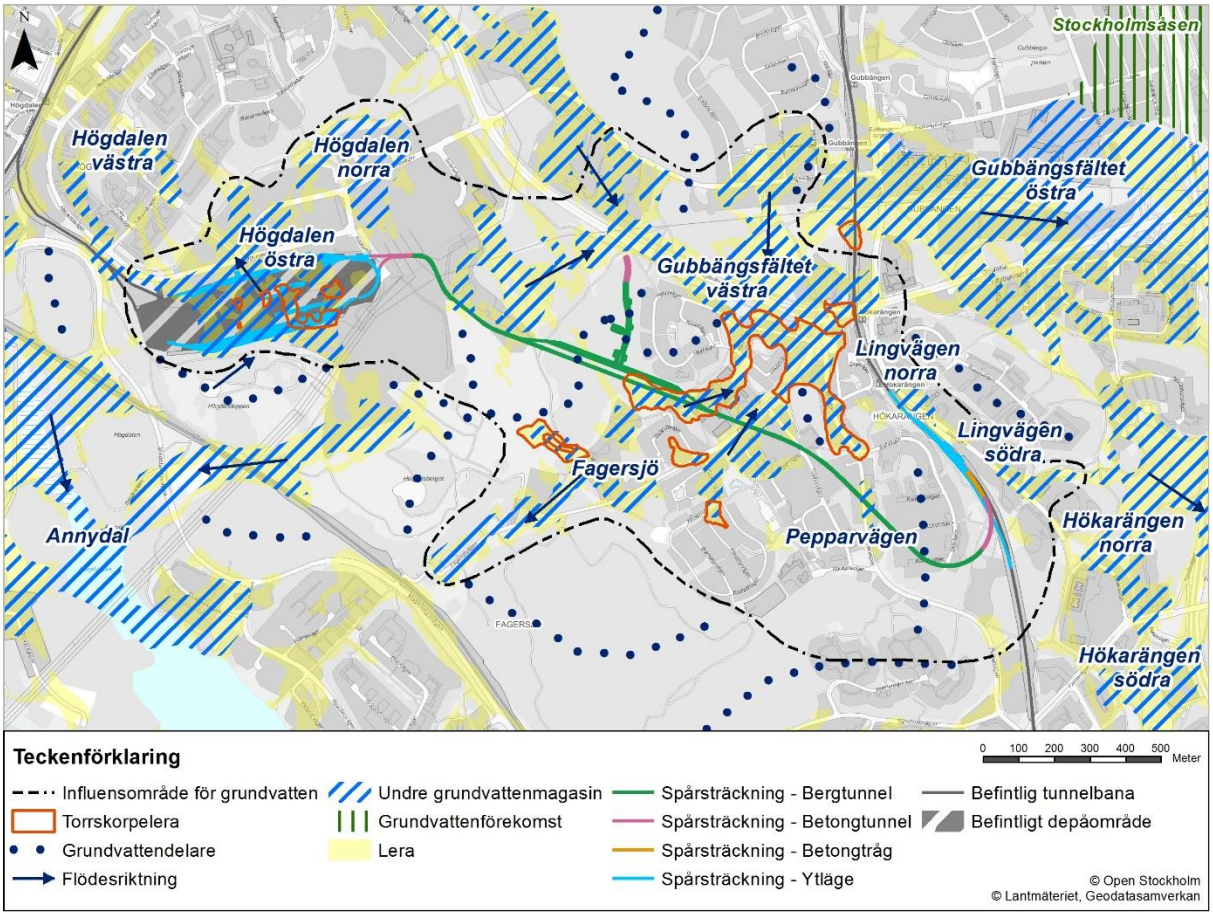
Denna PM baseras på inventeringar av geotekniska undersökningar och provtagningar som utförts inom det området som kan komma att påverkas av grundvattennivåsänkningar, det så kallade influensområdet för grundvatten. Utifrån inventerat underlag har sedan kompletterande undersökningar och provtagningar utförts inom utvalda områden.

I denna PM redovisas en sammanställning av utförda sättningsberäkningar i både inventerade och utförda kompletterande undersökningspunkter. Detaljerade resultat från markundersökningar, provtagningar och laboratorieanalyser på ostörda lerprover redovisas i en separat rapport, Förundersökningsrapport Geoteknik [1].

2.1 Urval av områden

De teoretiska beräkningarna avser marksättning eller markrörelse till följd av en antagen grundvattensänkning inom områden med sättningsbenägen lera. Efter bedömning och indelning av geologiska och hydrogeologiska områden har kolvprover tagits upp inom områden där lera förekommer. Proverna har analyserats på laboratorium genom så kallade CRS-försök, varifrån deformationsparametrar erhållits som underlag för beräkningarna.

Följande områden har identifierats, se Figur 1: Gubbängsfältet östra, Gubbängsfältet västra, Högdalen östra, Högdalen norra, Fagersjö och Hökarängen.



Figur 1. Områdesindelning av grundvattenmagasin inom influensområdet för grundvatten.

2.2 Marksättningars utbildande

Marksättningar kan uppkomma av olika orsaker, exempelvis vid grundvattensänkning. Ett övre grundvattenmagasin finns i fyllning över tät lera, medan ett undre magasin finns i friktionsjord och berg under leran. Grundvattensänkningen i det undre grundvattenmagasinet kan ge upphov till marksättningar. Grundvattenförändringar i det övre magasinet ger inga marksättningar.

Vid en grundvattensänkning sänks portrycket i leran. Detta är en process som resulterar i att portrycket i leran söker sig till ett nytt jämviktstillstånd, det hydrostatiska trycket. Processen då portryckutjämning sker är långsam i täta jordlager som till exempel lera, medan den i grövre jordarter som till exempel silt, sand och grus går betydligt snabbare.

Under portryckutjämningen sker en konsolidering av leran, vilket medför deformation genom volymminskning. Volymminskningen motsvarar helt den vattenutpressning som sker. I friktionsjordar dräneras vattnet ut relativt snabbt och volymminskningen i dessa jordarter ger normalt endast små deformationer, praktisk försumbara, då kornskelettet inte deformeras när vattnet mellan kornen försvinner.

Man skiljer mellan primär och sekundär konsolidering. Med primär konsolidering avses den hydrodynamiska delen av volymminskningen. Med sekundär konsolidering avses volymminskning genom krypning i "jordskelettet", det vill säga när lerans kornskelett komprimeras. Sekundär konsolidering sker under konstant belastning även efter det att full portrycksutjämning har skett. Primär och sekundär konsolidering sker i praktiken i stort sett samtidigt och är därför svåra att särskilja. Däremot kan de sekundära sättningarna pågå under många tiotals år.

Jord som tidigare varit belastad eller haft avsänkt grundvattennivå får en viss överkonsolidering. Konsolideringsgraden framgår av laboratorieutvärderingen av jordprover. Detta innebär att jorden tål belastning upp till samma tryck som tidigare utan att primärkonsolidering sker.

Förhållandet mellan förkonsolideringsspänningen (σ'_c) och jordens rådande vertikala effektivspänning σ'_o kallas överkonsolideringskvot, OCR ($OCR=\sigma'_c / \sigma'_o$). En kvot på 1 till 1,5 benämns som normalkonsoliderad eller svagt överkonsoliderad, en kvot på 1,5 till 10 som överkonsoliderad och en kvot på mer än 10 som starkt överkonsoliderad. Är överkonsolideringskvoten under 1 innebär det att rådande spänningar i leran inte är helt utjämnade, d.v.s. konsolidering pågår.

Den sekundära konsolideringen, krypningen, antas uppstå i lera då effektivspänningen överskrider ca 80 % av förkonsolideringstrycket. Under denna nivå erhålls marginella krypeffekter.

Marksättningar är tidsberoende och även små sättningar kan pågå under lång tid, upp till 50 - 100 år.

Sättningens storlek och tidsberoende varierar med såväl jordens egenskaper, såsom förekomst av sand- och siltskikt, lerans mäktighet och grundvattensänkningens storlek och varaktighet.

Sättningar kan även utbildas utan grundvattensänkning, t.ex. vid belastningsökning från uppfyllning. Utlagda massor, eller ytliga skikt i leran, kan innehålla organiskt material som långsamt bryts ned, vilket medför sättningar. Sättningens storlek beror av andelen och mäktigheten organiskt material. Organiskt material antas förekomma lokalt och blir sannolikt av underordnad betydelse jämfört med primärkonsolidering av lera.

Maximala sättningar har beräkningsmässigt antagits uppnåtts inom 100 år. De tidsbundna sättningsförloppen, inklusive bidrag från krypsättningar, har studerats med geotekniska beräkningar. En översiktlig sammanställning av beräknade sättningsförlopp för olika tider och antagna grundvattensänkningar redovisas i kapitel 4.

I sättningsberäkningarna har grundvattensänkningarna antagits ske momentant i hela lerlagret från dag 1, samt att grundvattensänkningen är varaktig. I verkligheten kommer avsänkningen av trycknivån troligen ske gradvis tills den nya jämviktsnivån ställt in sig, eftersom förloppet sker långsamt i täta jordar såsom lera. I de fall trycknivån återställs till ursprunglig nivå, t.ex. genom infiltration, medför detta att sättningsförloppet avstannar.

2.3 Beteckningar och höjdsystem

Beräkningarnas ingående parametrar redovisas i Förundersökningsrapport Geoteknik. Parametrar och dess beteckningar följer SGF/BGS beteckningssystem, som är branschspecifik.

Nivåangivelser för mark och grundvatten ges i Rikets höjdsystem (RH2000).

Parametrar från CRS-försök

σ'_c = förkonsolideringstryck, [kPa]
σ'_L = gränstryck, [kPa]
M_o =kompressionsmodul under förkonsolideringstrycket, [kPa]
M_L = kompresssionsmodul för spänningar över förkonsolideringstrycket, [kPa]
M' = kompressionsmodul för spänningar över gränstrycket, [kPa]
k_i = initiell permeabilitet, [m/s]
β_k = permeabilitetsändring med kompression

Indata för GS Sättning utöver resultat från CRS-försök
r_o = tidsmotståndstalet för spänningar upp till $b_o*\sigma'_c$
r_1 = tidsmotståndstalet för spänningar upp till $b_1*\sigma'_c$
a_o och a_1 = faktorer som anger övergång mellan M_o och M_L
b_o och b_1 = faktorer som anger övergång mellan r_o och r_1
t_{ref} = referenstid
K_{init} = jordens permeabilitet

3 Indata för beräkningar

3.1 Allmänt

Sättningsberäkningar har utförts med beräkningsprogrammet GS-sättning, som baseras på Chalmersmodellen. Den jordmodell som har använts i programmet är Chalmers with creep respektive Chalmers without creep. Permeabilitetsmodellen är benämnd Log based strain.

3.2 Beräkningsgång och programvara

Inom influensområdet för grundvatten har områden med sättningsbenägna jordar definierats, se avsnitt 2.1. Dessa områden motsvarar slutna grundvattenmagasin.

Kompressionsförsök, så kallade CRS-försök, har utförts systematiskt på samtliga upptagna ostörda lerprover.

Sättningsberäkningarna är baserade på resultaten från CRS-försök, utförda på ostörda lerprover från kolvprovtagning. Laboratoriearbetena har utförts av SWECO Geolab i Stockholm. Sättningsberäkningar har endast utförts på kolvprovtagningar där CRS-försök utförts och gett tillförlitliga resultat.

Även CPT-sonderingar har utvärderats med datorprogrammet CONRAD, vilka har använts för att tolka jordens egenskaper.

3.3 Portryck och grundvattensänkning

Sättningens storlek vid grundvattensänkning är beroende av ansatt grundvattennivå vid beräkningsstart. En högre ansatt nivå innebär att sättningarna blir mindre vid en grundvattensänkning.

Den rådande grundvattennivån i det undre magasinet har i varje beräkningspunkt bedömts utifrån tillgängliga grundvattennivåmätningar inom närområdet. Saknas detta underlag har en grundvattennivå i underkant torrskorpelera antagits. I torrskorpelera har fullständiga sättningar redan utbildats. Ytterligare konsolidering av dessa jordlager beaktas därför inte.

I beräkningarna antas portrycket vara hydrostatiskt genom hela lermäktigheten.

I beräkningarna ansätts hela grundvattensänkningen momentant, d.v.s. vid tidens start (dag 1).

3.4 Redovisningens omfattning

Beräkningar har utförts för att bedöma sättningsbenägenheten vid olika antagna förändringar. Som beräkningsförutsättning har antagits grundvattensänkning i det undre grundvattenmagasinet med 0,3, 1 och 3 meter, relativt bedömd normalt grundvattennivå. Beräkningar har utförts för tidsperioderna 1, 2, 5, 10, 20, 40 och 100 år, där 100 år motsvarar en teoretisk totalsättning.

De redovisade resultaten avser beräknade sättningar med analyserade parametrar i enstaka punkter på ett antal nivåer. De visar därmed endast storleksordningen av förväntad sättning respektive antagen grundvattensänkning. Lokala variationer av lerans mäktighet och egenskaper kan förekomma inom de olika områdena.

Vid beräkningar av krypsättning används krypparametrar. Krypparametrarna är empiriska värden samt beräknade värden bestämda med utgångspunkt från jordens vattenkvot.

3.5 Sättningsparametrar

För fyllning och torrskorpelera har följande parametrar använts:

Parameter	**Fyllning**	**Torrskorpelera**
Densitet	19 kN/m³	17 kN/m³
M_o	20 000 kPa	20 000 kPa
M_L	20 000 kPa	20 000 kPa
σ'_c	150 kPa	150 kPa
σ'_L	300 kPa	300 kPa
M'	12	12
K_{init}	0,1	0,1
β_k	3,5	3,5
a_o	0,8	0,8
a_1	1,0	1,0

I de fall då krypsättning har beaktats har följande värden antagits:

t_{ref} = -0,00274 år (-1 dag)
r1 = 75/($w_N^{1,5}$)
b0 = σ'_0/σ'_c
b1 = 1,1
K_{init} = utvärderas ur CRS för aktuell σ'_0. OBS $K_{init} \neq K_i$ från CRS.

Skikt av sand och silt etc. är medtagna i beräkningarna, vilket påskyndar sättningar i närliggande lerlager.

I beräkningarna har dubbelsidig dränering antagits. I de fall där jorden innehåller torrskorpelera och grundvattenytan ligger i underkant torrskorpa kräver beräkningsprogrammet att torrskorpan är dränerande (”drainage”). Eftersom torrskorpelera egentligen inte är ett dränerande lager kommer sättningarna i beräkningen utbildas snabbare än i verkligt fall. Då torrskorpeleran innehåller till exempel sand blir beräkningsfallet mer likt det verkliga fallet.

De beräknade pågående sättningarna beror på att leran inte är konsoliderad för nuvarande spänningar. Pågående sättningar kommer alltså att utbildas även om grundvattenytan inte påverkas av tunnelbaneprojektet.

Beräkningarna baseras på de parametrar som jorden hade vid provtagningstillfället, vilket för en punkt som utfördes år 2014 innebär att sättningarna delvis kan ha utbildas från 2014 till idag.

4 Beräkningsresultat

Nedan sammanfattas de övergripande förutsättningarna, såsom jordlagerföljd, konsolideringsförhållanden och beräkningsresultat för undersökningspunkterna inom respektive område. Punkternas placering och grundvattenrör som utgjort underlag för beräkningarna redovisas i Bilaga C7.1. Även utförda CPT sonderingar som använts som stöd vid val av förkonsolideringstryck i de olika beräkningsområdena redovisas i Bilaga C7.1.

4.1 Gubbängsfältet östra

Ungefärlig utbredning av lerområdet redovisas i Figur 1.

4.1.1 Generellt

Lerområdet sträcker sig cirka 150 meter väster och cirka 600-1200 meter öster om befintligt tunnelbanespår. Lingvägen och tunnelbanespåret går genom området. Örbyleden och Tyresövägen sträcker sig i öst-västlig riktning. Bostadshus och parkeringsytor finns framförallt i norra och södra delarna av området och i övrigt finns öppna grönytor med fotbollsplaner, gångvägar, enstaka buskage och träd.

4.1.2 Topografi

Marknivåerna inom området varierar mellan +29 och +35 och höjdpartier avgränsar området.

4.1.3 Jordlagerförhållanden

Jorden består inom stora delar av området av lera där den översta metern är utbildad som torrskorpa. Enligt geologiska kartan är jorden växellagrad i den östra delen av området. Vid vägar och spår finns fyllning de översta metrarna. Utifrån tillgängliga markundersökningar är lerans mäktighet som mest cirka 8 meter i punkt 14W02, cirka 200 meter öster om befintligt spår. Vid befintliga tunnelbanespår är lerans mäktighet som mest cirka 4 meter i utförda undersökningspunkter.

4.1.4 Utförda undersökningar

Ostörd provtagning (kolv) har utförts i en punkt, 16WS901. I området har tidigare undersökningar utförts under 2014, en kolvprovtagning med CRS-försök 14W02, från detta projekt har inventerats och beräknats.

4.1.5 Sättningsegenskaper/Beräkningsresultat

Grundvattennivån är uppmätt i grundvattenrör 16RA814U, 16RA815U, 16RA816U, 16RA821U, 16WS901U och varierar under perioden maj 2016 till mars 2017 mellan +26,6 och +28,8. I beräkningen för punkt 16WS901 nivån +28,4 valts, d.v.s. 1 meter under markytan. I beräkningen för punkt 14W02 har nivån +27,6 valts, vilket motsvarar 1 meter under markytan.

Tabell 1. Provtagningspunkt 16WS901.

Marknivå		Grundvattennivå		Jordlager ovan lera (m)		Lermäktighet (m)	
+29,4		+28,4		0,2		4,5	
Lerans parametrar utvärderade från CRS-försök utförda på upptagna kolvprover från 16WS901							
Djup (m)	σ´c	σ´L	Mo	ML	M´	ki	β_k
2,5	83	147	5700	1352	15,2	1,3E-09	1,5
3,5	110	159	4800	1060	16,9	5,8E-11	1

Tabell 2. Resultat från sättningsberäkningarna i punkten 16WS901.

Grundvattensänkning (m)	1 år (m)	2 år (m)	5 år (m)	10 år (m)	20 år (m)	40 år (m)	100 år (m)
0,3	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0
3	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Figur 2. Diagrammet visar marksättningens tillväxt vid grundvattensänkning 0,3, 1,0 samt 3,0 meter i undersökningspunkt 16WS901.

Tabell 3. Provtagningspunkt 14W02.

Marknivå		Grundvattennivå		Jordlager ovan lera (m)		Lermäktighet (m)	
+28,6		+27,6		0		9	
Lerans parametrar utvärderade från CRS-försök utförda på upptagna kolvprover från 14W02							
Djup (m)	σ´c	σ´L	Mo	ML	M´	ki	β_k
2	67	87	4050	437	15,3	4,70E-10	4,3
3	81	118	4400	1353	18,5	5,20E-10	2,9

Tabell 4. Resultat från sättningsberäkningarna i punkten 14W02.

Grundvattensänkning (m)	1 år (m)	2 år (m)	5 år (m)	10 år (m)	20 år (m)	40 år (m)	100 år (m)
0,3	0	0	0	0	0	0	0
1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
3	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03

Figur 3. Diagrammet visar marksättningens tillväxt vid grundvattensänkning 0,3, 1,0 samt 3,0 meter i undersökningspunkt 14W02.

4.1.6 Bedömning

Leran i området är överkonsoliderad med 25 - 40 kPa. Inga marksättningar bedöms pågå i området. För beräknade grundvattensänkningar (0,3 – 3,0 meter) bedöms inga krypsättningar uppstå. Vilket innebär att framräknade sättningar vid en grundvattensänkning utbildats inom 3 till 5 år och att inga ytterligare sättningar förväntas uppkomma därefter.

4.2 Gubbängsfältet västra

Ungefärlig utbredning av lerområdet redovisas i Figur 1.

4.2.1 Generellt

Området angränsar till området Gubbängsfältet östra och omfattar en stor yta. I den sydöstra delen av området finns Hökarängens centrum, flerfamiljshus, radhus, Hökarängens skola, Fagersjövägen och Örbyleden samt tunnelbanans Gröna linje Farstagrenen. I den nordöstra delen finns bostäder och ett grönområde. I den nordvästra delen finns Gubbängens idrottsplats samt SL bussdepå. I den sydvästra delen av området finns skog och Gökdalens våtmark.

Marknivåerna inom området varierar mellan +33 och +39 och höjdpartier avgränsar området.

4.2.2 Jordlagerförhållanden

Sydöstra delen av området

Jorden i de delar av området som ej bedöms vara sättningskänsliga, består överst av 1-1,5 meter fyllning som underlagras av 1,5-3,5 meter växlellagringar av lera, silt och sand. I området runt punkt på Fagersjövägen består jorden av cirka 6,5 meter lera, där de översta 2 metrarna är utbildad som torrskorpa. I två punkter, 16W144 och 16W145, på Budbärarvägen består jorden överst av cirka 2 meter fyllning som vilar på ca 2 meter sandig siltig lera som i sin tur vilar på friktionsmaterial på berg.

Nordöstra delen av området
Jorden består inom stora delar av området överst av fyllning (upp till 1,5 meter) ovan lera som vilar på friktionsjord som i sin tur vilar på berg. Lermäktigheten uppgår till cirka 4 meter i undersökta punkter (16WS903 och 16W193) och har inslag av silt.

Nordvästra delen av området
Jorden består i undersökningspunkt 16W167 överst av ca 1 meter fyllning ovan cirka 7 meter lera som vilar på friktionsmaterial som i sin tur vilar på berg. I undersökningspunkt 17W008 består jorden överst av cirka 2 meter fyllning ovan cirka 11 meter lera son vilar på friktionsjord som i sin tur vilar på berg.

Sydvästra delen av området
Jorden består i undersökningspunkt (16W150) överst av cirka 1 meter fyllning ovan cirka 6 meter lera som vilar på ett tunt lager friktionsmaterial som i sin tur vilar på berg.

4.2.3 Utförda undersökningar
Ostörd provtagning (kolv) har i samband med denna utredning utförts i 7 punkter (16WS903, 16W060, 16W144, 16W150, 16W167, 16W193 och 17W008).

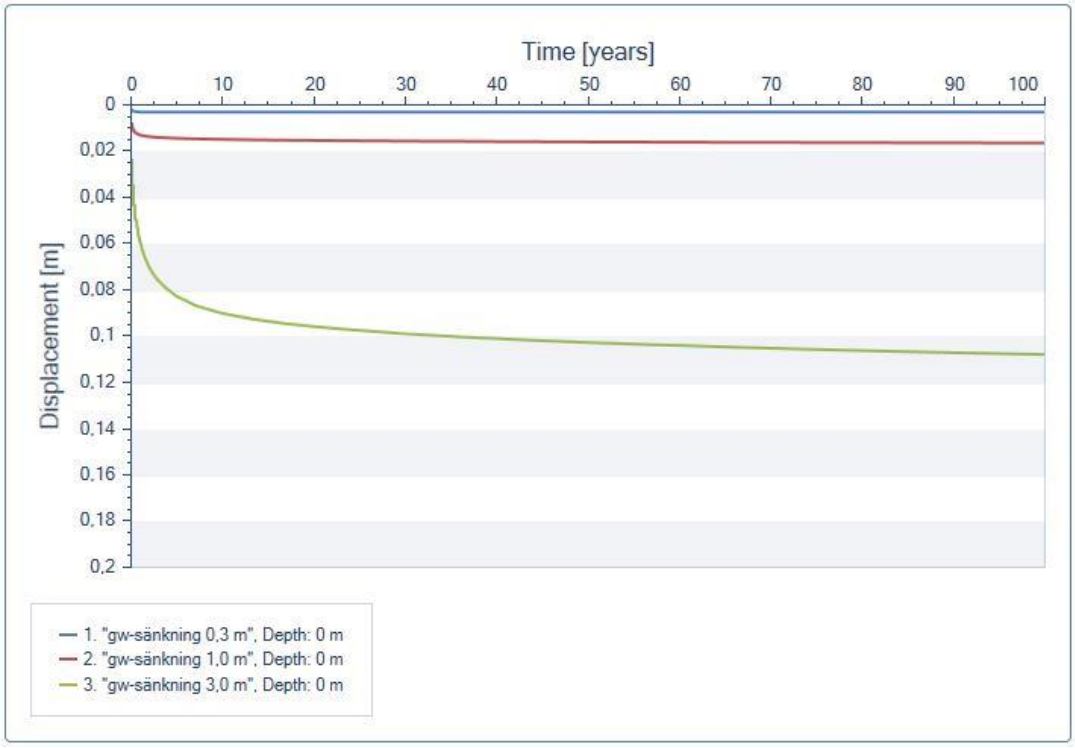
4.2.4 Sättningsegenskaper/Beräkningsresultat
Grundvattennivån är uppmätt i grundvattenrör 16RA822U samt 16RA836U och varierar under perioden mars 2016 till mars 2017 mellan +30,6 och +33,3. I beräkningen för punkt 16W167 har nivån +32,5 valts, vilket motsvarar 1,1 meter under markytan.

Tabell 5. Provtagningspunkt 16W167.

Marknivå		Grundvattennivå		Jordlager ovan lera (m)		Lermäktighet (m)	
+33,6		+33,6		1		5,5	
Lerans parametrar utvärderade från CRS-försök utförda på upptagna kolvprover från 16W167							
Djup (m)	σ´c	σ´L	Mo	ML	M´	ki	β_k
3	137	299	8300	2660	9,7	2,00E-10	2,9
4	53	85	3100	576	18,4	4,10E-10	2,7
5	74	120	3975	2016	20,9	1,50E-09	2,8

Tabell 6. Resultat från sättningsberäkningarna i punkten 16W167.

Grundvattensänkning (m)	1 år (m)	2 år (m)	5 år (m)	10 år (m)	20 år (m)	40 år (m)	100 år (m)
0,3	0	0	0	0	0	0	0
1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
3	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,1	0,1



Figur 4. Diagrammet visar marksättningens tillväxt vid grundvattensänkning 0,3, 1,0 samt 3,0 meter i undersökningspunkt 16W167.

Grundvattennivån är uppmätt i grundvattenrör 16WS903U och varierar under perioden juni 2016 till mars 2017 mellan +29,9 och +30,7. I beräkningen för punkt 16WS903 har nivån +30 valts, vilket motsvarar 1,5 meter under markytan.

Tabell 7. Provtagningspunkt 16WS903.

Marknivå		Grundvattennivå		Jordlager ovan lera (m)		Lermäktighet (m)	
+31,5		+30		1		5,5	
Lerans parametrar utvärderade från CRS-försök utförda på upptagna kolvprover från 16WS903							
Djup (m)	σ´c	σ´L	Mo	ML	M´	ki	β_k
2,5	165	289	8000	3131	12,5	6,2E-10	2,7
3,5	-	(3059)	2500	(135)	(21,1)	(6,1E-10)	(4,8)

Tabell 8. Resultat från sättningsberäkningarna i punkten 16WS903.

Grundvattensänkning (m)	1 år (m)	2 år (m)	5 år (m)	10 år (m)	20 år (m)	40 år (m)	100 år (m)
0,3	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0
3	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Figur 5. Diagrammet visar marksättningens tillväxt vid grundvattensänkning 0,3, 1,0 samt 3,0 meter i undersökningspunkt 16WS903.

Grundvattennivån är uppmätt i grundvattenrör 16WS934U och 136D12 och varierar under perioden 1977 till mars 2017 mellan +32,3 och +33,2. I beräkningen för punkt 16W060 har nivån +32,7 valts, vilket motsvarar 2,4 meter under markytan.

Tabell 9. Provtagningspunkt 16W060.

Marknivå		Grundvattennivå		Jordlager ovan lera (m)		Lermäktighet (m)	
+35,1		+32,7		1,5 (Fy)		6,25	
Lerans parametrar utvärderade från CRS-försök utförda på upptagna kolvprover från 16W060							
Djup (m)	σ´c	σ´L	Mo	ML	M´	ki	β_k
3,5	108	231	7800	1912	10,8	9,9e-10	1,9
4,5	118	162	5500	3219	20,9	1,6E-10	4,3
5,5	(_125_)	(_169_)	(_5300_)	(_4235_)	(_26,6_)	5E-9	4,1

Tabell 10. Resultat från sättningsberäkningarna i punkten 16W060.

Grundvattensänkning (m)	1 år (m)	2 år (m)	5 år (m)	10 år (m)	20 år (m)	40 år (m)	100 år (m)
0,3	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0
3	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Figur 6. Diagrammet visar marksättningens tillväxt vid grundvattensänkning 0,3, 1,0 samt 3,0 meter i undersökningspunkt 16W060.

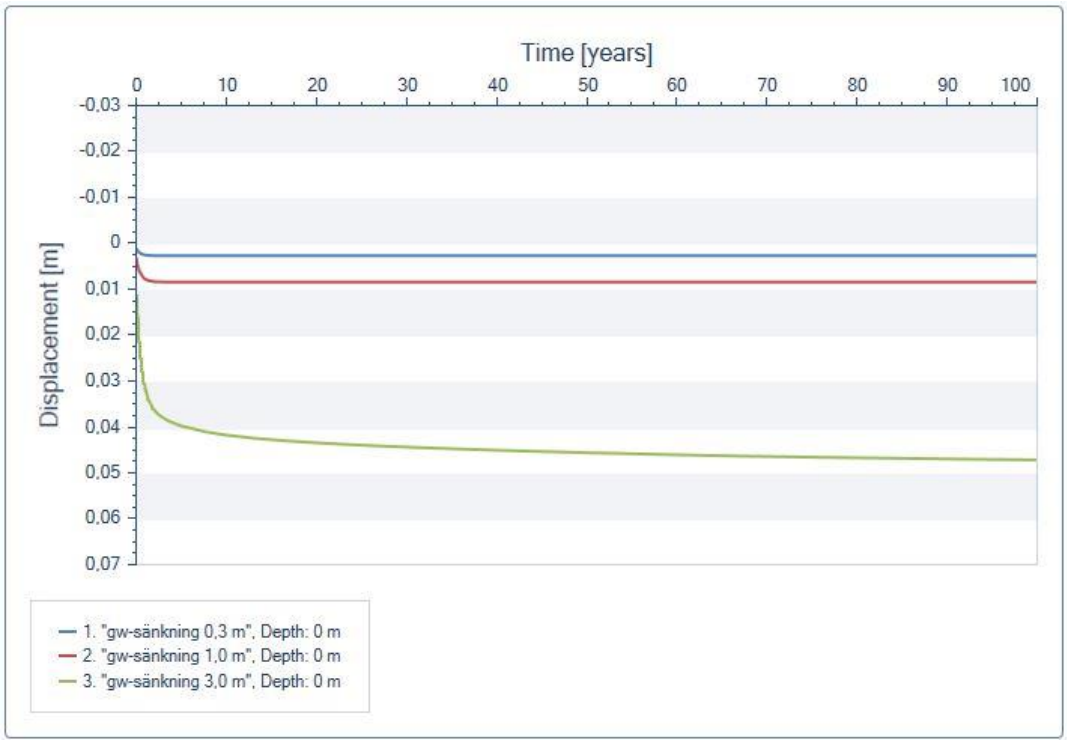
Grundvattennivån är uppmätt i grundvattenrör 16WS906U och varierar under perioden juni 2016 till mars 2017 mellan +34 och +35. I beräkningen för punkt 16W150 har nivån +34,4 valts, vilket motsvarar 1 meter under markytan.

Tabell 11. Provtagningspunkt 16W150

Marknivå		Grundvattennivå		Jordlager ovan lera (m)		Lermäktighet (m)	
+35,4		34,4		1,5		5,5	
Lerans parametrar utvärderade från CRS-försök utförda på upptagna kolvprover från 16W150							
Djup (m)	σ´c	σ´L	Mo	ML	M´	ki	β_k
2,8	128	296	6900	2883	12,1	2,3E-10	3,7
4	78	136	5300	1413	16,3	3,1E-10	4
5	89	144	5600	3065	21,4	2,9E-10	4,7

Tabell 12. Resultat från sättningsberäkningarna i punkten 16W150

Grundvattensänkning (m)	1 år (m)	2 år (m)	5 år (m)	10 år (m)	20 år (m)	40 år (m)	100 år (m)
0,3	0	0	0	0	0	0	0
1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
3	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05



Figur 7. Diagrammet visar marksättningens tillväxt vid grundvattensänkning 0,3, 1,0 samt 3,0 meter i undersökningspunkt 16W150.

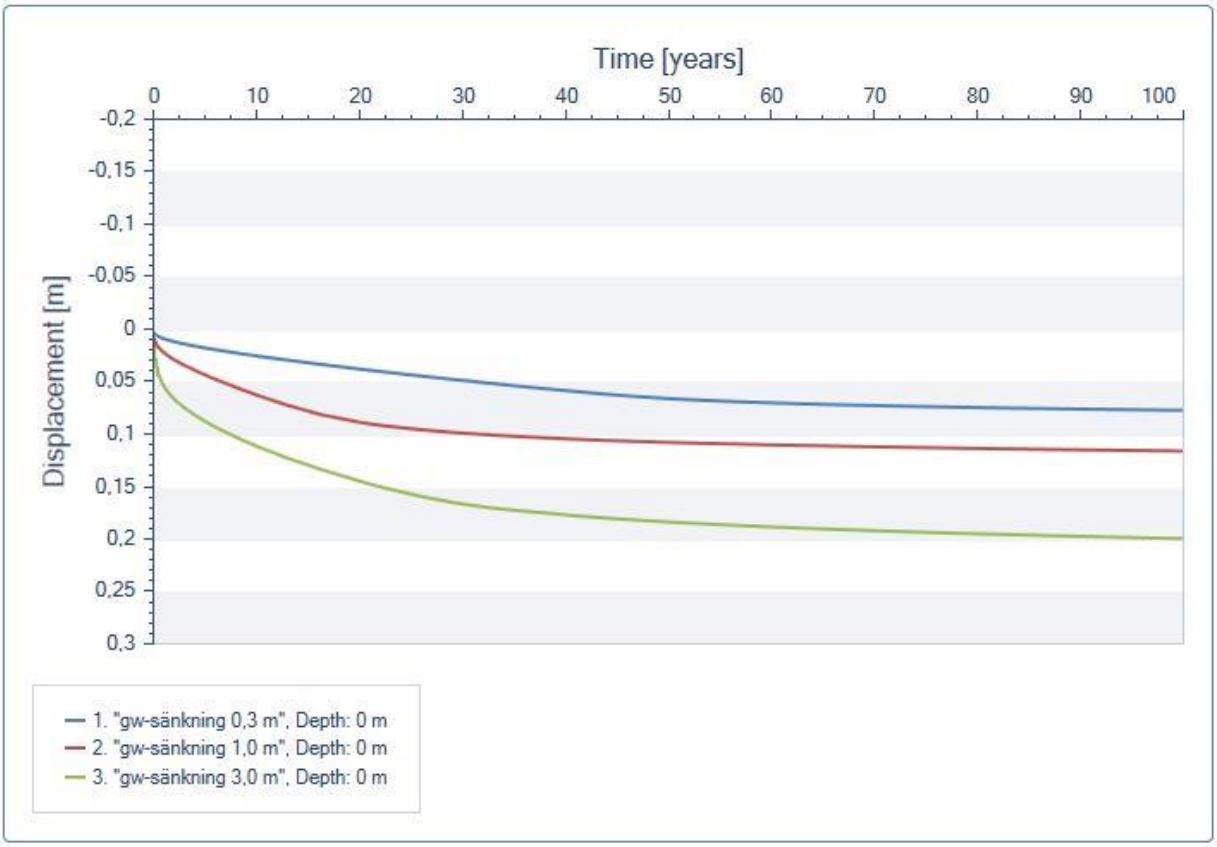
Grundvattennivån är uppmätt i grundvattenrör 126D174 och varierar under perioden 1977 till 2017 mellan +32 och +33. I beräkningen för punkt 17W008 har nivån +32,4 valts, vilket motsvarar 1,6 meter under markytan.

Tabell 13. Provtagningspunkt 17W008.

Marknivå		Grundvattennivå		Jordlager ovan lera (m)		Lermäktighet (m)	
+34		32,4		2,3		10,7	
Lerans parametrar utvärderade från CRS-försök utförda på upptagna kolvprover från 17W008							
Djup (m)	σ´c	σ´L	Mo	ML	M´	ki	β_k
3	74	135	3900	1067	13	3,2e-10	3,6
5	80	108	5400	1354	15,5	2,5e-10	3,1
7	106	177	5500	1028	16,9	5,3e-11	2,1
9	90	163	4300	2009	20,7	2,1e-10	3,7

Tabell 14. Resultat från sättningsberäkningarna i punkten 17W008

Grundvattensänkning (m)	1 år (m)	2 år (m)	5 år (m)	10 år (m)	20 år (m)	40 år (m)	100 år (m)
0,3	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08
1	0,02	0,03	0,04	0,06	0,09	0,1	0,12
3	0,05	0,07	0,09	0,11	0,14	0,18	0,2



Figur 8. Diagrammet visar marksättningens tillväxt vid grundvattensänkning 0,3, 1,0 samt 3,0 meter i undersökningspunkt 17W008.

4.2.5 Bedömning

Leran i områdets nordvästra del, i anslutning till undersökningspunkterna 16W150, 16W167 samt 17W008, är överkonsoliderad med 7 - 15 kPa. Inga marksättningar bedöms pågå i denna del av området. Vid beräknade grundvattensänkningar på 0,3 meter, bedöms inga krypsättningar uppstå vid undersökningspunkterna 16W150 och 16W167. Dock bedöms krypsättningar uppstå i undersökningspunkt 17W008 vid grundvattensänkningar större än 0,3 meter. I undersökningspunkt 16W150 uppstår krypsättningar vid en grundvattensänkning på 3,0 meter. I undersökningspunkt 16W167 uppstår krypsättningar vid en grundvattensänkning på både 1,0 och 3,0 meter.

I områdets nordöstra del, i anslutning till undersökningspunkt 16W193, bedöms leran vara överkonsoliderad med 30-100 kPa. Vid laboratorieförsök på upptagna ostörda prover från undersökningspunkten kunde inga CRS-resultat erhållas på grund av mycket siltinnehåll i leran. Beräkningar har därför inte kunnat utföras i denna undersökningspunkt.

I områdets sydöstra del, i anslutning till undersökningspunkt 16W144, bedöms leran vara överkonsoliderad med 50 - 100 kPa enligt resultat från utvärderade CPT-sonderingar. Inga marksättningar bedöms pågå i denna del av området. Vid laboratorieförsök på upptagna ostörda prover från undersökningspunkten kunde inga CRS-resultat erhållas på grund av mycket siltinnehåll i leran. Beräkningar har därför inte kunnat utföras i denna undersökningspunkt.

Leran i områdets sydöstra del i anslutning till undersökningspunkterna 16WS903 samt 16W060 är överkonsoliderad med 50 - 100 kPa. Inga marksättningar bedöms pågå i denna del av området. För beräknade grundvattensänkningar (0,3 – 3,0 meter) uppstår inga krypsättningar i denna del av området.

Leran i områdets nordvästra del är mer sättningsbenägen än övriga delar av området.

4.3 Högdalen östra

Ungefärlig utbredning av lerområdet redovisas i Figur 1.

4.3.1 Generellt

Området ligger strax norr om Högdalstoppen utmed Högdalsdepån och Harpsundsvägen. Inom området finns huvudsakligen industrifastigheter samt flerfamiljshus med tillhörande tomter och gator.

4.3.2 Topografi

Marknivåerna inom området varierar mellan +33 och +36 och höjdpartier avgränsar området.

4.3.3 Jordlagerförhållanden

Delar av området består av lera som ej bedöms vara sättningsbenägen, se bilaga C7.1. Jorden i övriga delar består enligt undersökningspunkterna R21, R61B, 135B-137 samt 17W009 överst av 1,5-3,5 meter fyllning ovan 3,5-5 meter lera som vilar på 1-3 meter friktionsmaterial som i sin tur vilar på berg. Fyllningen består av silt, sand och grus med innehåll av block. Lerans översta 2-4 meter är utbildad som torrskorpa. Leran har inslag av silt.

4.3.4 Utförda undersökningar

Inga kolvprovtagningar med CRS-försök är utförda i området på grund av hög andel silt i leran.

4.3.5 Sättningsegenskaper/Beräkningsresultat

Grundvattennivån är uppmätt i grundvattenrör 16WS910 och 16RA831U och varierar under perioden maj 2016 till mars 2017 mellan +30,6 och +33,7.

4.3.6 Bedömning

Lerans mäktighet under grundvattennivån är maximalt 3 m. Baserat på utvärderad CPT sondering i undersökningspunkt 17W009 bedöms leran vara kraftigt överkonsoliderad och därmed ej sättningsbenägen vid grundvattensänkning.

4.4 Högdalen norra

Ungefärlig utbredning av lerområdet redovisas i Figur 1.

4.4.1 Generellt

Området ligger norr om Högdalsdepån. Stallarholmsvägen går genom området. Området består huvudsakligen av låga industrifastigheter/verkstäder med tillhörande tomter och gator.

4.4.2 Topografi

Marknivåerna inom området varierar mellan +35 och +36. Området avgränsas delvis av höjdpartier.

4.4.3 Jordlagerförhållanden

Jorden består av fyllning för vägar och andra hårdgjorda ytor. Leran i området bedöms ha en mäktighet mellan 1 - 6 m enligt sonderingspunkter 64SSG8B, 64SSG9D samt 17WS901. Enligt CPT utförd i sonderingspunkt 17WS901 är leran överkonsoliderad med mellan 1 – 40 kPa. Med avseende på de relativt små lermäktigheterna och konsolidering i området bedöms risken för skadliga marksättningar vara liten.

4.4.4 Utförda undersökningar
Inga kolvprovtagningar är utförda i området.

4.4.5 Sättningsegenskaper/Beräkningsresultat
Inga sättningsberäkningar har utförts i området.

4.4.6 Bedömning
Leran i området bedöms ha liten mäktighet och inte vara sättningsbenägen.

4.5 Fagersjö
Ungefärlig utbredning av lerområdet redovisas i Figur 1.

4.5.1 Generellt
Området ligger utmed Fagersjövägen. Området består huvudsakligen av skogspartier, grönområden samt flerfamiljshus, radhus och friliggande villor med tillhörande tomter och gator. Området gränsar till Gubbängsfältet västra.

4.5.2 Topografi
Marknivåerna i området varierar mellan cirka +39 och ca +43 och höjdpartier avgränsar området.

4.5.3 Jordlagerförhållanden
Överst utgörs jorden till stor del av torrskorpelera och/eller fyllning. Därunder förekommer lera till som mest 6 meter djup i undersökta punkter. Under leran har friktionsjord med cirka 1-4 mäktighet påträffats.

4.5.4 Utförda undersökningar
Ostörd provtagning (kolv) har i samband med denna utredning utförts i en punkt (16W201).

4.5.5 Sättningsegenskaper/Beräkningsresultat
Grundvattennivån är uppmätt i grundvattenrör 16RA835B, 16WS914U, 16WS935U och 136C53 och varierar under perioden 1980 till mars 2017 mellan +36,1 och +39,7. I beräkningen för punkt 16W201 har grundvattennivån + 37,4 valts, vilket motsvarar 1,7 meter under markytan.

Tabell 15. Provtagningspunkt 16W201.

Marknivå		Grundvattennivå		Jordlager ovan lera (m)		Lermäktighet (m)	
+39,1		+37,4		2		4,5	
Lerans parametrar utvärderade från CRS-försök utförda på upptagna kolvprover från 16W201							
Djup (m)	σ´c	σ´L	Mo	ML	M´	ki	β_k
4,5	119	183	5900	2142	19,3	8,1E-11	1,7

Tabell 16. Resultat från sättningsberäkningarna i punkten 16W201.

Grundvattensänkning (m)	1 år (m)	2 år (m)	5 år (m)	10 år (m)	20 år (m)	40 år (m)	100 år (m)
0,3	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0
3	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Figur 9. Diagrammet visar marksättningens tillväxt vid grundvattensänkning 0,3, 1,0 samt 3,0 meter i undersökningspunkt 16W201.

4.5.6 Bedömning

Leran i området är överkonsoliderad med 60 kPa. Inga marksättningar bedöms pågå i området. För beräknade grundvattensänkningar (0,3 – 3,0 meter) bedöms inga krypsättningar uppstå.

Leran i området bedöms inte vara sättningsbenägen.

4.6 Hökarängen norra

Ungefärlig utbredning av lerområdet redovisas i Figur 1. Endast en liten del av området ligger inom det bedömda influensområdet.

4.6.1 Generellt

Lerområdet sträcker från Farstavägen i söder till Skönstaholmsvägen i norr. Bostadshus och parkeringsytor finns framförallt i södra och norra delarna av området och i övrigt finns öppna grönytor, gång- och cykelvägar, enstaka buskage och träd.

4.6.2 Topografi

Marknivåerna i området varierar mellan cirka +22 och cirka +31 och höjdpartier avgränsar området i söder, väster och norr.

4.6.3 Jordlagerförhållanden

Vid gator och andra hårdgjorda ytor består jorden av fyllning ovan som mest cirka 4 meter lera. Djup till fast botten varierar från 3 till 5 meter enligt tidigare utförda undersökningspunkter 62SSG4J, 62SSG6A samt 62SSG7Q.

4.6.4 Utförda undersökningar
Eftersom området ligger utanför influensområdet har inga kolvprovtagningar utförts.

4.6.5 Sättningsegenskaper/Beräkningsresultat
Eftersom området ligger utanför influensområdet har inga beräkningar utförts.

4.6.6 Bedömning
I de delar av området som ligger inom influensområdet består jorden av som mest cirka 4 meter lera och anses vara delvis av torrskorpekaraktär och därför inte sättningsbenägen vid grundvattensänkningar.

4.7 Pepparvägen, Lingvägen södra och Lingvägen norra
Vid Pepparvägen och Lingvägen finns tre mindre lersänkor, se Figur 1. Undersökningar av lermäktighet och lerans egenskaper pågår och beräknas vara klara hösten 2019.

5 Sammanfattning av beräkningar

I området Gubbängsfältet östra i anslutning till undersökningspunkterna 14W02 samt 16WS901 bedöms inga marksättningar pågå. Leran bedöms vara överkonsoliderad med 25 – 40 kPa. Krypsättningar bedöms inte uppstå i området vid de beräknade grundvattensänkningarna (0,3 – 3,0 meter).

I området Gubbängsfältet västra bedöms inga marksättningar pågå. Leran bedöms vara överkonsoliderad i hela området, dock bedöms leran i områdets nordvästra del i anslutning till undersökningspunkterna 16W150, 16W167 samt 17W008 vara mer sättningsbenägen än leran i övriga delar av området. Endast i den nordvästra delen av området bedöms krypsättningar kunna uppstå.

I området Högdalen östra bedöms inga marksättningar pågå. Leran bedöms vara kraftigt överkonsoliderad i området och bedöms ej vara sättningsbenägen.

I området Högdalen norra bedöms leran ha liten mäktighet samt inte vara sättningsbenägen.

I området Fagersjö bedöms inga marksättningar pågå. Leran bedöms vara överkonsoliderad med 60 kPa. Krypsättningar bedöms ej uppstå i området vid de beräknade grundvattensänkningarna (0,3 – 3,0 meter).

I området Hökarängen norra bedöms sättningsbenägen lera kunna finnas lokalt i mitten av området.

Tabell 17. Sammanfattning av beräkningspunkter, lermäktighet samt beräknad marksättning vid 0,3 meter gv-sänkning efter tiderna; 1, 5 och 40 år.

Undersöknings-punkt	Lermäktighet [m]	Beräknad sättning 0,3 meter gv-sänkning, 1 år [m]	Beräknad sättning 0,3 meter gv-sänkning, 5 år [m]	Beräknad sättning 0,3 meter gv-sänkning, 40 år [m]
16WS901	4,5	0	0	0
14W02	9	0	0	0
16W167	5,5	0	0	0
16WS903	5,5	0	0	0
16W060	6,25	0	0	0
16W150	5,5	0	0	0
17W008	10,7	0,01	0,02	0,06
16W201	4,5	0	0	0

Tabell 18. Sammanfattning av beräkningspunkter, lermäktighet samt beräknad marksättning vid 1,0 meter gv-sänkningefter tiderna; 1, 5 och 40 år.

Undersöknings-punkt	Lermäktighet [m]	Beräknad sättning 1,0 meter gv-sänkning, 1 år [m]	Beräknad sättning 1,0 meter gv-sänkning, 5 år [m]	Beräknad sättning 1,0 meter gv-sänkning, 40 år [m]
16WS901	4,5	0	0	0
14W02	9	0,01	0,01	0,01
16W167	5,5	0,01	0,01	0,02
16WS903	5,5	0	0	0
16W060	6,25	0	0	0
16W150	5,5	0,01	0,01	0,01
17W008	10,7	0,02	0,04	0,1
16W201	4,5	0	0	0

Sammanfattningsvis konstateras i de flesta beräkningspunkter slutsättningar på 0,01-0,05 meter vid 3 meter grundvattensänkning. I en beräkningspunkt (Norra delen av Gubbängsfältet västra undersökningspunkt 17W008) antas slutsättningar bli maximalt 0,2 meter.

6 Referenslista

6.1 Framtagna underlagsdokument

[1] Förundersökningsrapport Geoteknik, Dokumentid 5320-G51-24-04001. WSP.

6.2 Övriga referenser

[2] Gubbängsfältet. Underlag för detaljplan. Markteknisk undersökningsrapport (MUR) - Geoteknik. Daterad 2014-03-12. WSP Samhällsbyggnad, Geoteknik avdelningen 5658

Vårt uppdrag är att genomföra tunnelbanans utbyggnad och övriga åtgärder inom ramen för 2013 års Stockholmsförhandling. Det innebär planering, projektering och nya stationer på fyra olika sträckor. För att kunna genomföra utbyggnaden behöver också depåkapaciteten ökas och nya tåg köpas in. Byggstart för utbyggnad av utökad depåkapacitet planeras under 2020 och byggtiden beräknas pågå cirka 6 år.

Region Stockholm
Förvaltning för utbyggd tunnelbana
Box 22550, 10422 Stockholm
Telefon: 08-737 25 00

PM Hydrogeologi

PM Sättningar
Bilaga C7.1
Undersökningspunkter

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Datum: 2019-06-14

Skala (A3): 1:8 000

0 100 200 300 Meter

© Lantmäteriet, Geodatasamverkan
© Open Stockholm

Teckenförklaring

- Kolvprovtagning
- Kolvprovtagning samt CRS
- Kolvprovtagning samt CPT och CRS
- CPT
- Sondering
- Grundvattenrör
- Bergtunnel
- Betongtunnel
- Betongtråg
- Spår i ytläge
- Befintlig tunnelbana
- Befintlig Högdalsdepå
- Berg
- Lera
- Morän
- Organisk jord
- Växellagring

Region Stockholm

PM Hydrogeologi

Bilaga C8

Föroreningar i grundvatten

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Region Stockholm

PM Hydrogeologi

Bilaga C8

Föroreningar i grundvatten

Miljöprövning för utbyggd depå i Högdalen

Region Stockholm

Titel: PM Hydrogeologi Bilaga C8 Föroreningar i grundvatten
Uppdragsledare: Catrine Söderström, WSP
Projektledare: Jörgen Niklasson, FUT
Författare: Håkan Svensson
Bilder & illustrationer: FUT/WSP/Kemakta om inget annat anges
Dokumentid: 5140-M53-22-01003_bilaga C8
Diarienummer: FUT 2016-0027
Utgivningsdatum: 2019-06-14

Distributör: Region Stockholm, förvaltning för utbyggd tunnelbana
Box 225 50, 104 22 Stockholm. Tel: 08 737 25 00. E-post: nyatunnelbanan@sll.se

Innehållsförteckning

1 Inledning 4
2 Underlagsmaterial 4
2.1 Tidigare utredningar 4
2.2 Genomförda undersökningar 2016-2019 4
2.3 Övrigt underlag 6
3 Föroreningssituation 7
3.1 Metaller 7
3.2 Oljeföroreningar 8
3.3 Klorerade alifater 9
3.4 Dioxin,PCB och PFAS 9
3.5 Vattenkvalitet befintlig tunnelbana 10
3.6 Förutsättningar för spridning 10
4 Vattenhantering 11
5 Referenser 13
5.1 Framtagna underlagsdokument 13
5.2 Övriga referenser 13

1 Inledning

Denna PM är en bilaga till PM Hydrogeologi, Bilaga C, som ingår i miljöprövningen för utbyggd depå i Högdalen.

Syftet med denna promemoria är att beskriva förekomsten av och förutsättningar för påverkan av föroreningar för den tillståndspliktiga vattenverksamheten.

Eftersom stora delar av anläggningen är belägen i berg, under grundvattenytan, kommer denna att påverka grundvattnet genom ett visst grundvatteninläckage till tunnelanläggningen. Negativa effekter som kan uppkomma i anslutning till områden med föroreningar i grundvatten på grund av tunnelanläggningen är dels att inläckande grundvatten för med sig föroreningar och påverkar vattenkvaliteten i det avledda grundvattnet. Vidare finns risk att ändrade grundvattenförhållanden kring tunneln påverkar eller mobiliserar föroreningar i mark och grundvatten.

Utredningsområdet omfattar bland annat äldre deponier (Högdalstopparna) och förbränningsanläggning i sydvästra delen av utredningsområdet. Vidare finns inom området pågående eller tidigare verksamheter som exempelvis kemtvättar och grafisk industri.

Genomgång har gjorts av resultat från tidigare miljöundersökningar för enskilda objekt eller fastigheter där risk finns att föroreningar kan påverka vattenkvaliteten på länshållningsvatten under byggtid och/eller dränvatten under drifttid. Grundvattnets kvalitet längs med planerad sträckning har undersökts genom provtagning i bergborrhål och grundvattenrör.

2 Underlagsmaterial

2.1 Tidigare utredningar

Följande undersökningar som utfört inom området har påträffats.

- Högdalstippen – Miljöteknisk markundersökning (Tyréns, 2008-05-06)
- Miljökontrollrapport – Överskottsmassehantering, Högdalstippen (WSP, 2011-04-21)
- Högdalstippen - Teknisk markmiljöundersökning och preliminär kostnadsuppskattning för hantering av påträffade föroreningar (Ramböll, 2015-10-28)
- Tunnelbana 1 Tillbyggnad inom spårdepå Högdalen, Etapp 1, Uppställningshall, hjulsvarv och verkstadshall, PM0, Bygghandling, Markundersökningsrapport (MUR) geoteknik (Ramböll, 2016-02-20)

2.2 Genomförda undersökningar 2016-2019

Miljöprovtagning har genomförts inom utredningsområdet i jord, grundvatten och ytvatten. Samtliga provtagningar har genomförts i syfte att utreda omfattningen av föroreningar samt spridningsbilden kring planerade undermarksanläggningar.

Inom utredningsområdet har miljötekniska provtagningar fokuserat på fem olika områden där en föroreningspåverkan bedöms kunna uppkomma eller där planerade markarbete kommer ske:

- Uppställningshall under mark
- Anslutning till Farstagrenen/schakt för anslutning mot markytan
- Befintlig Högdalsdepå
- Gökdalen

Därtill har spridningsförutsättningar av föroreningar från tippmassor vid Högdalstoppen varit en genomgående frågeställning, varför provtagningar också skett i anslutning till detta område. Vidare har provtagningar utförts inom grundvattenmagasinen Gubbängen västra och östra då magasinen har stor utbredning och omfattar potentiellt förorenande objekt.

Denna PM redogör huvudsakligen för de på effekter som kan uppkomma i anslutning till områden med föroreningar i grundvatten på grund av den tillståndspliktiga vattenverksamheten. För detaljerad redovisning av förorening i jord, exempelvis i samband med schaktning, hänvisas till förutsättningsrapporten PM Miljögeoteknik [1].

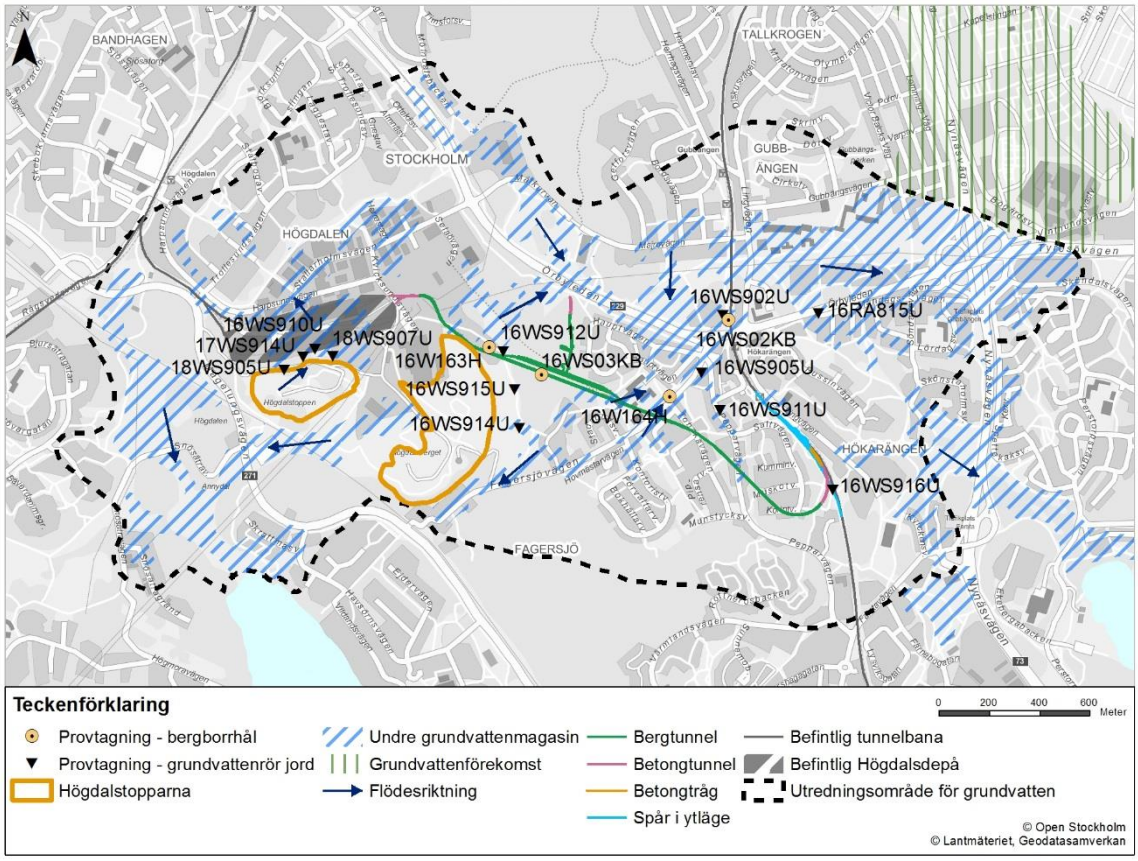
Då utredningsområdet inrymmer ett stort antal varierande verksamheter med olika markanspråk, samt att det råder en skiftande geologi, har ett omfattande analyspaket varit motiverat. Tidigare uppmätta ämneshalter vid genomförda undersökningar inom området har även legat till grund för omfånget av analyser inom ramen för denna undersökning.

I denna PM beskrivs föroreningssituationen i grundvatten avseende på följande parametrar, se Tabell 1.

Tabell 1 Analysparameter grundvatten

Analysparametrar grundvatten	**Ingående ämnen/ämnesgrupper**
Metaller	Arsenik (As), Barium (Ba), Bly (Pb), Kadmium (Cd), Kobolt (Co), Koppar (Cu, Krom (Cr), Kvicksilver (Hg), Nickel (Ni), Vanadin (V) och Zink (Zn)
Oljeföroreningar PAH	alifater, aromater, BTEX-ämnen (bensen, toluen, etylbensen och xylener) och PAH (polycykliska aromatiska kolväten). Halterna av PAH är summerade enligt följande: PAH-L Polycykliska aromatiska kolväten med låg molekylvikt: naftalen, acenaften och acenaftylen. PAH-M Polycykliska aromatiska kolväten med medelhög molekylvikt: fluoren, fenantren, antracen, fluoranten och pyren. PAH-H Polycykliska aromatiska kolväten med hög molekylvikt: bens(a)antracen, krysen, bens(b)fluoranten, bens(k)fluoranten, bens(a)pyren, dibens(ah)antracen, benso(ghi)perylen och indeno(123cd)pyren.
Klorerade alifater	VOC-EPA + Vinylklorid (ca 50 olika ämnen)
Dioxin	Klorerade dibenso-p-dioxiner (CDD) och dibensofuraner (CDF)
PCB	Polyklorerade bifenyler (18 kongener)
PFAS	Summa PFAS SLV 11

I Figur 1 redovisas punkter där provtagning och analyser av grundvatten utförts längs sträckningen av planerade bergtunnlar.



Figur 1 Översikt av grundvattenrör och bergborrhål (hammarborrhål och kärnborrhål) där provtagning och analys utförts i grundvattnet.

2.3 Övrigt underlag

Analysresultaten av metaller har jämförts mot den sammanställning av grundvattenkvalitet i jord i Stockholm som utförts av Miljöförvaltningen i Stockholm stad (Miljöförvaltningen i Stockholm 2013). Undersökningen utfördes med syfte att få en bättre bild av grundvattenkvaliteten inom Stockholm stad.

Stockholms läns landsting genom Förvaltningen för utbyggd tunnelbana (FUT) och Trafikförvaltningen har sammanställt resultat från vattenprovtagningar i pumpgropar och mätdammar i delar av den befintliga tunnelbanan och i Citybanan (FUT och Trafikförvaltningen, 2017). Provtagningarna genomfördes under 2005-2016. Då befintlig tunnelbana (Grön linje) går ovan mark inom utredningsområdet för utbyggd depå i Högdalen finns inga representativa halter specifikt för dräneringsvatten från bergtunnlar i området. Dock kan generella slutsatser dras från utredningen beträffande vattenkvalitet i bergtunnlar i urban miljö i Stockholmsområdet.

3 Föroreningssituation

I detta kapitel beskrivs förekomsten av föroreningar längs spårsträckningen samt vid Högdalstopparna och grundvattenmagasinen inom Gubbängsfältet västra. Redovisning av föreningshalterna görs områdesvis där uppmätt maxhalt i grundvatten inom respektive område redovisas. Respektive område omfattar provtagningspunkter enligt indelning i Tabell 2.

Tabell 2 Indelning av områden (med ingående provpunkter) för beskrivning av föroreningssituationen i grundvatten längs sträckningen av planerade spårtunnlar.

Område	Grundvattenrör i jord	Borrhål i berg
Anslutning till Farstagrenen	16WS911U, 16WS916U	
Nordost om Högdalstopparna	16WS912U, 16WS914U	16W163H*, 16WS03KB**
Nordost Högdalstopparna (rör 16WS915, nära släntfot)	16WS915	
Nordväst om Högdalstopparna/befintligt depåområde	16WS910U, 17WS914U, 18WS905U, 18WS907U	
Gubbängsfältet västra	16WS905U, 16WS902U	16W164H*, 16WS02KB**

*Hammarborrhål, **Kärnborhål

Områdesindelningen sammanfaller dels med tunnelsträckningens olika delar men även med typen av markanvändning och typ av potentiellt förorenande verksamhet. Området benämnt anslutning till Farstagrenen utgörs huvudsakligen av bostadsområde och potentiellt förorenande verksamheter av mindre storlek, exempelvis kemtvättar och grafisk industri. Området nordost om Högdalstopparna sammanfaller med sträckningen av uppställningshall under mark, området ligger i anslutning till Högdalstopparna där bland annat deponering av avfall bedrivits. Området nordväst om Högdalstopparna ligger även i anslutning till Högdalstopparna men omfattar även befintlig Högdalsdepå.

Vid beskrivning av föroreningssituationen redovisas huvudsakligen de ämnen där uppmätt halt detekterats över rapporteringsgränsen.

3.1 Metaller

Metallhalter i grundvatten redovisas i Tabell 3. För grundvatten i jord observeras förhöjda halter av arsenik och nickel huvudsakligen i området nordost om Högdalstopparna. För grundvatten i berg i anslutning till spårsträckningen konstateras att metallerna nickel och zink även är förhöjda varav nickel är högre än för grundvatten i jord. Detta gäller för nickel nordost om Högdalstopparna. I anslutning till Gubbängsfältet västra har höga zinkhalter uppmätts i grundvatten i berg, dock ligger denna punkt (16WS02KB) cirka 450 meter norr om spårlinjen.

Tabell 3 Påträffad maxhalt av metaller i grundvatten (undre magasin och kärn-/hammarborrhåll) samt bakgrundshalter i grundvattenförande lager inom hela Stockholm stad (Miljöförvaltningen i Stockholm 2013).

	Arsenik	Bly	Koppar	Krom	Kvicksilver	Nickel	Zink
	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Anslutning till Farstagrenen	4,2	< 0,050	2	0,2	< 0,1	9,8	< 1
Nordost Högdalstopparna	8	0,24	18	0,51	< 0,1	19	15
Nordost Högdalstopparna (16WS915U)	6,7	< 0,1	8,2	0,27	< 0,1	17	14
Nordost Högdalstopparna-berg	2	< 0,1	8,7	0,27	< 0,1	23	12
Nordväst Högdalstopparna/ Befintlig depåområde	< 0,2	< 0,050	5,4	0,28	< 0,1	21	4
Gubbängsfältet v.	0,51	< 0,050	0,79	<0,2	<0,1	19	< 1
Gubbängsfältet v.-berg	0,3	< 0,050	18	< 0,20	< 0,1	25	280
Bakgrundshalt	0,41	0,05	2	0,07	<0,002	1,7	4,4

3.2 Oljeföroreningar

Oljeföroreningar i grundvatten redovisas i Tabell 4. För grundvatten i jord observeras mycket förhöjda halter av PAH i området nordost om Högdalstopparna. I övriga delar längs med tunnelsträckningen ligger halten generellt lågt eller under rapporteringsgränsen. Det kan konstateras att halterna vid Högdalstopparna ligger som högst i det grundvattenrör som ligger närmast sluttningsfoten (16WS915U). På längre avstånd, i nordlig riktning från Högdalstopparna, minskar halten betydligt. För grundvatten i berg konstateras att övriga oljeföroreningar inom hela området även är låga eller ligger under rapporteringsgränsen.

Tabell 4 Påträffad maxhalt av oljeföroreningar i grundvatten (undre magasin och kärn-/hammarborrhåll)

	Toluen	Alifater >C16-C35	Aromater >C16-C35	PAH-L*	PAH-M*	PAH-H*
	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Anslutning till Farstagrenen	< 0,0010	0,13	< 0,0050	< 0,20	< 0,30	< 0,30
Nordost Högdalstopparna	< 0,0010	< 0,050	< 0,0050	< 0,20	2,1	3,2
Nordost Högdalstopparna (16WS915U)	< 0,0010	<0,50	0,024	8,3	140	120
Nordost Högdalstopparna-grundvatten i berg	0,04	0,1	< 0,0050	< 0,20	< 0,30	< 0,30
Nordväst Högdalstopparna/ Befintlig depåområde	< 0,0010	1,2	< 0,0050	1,2	22	12
Gubbängsfältet v.	< 0,0010	3,6	< 0,0050	< 0,20	< 0,30	< 0,30
Gubbängsfältet v.-berg	0,0018	0,18	< 0,0050	< 0,20	< 0,30	< 0,30

* PAH-L = Summa PAH med låg molekylvikt, PAH-M = Summa PAH med medelhög molekylvikt, PAH-H = Summa PAH med hög molekylvikt

3.3 Klorerade alifater

Förekomst av klorerade alifater i grundvatten redovisas i Tabell 5. I grundvatten i jord påträffas endast låga halter eller halter under rapporteringsgränsen inom området. Dock har detektion av dikloreten och vinylklorid gjorts inom området för anslutning till Farstagrenen. Nordost om Högdalstopparna har inga klorerade alifater detekterats förutom för triklormetan som ligger i nivå med rapporteringsgränsen.

För den provtagning som är utförd i grundvatten i jord i anslutning till Gubbängsfältet västra konstateras detektion av dikloreten och vinylklorid, denna punkt (16WS905U) ligger cirka 220 meter norr om spårlinjen.

Tabell 5 Påträffad maxhalt av oljeföroreningar i grundvatten (undre magasin och kärn-/hammarborrhåll).

	1,1,2-Trikloretan	cis-1,2-Dikloreten	Tetrakloreten	Triklormetan	Vinylklorid
	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Anslutning till Farstagrenen	< 1,0	21	< 1,0	< 1,0	0,76
Nordost Högdalstopparna	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 0,50
Nordost Högdalstopparna (16WS915U)	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 0,50
Nordväst Högdalstopparna/ Befintlig depåområde	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,1	< 0,50
Gubbängsfältet v.	< 1,0	23	< 1,0	< 1,0	0,89
Gubbängsfältet v.-berg	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 0,10

3.4 Dioxin,PCB och PFAS

Vid analys av dioxin anges halten i TCDD-ekvivalenter, det vill säga halten av de olika föreningarna i gruppen viktas beroende på hur toxiska de är i jämförelse med TCDD (Tetraklordibenso-p-dioxin) som är den giftigaste dioxinkongenen. Viktningen görs med toxikologiska ekvivalensfaktorer (TEF/TEQ-värden). Dioxiner anges vid analys även exklusive och inklusive rapporteringsgränsen (LOQ-limit of quantitation). Dioxiner har analyserats i ett hammarborrhål(16W163H) i området nordost om Högdalstopparna. Inga kongener rapporterades över rapporteringsgränsen varför ingen detektion kan rapporteras för värden exklusive LOQ, inklusive LOQ uppges halten till cirka 4 pg/l, dvs summan av rapporteringsgränsen. Inga generella svenska riktvärden för dioxin i grundvatten finns framtagna. Jämfört med internationella riktvärden ligger dioxinhalten (inklusive LOQ) långt under. Exempelvis uppges det amerikanska kriteriet för dioxin i dricksvatten till 30 pg/l (EPA, 2009).

PCB utgörs av många olika enskilda kongener som skiljer sig genom antalet kloratomer och deras plats i molekylen. Oftast analyseras endast 7 PCB-kongener, de så kallade indikator-PCB-kongenerna. PCB har analyserats i hammarborrhål 16W163H i området nordost om Högdalstopparna samt i grundvattenrör i jord vid sluttfoten till Högdalstopparna (16WS914U, 16WS915U och 16WS912U). I samtliga rör i jord detekterades inga kongener över rapporteringsgränsen [1]. För grundvatten i berg (hammarborrhål) uppmättes en halt av PCB-7 på 5600 pg/l (exklusive LOQ) och 7100 pg/l (inklusive LOQ). Inga generella riktvärden för PCB i grundvatten finns framtagna. I jämförelse med internationella riktvärden för bedömning av påverkan i grundvatten ligger halten inklusive LOQ dock under. Exempelvis uppges det holländska kriteriet för PCB i grundvatten till 10 000 pg/l (RIVM, 2001). Liksom dioxin bedöms PCB till

största delen adsorberas till partiklar, framförallt i kallt klimat, varför transport med grundvatten är begränsad.

Högfluorerade ämnen (PFAS) är en mycket bred grupp av ämnen som karaktäriseras av deras ytaktivitet. En analys av de historiskt vanligaste förkommande ämnena PFOS och PFOA (summa PFAS SLV 11) har utförts i grundvatten vid norra sluttfoten till Högdalstopparna (18WS907U). Urvalet baserat på Livsmedelsverkets rekommenderade 11 PFAS-ämnen vid bedömning av halter i dricksvatten. Summa PFAS SLV 11 uppmättes till 380 ng/l. Preliminära riktvärden för PFOS i grundvatten för olika exponeringsvägar och skyddsobjekt har tagits fram av Sveriges geotekniska institut (SGI, 2015). Dataunderlaget för framtagning av riktvärden är för de flesta PFAS-föreningar bristfälligt. Det är endast för PFOS som det finns vetenskapliga data i sådan omfattning att det är relevant att ta fram ett preliminärt riktvärde. Jämförsele mellan summahalt av PFAS-ämnen med riktvärde framtaget för PFOS motiveras dock med att PFOS antas vara de mest toxiska av ämnena. Riktvärde för skydd av grundvatten (som potentiell drickvattenresurs) anges till 45 ng/l och skydd av ytvatten uppges till 230 ng/l. Halten av PFOS i provtagning av grundvatten i 18WS907 uppmäts till 56 ng/l.

3.5 Vattenkvalitet befintlig tunnelbana

Stockholms läns landsting genom Förvaltning för utbyggd tunnelbana och Trafikförvaltningen har sammanställt resultat från vattenprovtagningar i pumpgropar och mätdammar i delar av tunnelbanan under 2005-2016. Prover har dels tagits under normal drift, det vill säga utan att någon form av arbete med vatten förekommer och dels vid bilningsarbete med vatten och vid renspolning av makadam.

Generellt konstateras att vattenkvaliteten i tunnelbanan, under normal drift, ligger i nivå med Stockholms grundvatten. Med undantag från vissa enskilda analyser observeras generellt låga halter av organiska ämnen och tungmetaller i tunnelvattnet.

Vattenprovtagning från Citybanans nybyggda VA-station visar på så låga halter av föroreningar i inkommande vatten att sedimenteringsbassängerna inte ger någon nämnvärd effekt.

3.6 Förutsättningar för spridning

Den största risken för föroreningsspridning i grundvatten bedöms kunna ske från den före detta deponin Högdalstopparna. Inga uppgifter finns huruvida sluttäckning av deponin har skett och i vilken omfattning.

Högdalstopparna utgör en naturlig vattendelare varför vatten som infiltrerat via nederbörden kan perkolera ned genom fyllnadsmassorna och bilda lakvatten. Föroreningsspridning bedöms vara störst i grundvatten i jord. Dock finns viss risk att föroreningar kan transporteras djupare ned i grundvatten i berg om det förekommer mycket sprickbildningar i underliggande berg.

Grundvattenströmningen bedöms ske i nordostlig till nordvästlig riktning från Högdalstopparna. Inga trycknivåer finns för själva deponiområdet, men baserat på skillnad i trycknivåer mellan grundvattenrör vid sluttfoten och grundvattennivåer på längre avstånd, i anslutning till planerad spårsträckning, uppskattas den hydrauliska gradienten till cirka 0,04 m/m.

De analyser som utförts visar att prover från grundvattenrör satta vid sluttfoten av Högdalstopparna innehåller höga halter av PAH:er medan halterna minskar betydligt i grundvatten i jord med ökat avstånd från deponin. Vidare påvisas summahalter av PAH i grundvatten i berg under rapporteringsgränsen. Detta kan troligen förklaras med att PAH till största del binds till partikulärt material och fastläggs i marken, desto högre molekylvikt (PAH-M

och PAH-H) desto större fastläggning. För metallerna observeras de högsta metallhalterna längs spårsträckningen i provpunkter nordost om Högdalstopparna.

Stråk med svaghetszoner i berg förekommer längs med hela sträckningen. Svaghetszonerna är till största delen orienterade i nordvästlig-sydostlig riktning. I anslutning till uppställningshallen under mark identifieras flera zoner mitt på sträckningen av bergtunnlarna. Enligt byggnadsgeologiska kartan korsar en svaghetszon i östvästlig riktning den östra delen av deponin. Dock visar de hydrogeologiska tester som utförts i anslutning till Högdalstopparna på normaltätt berg.

Då strömningsriktningen bedöms ske i nordostlig till nordvästlig riktning från Högdalstopparna kommer inte eventuell påverkan på trycknivåerna på grund av dränering till planerad bergtunnel att förändra strömningsriktningen. Föroreningen kommer därför inte att sprida sig till ett tidigare opåverkat område. Dock medför en avsänkning en ökad hydraulisk gradient och därmed ett ökat grundvattenflöde genom jord och berg.

Då bergtäckningen längs sträckningen av bergtunneln vid Högdalstopparna är relativt stor (cirka 15-30 meter) bedöms trycksänkningen i de översta delarna av berget endast uppgå till ett par meter. Trycksänkningen är störst rakt ovanför tunnellinjen med successivt avtagande påverkan på större avstånd från tunnellinjen.

Baserat på kända grundvattennivåer i grundvattenmagasin i jord vid släntfot Högdalstopparna respektive i området vid uppställningshallen beräknas en hydraulisk gradient på cirka 0,04 m/m. Om det antas att trycksänkningen i grundvattenmagasinet i jord vid uppställningshallen under mark uppgår till 2 meter medför det en ökning av gradienten till cirka 0,05 m/m, det vill säga en ökning med cirka 30-40%. Dock är jorddjupet i området relativt grunt samt genombrutet av berghällar vilket medför ett litet grundvattenflöde i jord. De hydrogeologiska undersökningar som utförts i jord i området visar på täta till måttligt genomsläppliga jordar, hydrauliska konduktiviteter på i storleksordningen $1 \cdot 10^{-8}$ till $1 \cdot 10^{-6}$ m/s [2]. Påverkan på föroreningstransport och föroreningshalterna i grundvattenmagasinen i jord i området på grund av en trycksänkning kring bergtunneln bedöms således vara begränsad.

4 Vattenhantering

Som ovan redovisats har höga halter av PAH i grundvatten i jord i anslutning Högdalstopparna konstaterats. Dock visar undersökningar i grundvatten i berg att halterna är låga, det bedöms därför ske en mycket begränsad spridning av PAH till grundvatten i berg. För dioxin har inga halter över rapporteringsgränsen detekterats. PCB har detekterats i grundvatten i berg, dock i låga halter. Beträffande klorerade alifater bedöms halterna som låga i både grundvatten i berg och jord längs hela sträckningen.

För metaller konstateras generellt måttligt förhöjda halter i grundvatten i jord längs sträckningen. Måttliga halter konstateras även i berg i anslutning till Högdalstopparna.

Risken för mobilisering av föroreningar motverkas genom att täta tunnlarna för att minimera påverkan på omgivande grundvattenmagasin. Ett litet inläckage till tunnlarna innebär begränsad avsänkning av grundvattennivån vilket medför att risken för en grundvattenströmning mot tunnelsträckningen minskas. Vid behov kan även vatten genom konstgjord infiltration tillföras till grundvattenmagasinen för att upprätthålla de naturliga grundvattennivåerna.

Då risk finns för främst förhöjda metallhalter i anslutning till Högdalstopparna bör rening ske av både länshållningsvatten under byggtiden och dränvatten under drifttiden. Inom det befintliga depåområdet, tex vid stödkonstruktionen, kan även halter av PAH behöva hanteras i länshållningsvattnet i byggtiden.

Generellt vid tunnelbyggen uppkommer olika vatten vid bygg- och drifttid. I samband med byggtid uppkommer:

- Länshållningsvatten – det vatten som uppkommer i arbetsschakt och tunnlar och som utgör en blandning av inläckande grundvatten, nederbörd samt processvatten.
- Processvatten – det vatten som används för byggprocessen.

I samband med drifttid uppkommer:

- Spolvatten – det vatten som används för spolning av tunnlarna för att rengöra ytor.
- Släckvatten – det förorenade vattnet som använts i släckningsarbete eller för utspädning av spill och som ska omhändertas. Släckvatten hamnar på spår/tråg m.m. efter räddningstjänstens insats.
- Dräneringsvatten – det inläckande grundvatten som leds bort under drifttiden.

Innan utsläpp sker till recipienten eller ledningsnätet sker normalt behandling i behandlingsanläggningar i olika steg:

- Oljeavskiljning
- Utjämningsmagasin
- Sedimentering i sedimenteringsdamm eller lamellsedimenteringscontainer.

Ovanstående metoder är i huvudsak gångbara på suspenderat material, oljeföroreningar och metaller. Följaktligen ska vatten från lågpunkten (pumpgrop) i underjordanläggningen i anslutning behandlas i ett reningssteg som är anpassat för metaller. Det gäller både länshållningsvatten under byggtid samt dränvatten från bergtunnlar under drifttid.

Avseende PFAS-ämnen i länshållningsvatten kan vid behov rening ske med kolfilteranläggning. Detta bedöms i sådana fall främst vara aktuellt under byggtid i samband med länshållning av schakt inom befintligt depåområde.

5 Referenser

5.1 Framtagna underlagsdokument

[1] Förundersökningsrapport Miljögeoteknik, Dokumentid 5320-N51-24-04032

[2] Förundersökningsrapport Hydrogeologi, Dokumentid 5320-G52-24-04001

5.2 Övriga referenser

FUT och Trafikförvaltningen (2016): Provtagning av vatten i tunnelbanan – Analys av vattenkemi och jämförelse med riktvärden. Rapport 2017-02-15, version 1.1

Miljöförvaltningen i Stockholm (2013): Grundvatten i Stockholm 2011-2012, Miljöförvaltningen, Stockholm stad, ISBN 978-91-85125-49-4

Naturvårdverket (2009): Riktvärden för förorenad mark, modellbeskrivning och riktvärden, ISBN 978-91-620-5976-7, Rapport 5979

RIVM (2001): Technical evaluation of the Intervention Values for Soil/sediment and groundwater, Human and ecotoxicological risk assessment and derivation of risk limits for soil, aquatic sediment and groundwater, RIVM report 711701023, National institute of public health and the environment, The Netherlands

EPA (2009): National Primary Drinking Water Regulations, https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulation-table, United States Environmental Protection Agency, US

SGI (2015): Preliminära riktvärden för högfluorerade ämnen (PFAS) i mark och grundvatten, SGI Publikation 21, Linköping 2015, Statens geotekniska institut

Vårt uppdrag är att genomföra tunnelbanans utbyggnad och övriga åtgärder inom ramen för 2013 års Stockholmsförhandling. Det innebär planering, projektering och byggnation av ny tunnelbana och nya stationer på fyra sträckor. För att kunna genomföra utbyggnaden behöver också depåkapaciteten ökas och nya tåg köpas in. Byggstarten för utbyggnad av depåkapacitet Högdalen planeras under 2020 och byggtiden beräknas pågå cirka 6 år.

Region Stockholm
Förvaltning för utbyggd tunnelbana
Box 22550, 104 22 Stockholm
Telefon: 08-737 25 00

Region Stockholm