

PM Hydrogeologi

Bilaga C2
Hydrogeologiska beräkningar

Miljöprövning för tunnelbana från Fridhemsplan till Älvsjö

Titel: PM Hydrogeologi – Bilaga C2 Hydrogeologiska beräkningar

Konsult: Sweco Sverige AB

Författare: Teklay Zeray, Mashuqur Rahman och Emad Dehkordi

Projektledare: Kajsa Nilsson, förvaltning för utbyggd tunnelbana (FUT)

Bilder & illustrationer: Sweco och Region Stockholm om inget annat anges.

Dokument ID: 7300-G721-23-00001_bilaga 2

Diarienummer: 2021-1095

Utgivningsdatum: 2024-12-16

Distributör: Region Stockholm, förvaltning för utbyggd tunnelbana

Box 454 36, 104 31 Stockholm. Tel: 08-123 100 00.

E-post: registrator.fut@regionstockholm.se

Innehållsförteckning

1	Inledning	5
2	Berggrundens genomsläpplighet.....	5
2.1	Brunnar.....	6
2.1.1	Utvärdering av brunnnsdata	8
2.1.2	Resultat från SGU:s brunnar	8
2.1.3	Jämförelse av resultat från SGU:s brunnar med andra projekt	11
2.2	Vattenförlustmätningar	11
2.2.1	Utvärdering av mätdata.....	13
2.2.2	Uppskalning av konduktivitet.....	13
2.2.3	Resultat från vattenförlustmätningar	15
2.3	Hydrogeologiska domäner.....	19
3	Vattenbalans.....	23
3.1	Definitioner och principer för vattenbalansberäkning	23
3.2	Beräknad grundvattenbildning inom delavrinningsområden	24
4	Beräkningsmetodik för Inläckage	26
4.1	Styrande Ekvationer	26
4.2	Indata.....	27
4.3	Metodik för stokastiska beräkningar	28
4.3.1	Modellbeskrivning.....	28
4.3.2	Parametrisering	28
4.3.2.1	Bergets konduktivitet, K_0	29
4.3.2.2	Bergets konduktivitet efter injektering, K_i	30
4.3.2.3	Injekterade zonens mäktighet utanför tunnel, t	31
4.3.3	Beräkningsmodell	32
4.4	Metodik för deterministiska beräkningar.....	32
5	Resultat	33
5.1	Resultat från stokastiska beräkningar	33
5.1.1	TBM-borrade spårtunnlar.....	33
5.1.2	Borra-spräng tunnlar.....	34
5.1.2.1	Stationsutrymme	34
5.1.2.2	Arbetstunnlar och depåtunnel	35
5.1.3	Inläckage till vertikalschakter och rulltrappsschakt.....	37
5.2	Resultat från deterministiska beräkningar.....	37
5.2.1	TBM-borrade spårtunnlar	37
5.2.2	Borra-spräng tunnlar	38
5.2.2.1	Stationsutrymme.....	38
5.2.2.2	Tvärtunnlar.....	38
5.2.2.3	Arbetstunnlar.....	41
5.2.2.4	Vändspår till Depå.....	41
5.2.3	Inläckage till schakter	41

5.2.3.1	Biljetthall hiss- och rulltrappschakt.....	41
5.2.3.2	Luftutbytesschakt och brandgasschakter	42
5.2.3.3	TBM-start och depå	42
6	Beräkning av grundvattenpåverkan	43
6.1	Influensområde för bergtunnlar	45
6.2	Influensområde för bergtunnlar	45
6.2.1	Influensområde för TBM.....	45
6.2.2	Influensområde för borrhning och sprängning tunnlar	46
6.3	Påverkansområde för stationer och vertikala schakter	47
7	Referenser	48

1 Inledning

Region Stockholm planerar att bygga ut tunnelbanan mellan Fridhemsplan och Älvsjö. Denna PM ingår som Bilaga till PM hydrogeologi, Bilaga C till ansökan.

Syftet med denna PM är att redovisa beräkningar som ligger till grund för bedömning av påverkan på grundvattenförhållandena orsakad av utbyggnaden av ny linje från Fridhemsplan till Älvsjö.

För detaljer om anläggningsbeskrivning se *Teknisk beskrivning*, Bilaga A.

2 Berggrundens genomsläpplighet

För att förklara berggrundens genomsläpplighet har ett flertal begrepp använts för att definiera berget, t. ex, ytberg, normalberg och svaghetszon. Ytberg avser de översta 20 meter under markytan. Normalberg utgörs av intakt kompetent berg med två-tre huvudsprickgrupper och är oftast sprickfattigt. Svaghetszon definieras av berg med högre sprickdensitet och omvandlingsgrad än omgivande berggrund. Svaghetszon innebär inte att berget är genomsläppligt. Däremot, finns risk att hög sprickdensitet i samband med förekomst av vatten kan leda till mycket inläckage inom ett begränsat område.

Berggrundens genomsläpplighet, det vill säga hydraulisk konduktivitet har analyserats utifrån data från SGU:s brunnsarkiv, tidigare utförda undersökningar i närområdet och undersökningar som utförts inom projektet.

Ett medelvärde för hydraulisk konduktivitet kan beräknas på olika sätt, aritmetiskt, geometriskt och harmoniskt. Berget hydraulisk konduktivitet är både djup och skalberoende. Baserat på data från SKB's Aspö laboratorium har Gustafson (2012) visat att aritmetiska medelvärde för konduktivitet minskar med en ökad djup (ner till 600 meter under bergöverytan) och längdskala. Geometriskt medelvärde ökar och standardavvikelse minskar med ökade längdskala. Däremot, minskar geometriskt medelvärde mot djupet-och standardavvikelse ökar. Stille (2015) tog fram en teoretisk modell för att visa samband mellan längden för mätskalan, konduktivitet och standardavvikelse. Enligt Stille (2015) är aritmetiskt medelvärde oberoende av skalan, medan geometriskt medelvärdet ökar med skalan. Gustafson (2012) och Stille (2015) redovisar att standardavvikelse för konduktivitet minskar med ökad skala och det aritmetiska medelvärdet är högre än geometriskt och harmoniskt medelvärde. Stora delar av de planerade bergtunnlarna är belägna cirka 30 till 65 meter under bergöverytan. I detta sammanhang anses att teoretisk modell enligt Stille (2015) är lämplig att använda för att beräkna bergets olika hydrauliska medelkonduktiviteter samt standardavvikelse.

För att kunna skatta medelvärdet vid ofullständiga mätserier nyttjas antagandet att berget typiskt har en nära lognormalfördelad hydraulisk konduktivitet. Mätresultaten från sektionsvisa vattenförlustmätningar från kärnborrhål eller brunnar passas till lognormalfördelningar genom att redovisa data som empiriska statistiska fördelningar.

2.1 Brunnar

Underlag från SGU:s brunnstabas har använts för att ta fram en övergripande bild av bergets hydrauliska konduktivitet. De flesta brunnarna är belägna vid berg i dagen. Det innebär att grundvattnet i brunnarna kommer huvudsakligen från bergmagasin. Antal brunnar längs tunnellen är begränsat. SGU:s brunnar inom 1 kilometer från utredningsområde har använts för analysen. Inom detta utredningsområde finns 567 brunnar enligt SGU:s brunnstabas, med djup som varierar mellan 24 och 150 meter. Vanligtvis minskar bergets konduktivitet med djupet. Brunnar kan emellertid innehålla vattenflöden som passerar både genom normalberg och svaghetszoner, vilket innebär att utvärderingen av bergets konduktivitet, baserad på dessa data, endast ger en övergripande uppskattning av förhållandena i hela utredningsområdet och inte nödvändigtvis längs tunnellen.

Erfarenheter från utbyggnaden av tunnelbanans Blå linje, från Kungsträdgården till Nacka och Söderort, indikerar att bergmassan i Södermalm eller norr om Hammarbykanalen generellt är mer genomsläpplig än den i Söderort. En analys av brunnar indikerade att brunnar norr om Liljeholmsviken har högre genomsläpplighet jämfört med brunnar söder om Liljeholmsviken.

Läge för brunnarna och uppskattad konduktivitet redovisas i Figur 1. I den statistiska analysen delas brunnarna in i två delområden, Norr och Syd, i syfte att se om det föreligger några statistiska skillnader i bergets genomsläpplighet. Brunnarna vid respektive delområde har delats upp med 50 meters djupintervall. Den beräknade hydrauliska konduktiviteten är ett genomsnitt för respektive djup.

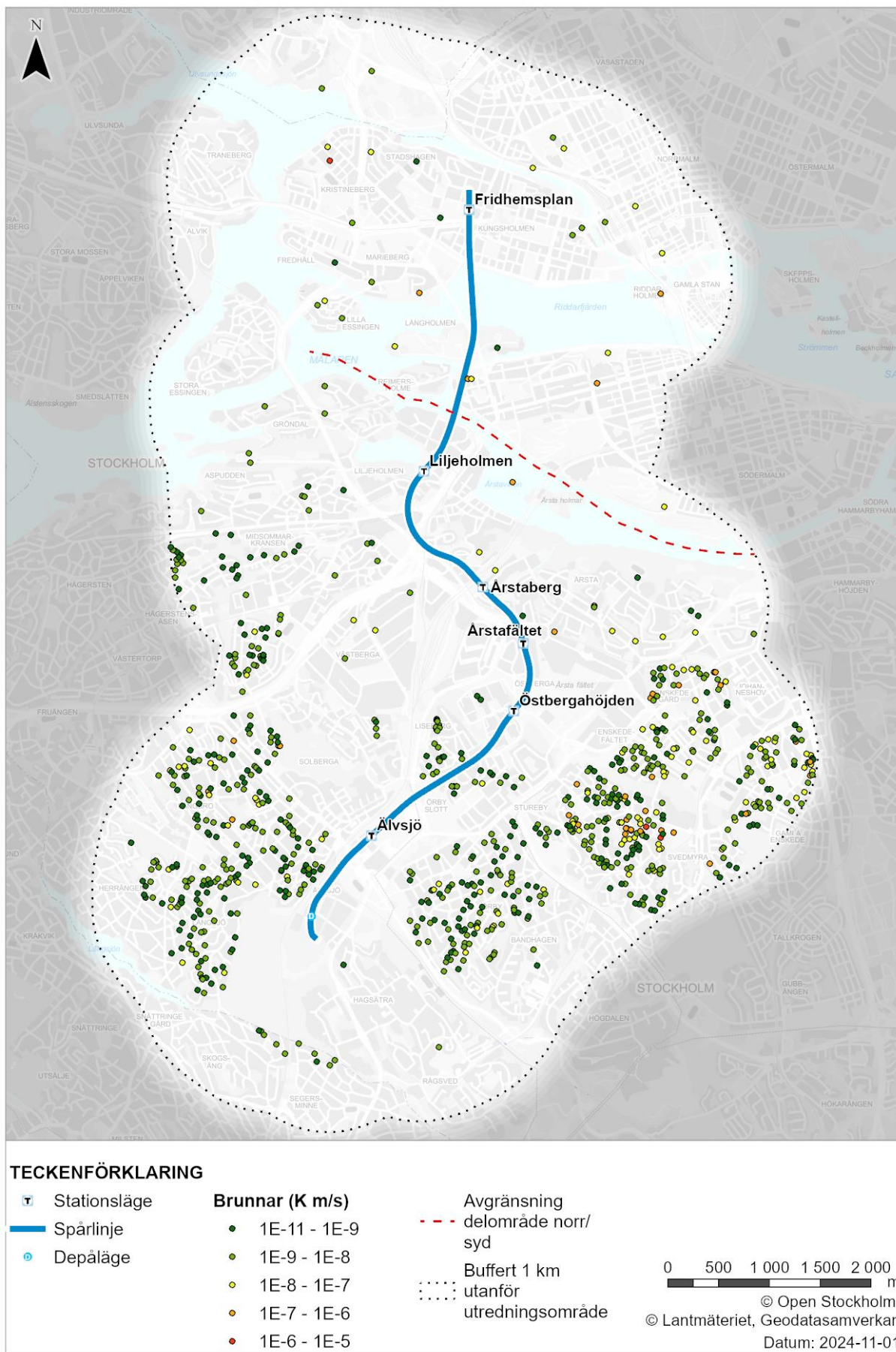
Uppdelningen har gjorts enligt följande:

- Brunnar med djup 0–50 meter
- Brunnar med djup 0–100 meter
- Brunnar med djup 0–150 meter

Antal brunnar i inom delområde Norr och Syd samt djupintervall redovisas i Tabell 1.

Tabell 1. Antal brunnar inom olika djupkategorier i respektive delområde.

Djupintervall	Antal brunnar, delområde Norr	Antal brunnar, delområde Syd
0–50 m	6	21
0–100 m	15	67
0–150 m	17	449



Figur 1. Läge för SGU:s brunnar som har använts för beräkning av hydraulisk konduktivitet.

2.1.1 Utvärdering av brunndata

Utvärdering av brunndata från SGU:s brunnarkiv har utförts genom analytisk metod och redovisas i Ekvation 1 (Fransson, 2001). Beräkningsmetoden approximerar transmissiviteten till den specifika kapaciteten, q/dh . Utifrån transmissivitet, T , beräknas en medelkonduktivitet, K , enligt Ekvation 2. Beräkningsekvationen tar hänsyn till brunnskapacitet, q och avsänkning i brunnen, dh .

$$T = \frac{q}{dh} \quad \text{Ekvation 1}$$

$$K = \frac{T}{b} \quad \text{Ekvation 2}$$

Med beteckningar enligt nedan:

T	Transmissivitet [m^2/s]
K	Hydraulisk konduktivitet [m/s]
q	Brunnskapacitet [m^3/s]
dh	Avsänkning [m]
b	Akvifermäktighet [m]

Beräkningen har gjorts med följande antaganden;

- Avsänkning, dh , antas som djup från grundvattenytan till botten av brunnen.
- Bergöverytan antas som grundvattenytan (för brunnar som saknas uppgift om grundvattennivå).
- Akvifermäktighet, b antas som avstånd från grundvattenytan till botten av brunnen.

Ett medelvärde för hydraulisk konduktivitet har beräknats för brunnar i respektive djupintervall och område. Aritmetiskt och geometriskt medelvärde samt storskaligt värde för hydraulisk konduktivitet (K_{3D}) har beräknats. Här har den storskaliga hydrauliska konduktiviteten (K_{3D}) använts för bedömning av bergets hydrauliska konduktiviteter. Den storskaliga tredimensionella hydrauliska konduktiviteten (K_{3D}) beräknas enligt Ekvation 3 (Gustafson, 2012).

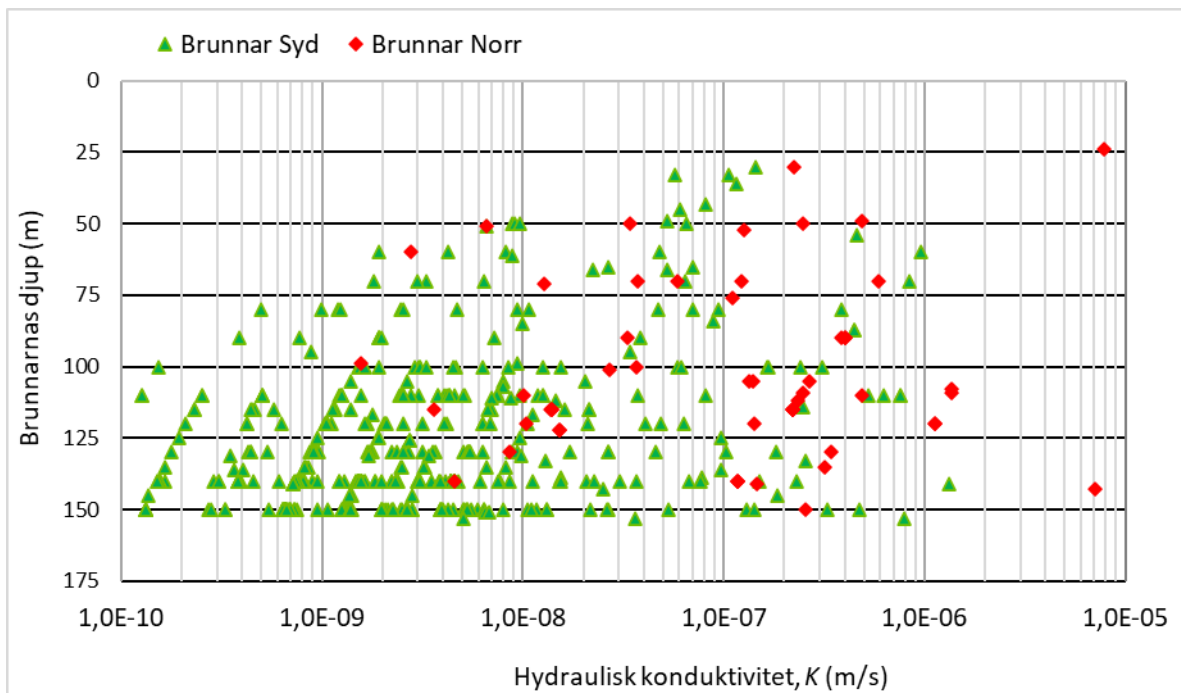
$$K_{3D} = K_G \cdot e^{\left(\frac{\sigma_{lnK}^2}{6}\right)} \quad \text{Ekvation 3}$$

Med beteckningar enligt nedan:

K_G	Geometriskt medelvärde för K i aktuell mätskala [m/s]
σ_{lnK}	Standardavvikelse [-]
K_{3D}	Storskalig hydraulisk konduktivitet [m/s]

2.1.2 Resultat från SGU:s brunnar

I Figur 2 redovisas hydraulisk konduktivitet mot djup för brunnar i delområde Norr och Syd. Resultaten indikerade att hydrauliska konduktiviteten minskar med djupet, det vill säga att det översta berget generellt har högre konduktivitet jämfört med det djupa berget. Hydraulisk konduktivitet fördelat mellan brunnar i delområde Norr och Syd visade högre konduktivitet för brunnar i Norr jämfört med brunnar i Syd område. I Tabell 2 redovisas beräknade hydrauliska konduktiviteter från SGU:s brunnar. En jämförelse för hydraulisk konduktivitet av brunnarna med andra projekt i närområdet redovisas i kapitel 2.1.3.



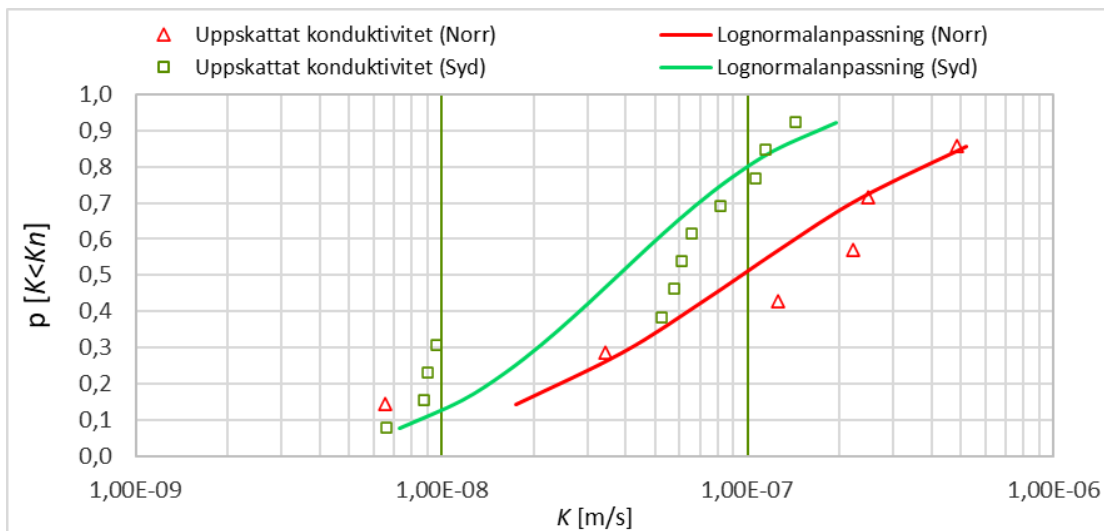
Figur 2. Beräknad hydrauliska konduktivitet (K) mot bergdjup i bergborrade brunnar från SGU:s brunnsarkiv. Beräknad hydrauliska konduktiviteten är ett aritmetiskt medelvärde för hela brunnsdjupet.

Notera att beräknade hydrauliska konduktiviteter från SGU:s brunnar är ett genomsnitt för hela brunnsdjupet, det vill säga ett medelvärde för ytberg, normalberg och svaghetszoner.

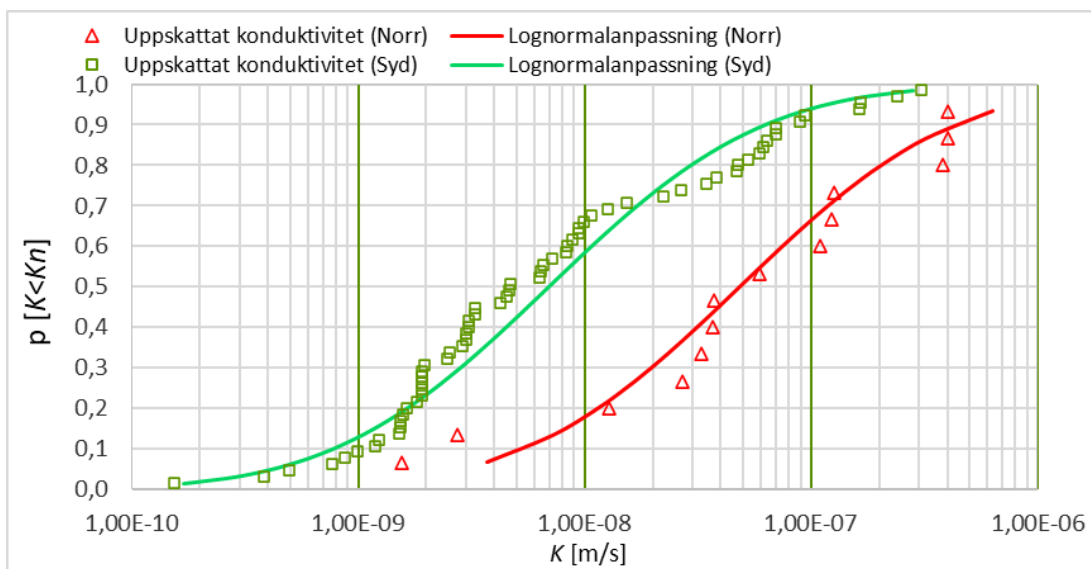
Tabell 2. Beräknad hydraulisk konduktivitet från SGU:s brunnar.

Hydraulisk konduktivitet (m/s)	Delområde Norr			Delområde Syd		
	0–50 m	0–100 m	0–150 m	0–50 m	0–100 m	0–150 m
Min	$6,6 \times 10^{-9}$	$1,6 \times 10^{-9}$	$8,0 \times 10^{-10}$	$6,6 \times 10^{-9}$	$1,5 \times 10^{-10}$	$1,3 \times 10^{-10}$
Max	$4,8 \times 10^{-7}$	$4,0 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-7}$	$3,1 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-6}$
Aritmetiskt medel	$1,9 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$5,7 \times 10^{-8}$	$6,0 \times 10^{-8}$	$2,9 \times 10^{-8}$	$2,2 \times 10^{-8}$
Geometriskt medel	$9,5 \times 10^{-8}$	$4,9 \times 10^{-8}$	$2,6 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-8}$	$6,9 \times 10^{-9}$	$2,4 \times 10^{-9}$
K_{3D}	$1,4 \times 10^{-7}$	$7,9 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-8}$	$4,7 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-9}$
Standardavvikelse	1,6	1,7	1,5	1,2	1,7	0,6

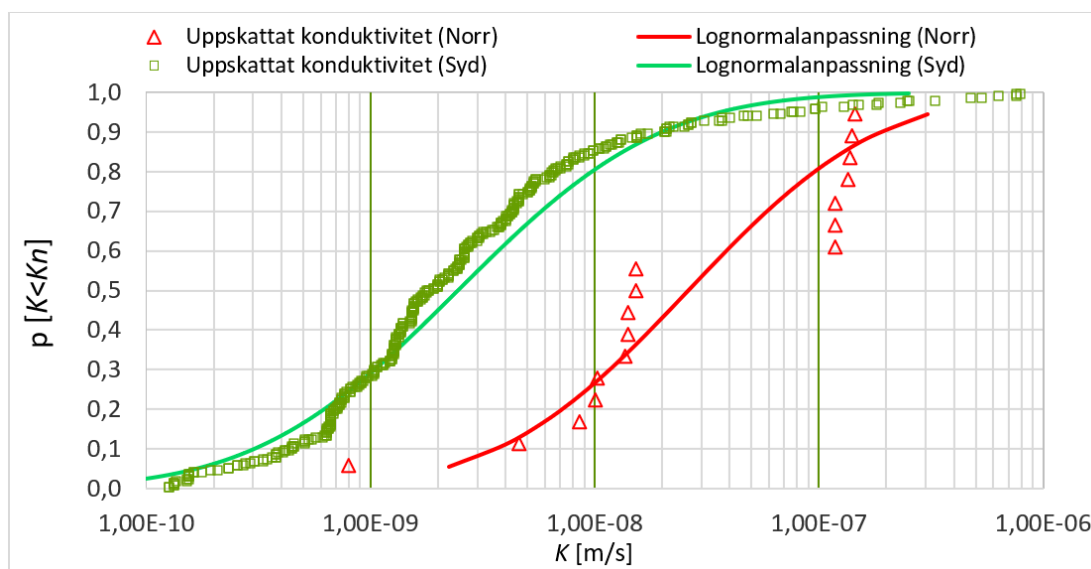
I Figur 3 till Figur 5 redovisas kumulativ lognormalafördelning av hydraulisk konduktivitet från SGU:s brunnar. Figurerna visar en tydlig skillnad på konduktiviteten mellan brunnarna i delområde Norr och Syd och det indikerar att berggrund i delområde Syd generellt är tätare än berggrund i delområde Norr.



Figur 3. Kumulativt fördelningsdiagram för hydraulisk konduktivitet från brunnar med 0–50 meter djup.



Figur 4. Kumulativt fördelningsdiagram för hydraulisk konduktivitet från brunnar 0–100 meter djup.



Figur 5. Kumulativt fördelningsdiagram för hydraulisk konduktivitet från brunnar 0–150 meter djup.

2.1.3 Jämförelse av resultat från SGU:s brunnar med andra projekt

En jämförelse mellan resultat från utförda beräkningar och resultat från andra projekt i närområde har utförts. Resultat från beräkningarna visar generellt på samma storleksordning som de andra projekten (med mindre skillnader). Skillnad i resultat beror på metodernas olika antaganden, olika datakällor eller heterogeniteten av utredningsområdet (slumpmässig fördelning av brunnar). Inga jämförelser utfördes per brunn utan per område. I Tabell 3 redovisas beräknade hydrauliska konduktiviteter och resultat från andra projekt.

Tabell 3. Hydrauliska konduktiviteter från andra projekt i närområde.

Bergdjup	Storskalig hydraulisk konduktivitet, K_{3D} [m/s]						
	Tunnelbana från Kungsträdgården till Nacka och söderort		Tunnelanläggning City Link etapp 2	Ny avloppstunnel, "Mässtunnel"	Nya Östberga tunnel	Ny tunnelbana från Fridhemsplan till Älvsjö	
	Nacka brunnar	Stockholm brunnar	Danderyd/Skanstull	Älvsjö/ Liljeholmen	Sickla/Saltsjön	Delområde Norr	Delområde Syd
<50 m	-	-	$4,5 \times 10^{-8}$	$1,9 \times 10^{-7}$	$3,4 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-7}$	$4,7 \times 10^{-8}$
<100 m	$1,6 \times 10^{-8}$	$7,1 \times 10^{-8}$	-	$7,9 \times 10^{-8}$	$7,9 \times 10^{-8}$	$7,5 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$
<150 m	$3,2 \times 10^{-9}$	$1,5 \times 10^{-8}$	-	-	$2,9 \times 10^{-7}$	$3,9 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-9}$
<200 m	$1,7 \times 10^{-9}$	$8,1 \times 10^{-9}$	$2,5 \times 10^{-8}$	$1,9 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-8}$	-	-

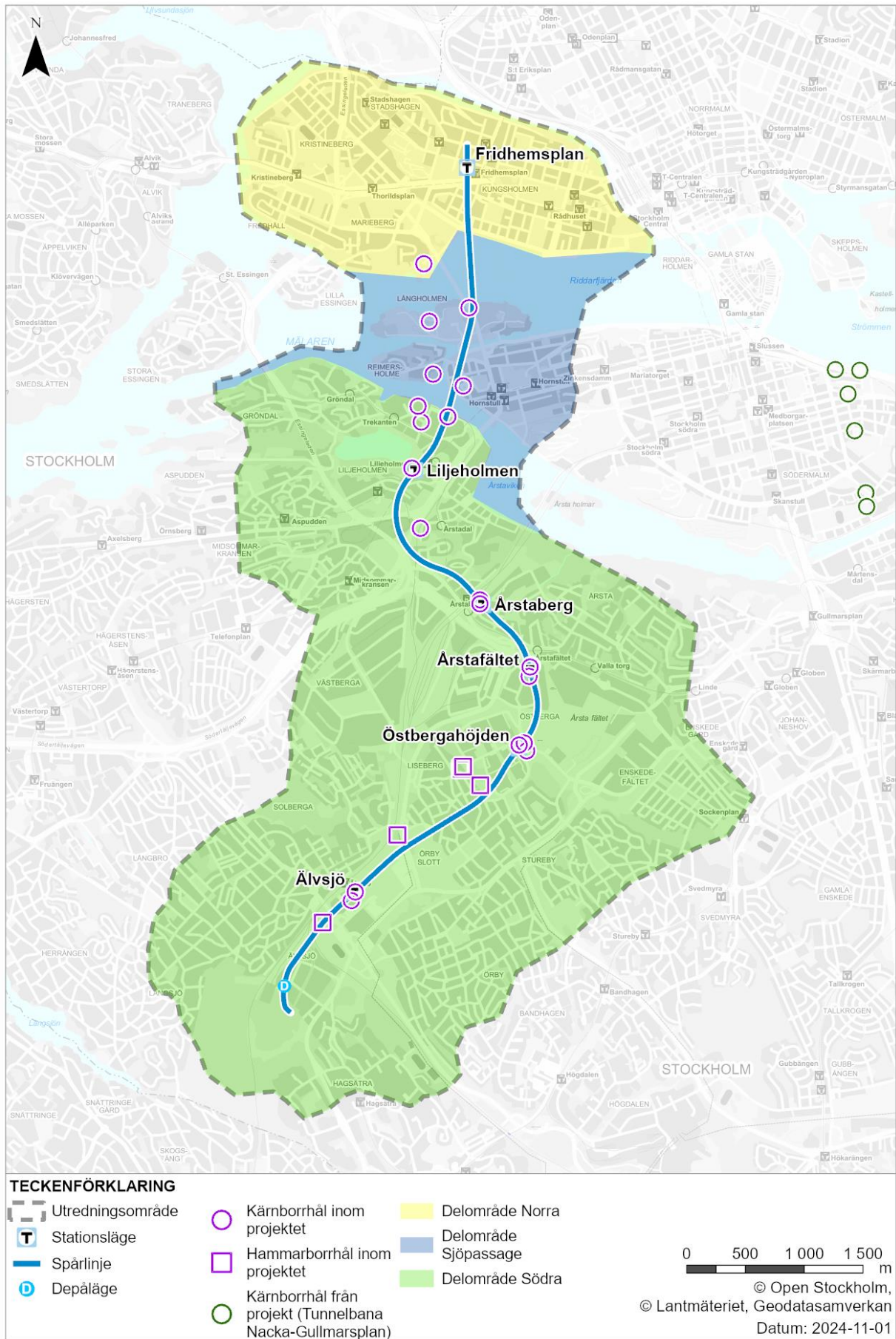
2.2 Vattenförlustmätningar

Data från vattenförlustmätningar har analyserats för att utvärdera bergets genomsläpplighet. Vattenförlustmätningar från 26 st borrhål längs planerad anläggning och sju stycken i närområdet, från Tunnelbana från Kungsträdgården till Nacka och Söderort, har utnyttjats för denna analys.

SGU:s brunnar data visar att berggrund norr om Liljeholmsviken generellt är mer genomsläpplig i jämförelse med berget söder om viken. Borrhålssektioner inom sjöpassageområdet, det vill säga Mälaren och Mäläröarna, utvärderas separat. Utvärdering av vattenförlustmätningar utfördes därför separat för borrhål norr respektive söder om sjöpassagen. Geografisk placering av borrhål i förhållande till delområden Norr, Sjöpassage och Syd redovisas i Figur 6. Antal borrhål och sektioner med vattenförlustmätningar som används för analys redovisas i Tabell 4.

Vattenförlustmätningarna som utfördes mellan station Fridhemsplan och Liljeholmen har använts för bedömning av bergets genomsläpplighet under sjöpassagen. Därför kompletterades analysen med ytterligare 9 st borrhål från Norrmalm-Södermalm området, för att utvärdera bergets genomsläpplighet i delområde Norr.

SGU:s brunnar data visar högre konduktivitet för översta berget och att hydraulisk konduktiviteten minskar vid djup (se Figur 2). Slutnivån av sektionerna för vattenförlustmätningarna i borrhålen varierar mellan 26 meter och 200 meter under bergytan. För ytberg utvärderas samtliga sektioner som tillhör de översta 20 meter i domän Norr och Syd tillsammans och resultatet representerar båda delområdena. För normalberg utvärderas samtliga sektioner som befinner sig mer än 20 meter under bergöverytan.



Figur 6. Lägen för bergorrhål med vattenförlustmätningar som har analyserats i förhållande till de olika delområden Norra, Sjöpassage och Syd.

2.2.1 Utvärdering av mätdata

Beräkning av hydraulisk konduktivitet från vattenförlustmätningarna utförda i varje sektion har utförts med Moyes' formel (Moyes, 1976), enligt Ekvation 4.

$$K = \frac{q}{2 \times \pi \times L \times dh} \left[1 + \ln \left(\frac{L}{2 rw} \right) \right] \quad \text{Ekvation 4}$$

Med beteckningar enligt nedan:

<i>K</i>	<i>Hydraulisk konduktivitet [m/s]</i>
<i>q</i>	<i>Uppmätt flöde [m³/s]</i>
<i>dh</i>	<i>Pålagt övertryck, meter vattenpelare [m]</i>
<i>L</i>	<i>Sektionslängd [m]</i>
<i>rw</i>	<i>Radie på borrhålet [m]</i>

Vattenförlustmätningarna utfördes med enkel/dubbelsmanschett i 6 meter sektion, förutom 3 borrhål som utfördes under lokaliseringstudering. För dessa borrhål, mättes ackumulerade flöde i varje 0,2 meter. Vattenförlustmätningarna visar att den undre mätgränsen förmodligen ligger närmare cirka 0,2 l/min, vilken motsvarar cirka 2×10^{-8} m/s för 6 meter lång sektion och 0,2 MPa övertryck. Den övre mätgränsen anges till 65 l/min till 80 l/min, vilket motsvarar en utvärderad hydraulisk konduktivitet i en 6 meter lång sektion på cirka 1×10^{-6} m/s till 1×10^{-5} m/s. Trycket under vattenförlustmätningar uppmäts vid marknivå.

I de sektioner där vattenförlust understiger mätgränsen rapporteras noll flöde i vattenförlustmätningarna. Andel sektioner som visade noll flöde under vattenförlustmätningarna i olika domäner visas i Tabell 4.

Tabell 4. Antal borrhål och sektioner (6 meter sektioner) med vattenförlustmätningar som har använts för analys.

Delområde	Hydrogeologisk domän	Antal borrhål som analyserad	Antal sektioner	Andel sektioner inom hydrogeologiska domän som visade nollflöde
Norr	Ytberg	6	13	69%
	Normalberg	10	195	77%
	Svaghetszoner	11	44	50%
Syd	Ytberg	15	55	80%
	Normalberg	18	254	82%
	Svaghetszoner	12	35	57%
Sjöpassage	Svaghetszoner	8	34	35%
	Normalberg	8	138	75%

2.2.2 Uppskalning av konduktivitet

Bergets genomsläpplighet följer lognormal fördelning, vilket innebär att stor spridning över hydraulisk konduktivitet kan förekomma inom samma hydrogeologiska domän. Utvärdering av vattenförlustmätningarna resulterar i motsvarande medelkonduktivitet för 6 meter sektionen. För att hantera heterogenitet av konduktiviteten i bergmassa kan undersökningsresultat från 6 meter sektioner skalas upp till rimlig nivå, med förutsättning att berget anses som ett kontinuummedium (Stille, 2015).

Vattenförlustmätningarna visar mätosäkerhet vid låg vattenförlust och därför används lognormal fördelningen fokuserad på den bästa anpassningen för mätvärden i intervallet med minst osäkerhet, vanligtvis mellan 50 % och 90 %.

I Holmberg (2017) och Stille (2015, 2016) beskrivs en metodik för uppskalning av lognormalfördelade data i form av sektionstransmissiviteter. Metodiken innebär att mätdata från vattenförlustmätningarnas sektionslängd kan skalas upp till skala 100 meter baserat på en skalning av lognormalfördelningens parametrar enligt Ekvation 5 och Ekvation 6:

$$\mu_{TL} = n \times \mu_{TL_{bas}} \quad \text{Ekvation 5}$$

$$\sigma_{TL} = \sqrt{n} \times \sigma_{TL_{bas}} \quad \text{Ekvation 6}$$

Där:

$\mu_{TL_{bas}}$ *aritmetiska medelvärde på sektionstransmissiviteten för längdskalan med data*

$\sigma_{TL_{bas}}$ *standardavvikelse på sektionstransmissiviteten för längdskalan med data*

$$n = L/L_{bas}$$

Hydraulisk konduktivitet kan beskrivas som $K = T/L$ och aritmetiska medelvärde för konduktivitet, μ_{KL} och standardavvikelse kan beräknas enligt Ekvation 7 och Ekvation 8:

$$\mu_{KL} = \frac{1}{L} \frac{L}{L_{bas}} \mu_{TL_{bas}} = \frac{\mu_{TL_{bas}}}{L_{bas}} \quad \text{Ekvation 7}$$

$$\sigma_{KL} = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{L}{L_{bas}}} \sigma_{TL_{bas}} = \frac{\sigma_{TL_{bas}}}{\sqrt{L \cdot L_{bas}}} \quad \text{Ekvation 8}$$

Skalberoende geometriskt medelvärde K_g , Matherons förmodan K_{3D} och varianser (ε^2) för normal fördelat medelvärde (LnK) kan beräknas enligt Ekvation 9–11.

$$K_g = \frac{\mu_{KL}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_{KL}}{\mu_{KL}}\right)^2}} \quad \text{Ekvation 9}$$

$$K_{3D} = K_g e^{\left(\frac{\varepsilon^2}{6}\right)} \quad \text{Ekvation 10}$$

$$\varepsilon^2 = \ln \left(1 + \frac{\sigma_{TL_{bas}}^2 L_{bas}}{\mu_{TL_{bas}}^2 L}\right) \quad \text{Ekvation 11}$$

För lognormal fördelning ska logaritmen av konduktiviteten vara normalfördelad. Sannolikheten för att ett värde på hydrauliska konduktivitet över eller underskrids aritmetiskt medelvärde kan beräknas enligt Ekvation 12 (Stille, 2016).

$$P(K < K_n) = \Phi \left(\frac{LnK_n - \lambda}{\sigma_{KL}} \right) \quad \text{Ekvation 12}$$

Där

σ_{KL} *Standardavvikelse av konduktivitet för uppkallad längden*

$$\lambda = Ln(\mu_{KL}) - \frac{1}{2} \sigma_{KL}^2$$

2.2.3 Resultat från vattenförlustmätningar

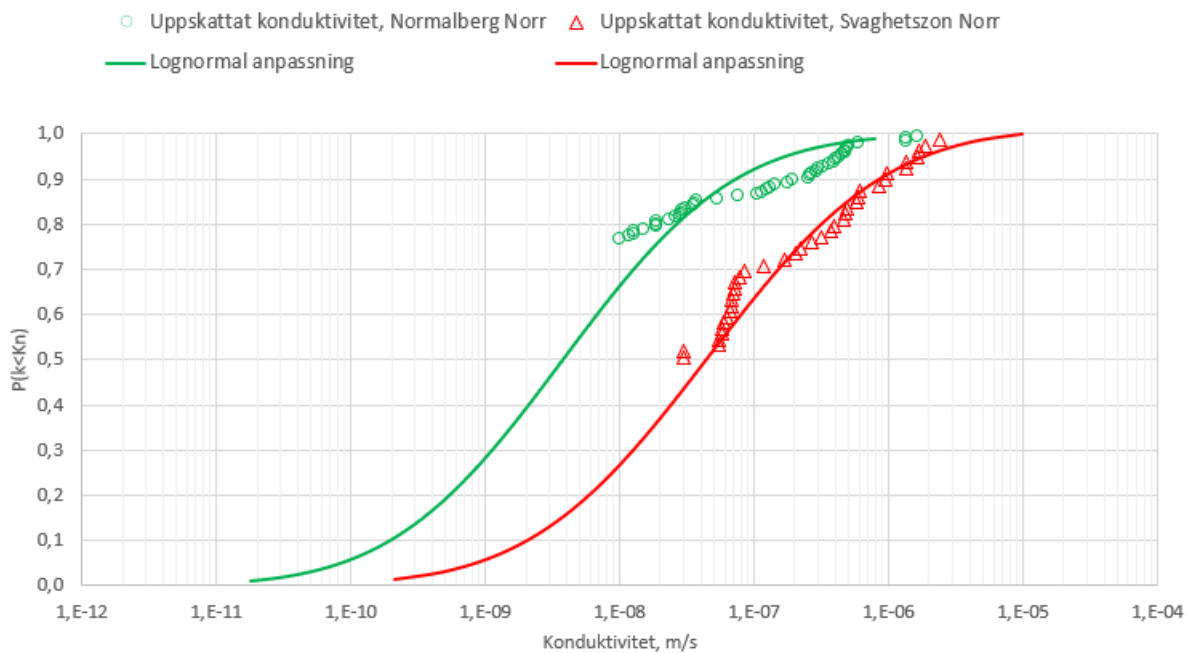
I detta avsnitt presenteras resultaten av beräkningarna och bedömda karakteristiska medelvärden för hydraulisk konduktivitet inom delområde Norr, sjöpassage och Syd för normalberg, ytberg och svaghetszon (se Figur 7 till Figur 10).

Delområde sjöpassage är ett begrepp som används för att urskilja resultat från vattenförlustmätningar under sjöpassagen som visade signifikant skillnad i jämförelse med vattenförlustmätningar under marken. Samtliga sjöpassager där planerade anläggningar passerar under befinner sig i delområde Norr. Däremot har plats specifika undersökningar utförts för att utvärdera bergets genomsläpplighet under sjöpassagen och därför utvärderas resultat separat för sjöpassage.

I resultaten visas också skalberoende av geometrisk medelkonduktivitet, Matherons förmodan samt standardavvikelse.

Delområde Norr

Anpassningen av lognormalfördelningar för uppmätt vattenförlustdata och parametervärden för de statistiska fördelningarna för normalberg och svaghetszon redovisas i Figur 7 och Tabell 5. Några sektioner i normalberg visade större vattenförlust och uppskattad konduktivitet är högre än 1×10^{-6} m/s. De höga konduktivitetvärdena representerar inte typisk genomsläpplighet för normalberg, däremot innebär det att normalberg visar stor variation för konduktivitet.



Figur 7. Empiriska fördelningar av sektionkonduktiviteter, baserat på data från sektionssvise vattenförlustmätningar i 6 meter sektioner, samt anpassade lognormala fördelningar för delområde Norr. Grafen beskriver sannolikhet (P) för att ett värde på den hydrauliska konduktiviteten över- eller underskrids.

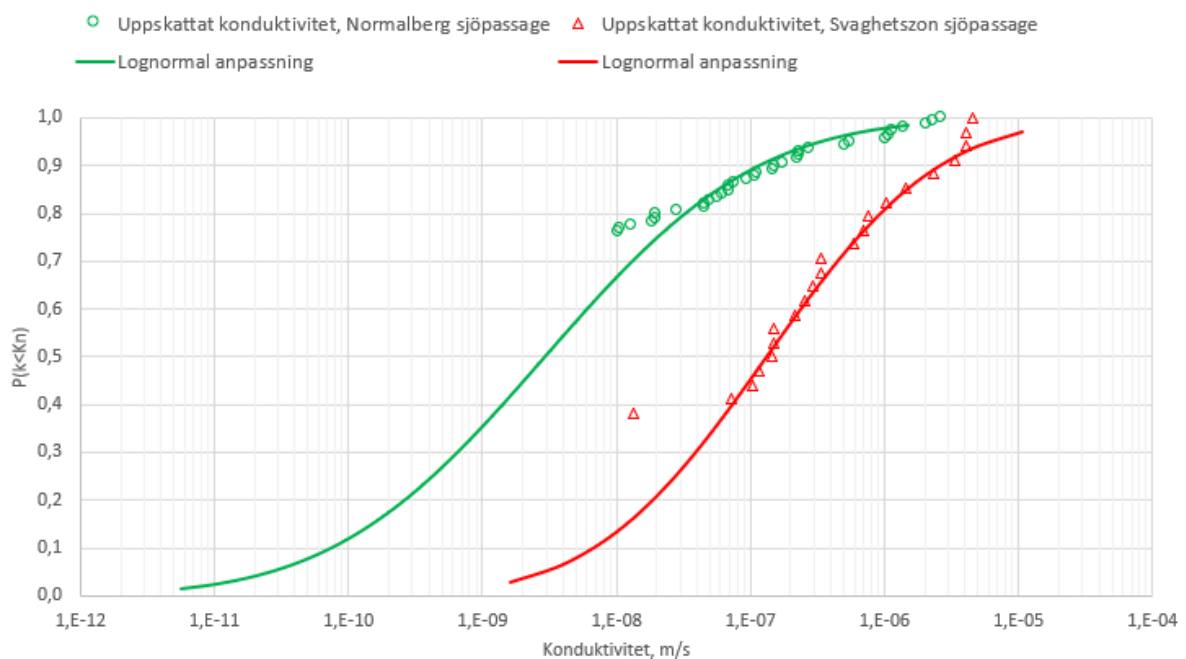
Tabell 5. Utvärderade medelvärden, baserat på statistiska fördelningar redovisade i Figur 7, inom delområde Norr, indelat i normalberg och svaghetszoner.

Berg	Skala	Aritmetiska medel, K_a [m/s]	Geometriskt medel, K_g [m/s]	Matherons förmodan, $K3D$ [m/s]	Standardavvikelse
Normalberg (Norr)	6 m	$6,0 \times 10^{-8}$	$4,5 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-8}$	2,3
	10 m		$5,4 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-8}$	2,2
	100 m		$1,6 \times 10^{-8}$	$2,5 \times 10^{-8}$	1,6
Svaghetszon (Norr)	6 m	$7,0 \times 10^{-7}$	$6,2 \times 10^{-8}$	$1,4 \times 10^{-7}$	2,2
	10 m		$8,0 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-7}$	2,1
	100 m		$2,4 \times 10^{-7}$	$3,4 \times 10^{-7}$	1,5

Delområde Sjöpassage

I allmänhet för berget under sjöpassagen innebär det inte per automatik att hög medelkonduktivitet förekommer utan förekomst av hög genomsläpplighet är beroende av sprickdensitet, sprickfyllningsmaterial, huruvida berget är krossad och så vidare.

Kumulativa fördelningsdiagram med passade lognormalfördelningar för uppmätta vattenförlustdata för normalberg och svaghetszon under sjöpassage redovisas i Figur 8 och parametervärden för de statistiska fördelningarna redovisas i Tabell 6. Utvärdering av uppmätt vattenförlustdata visar att berget generellt är mer genomsläppligt, både för normalberg och svaghetszon under sjöpassage, i jämförelse med berget som befinner sig under landet inom delområde Norr.



Figur 8. Empiriska fördelningar av sektionkonduktivitet, baserat på data från sektionvisa vattenförlustmätningar i 6 meter sektioner, samt anpassade lognormala fördelningar för svaghetszoner under sjöpassagen. Grafen beskriver sannolikhet (P) för att ett värde på den hydrauliska konduktiviteten över- eller underskrids.

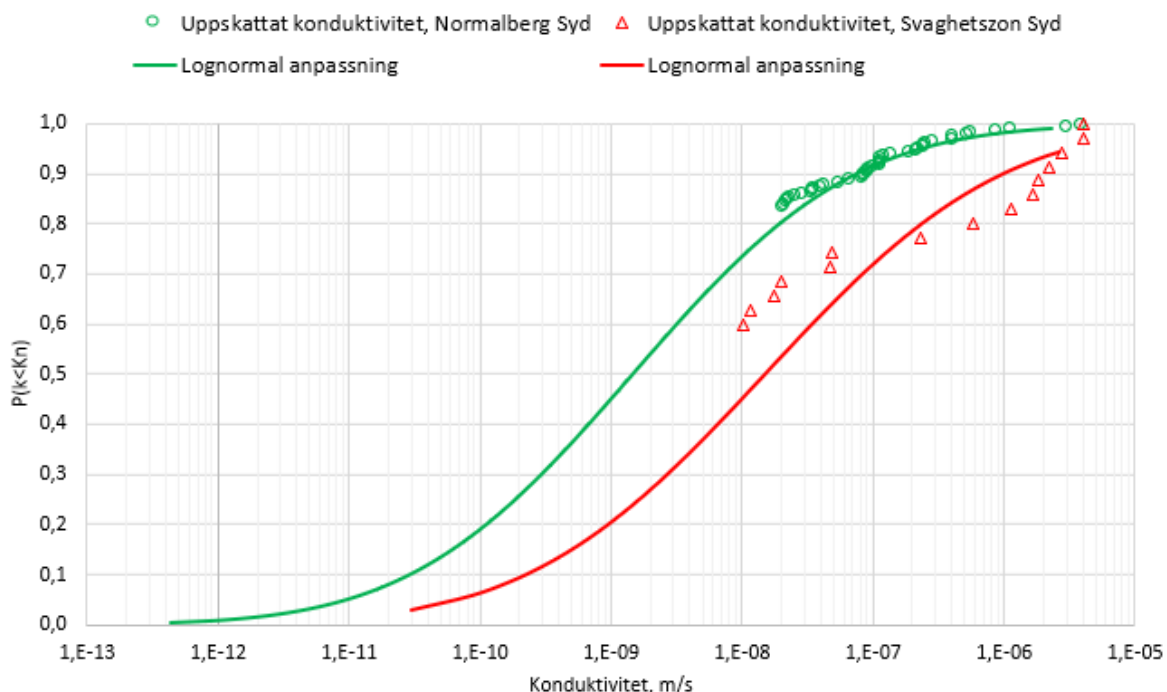
Tabell 6. Utvärderade medelvärden, baserat på statistiska fördelningar redovisade i Figur 8 för delområde sjöpassage, indelat i normalberg och svaghetszoner.

Berg	Skala	Aritmetiska medel, K_a [m/s]	Geometriskt medel, K_g [m/s]	Matherons förmodan, K_{3D} [m/s]	Standard-avvikelse
Normalberg under Sjöpassage	6m	$1,8 \times 10^{-7}$	$3,1 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-8}$	2,9
	10 m		$4,0 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-8}$	2,8
	100 m		$1,2 \times 10^{-8}$	$3,0 \times 10^{-8}$	2,3
Svaghetszon under Sjöpassage	6m	$1,7 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^{-7}$	2,2
	10 m		$2,0 \times 10^{-7}$	$4,0 \times 10^{-7}$	2,1
	100 m		$5,9 \times 10^{-7}$	$8,4 \times 10^{-7}$	1,5

Delområde Syd

Kumulativa fördelningsdiagram med passade lognormalfördelningar för uppmätta vattenförlustdata redovisas i Figur 9 och parametervärden för de statistiska fördelningarna redovisas i Tabell 7.

Utvärderingen visar att normalberg generellt har lägre medelkonduktivitet och samma variation i konduktivitet inom domänområde Syd i jämförelse med delområde Norr. Svaghetszoner inom delområde Syd visade lägre medelkonduktivitet, med större variation i konduktivitet i jämförelse med delområde Norr.



Figur 9. Empiriska fördelningar av sektionkonduktivitet, baserat på data från sektionvisa vattenförlustmätningar, samt anpassade lognormala fördelningar för domänområde Syd. Grafen beskriver sannolikhet (P) för att ett värde på den hydrauliska konduktiviteten över- eller underskrids.

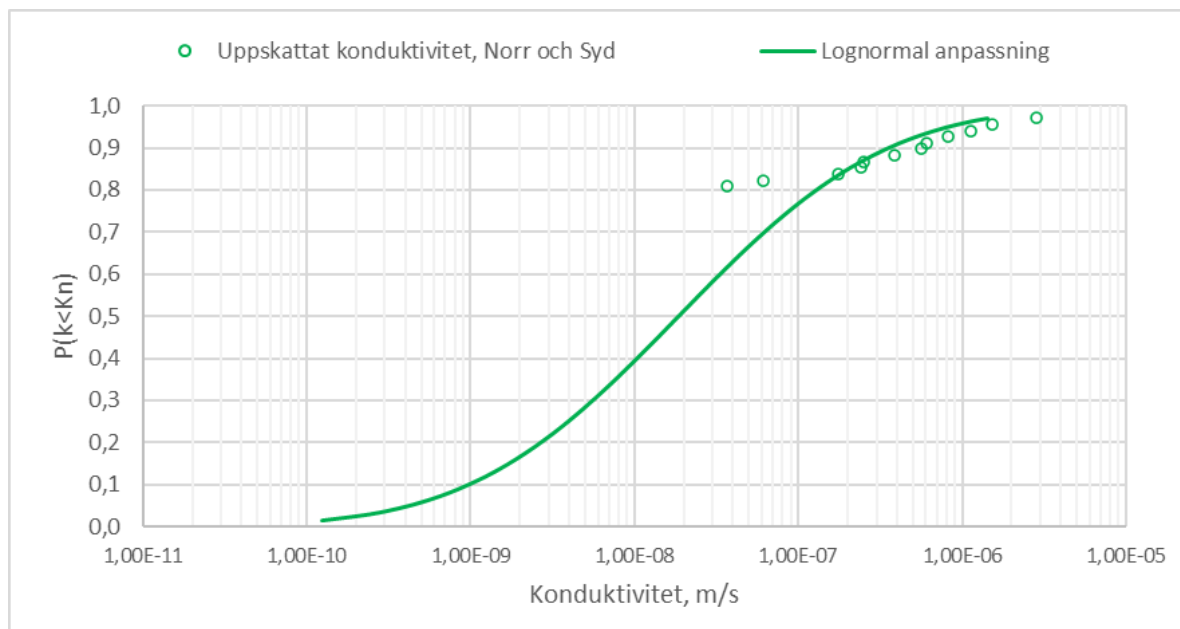
Tabell 7. Utvärderade medelvärden, baserat på statistiska fördelningar redovisade i Figur 9, inom domänområde Syd, indelat i normalberg och svaghetszoner.

Berg	Skala	Aritmetiska medel, K_a [m/s]	Geometriskt medel, K_g [m/s]	Matherons förmodan, (K_{3D}) [m/s]	Standardavvikelse
Normalberg (Syd)	6m	$1,5 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-9}$	$6,6 \times 10^{-9}$	3,0
	10 m		$2,2 \times 10^{-9}$	$9,0 \times 10^{-9}$	2,9
	100 m		$7,0 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-8}$	2,5
Svaghetszon (Syd)	6m	$3,0 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-8}$	$8,9 \times 10^{-8}$	3,2
	10 m		$2,4 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-7}$	3,1
	100 m		$7,6 \times 10^{-8}$	$2,7 \times 10^{-7}$	2,7

Domän Ytberg

En analys av djupberoendet av bergets hydrauliska konduktivitet visar en signifikant skillnad för sektioner tillhörande de översta 20 meter, i jämförelse med nedre delen. Beräkningen av genomsläpplighet baseras på uppgifterna från utförda vattenförlustmätningar, sammanslaget för samtliga sektioner inom delområde Norr och Syd. Kumulativa fördelningsdiagram med passade lognormalfördelningar för uppmätta vattenförlustdata för ytberg redovisas i Figur 10 och parametervärden för de statistiska fördelningarna redovisas i Tabell 8.

Utvärderingen visar att ytberg är mer genomsläppligt och har stor variation i konduktivitet i jämförelse med normalberg inom delområde Norr och Syd.



Figur 10. Empiriska fördelningar av sektionkonduktiviteter för ytberg, baserat på data från sektionssvaga vattenförlustmätningar i 6 meter sektioner för både domänområde Norr och Syd, samt anpassade lognormala fördelningar. Grafen beskriver sannolikhet (P) för att ett värde på den hydrauliska konduktiviteten över- eller underskrids.

Tabell 8. Utvärderade medelvärden, baserat på statistiska fördelningar redovisade i Figur 10, inom område Norr och Syd.

Berg	Skala	Aritmetiska medel, K_a [m/s]	Geometriskt medel, K_g [m/s]	Matherons förmodan, K_{3D} [m/s]	Standardavvikelse
Ytberg (Norr och Syd)	6 m	$2,6 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-8}$	$4,4 \times 10^{-8}$	2,2
	10 m		$2,9 \times 10^{-8}$	$6,0 \times 10^{-8}$	2,1
	100 m		$8,8 \times 10^{-8}$	$1,3 \times 10^{-7}$	1,5

Jämförelse av resultat med SGU:s brunnar

Hydraulisk konduktivitet från SGU:s brunnar är ett genomsnitt för hela brunnsdjupet (sprucket och ej sprucket berg). En jämförelse mellan hydrauliska konduktivitet från SGU:s brunnar och vattenförlustmätningar har utförts genom att beräkna ett viktat medelvärde för hydrauliska konduktivitet av sprucket (svaghetszon) och ej sprucket berg (normalberg) från vattenförlustmätningar. I beräkningen antogs andelen svaghetszoner vara cirka 17 % för berget inom norra området och cirka 20 % för berget i södra området. Resultaten visar generellt på samma storleksordning som den genomsnittliga hydrauliska konduktiviteten från SGU:s brunnar.

2.3 Hydrogeologiska domäner

Hypotesen bakom domänindelning är att det finns en signifikant skillnad i hydraulisk medelkonduktivitet mellan olika domäner utifrån resultat från tidigare utförda undersökningar och erfarenhet från tunneldrivning i närområdena. Domänindelning utgörs preliminärt av resultat från SGU:s brunnar, resultat från vattenförlustmätningar och erfarenhet från andra projekt i nära område, Utbyggnad av tunnelbanans Blå linje. Uppskattad konduktivitet från SGU:s brunnar motsvarar genomsnittlig konduktivitet för olika bergkvaliteter längs brunnsdjupet. Däremot visar resultat från vattenförlustmätningar platspecifik genomsläpplighet och kan kvantifieras baserat på bergkvalitet. I detta arbete har vattenförlustmätningensdata använts för att uppskatta konduktivitet för olika hydrogeologiska domäner.

Uppdelning av hydrogeologiska domäner sammanfattas nedan:

- Huvudsakliga domänindelningen utgörs av ytberg, normalberg och svaghetszoner.
- Normalberg utgörs av det kompetenta djupa berget vilket visar en förväntad spridning av genomsläpplighet i enighet med analyserad hydraulisk medelkonduktivitet. Vattenförlustmätta sektioner som inte sammanfaller med någon svaghetszon enligt karteringsprotokoll eller med SGU:s byggnadsgeologiska karta definieras tillhöra normalberg.
- Ytberg brukar vara uppsprucket och dominerade sprickgrupp är sub-horisontell. Erfarenhetsmässigt har ytberg generellt högre medelkonduktivitet.
- Svaghetszoner definieras av berg som har högre sprickdensitet, hög omvandlingsgrad, öppna sprickor och mjuk till tjockare sprickfyllning. Vattenförlustmätta sektioner som visar kraftigt uppsprucket berg, tjockare sprickfyllning, kärnförlust enligt kärnkarteringsprotokoll och sammanfaller med karterade svaghetszoner, definieras tillhöra svaghetszon. Svaghetszoner kan variera mellan lösa öppna sprickor inom uppsprucket berg till sträckan som innehåller flera svaghetszoner med lerfyllda eller kemiskt sönderdelat mycket svagt berg. Generellt, är det vid svaghetszoner det påträffas hög sprickdensitet i samband med tre-dimensionellt spricknätverk och därmed en hög sannolikhet av genomsläppligt berg. Baserad på sprickfyllning kan sprickorna vara läkta eller öppna.

Utifrån ovanstående resonemang har indelningen av hydrogeologiska domäner tagits fram och sammanfattning av bedömda medelvärden för hydraulisk konduktivitet i de antagna hydrogeologiska domänerna visas i Tabell 9.

Skalberoende medelvärden för konduktivitet samt deras standardavvikelse för olika delområden och hydrogeologiska domäner redovisas i Tabell 5 till Tabell 8. För att reducera den heterogenitet som finns i bergets konduktivitet har en skala om 100 meter bedömts vara lämplig för domänerna normalberg och ytberg. I praktiken förekommer svaghetszoner i mindre omfattning samt mellan normalberg, vilket motiverar användningen av en 10 meters skala för domänen svaghetszon. Tätning av berget genom injektering utförs generellt med 24 meter långa borrhål. En skala om 20 meter för normalberg resulterar i en högre standardavvikelse för medelkonduktiviteten och kan leda till en underskattning av inläckage. Vid en 20 meters skala för normalberg krävs mer detaljerad information om berggrundens geologiska och hydrogeologiska förhållanden. Bergets konduktivitet antas följa en lognormal fördelning, med utgångspunkt att logaritmen av konduktiviteten är normalfördelad. I Tabell 9 redovisas standardavvikelsen för logaritmen av det aritmetiska medelvärdet (K_a) för att illustrera storleken på standardavvikelsen i en normalfördelning. De karakteristiskt låga och höga värden som presenteras i Tabell 9 motsvarar 5% respektive 95 % sannolikhet för konduktivitet, baserat på den probabilistiska densitetsfunktionen för den aritmetiska konduktiviteten. Syftet med de karakteristiskt låga och höga värdena är att illustrera det intervall av aritmetisk konduktivitet som kan förekomma.

I utförda inläckageberäkningar har uppskattat medelkonduktivitet för K3D används för deterministiska analysen och uppskattat medelkonduktivitet för aritmetiska konduktivitet samt standardavvikelse använts för stokastiska analysen.

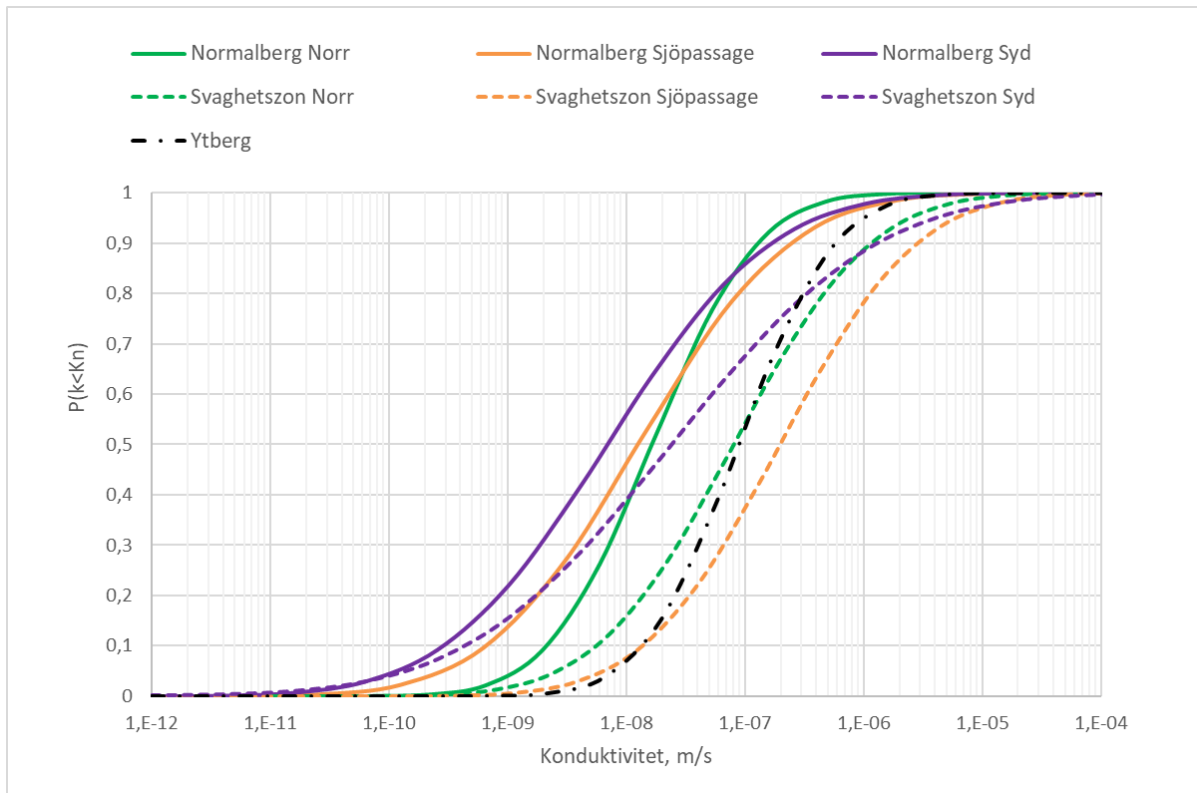
Profil för de hydrogeologiska domänområdena längs sträckan redovisas i Figur 12.

Tabell 9. Karakteristiska värden för hydrauliska konduktivitet inom antagna hydrogeologiska domäner.

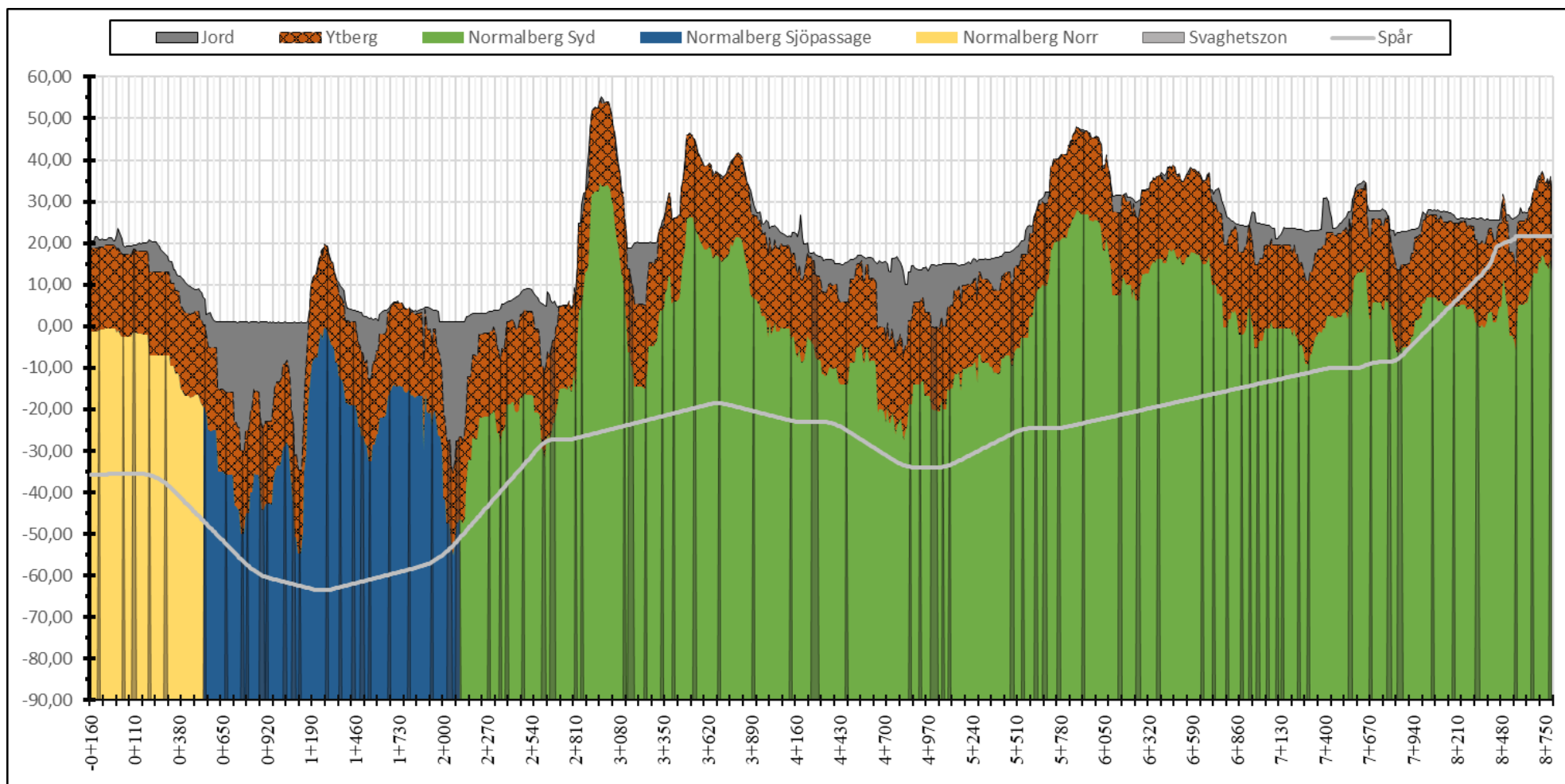
Del-område	Hydrogeologisk domän	Skala (m)	Uppskattat medelvärde, K_{3D} (m/s)	Uppskattat medelvärde, K_a (m/s)	Standard-avvikelse för $\ln K_a$	Karakteristiskt lågt värde för K_a , $p=0.05$	Karakteristiskt högt värde för K_a , $p=0.95$
Norr	Ytberg	100	$1,3 \times 10^{-7}$	$2,6 \times 10^{-7}$	1,5	$8,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-6}$
	Normalberg	100	$2,5 \times 10^{-8}$	$6,0 \times 10^{-8}$	1,6	$5,0 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-7}$
	Svaghetszon	10	$2,0 \times 10^{-7}$	$7,0 \times 10^{-7}$	2,1	$3,0 \times 10^{-9}$	$3,0 \times 10^{-6}$
Sjö-passage	Ytberg	100	$1,3 \times 10^{-7}$	$2,6 \times 10^{-7}$	1,5	$8,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-6}$
	Normalberg	100	$3,0 \times 10^{-8}$	$1,8 \times 10^{-7}$	2,3	$1,5 \times 10^{-10}$	$3,0 \times 10^{-7}$
	Svaghetszon	10	$4,0 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-6}$	2,1	$5,0 \times 10^{-9}$	$5,0 \times 10^{-6}$
Syd	Ytberg	100	$1,3 \times 10^{-7}$	$2,6 \times 10^{-7}$	1,5	$8,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-6}$
	Normalberg	100	$2,0 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-7}$	2,5	$7,0 \times 10^{-11}$	$2,0 \times 10^{-7}$
	Svaghetszon	10	$1,0 \times 10^{-7}$	$3,1 \times 10^{-6}$	3,1	$1,5 \times 10^{-11}$	$5,0 \times 10^{-6}$

Sannolikhet för hydraulisk konduktivitet

Sannolikheten för att värdet på aritmetiska hydrauliska konduktiviteter över- eller underskrids inom olika hydrogeologiska domäner har beräknats enligt Ekvation 12 och redovisas i Figur 11. Aktuella konduktiviteter i berget kommer att bli en spridning av genomsläpplighet i enighet med resultat som redovisas i Figur 11 och högre eller lägre genomsläpplighet kan förekomma inom samma hydrogeologiska domän.



Figur 11. Kumulativ fördelningsfunktion för aritmetiska konduktiviteten för olika hydrogeologiska domäner. Figuren visar sannolikheten för att ett värde på hydrauliska konduktivitet underskrids inom hydrogeologiska domäner.



Figur 12. Profil för hydrogeologiska domäner längs spårlinje, inklusive depå. Längdmätning i profilen är baserad på spårlinje [N-Spår].

3 Vattenbalans

3.1 Definitioner och principer för vattenbalansberäkning

Grunden för en vattenbalansberäkning är den så kallade klimatologiska vattenbalansen, det vill säga balansen mellan hur mycket det regnar inom ett område och hur mycket som avrinner därifrån efter att avdunstning och växtlighetens vattenupptag dragits bort. Avdunstning och växtupptag brukar sammantaget kallas för evapotranspiration. Även förändringar i magasinering kan ingå, speciellt om vattenbalansen redovisas för ett enskilt år.

Vattenbalans för delavrinningsområdena, som redovisas i *PM Hydrogeologi*, har beräknats med indata från SMHI:s Vattenwebb. I tjänsten redovisas vattenbalansparametrar som har beräknats med S-Hypemodell för total cirka 37 000 avrinningsområden. Till exempel redovisas data för de senaste tolv månaderna vid södra delen av Kungsholmen i Tabell 10.

Tabell 10. Vattenbalans vid södra delen av Kungsholmen

Parametrar	Senaste tolv månader	Normalt	SGU:s Karta Ah6*
Nederbörd	690 mm	593 mm	650 – 700 mm
Evapotranspiration	258 mm	238 mm	>450 mm
Magasinsförändring	0 mm	0 mm	
Utflyde (avrinning)	432 mm	354 mm	>200 mm

* SGU serie Ah6 Hydrogeologiska länskartan, Stockholms län

Som jämförelse togs SGU:s publikation från 1980-talet med i tabellen då den redovisar de ”nyckeltal” för områdesavrinning eller så kallad nettonederbörd vilket då utgör maximal potentiell grundvattenbildning. Det är en noterbar skillnad mellan den äldre publikationen och de värden som SMHI redovisar för Kungsholmen. Detta beror till största del på att SMHI:s modell tar hänsyn till den stora andelen bebyggd och hårdgjord yta utan vegetation. Väljs ett delavrinningsområde med övervägande naturmark fås en större överensstämmelse mellan S-Hypemodellen och SGU:s länskarta.

Avrinningen delas upp i ytvattenavrinning eller grundvattenavrinning. Avrinning uppe på markytan är ovanligt inom naturmark och således bildar i stort sett all nettonederbörd inom områden som inte är hårdgjorda ett grundvatten. Inom bebyggda områden med hårdgjorda ytor sker ytlig regelmässigt, speciellt vid tillfällena med kraftiga regn. Även bortledning i dagvattenledningar kan räknas till den ytliga avrinningen. Under opåverkade förhållanden är grundvattenavrinningen måttlig i berg och undre grundvattenmagasin. Normalt avrinner det ytliga grundvattnet till diken, täckdiken, dränerings- och dagvattenledningar med mera, och vidare som ett ytvattenflöde.

Under förhållanden där en undermarksanläggning i berg dränerar en del av berggrundvattnet uppstår lokalt kraftigare strömningsgradienter in mot tunneln än de topografiskt betingade. En större andel av grundvattenbildningen avrinner ner till undre grundvattenmagasin och berg. Ökningen tas av det grundvatten som annars skulle avledas till diken och dagvattenledningar.

Ett övre grundvattenmagasin kan påverkas indirekt av dränering till en undermarksanläggning i berg genom att tillrinningen från intilliggande berg- och moränhöjder minskar. Om

grundvattenavsänkningen är stor i undre magasin kan ett läckage genom lerjorden uppstå.

3.2 Beräknad grundvattenbildning inom delavrinningsområden

Beräkningen av vattenbalansen utgår från de olika delområdena för avrinningen i jordlagren som redovisas i Bilaga C, PM Hydrogeologi. Som *steg 1* har uppgifter om nettonederbörden inhämtats från SMHI:s redovisade värden för normala årsavrinningen från de olika delavrinningsområden som redovisas på deras hemsida. SMHI:s områden kan omfatta ett eller flera av delområdena som då ansätts samma nettonederbörd men är förhållandevis detaljerad, exempelvis delas Kungsholmen in i två avrinningsområden.

Steg 2 är att beräkna andelen som potentiellt kan bilda grundvatten, det vill säga inte avrinner via dagvattensystem. Detta görs genom att kombinera lantmäteriets GIS-uppgifter om markanvändning med Svenskt Vattens uppgifter om avrinningskoefficienter (publikation P90).

Tabell 11. Infiltrationskoefficient för olika bebyggelse typer.

Ytkod	Ytklass	Motsvarande P90 klass	Avrinnings-koefficient	Infiltrations-koefficient*
V	Låg bebyggelse	Villor	0,15	0,95
SI	Sluten bebyggelse	Slutna stadskvarter både med och utan vegetation	0,6	0,5
	Industriområde	Stora tak, stor andel hårdgjorda ytor	0,5	0,5
Ö	Hög bebyggelse	Öppet byggnadssätt och radhus	0,4	0,7

Avrinningskoefficienten avser dimensionering av dagvattensystem, det vill säga system som ska klara dimensionerande regnintensitet (större skyfall). Grundvattenbildning sker snarare vid mer lågintensiv nederbörd och snösmältning då jordlagren hinner ta emot en större andel av nederbörden. Infiltrationskoefficienten bör därav beräknas till något större än 1-avrinningskoefficient varför en justeringsfaktor på 0,1 införs, se Tabell 11.

Steg 3 i beräkningen är att kombinera framtagna ytor med en infiltrationskoefficient med byggnadsgeologiska kartans fördelning av jordarter som har en ansatt infiltrationskapacitet, se Tabell 12.

Tabell 12. Infiltrationskoefficient för olika jordar.

Typkod	Jordart	Infiltrationskoefficient	Magasin
BM	Berg och morän	0,95	Undre magasin
ÅM	Åsmaterial	1,4	Undre magasin
VX	Växellagrat	0,8	Undre magasin
L	Lera, organisk jord	0,8	Övre magasin

Sammantaget beräknas potentiell grundvattenbildning för följande kombinationer:

Undre magasin (och potentiellt till berg)

BM-V, BM-SI, BM-Ö osv. Berg, moränområden med olika bebyggelse typer

ÅM-V, ÅM-SI osv Åsmaterial med olika bebyggelse typer

VX-V, VX-S osv Växellagring med olika bebyggelse typer

BM
ÅM
VX

Berg, moränområden utan bebyggelse
Åsmaterial utan bebyggelse
Växellagrat

Övre magasin

L-V-L-SI, L-Ö
L

Lera med olika bebyggelsetyper
Lera utan bebyggelse

Den beräknade potentiella grundvattenbildningen till de olika delavrinningsområdena uppgår till mellan 56 och 94 % av nettonederbörden främst beroende på olika bebyggelsetryck, se Tabell 13.

Tabell 13. Beräknade potentiell grundvattenbildning inom olika delavrinningsområden inom utredningsområde.

Delavrinningsområde	Medel Infiltrationskoefficient	Grundvattenbildning					
		Övre magasin		Undre magasin		Total	
		(l/min)	(mm/år)	(l/min)	(mm/år)	(l/min)	(mm/år)
Fredhäll	0,80	83	78	213	202	296	281
Kristineberg	0,66	115	121	106	111	221	232
Kungsholms strand	0,60	49	46	176	165	225	211
Mariebergssundet	0,84	13	30	109	245	122	275
Norr Mälärstrand	0,56	78	109	62	86	141	195
Rådhuset	0,66	67	95	98	137	165	232
Rålabshov	0,73	197	91	352	163	548	254
Stadshuset	0,63	34	161	13	60	47	221
Långholmen norr	0,94	3	10	83	288	86	298
Långholmen syd	0,92	20	55	84	235	104	290
Reimersholme väst	0,79	0	0	28	250	28	250
Reimersholme öst	0,71	10	68	23	155	33	223
Hornstull	0,57	37	67	72	131	109	198
Söder Mälärstrand	0,66	11	59	32	168	43	227
Södersjukhuset	0,91	0	13	6	287	6	300
Tanto	0,68	53	90	80	135	134	225
Trekanten	0,74	116	60	336	174	453	234
Liljeholmen-Midsommarkransen	0,73	111	43	475	182	586	225
Gröndal	0,74	12	50	45	184	57	234
Essingesundet	0,79	1	4	69	209	70	213
Mörtviken	0,82	18	41	82	192	100	233
Aspudden	0,75	24	32	130	179	153	212
Årsta-Enskede	0,70	1523	112	1379	102	2902	214
Älvsjö-Högdalen	0,79	1540	102	1698	113	3238	215
Summa		4116		5751		9867	
Medel			64		173		238

4 Beräkningsmetodik för Inläckage

Beräkningar av inläckage för tunnel och vertikalschakt kan utföras med olika metoder, såsom stokastisk och deterministisk. Inläckage av grundvatten efter bergschakt kan påverkas av flertal parametrar som medför stora osäkerheter till exempel, bergets ursprungliga konduktivitet samt uppnådd konduktivitet efter injektering, injekterade zonen mäktighet. Dessa osäkerheter kan betraktas vid en stokastisk analys. I den deterministiska analysen finns begränsningen att bergets heterogenitet inte kan hanteras vilket medför stora osäkerheter i resultaten. Inläckageberäkningar har utförts med både stokastisk och deterministisk analys. Resultaten från stokastiska analysen används vidare i Bilaga C, PM Hydrogeologi för att skapa grunden till villkor för ansökan till miljöödomen. Resultat från deterministiska analysen redovisas också som en referens men medför stora osäkerheter i resultaten.

4.1 Styrande Ekvationer

Teorier bakom beräkning av inläckage till bergtunnlar och vertikala schakter framgår av Gustafson (2012) och används för stokastiska och deterministiska analyserna.

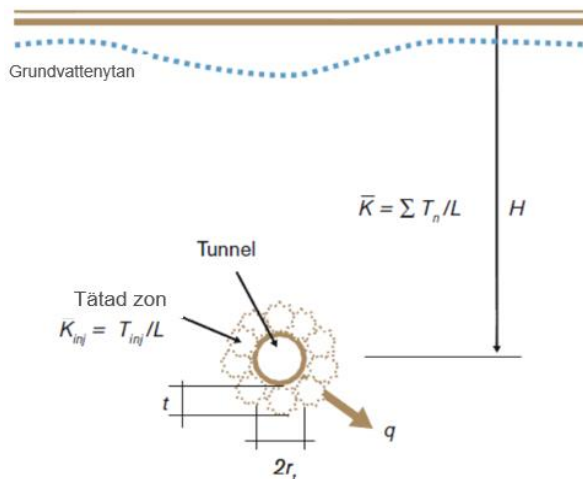
För beräkning av inläckage till bergtunnel har ett matematiskt uttryck för inflöde till ett horisontellt borrhål använts och redovisas i Ekvation 13–14. Ekvation 13 beskriver inläckage till bergtunnlar utan tätning. Ekvation 14 beskriver inläckage till bergtunnlar efter utförd injektering, dvs med en tätad zon (t) kring tunneln. Konceptuellmodell för beräkningsmetoden redovisas i Figur 13.

$$q = \frac{2 \times \pi \times K \times H \times L}{\ln\left(\frac{2H}{r_t}\right) + \xi} \quad \text{Ekvation 13}$$

$$q = \frac{2 \times \pi \times K \times H \times L}{\ln\left(\frac{2H}{r_t}\right) + \left(\frac{K}{K_i} - 1\right) \cdot \ln\left(1 + \frac{t}{r_t}\right) + \xi} \quad \text{Ekvation 14}$$

Beräkningarna har utförts med beteckningar enligt nedan:

q	<i>Inläckage till tunnel [m³/s]</i>
K	<i>Hydraulisk konduktivitet för oinjekterade berg [m/s]</i>
K_i	<i>Hydraulisk konduktivitet för injekterade berg [m/s]</i>
H	<i>Grundvattentryck vid tunnel centrum [m]</i>
L	<i>Tunnel längd [m]</i>
r_t	<i>Ekvivalent tunnelradie [m]</i>
t	<i>Bred på injekterade zonen [m]</i>
ξ	<i>Skinfaktor []</i>



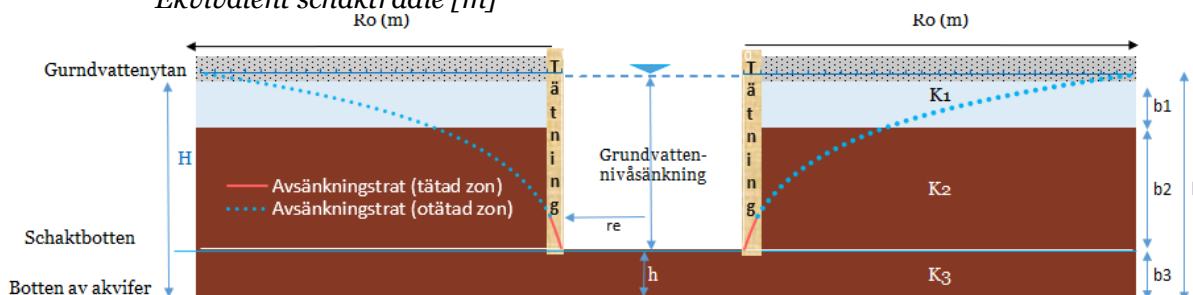
Figur 13. Illustration för beräkning av inläckage till bergtunnlar enligt (Gustafson, 2012).

Inläckage till vertikala schakter, hiss- och biljetthall, luftutbyte-och brandgasschakter samt TBM-etablering och betongtunnlar har beräknats med Thiems brunnsekvation (Ekvation 15). Ekvationen betraktar ett schakt som en brunn med en ekvivalentradie (r_e). Konceptuell modell för beräkningsmetoden redovisas i Figur 14.

$$q = 2 \times \pi \times K \times b \frac{(H-h)}{\ln\left(\frac{R_0}{r_e}\right)} \quad \text{Ekvation 15}$$

Beräkningarna har gjorts med beteckningar enligt nedan:

q	Inläckage till schaktet
K	Genomsnitt hydraulisk konduktivitet [m/s]
b	Akvifermäktighet [m]
H	Grundvattentryck till grundvattenytan [m]
h	Grundvattentryck vid schaktbotten [m]
R_0	Influensområde [m]
r_e	Ekvivalent schaktradie [m]



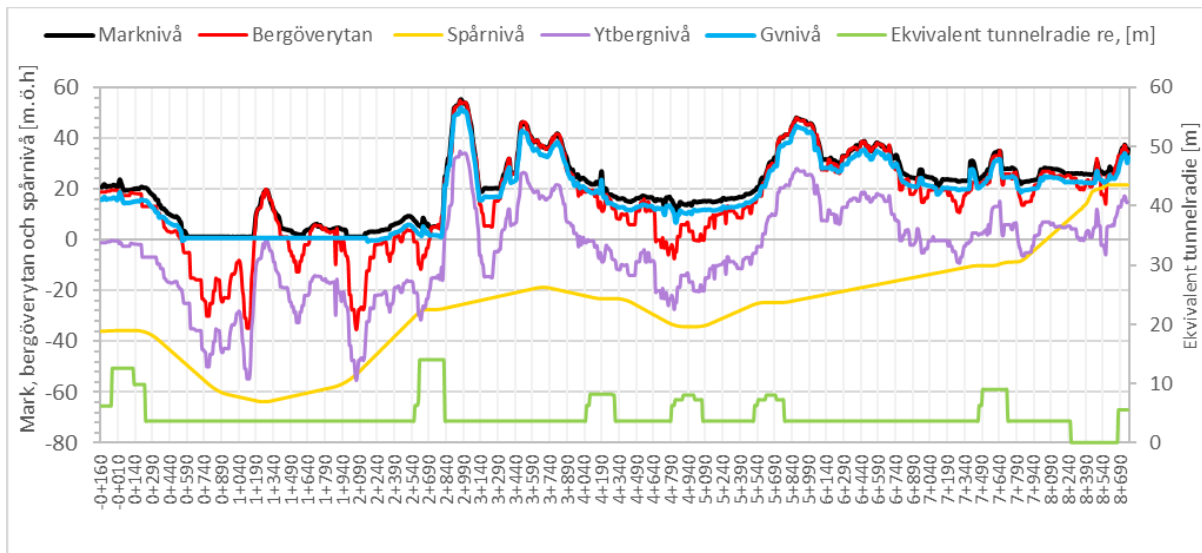
Figur 14 Illustration för beräkning av inläckage och påverkansområde till vertikala schakter.

4.2 Indata

Följande indata och underlag har använts som indata i den stokastiska och deterministiska beräkningsmodellen:

- Dimensionerande grundvattennivåer är uppskattade utifrån utförda undersökningar inom projektet. Dimensionerande grundvattennivå och bergövertyans nivå längs planerad anläggning redovisas i Figur 15.
- Ekvivalent tunnelradie för stationerna redovisas i Figur 15.

- Längd för borra-spräng tunnlar och TBM tunnlar redovisas i Tabell 15 respektive Tabell 16.
- Längd och ekvivalent tunnelradie för arbetstunnlar och depåtunnel redovisas i Tabell 18 respektive Tabell 19.
- Djup och ekvivalent schakt area för vertikala schakter redovisas i Tabell 20.
- Utvärdering av bergkvalitet och bergets genomsläpplighet utförts utifrån utförda kärnborrningar och vattenförlustmätningar och en sammanställning av tolkade svaghetszoner framgår av PM Hydrogeologi. Omfattning av olika hydrogeologiska domäner längs tunnlar redovisas i Figur 12.
- Bergets konduktivitet för olika hydrogeologiska domäner redovisas i avsnitt 2.3.



Figur 15. Indata för grundvattennivå, bergnivå, spårnivå och ekvivalent tunnelradie längs planerade anläggning

4.3 Metodik för stokastiska beräkningar

Bergets genomsläpplighet brukar förklaras med medelkonduktivitet och standardavvikelse. Osäkerheterna i bergets konduktivitet, som ställvis överskrider eller underskrider medelkonduktivitet, kan inte beaktas i traditionella deterministiska analytiska beräkningar. För att uppskatta osäkerheten kopplat till inläckage i borra - spränga och TBM drivna tunnlar har en stokastisk modell upprättats. I detta kapitel beskrivs modellens uppbyggnad samt parametrisering.

4.3.1 Modellbeskrivning

Beräkningsmodellen använder Monte-Carlo simuleringstekniken för att upprepa beräkningen baserad på slumpmässigt faktorn ett stort antal gånger. De enskilda resultaten sparas och sammanfattas i en normalfördelning. Sedan redovisas sannolikhet motsvarande percentilerna för värdena i fördelningsdiagram.

För beräkning av inläckage för tunnlar och schakter har styrande Ekvationer som redovisas i avsnitt 4.1 används. Där ekvivalent tunnelradie (r_t) och grundvattentryck (H) anses som konstant parameter. Däremot har bergets konduktivitet, före injektering (K_0) och efter injektering (K_i) samt injekterade zonen tjocklek (t) kvantifieras med hjälp av stokastisk modell.

4.3.2 Parametrisering

För att möjliggöra kvantifiering av osäkerheter kring inläckagets omfattning används en stokastisk modell. I modellen anges osäkra parametrar med en sannolikhetsfördelning i stället för med ett diskret värde. Vid körning av modellen används en slumpalgoritm för att generera en uppsättning

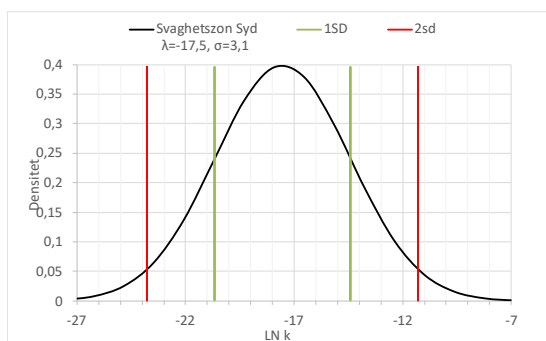
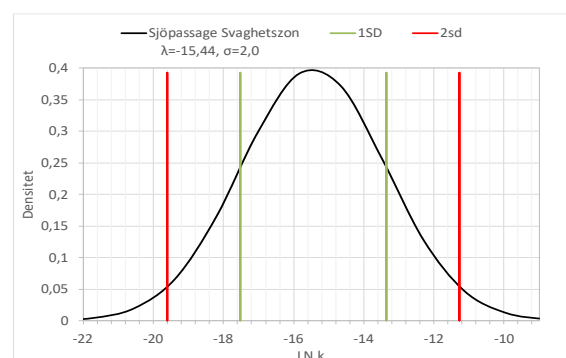
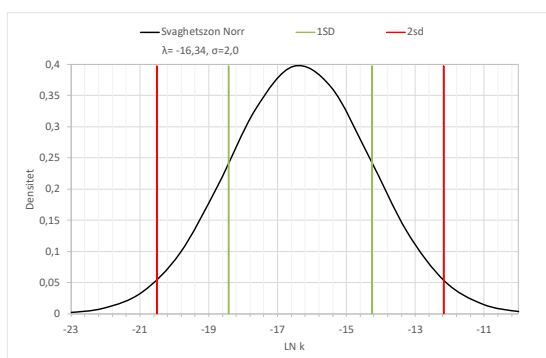
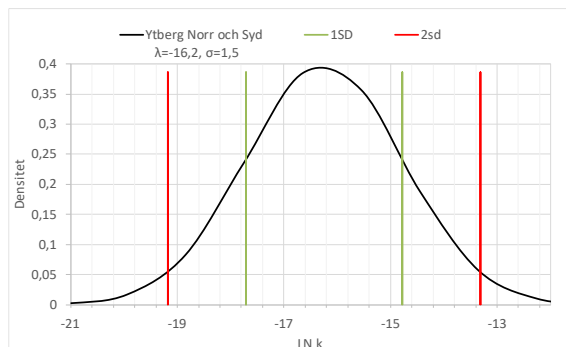
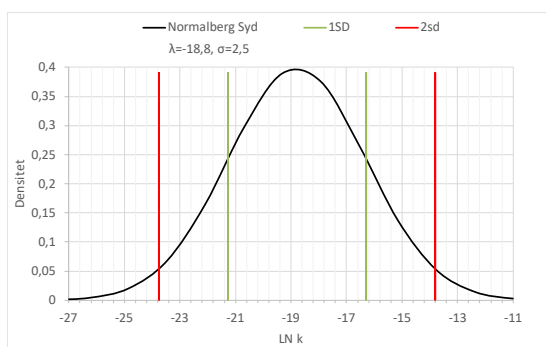
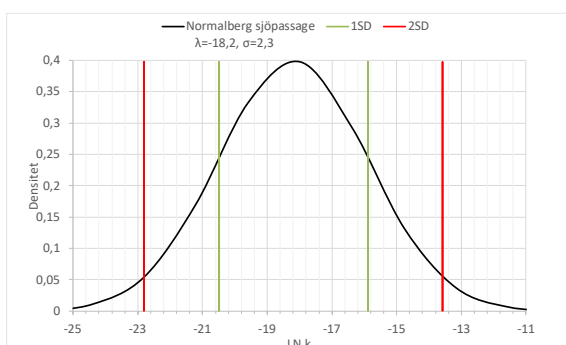
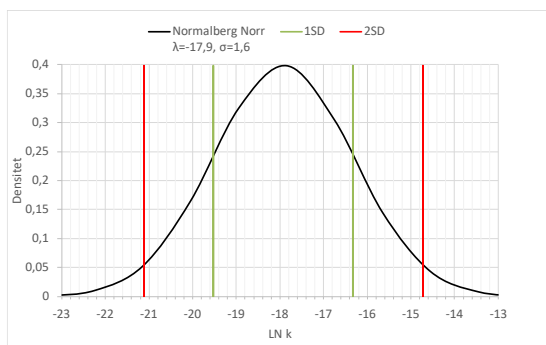
av diskreta värden ($n = 10\ 000$) utifrån fördelningarna, dvs möjliga utfall av variablerna eller möjlig kombination av utfall för modellen.

Därefter beräknas för varje realisering inflödet med Ekvation 13 - 15. Detta kapitel redogör för vilka sannolikhetsfördelningar och parametrar som har valts som variabler i dessa Ekvationer.

4.3.2.1 Bergets konduktivitet, K_0

För att modellera bergets hydrauliska konduktivitet ansätts bergmassan som ett stokastiskt kontinuum för att beskriva bergets heterogena hydrauliska egenskaper. Detta är enbart en generaliserad beskrivning av bergets hydrauliska egenskaper, inte dess faktiska hydrauliska egenskaper. Konduktiviteten anses vara varierande längs tunnelsträckningen och baseras på flera sannolikhetsfördelningar, så att segmentet har en slumpmässigt hydraulisk konduktivitet. Vid varje modellrealisering genereras olika konduktivitetsvärden för varje segment som representerar den möjliga variationen i konduktivitetsfördelningen. Den okända faktiska hydrauliska konduktiviteten antar däremot ett konkret värde. Bergets hydrauliska konduktivitet och sannolikhetsfördelning utgörs av respektive hydrauliska domäner som redovisas i Figur 11. Probabilitet densitetfunktion av logaritmen av konduktivitet, för varje hydrauliska domäner redovisas i Figur 16.

I teorin kan den högsta och lägsta gränsen av hydraulisk konduktivitet vara oändlig. För tunnlar, är det högsta och lägsta gränsvärde för konduktivitet begränsad vid 90% och 5% sannolikhet utifrån respektive kumulativ fördelningsfunktion. Vid förundersökningar visades att vissa områden, till exempel svaghetszonen vid Älvsjö IP:s grusplan, överskrider bergets konduktivitetsgränsvärde som används i konduktivitetsfördelningen. Inläckageberäkningen för dessa områden utfördes baserat på resultaten från förundersökningen. För vertikala schakter används beräkningsmodell för inläckage enligt Ekvation 15. I beräkningsmodellen antas att oinjekterade berg har samma konduktivitet inom hela influensområdet, utanför tätade zonen. Därför ansätts det högsta gränsvärdet för konduktivitet för oinjekterade berg till 2×10^{-7} m/s.



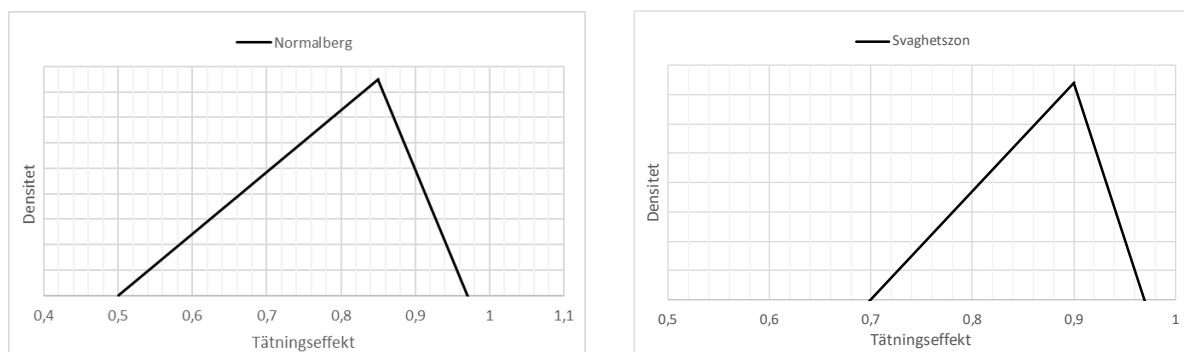
4.3.2.2 Bergets konduktivitet efter injektering, K_i

Bergets konduktivitet är behäftad med osäkerhet avseende uppnådd täthet och tätskärmens tjocklek varför dessa parametrar har tilldelats fördelningar och hanterats i de stokastiska beräkningarna. Bergets konduktivitet efter injekteringen kan förklaras med hjälp av uppnådd tätningsseffekt, $\eta = 1 - \frac{k_I}{k_0}$. Utifrån erfarenhet från tidigare utförda projekt kan konstateras att maximal 90%-95% tätningsseffekt uppnås efter injekteringen. Det kan betonas att bergets konduktivitet efter injekteringen är högst beroende av olika geologiska parametrar samt

bergkvalitet och tätningseffekt kommer att variera beroende på bergets ursprungliga konduktivitet.

Tätningseffekt för injektering modelleras som en kontinuerlig och triangulär fördelning. För normalberg valdes att tätningseffekt ska variera mellan 0,5 och 0,97, där mest sannolikt är 0,85. För svaghetszon valdes att tätningseffekt ska variera mellan 0,7 och 0,97, där 0,9 är mest sannolik. Gränsvärde samt mest sannolikt värde för triangulär fördelning valdes baserat på erfarenhet och teorier som anges i Creutz et al., (2017) och Eriksson & Stille (2015). Vald tätningseffekt ska resultera mellan så kallad 'uncomplicated grouting' till 'difficult grouting'. I beräkning av inläckage antas att berget konduktivitet efter injektering kan minskas till minst 5×10^{-9} m/s och gränsvärde för minsta konduktivitet efter injekteringen ansätts till 5×10^{-9} m/s.

Probabilitet densitetfunktion för triangulärt fördelningar av tätningseffekt redovisas i Figur 17.



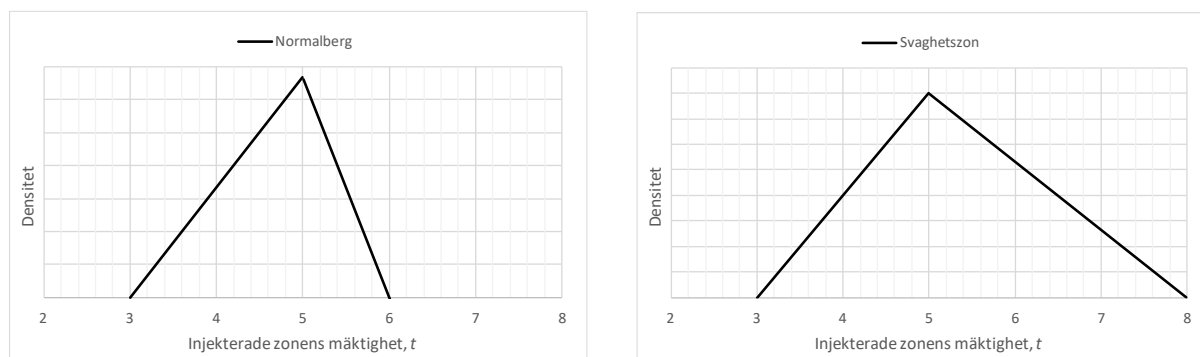
Figur 17. Probabilitet densitetfunktion för triangulärt fördelningar för tätningseffekt.

4.3.2.3 Injekterade zonen mäktighet utanför tunnel, t

Den injekterade zonen mäktighet utanför tunnlar styrs av dimensionerande radiell spridning av injekteringsbruk samt orientering av dominerade sprickgrupper och stickning av injekteringsborrhål. I praktiken kan radiell spridning vara omöjligt baserad på sprickorienteringar samt samverkan mellan olika sprickgrupper.

Injekterade zonen mäktighet modelleras som en kontinuerlig triangulär fördelning. För normalberg valdes att mäktighet ska variera mellan 3,0 och 6,0, där mest sannolikt är 5,0. För svaghetszon valdes att tätningseffekt ska variera mellan 3,0 och 8,0, där 5,0 är mest sannolik.

Probabilitet densitetfunktion för triangulärt fördelningar av injekterade zonen mäktighet utanför tunnel redovisas i Figur 18.



Figur 18 Probabilitet densitetfunktion för triangulärt fördelningar för injekterade zonen mäktighet utanför tunnlar.

4.3.3 Beräkningsmodell

Stokastiska beräkningar utförs i följande beräkningssteg:

1. Berget längs med tunnel fördelas i segment om tio meter. Varje segment tilldelas hydraulisk domän som redovisas i Figur 12.
2. För varje segment dras ett slumpmässigt värde från sannolikhetsfördelningen som beskriver bergets hydrauliska konduktivitet, tätningseffekt, motsvarande konduktivitet efter injekteringen och injekterade zonen mäktighet utanför tunnel. I varje segment upprepas detta 10 000 gånger.
3. Inläckage för varje segment beräknas enligt avsnitt 4.1 för varje slumpmässigt värde och motsvarande parametrarna.
4. Slutligen summeras inläckage för alla segment för respektive delsträcka (station, arbetstunnel, TBM tunnel och så vidare). Totalt 10 000 realisering för varje 10 meter segment används för att beräkna summerat inläckage för varje delsträcka.
5. Baserade på medelvärde och standardavvikelse av 10 000 realisering kan en probabilitetsdensitet funktion tas fram för varje delsträcka. Percentilerna kan tolkas som sannolikhet att ett visst inflöde underskrids.

4.4 Metodik för deterministiska beräkningar

För deterministiska beräkningar av inläckage för tunnlar och schakter har styrande Ekvationer som redovisas i avsnitt 4.1 används. Där ekvivalent tunnelradie (r_t), och grundvattentryck (H), bergets konduktivitet, före (K_0), och efter injektering (K_i), samt injekterade zonen tjocklek (t) anses som konstant parameter.

Bergets konduktivitet är baserat på analyser från vattenförlustmätningar som redovisas i kapitel 2.2. Hydraulisk konduktivitet av berggrund som har använts i beräkningen har sammanställts i Tabell 14. Injekterade zonen mäktighet (t) antas 5 meter. Skinfaktorn (ξ) är en parameter som hanterar att tunnarna succesivt blir tätare då berget runt den utsprängda tunneln förändras. För att bedöma det maximala inläckaget, har skinfaktorn ansatts till noll. Schaktbotten för hiss- och biljetthall och luftutbyte schakter antas vara spårnivå.

För vertikala schakter har en sammanvägd konduktivitet (vägd K) använts för att hantera olika hydraulisk konduktivitet och tillämpa beräkningsformeln. Det vägda genomsnittet för hydraulisk konduktiviteten har beräknats genom att multiplicera hydrauliska konduktivitet av varje lager med en motsvarande akvifermäktigheten för respektive lager och därefter divideras summan med total akvifermäktigheten.

Tabell 14. Hydraulisk konduktivitet av berggrund som har använts för beräkning av inläckage.

Bergdomän	Hydrauliska konduktivitet utan tätning, K [m/s]	Hydrauliska konduktivitet efter tätning, K_{inj} [m/s]	Tätningseffekt $K_i = k(1 - n)$
Ytberg	$1,3 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-8}$	90%
Normalberg Norr	$2,5 \times 10^{-8}$	$7,0 \times 10^{-9}$	70%
Normalberg Syd	$2,0 \times 10^{-8}$	$7,0 \times 10^{-9}$	65%
Svaghetszoner Norr	$2,0 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-8}$	90%
Svaghetszoner Syd	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-8}$	85%
Svaghetszoner vid sjöpassage	$4,0 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-8}$	95%

5 Resultat

I detta avsnitt redovisas resultaten från både stokastiska och deterministiska beräkningar. Den deterministiska beräkningsmetodiken medför betydande osäkerheter avseende bergets konduktivitet (både före och efter injektering), samt mäktigheten av den injekterade zonen utanför tunneln. Heterogenitet i bergets konduktivitet beaktas därför inte i beräkningen. De stokastiska analyserna presenteras som percentilfördelningar, som belyser de olika osäkerheterna i det beräknade inläckaget.

5.1 Resultat från stokastiska beräkningar

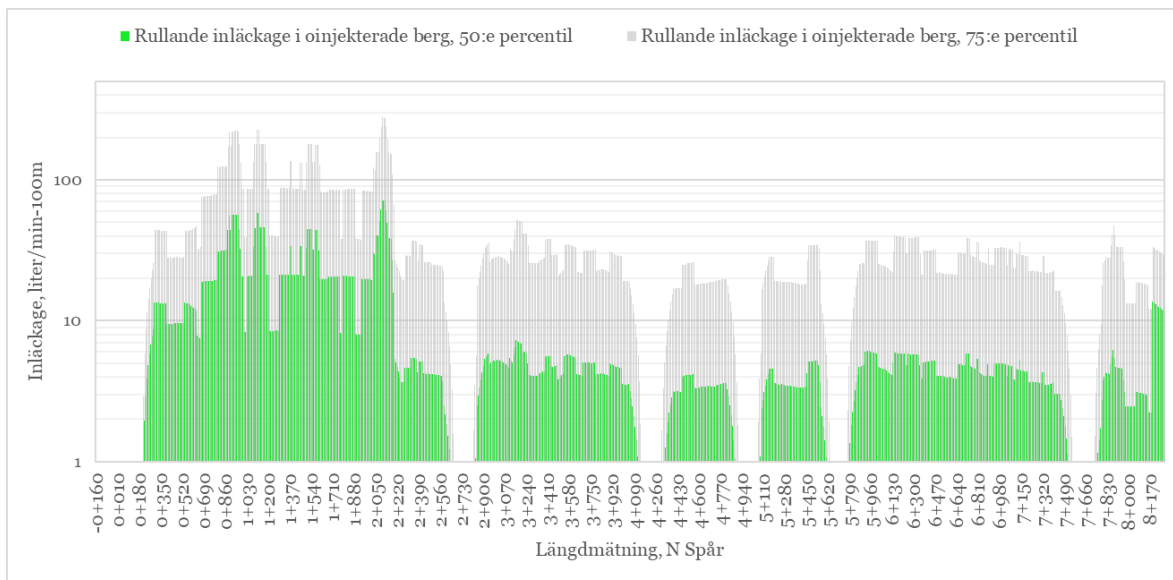
Resultat från stokastiska beräkningar redovisas i percentil fördelningsdiagram i avsnitt 5.1.1 till 5.1.3. I percentilfördelningsdiagram redovisas beräknat inläckage för 25:e, 50:e, 60:e, 75:e, 90:e och 95:e percentil.

5.1.1 TBM-borrade spårtunnlar

Beräkning av inläckage för TBM tunnlar har utförts för oinjekterat berg. Längdmätningar och längderna för TBM borrade spårtunnlar redovisas i Tabell 15. Omfattning av olika hydrogeologiska domäner längs tunnelsträckorna redovisas i Figur 12. Fördelningar av inläckage i varje 10 meter segment utifrån bräkningar från 10 000 simulering redovisas i Figur 19.

Tabell 15. Längdmätning för TBM tunnlar.

TBM-borrade tunnlar mellan stationer	Längdmätning, start	Längdmätning, Slut	Längd, meter
Fridhemsplan - Liljeholmen	0+220	2+575	2350
Liljeholmen - Årstaberget	2+800	4+065	1235
Årstaberget - Årstafältet	4+310	4+815	505
Årstafältet - Östbergahöjden	5+070	5+520	450
Östbergahöjden - Älvsjö	5+780	7+475	1695
Älvsjö - TBM, schakt för montering och start	7+720	8+265	545



Figur 19. Fördelningar av inläckage längs TBM tunnelsträckorna efter 10 000 simuleringar.

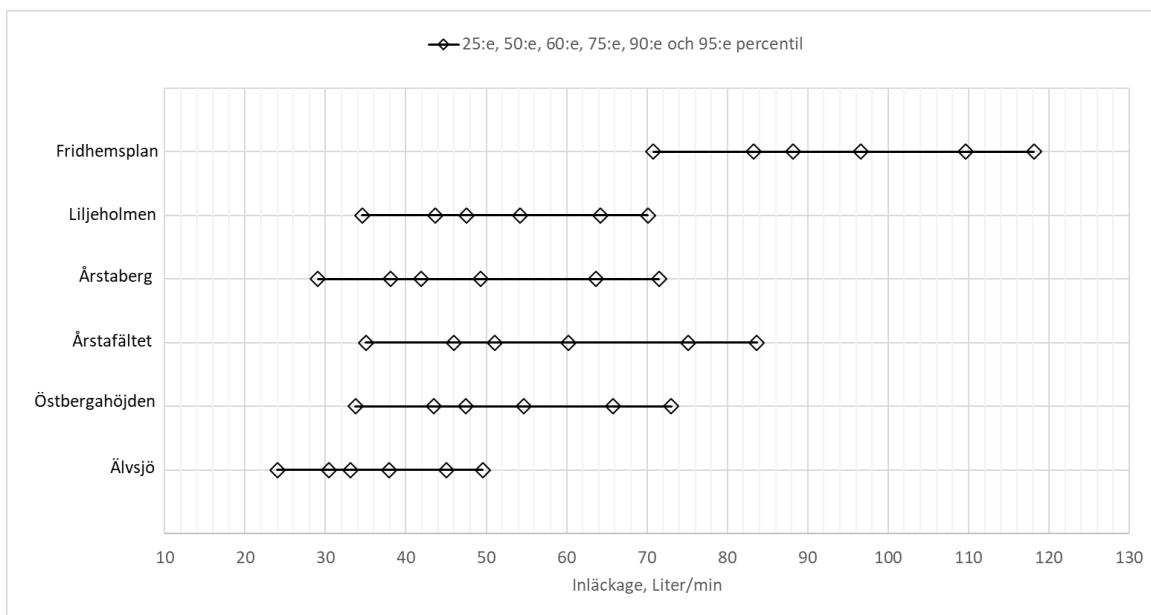
5.1.2 Borra-spräng tunnlar

Inläckageberäkningar för tunnlar drivna genom borrhning och sprängning inkluderar plattform, starttunnlar för TBM, fläkttunnlar, servicetunnel, arbetstunnel och anslutning mellan plattform och hisschakt. Längdmätning samt längden för varje station redovisas i Tabell 16.

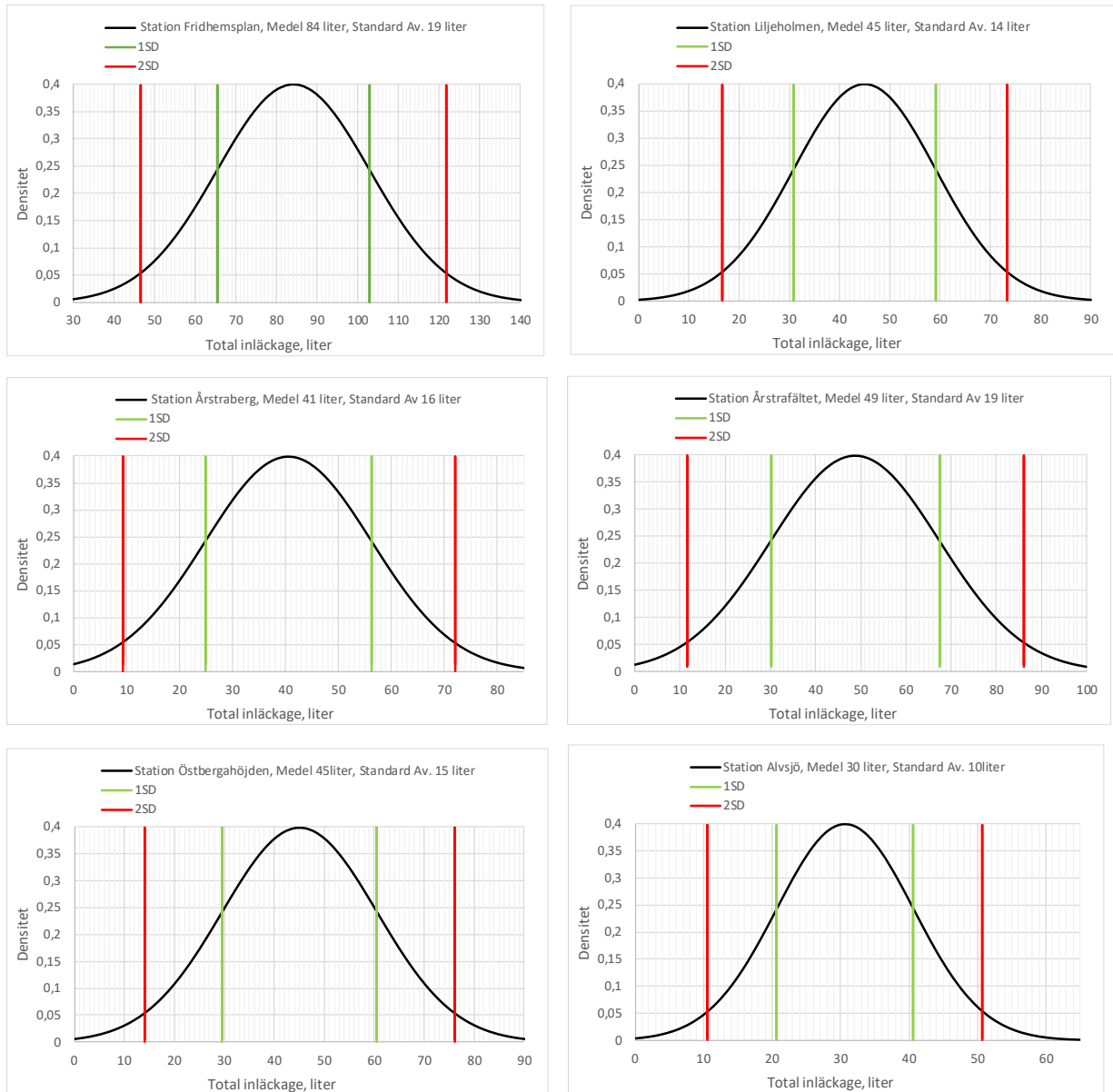
5.1.2.1 Stationsutrymme

Resultat från stokastiska beräkningar för totalt inläckage i stationsutrymme redovisas i percentilfördelningsdiagram i Figur 20. Totalt inläckage för station Fridhemsplan är högre än övriga stationer. Detta kan förklaras av att bergschakt inom station Fridhemsplan är längre än andra stationer samt station Fridhemsplan tillhör den hydrogeologiska domän 'Norr' vilken är mer genomsläppligt i jämförelse med stationerna som tillhör domän 'Syd'.

Probabilitet densitetfunktion för beräknat inläckage för samtliga stationer redovisas i Figur 21.



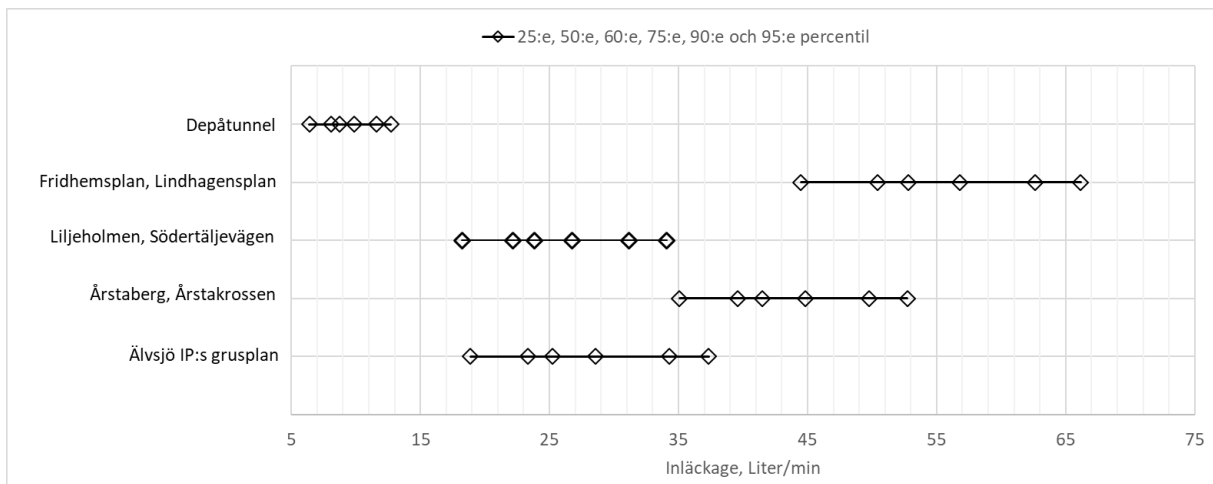
Figur 20. Fördelningar av totala inläckage för borra-spräng stationer efter 10 000 simuleringar.



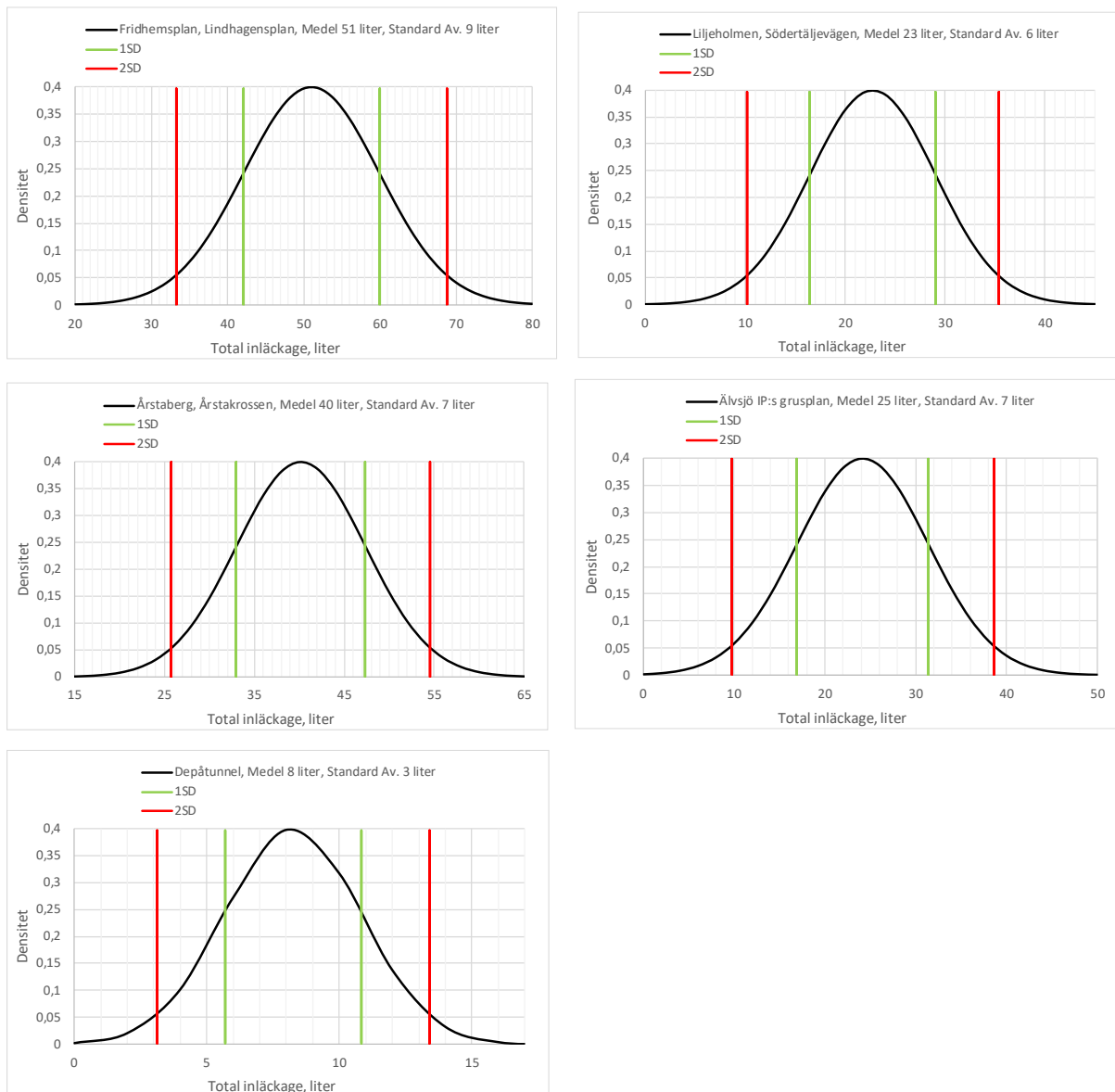
Figur 21. Probabilitet densitetfunktion av beräknat totala inläckage för olika stationer. Område inom 1SD avser 68% och område inom 2SD avser 95% sannolikhet respektive att totala inläckage kommer att vara inom gränsen av respektive område.

5.1.2.2 Arbetstunnlar och depåtunnel

Resultat från stokastiska beräkningar för totalt inläckage i arbetstunnlar och depåtunnel redovisas i Figur 22. Längden och ekvivalent tunnelradie för arbetstunnlar och depåtunnel redovisas i Tabell 18 respektive Tabell 19. För Depåtunnel är beräknat totalt inläckage lägre än för övriga tunnlar. Detta kan förklaras av att grundvattentrycket ovan depåtunnel är ganska litet och varierar mellan 5–15 meter. Probabilitet densitetfunktion för beräknat inläckage för arbetstunnlar och depåtunnel redovisas i Figur 23.



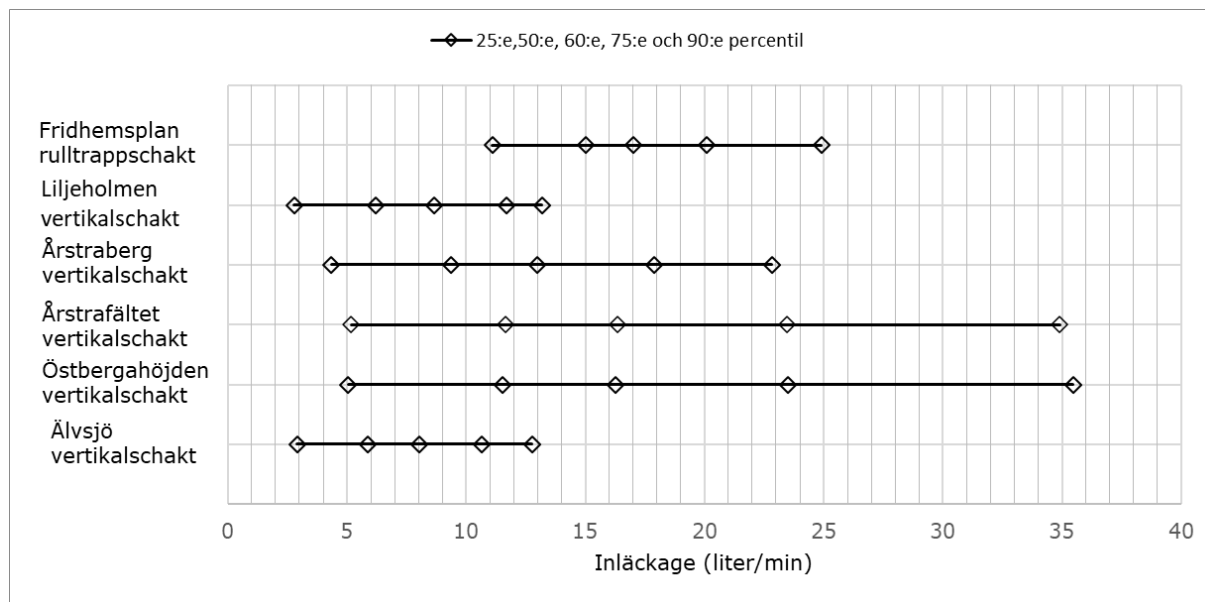
Figur 22. Fördelningar av totala inläckage för arbetstunnlar och depåtunnel efter 10 000 simuleringar.



Figur 23. Probabilitet densitetfunktion av beräknat totala inläckage för olika stationer. Område inom 1SD avser 68% och område inom 2SD avser 95% sannolikhet respektive att totala inläckage kommer att vara inom gränsen av respektive område.

5.1.3 Inläckage till vertikalschakter och rulltrappsschakt

Stokastiska beräkningar för inläckage för vertikalschakt har utförts för samtliga hisschakt. Geometri för hisschakt framgår av Tabell 20. Inläckage beräkningar för rulltrappsschakt utförts för station Fridhemsplan. Parametrisering för bergets ursprungliga konduktivitet (K_0), konduktivitet efter injektering (K_i), och injekterade zonens mäktighet (t) redovisas i avsnitt 4.3.2. Resultat från stokastiska beräkningar av inläckage för samtliga schakter redovisas i Figur 24. Samtliga hisschakt har 20 meter ytberg, däremot, varierar djupet för normalberg.



Figur 24. Fördelningar av inläckage för vertikalschakter och rulltrappsschakt efter 10 000 simuleringar och jämförelse med resultaten från deterministiska beräkningar.

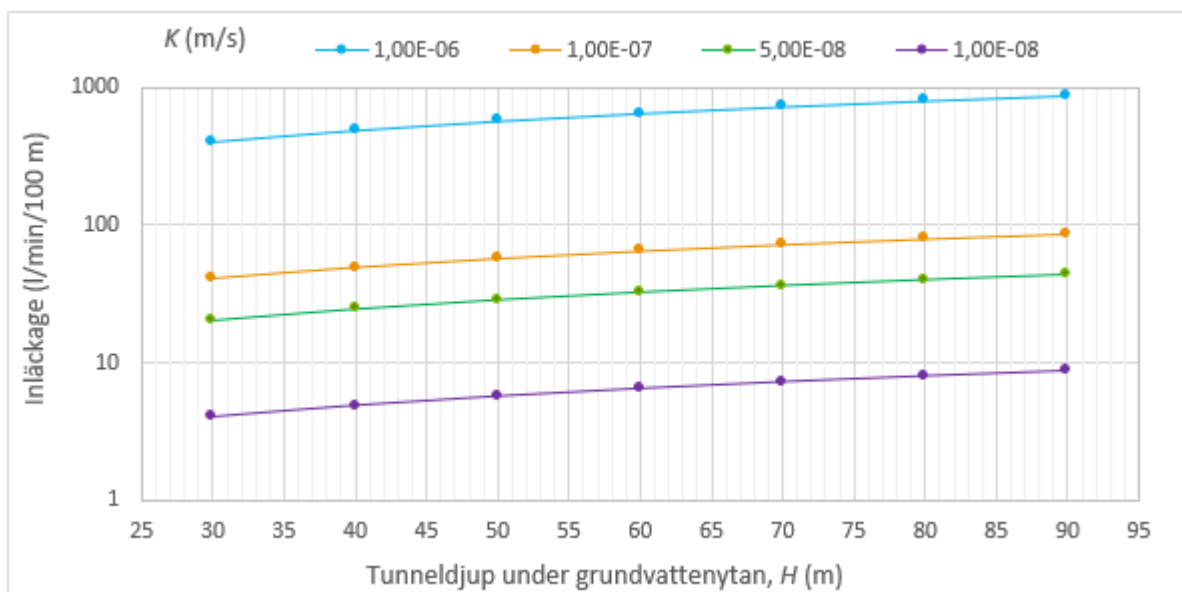
5.2 Resultat från deterministiska beräkningar

De planerade bergtunnlarna från Fridhemsplan till Älvsjö omfattar två enkelspårtunnlar, växelpartier, fläkt-tunnlar, tvärtunnlar, servicetunnlar och arbetstunnlar. De enkla spårtunnlarna kommer byggas med tunnelborrningsmaskin (TBM). Medan växelpartier, fläkt-tunnlar, tvärtunnlar, servicetunnlar, arbetstunnlar och själva stationsutrymmet kommer byggas med borra- och spräng. I samband med bergtunnlarna kommer ett antal vertikala schakter för hiss- och biljetthall, luftutbytes- och brandgasschakt samt schakt för TBM, montering och start utförs. Inläckageberäkning för TBM, borra- och spräng och vertikala schakter har gjort separat.

5.2.1 TBM-borrade spårtunnlar

Spår-linjen kommer byggas som två enkelspårtunnlar. Eftersom den andra spårtunneln kommer att drivas med en eftersläpning redovisas i beräkningen inläckage för en enkelspårtunnel. Tunneldiametern är cirka 7 meter och tunneldjupet varierar mellan cirka 30 och 80 meter under markytan.

Inläckage för TBM har beräknats utan tätning och gäller under byggskede. För att visa på bergförhållandenas betydelse för inläckaget vid olika tunneldjup har en separat beräkning gjorts, vilket redovisas i Figur 25. Beräknat inläckaget för TBM längs spår-linjen redovisas i Figur 26.



Figur 25. Beräknat inläckage för enkelspårtunnel [TBM] med olika hydrauliska konduktiviteter i injekterat berg och tunneldjup under grundvattenytan.

5.2.2 Borra-spräng tunnlar

5.2.2.1 Stationsutrymme

Bergtunnlar vid stationsutrymme (plattform, växel, servicetunnlar, starttunnlar och fläkttunnlar) ska byggas med relativt stor diameter (14–20 meter). Tunnlarna kommer byggas med metoden borrhning -och sprängning och med tätning/injektering. Inläckage för tunnlar har beräknats för respektive station. Beräkningen tar hänsyn till injekterade bergtunnlar. Beräknade inläckaget redovisas i Tabell 16. I redovisas beräknade inläckaget längs spårinjen.

Tabell 16. Beräknade inläckage för bergtunnlar vid stationsutrymme (plattform, växelpartier, fläkttunnlar, starttunnlar och servicetunnlar) borrhning och sprängning.

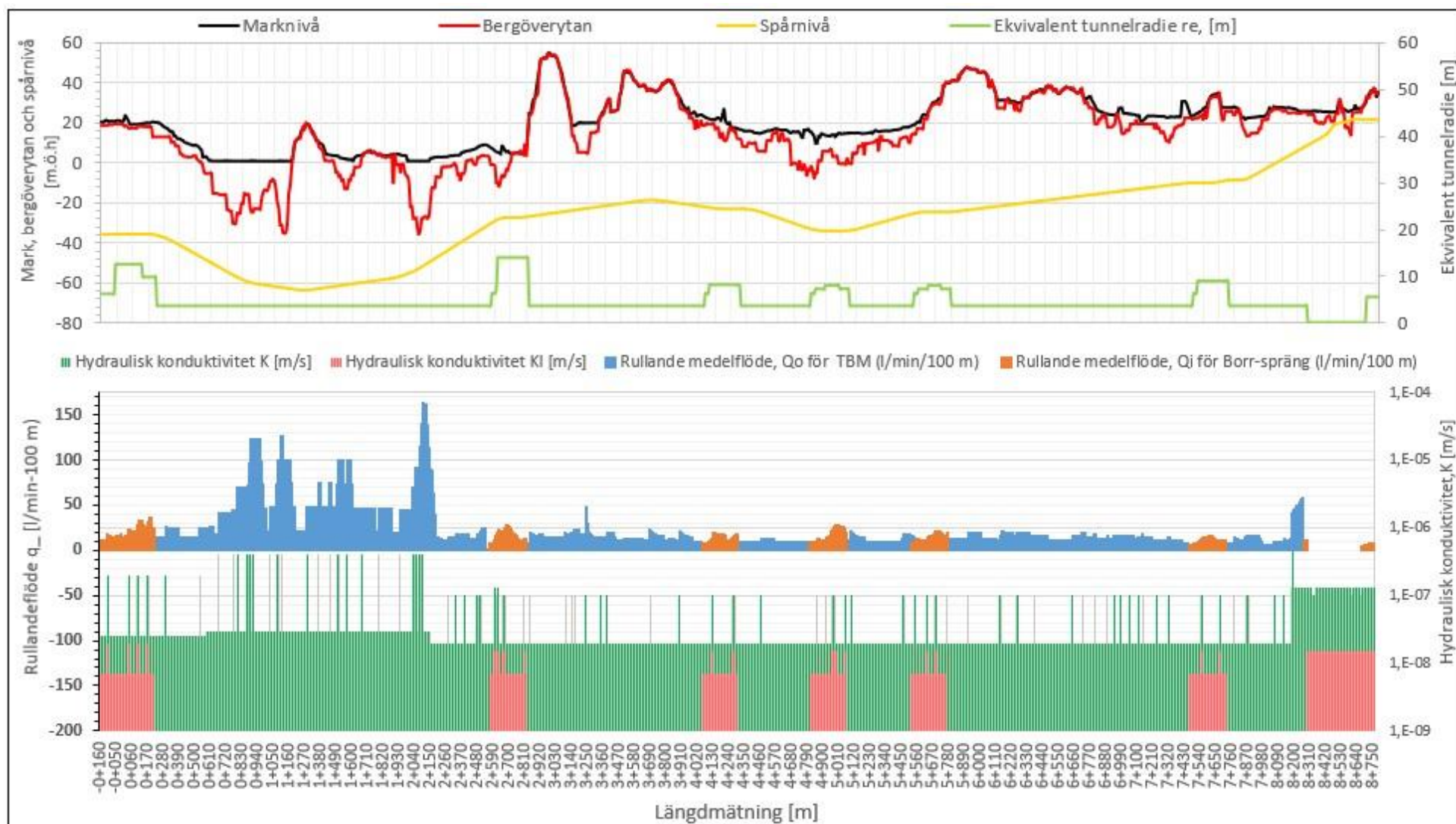
Station	Längdmätning start	Längdmätning slut	Längd (m)	Inläckage med injektering, (l/min)
Fridhemsplan	-0+160	0+220	380	86
Liljeholmen	2+575	2+830	255	47
Årstaberget	4+065	4+310	245	42
Årstafältet	4+815	5+070	255	49
Östbergahöjden	5+520	5+780	260	43
Älvsjö	7+475	7+720	245	35

5.2.2.2 Tvärtunnlar

Ett antal tvärtunnlar ska byggas längs spårinjen. Tvärtunnlarna kommer förbinda enkelspårtunnlarna. Antal tvärtunnlar är 19 och kommer byggas med cirka 300 meter mellanrum. Längd för varje tvärtunnel varierar mellan 13–20 meter och tunneldiameter är cirka 3,4 meter. Inläckage beräkning för tvärtunnlar utförs enligt Ekvation 14 och påverkan från huvudtunnlarna har inte betraktats. Inläckage för tvärtunnlar efter injektering har beräknats med två scenarier. Scenario 1 (låg hydraulisk konduktivitet ca $1,4 \times 10^{-8}$ m/s) och scenario 2 (hög hydraulisk konduktivitet ca $5,4 \times 10^{-8}$ m/s). Beräknat inläckage för samtliga tvärtunnlar redovisas i Tabell 17.

Tabell 17. Beräknade inläckaget för tvärtunnlar.

Tvärtunnel (nr)	Tunneldjup under grundvatten, h [m]	Inläckage efter injektering, Låg hydraulisk konduktivitet [l/min]	Inläckage efter injektering, hög hydraulisk konduktivitet [l/min]	Kommentar
1	50	3	11	
2	53	5	19	Under Riddarfjärden
3	62	5	21	Under Riddarfjärden
4	64	5	22	
5	63	5	21	
6	60	5	20	
7	54	5	19	Under Liljeholmsviken
8	41	2	10	
9	70	4	15	
10	43	3	11	
11	55	3	14	
12	45	3	10	
13	42	3	11	
14	42	2	10	
15	65	4	17	
16	50	3	13	
17	52	3	14	
18	36	2	10	
19	33	2	8	



Figur 26. Rullande medelflöde per 100 meter tunnelängd för TBM och borrning och sprängning jämfört med tunneldjup under mark och tunnelradie. Flöde för TBM är utan injektering och i byggskede. Flöde för borrning -och sprängning är med injektering och är för bygg-och driftskede.

5.2.2.3 Arbetstunnlar

Fyra arbetstunnlar planeras. Längd för arbetstunnlarna varierar från 190 till 580 meter. Diameter för arbetstunnlarna varierar mellan 7,6 och 8,8 meter. Inläckage för arbetstunnlarna har beräknats på liknande vis som för spårtunnlarna och redovisas i Tabell 18.

Tabell 18. Beräknat inläckage för arbetstunnlar.

Arbetstunnel	Tunnellängd, L [m]	Ekvivalent tunnelradie, r_t [m]	Inläckage med injektering, q [l/min]
Fridhemsplan, Lindhagensplan	530	4,4	55
Liljeholmen, Södertäljevägen	300	4,4	28
Årstaberg, Årstakrossen	580	4,4	47
Älvsjö IP:s grusplan	190	4,4	29

5.2.2.4 Vändspår till Depå

En bergtunnel (8+680 till 8+770), cirka 90 meter lång med ekvivalenttunnelradie cirka 5,5 meter, planeras vid depån. Inläckage för depåtunneln har beräknats på liknande vis som för spårtunnlarna (borrning och sprängning). Beräknat inläckage redovisas i Tabell 19.

Tabell 19. Beräknade inläckage för depåtunnel.

Anläggning	Tunnellängd [m]	Ekvivalenttunnelradie, r_t [m]	Inläckage med injektering, q [l/min]
Bergtunnel vid depåområde	90	5,5	8

5.2.3 Inläckage till schakter

Ett antal vertikala schakter för hiss och biljetthall, rulltrappschakt, brandgasschakt luftutbytesschakt och schakt för att montera och starta TBM ska utföras längs spårlinjen. De vertikala schakterna för hiss, biljetthall och rulltrappschakter kommer utföras vid stationsuppgången medan de andra schakterna ska placeras längs med spårlinjen. Hiss, brandgasschakt och luftutbytesschakterna ska utföras från markytan till plattformen eller tunneltak. Schakter för biljetthall är några meter under markytan.

5.2.3.1 Biljetthall hiss- och rulltrappschakt

Vid Fridhemsplan ansluter stationen till befintlig station via ett rulltrappschakt. För övriga stationer byggs en biljetthall med anslutande vertikalschakt ned till plattformsutrymmet. Schaktens tvärsnittsareor och djup redovisas tillsammans med beräknat inläckage i Tabell 20 nedan. Beräkningen är utförd enligt Ekvation 15, vilket redovisades i avsnitt 4.1 ovan. Redovisat beräknat inläckage gäller i driftskedet och avser inläckage för schaktets del i berg.

Tabell 20. Beräknade inläckage för biljetthall, hiss- och rulltrappschakter. Beräknade inläckage är i driftskede och från berg, inläckage från jordschakt i driftskede antas noll. Inläckage mellan betongkonstruktion och berg ingår inte i detta.

Anläggningsdel	Ekvivalentschaktradie, re [m]	H [m]	Inläckage med tätning, q (l/min)	Anteckning
Station Fridhemsplan	7	40	15	Rulltrappschakt
Station Liljeholmen	11	30	8	Biljetthall- och hisschakt
Station Årstaberget	15	37	13	Biljetthall- och hisschakt
Station Årstafältet	14	47	17	Biljetthall- och hisschakt
Station Östbergahöjden	13	49	16	Biljetthall- och hisschakt
Station Älvsjö	11	35	8	Biljetthall- och hisschakt

5.2.3.2 Luftutbytesschakt och brandgasschakter

Ett antal luftutbytesschakt och brandgasschakter planeras längs spårlinjen. Schaktdjupet antas från markytan till spåret. Tvärsnittarea för luftutbytesschaktet är cirka 12 m² och för brandgasschakter är det cirka 25 m². Beräknade inläckaget för luftutbytesschakter och brandgasschakter redovisas i Tabell 21.

Tabell 21. Beräknade inläckaget luftutbytesschakter och brandgasschakter. Beräknade inläckage är i driftskede och från berg, inläckage från jordschakt i driftskede antas noll. Inläckage mellan betongkonstruktion och berg ingår inte i detta.

Anläggningsdel	Ekvivalentschaktradie, re [m]	Djup under grundvatten, H [m]	Inläckage med injektering, q [l/min]
Luftutbytesschakt Fleminggatan	4,5	52	15
Brandgasschakt Fridhemsgatan	2,3	51	10
Luftutbytesschakt Liljeholmsstranden	2,3	47	15
Luftutbytesschakt Hägerstensvägen	2,3	41	7
Luftutbytesschakt Sjöviksbacken	2,3	58	11
Brandgasschakt Årsta Skolgränd	2,4	42	7
Luftutbytesschakt Östbergavägen	3,1	44	12
Luftutbytesschakt Östbergabackarna	2,3	60	12
Luftutbytesschakt Åbyvägen	2,3	37	6

5.2.3.3 TBM-start och depå

Schakter för TBM start och betongtunnlar är planerade vid depå. Schakt för TBM, montering och start blir cirka 170 meter långt och cirka 25 till 35 meter brett. Schaktdjupet ansätts till cirka 15 meter under markytan och går ned i både jord och i berg. Söder om schakt för TBM montering och start anläggs ett schakt för spår upp till själva depåbyggnaden som anläggs i samma del av området som TBM schaktet. Depåschakten inleds med schakt för en betongtunnel, cirka 230 meter lång och 20 meter bred. Schaktdjup antas cirka 8 meter under markytan. Därefter följer en bergtunnel in i anslutande bergshöjd inom Hagsåtrareservatet. Inläckage för placering av

startgrop för TBM och betongtunnel har beräknats separat. Beräknade inläckage redovisas i Tabell 22.

Tabell 22. Beräknade inläckage för TBM start och depåschakter.

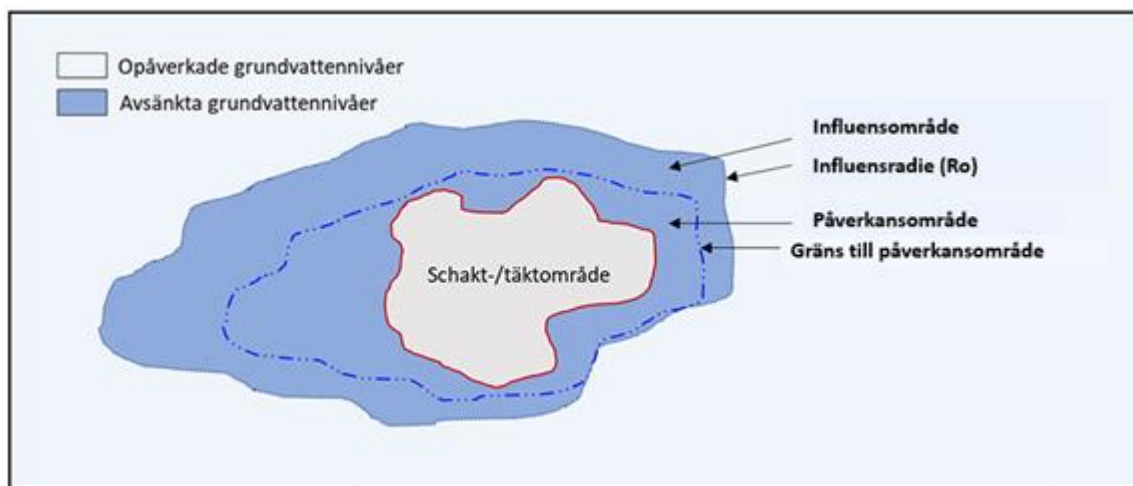
Anläggningsdel	Djup under grundvatten, H[m]	Inläckage med tätning i byggskede (l/min)	Inläckage med tätning i driftskede (l/min)
TBM, schakt för montering och start, station Älvsjö	14	24	ca 4 (till betongtunnlar)
Depåschakt söder om schakt för montering och start av TBM	8	18	ca 4 (till betongtunnlar)

6 Beräkning av grundvattenpåverkan

Beräkning av influensradie och påverkansområde har gjorts för att bedöma grundvattenpåverkan. Influensradie (R_0) definieras som avstånd inom vilket grundvattennivån sjunker till följd av ett grundvattenuttag eller en grundvattenbortledning. Influensområde är det område inom vilket grundvattennivåerna sänks till följd av vattenverksamheten. Påverkansområde definieras som det område inom vilket ändringen i grundvattennivå kan orsaka skador på befintliga byggnader och anläggningar. Den principiella skillnaden mellan influensradie, influensområde och påverkansområde redovisas i Figur 27.

Influensområdets utbredning för planerade tunnlar och tillhörande anläggningar beräknas med analytiska metoder. Beräkningsmetoden bygger på flödesbalans (Ekvation 16) mellan inläckage (q) och grundvattenbildning (W) inom ett influensområde. Metoden bygger på principen att inläckaget till en undermarksanläggning motsvaras av grundvattenbildningen inom ett visst influensområde (se Ekvation 16).

I beräkningen ansatts ett gränsvillkor på 0,3 meter avsänkning ($R_{0,3}$), vilket är en avsänkning som vanligen anses som rimlig för att beräkna ett påverkansområde för vertikala schakter. Påverkansområde för bergtunnlar beräknas till noll meter avsänkning (R_0). Påverkansområde på 0,3 meter avsänkning ($R_{0,3}$), för bergtunnlarna hänvisas till Bilaga C3, Grundvattenmodellering.



Figur 27. Principskiss för influensradie, influensområde och påverkansområde (efter SGU:s modell).

Beräkning av influensområde för bergtunnlar och vertikala schakter har gjorts separat. Beräkning av influensområde för vertikala schakter har utförts enligt Lembkes (1886), Ekvation 16. Beräkningsmetoden tar hänsyn till grundvattentrycksänkning (H), hydraulisk konduktivitet (K) och grundvattenbildning (W). Princip för beräkningsmetoden är enligt Figur 14 (se kapitel 4).

$$Ro = H \sqrt{\frac{k}{2 \times w}} \quad \text{Ekvation 16}$$

K *Hydraulisk konduktivitet [m/s]*
 H *Grundvattentrycksänkning [m]*
 Ro *Influensområde [m]*
 W *Grundvattenbildning [m³/s]*

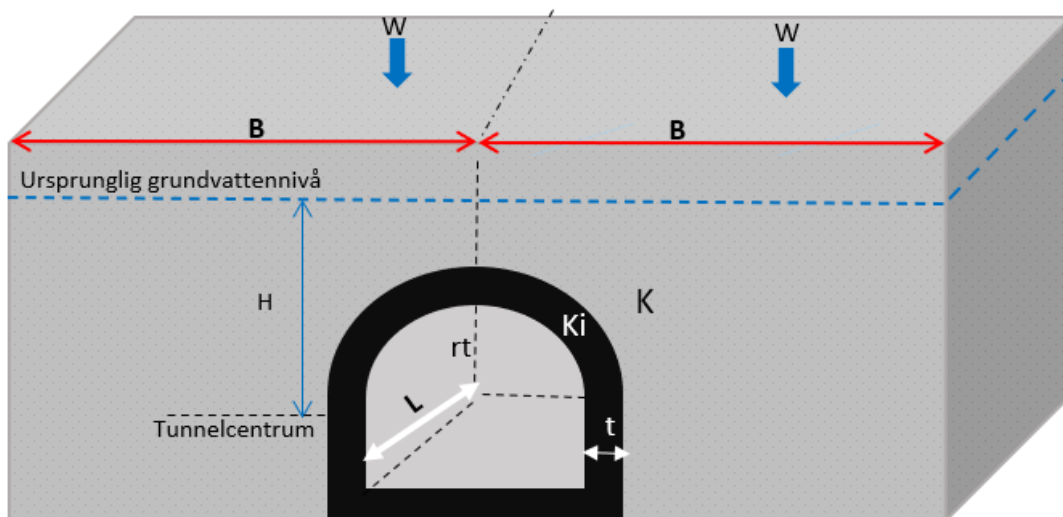
Influensområde för TBM-tunnlar i byggskede och för borrhning- och sprängning tunnlar i bygg och driftsskede har beräknats med Ekvation 18 (cirkulärt flöde). Influensområde för TBM-tunnlar i driftsskede har beräknats med Ekvation 19 (flöde perpendikulärt mot tunnel). Princip för beräkning av influensområde för tunnlar redovisas i Figur 28.

$$q = A \times W \quad \text{Ekvation 17}$$

$$Ro = \sqrt{\frac{q}{\pi \times w}} \quad \text{Ekvation 18}$$

$$B = \frac{q}{2 \times L \times W} \quad \text{Ekvation 19}$$

q *Inläckage [m³/s]*
 K *Hydraulisk konduktivitet [m/s]*
 Ro *Influensradie [m]*
 A *Area för påverkansområde [m²]*
 L *Tunnel längd [m]*
 B *Påverkansavstånd transversellt mot tunneln [m]*
 W *Grundvattenbildning [m³/s]*



Figur 28. Princip för beräkning av påverkansområde från bergtunnlar.

Påverkansområde ($R_{o,3}$) har beräknats enligt Theis (1935), Ekvation 20. Konceptuell modell för beräkningsmetoden redovisas i Figur 14.

$$S = S_w \left[1 - \frac{\ln(r/re)}{\ln(R_o/re)} \right] \quad \text{Ekvation 20}$$

S	<i>Avsänkning vid schaktet [m]</i>
S_w	<i>Avsänkning på avstånd av r från schaktet [m]</i>
R_o	<i>Influensradie [m]</i>
r	<i>Avstånd från schaktkanten [m]</i>
r_e	<i>Ekvivalent schaktradie [m]</i>

Indata för beräkningarna är baserat på utförda undersökningar och erfarenheter från tidigare utförda projekt i närområdet. Bergets hydrauliska konduktivitet är baserat på resultat från vattenförlustmätningar, se Tabell 14 (avsnitt 4.4). Hydraulisk konduktivitet av jordmagasin är baserat på resultat från siktanalyser och slugtester. Hydrauliska konduktivitet för jordmagasin cirka 2×10^{-5} m/s har använts i beräkningen. Grundvattentrycksänkning (H) antas som vertikalt avstånd mellan ursprunglig grundvattennivå och schaktbottennivå-/tunnelcentrum. Grundvattenbildning (W) inhämtats från vattenbalansberäkning (se kapitel 3). Sponttätheten antas cirka 1×10^{-8} m/s.

6.1 Influensområde för bergtunnlar

Influensområdets för bergtunnlar styrs av olika faktorer, såsom grundvattenbildning, tunneldjup och hydraulisk konduktivitet. För att hantera de faktorerna har influensområdets utbredning beräknats med ett antal scenarier. Det vill säga att beräkningen har gjort för olika tunneldjup, hydraulisk konduktivitet och grundvattenbildning. Tunneldjup under grundvatten (H) cirka 30, 40, 50, 60, 70, 80 och 90 meter har valts för denna beräkning. Grundvattenbildningen (W) cirka 50, 100 och 150 mm/år har använts i beräkningen. Hydraulisk konduktivitet för oinjekterade berg cirka 1×10^{-6} m/s, 1×10^{-7} m/s och 1×10^{-8} m/s har använts i beräkningen. Hydraulisk konduktivitet för injekterade berg har ansatts till cirka 1×10^{-7} m/s, 1×10^{-8} m/s och 1×10^{-9} m/s. Separat beräkning av influensområde har gjort för TBM och borrning och sprängning. Beräknade influensområde för respektive scenarier är per 100 meter tunnellängd. Påverkansområde för bergtunnlar beräknas till noll meter avsänkning (R_o).

6.2 Influensområde för bergtunnlar

6.2.1 Influensområde för TBM

Beräkning av influensområde för TBM har gjorts för bygg och driftsskede. Beräkning av influensområde i byggskede tar hänsyn till oinjekterade bergtunnlar och utan lining. Beräkningen har utförts med olika scenarier. Det vill säga att beräkningen har utförts med olika hydraulisk konduktivitet (K) och olika grundvattenbildning (W). Beräkning av influensområde i driftsskede tar hänsyn till injekterade bergtunnlar och med lining. Inläckage från TBM i driftsskede antas vara cirka 1 l/min/100 meter per tunnelrör. Beräknade influensradie i bygg och driftsskede redovisas i Tabell 23 och Tabell 24.

Tabell 23. Beräknat influensområde för TBM i byggskede.

Tunneldjup under grundvatten, H (m)	Influensområde, R_o [m]								
	$K=1 \times 10^{-6}$ $W=50$	$K=1 \times 10^{-6}$ $W=100$	$K=1 \times 10^{-6}$ $W=150$	$K=1 \times 10^{-7}$ $W=50$	$K=1 \times 10^{-7}$ $W=100$	$K=1 \times 10^{-7}$ $W=150$	$K=1 \times 10^{-8}$ $W=50$	$K=1 \times 10^{-8}$ $W=100$	$K=1 \times 10^{-8}$ $W=150$
30	1157	818	668	366	259	211	116	82	67
40	1273	900	735	402	285	232	127	90	73
50	1375	972	794	435	307	251	137	97	79
60	1466	1037	847	464	328	268	147	104	85
70	1550	1096	895	490	347	283	155	110	89
80	1628	1151	940	515	364	297	163	115	94
90	1701	1202	982	538	380	310	170	120	98

K i m/s och W i mm/år

Tabell 24. Beräknat influensområde för TBM i driftsskede.

Scenarier	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
	$W=50$ mm/år, $q=2$ l/min	$W=100$ mm/år, $q=2$ l/min	$W=150$ mm/år, $q=2$ l/min
Influensradie, R_o [m]	105	53	35

6.2.2 Influensområde för borrhning och sprängning tunnlar

Beräkning av influensområde för borrhning och sprängning av tunnlar har gjorts med hänsyn till injekterade bergtunnlar (K_i). Influensområde för borrhning och sprängning av tunnlar i bygg och driftsskede antas vara samma. Beräknat influensområde för olika hydraulisk konduktivitet, olika tunneldjup, och grundvattenbildning redovisas i Tabell 25.

Tabell 25. Beräknat influensområde för borrhning spräng i bygg och driftsskede.

Tunneldjup under grundvatten, H [m]	Influensområde, R_o [m]								
	$K=1 \times 10^{-6}$, $K_i=1 \times 10^{-7}$ $W=50$	$K=1 \times 10^{-6}$, $K_i=1 \times 10^{-7}$ $W=100$	$K=1 \times 10^{-6}$, $K_i=1 \times 10^{-7}$ $W=150$	$K=1 \times 10^{-7}$, $K_i=1 \times 10^{-8}$ $W=50$	$K=1 \times 10^{-7}$, $K_i=1 \times 10^{-8}$ $W=100$	$K=1 \times 10^{-7}$, $K_i=1 \times 10^{-8}$ $W=150$	$K=1 \times 10^{-8}$, $K_i=1 \times 10^{-9}$ $W=50$	$K=1 \times 10^{-8}$, $K_i=1 \times 10^{-9}$ $W=100$	$K=1 \times 10^{-8}$, $K_i=1 \times 10^{-9}$ $W=150$
30	708	501	409	159	112	92	71	50	708
40	834	590	481	190	135	110	83	59	834
50	939	664	542	217	153	125	94	66	939
60	1029	728	594	240	170	139	103	73	1029
70	1111	785	641	261	184	151	111	79	1111
80	1185	838	684	280	198	161	118	84	1185
90	1254	886	724	297	210	172	125	89	1254

K i m/s och W i mm/år

6.3 Påverkansområde för stationer och vertikala schakter

Beräkning av påverkansområde för stationer och vertikala schakter för luftutbyte-och brandgasschakter samt TBM-etablering och betongtunnlar har gjorts separat. Beräkning av influensområde vid stationer tar hänsyn till samtliga schakter inom stationsutrymme, dvs plattform, fläkttunnlar, servicetunnel, hiss- och biljetthall schakter. Beräknade påverkansområde redovisas i Tabell 26 till Tabell 28.

Tabell 26. Beräknade påverkansområde för stationer (plattform, fläkttunnlar, servicetunnel, hiss- och biljetthall schakter).

Anläggningsdel	Påverkansområde, $R_{0,3}$ [m] [Byggskede]	Påverkansområde, $R_{0,3}$ [m] [Driftskede]
Station Fridhemsplan	574	574
Station Liljeholmen	540	450
Station Årstaberget	488	417
Station Årstafältet	539	4457
Station Östbergahöjden	546	440
Station Älvsjö	344	284

Tabell 27. Beräknade påverkansområde för luftutbyte- och brandgasschakter.

Anläggningsdel	Påverkansområde, $R_{0,3}$ [m] Byggskede	Påverkansområde, $R_{0,3}$ [m] Driftskede
Luftutbytesschakt Flemminggatan	198	187
Brandgasschakt Fridhemsgatan	179	179
Luftutbytesschakt Liljeholmsstranden	235	176
Luftutbytesschakt Hägerstensvägen	160	160
Luftutbytesschakt Sjöviksbacken	189	189
Brandgasschakt Årsta Skolgränd	152	152
Luftutbytesschakt Östbergavägen	196	164
Luftutbytesschakt Östbergabackarna	193	193
Luftutbytesschakt Åbyvägen	110	110

Tabell 28. Beräknade påverkansradie för TBM-etablering och betongtunnlar schakter.

Anläggningsdel	Påverkansområde, $R_{0,3}$ [m] Byggskede	Påverkansområde, $R_{0,3}$ [m] Driftskede
TBM, schakt för montering och start	217	-
Depåschakt söder om TBM, schakt för montering och start	172	-

7 Referenser

- Creutz, M., Eriksson, M., Janson, T., & Zetterlund, M. (2017). *Enhetlig modell för projektering av berginjektering - Underlagsrapport*. Stockholm: BeFo Rapport 167.
- Eriksson, M., & Stille, H. (2005). *Cementinjektering i hårt berg*. Stockholm: SveBeFo.
- Fransson, Å. (2001). *Characterisation of fractured rock for grouting using hydrogeological methods. Doktorsavhandling*. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola.
- Gustafson, G. (2012). *Hydrogeology for rock engineers*. Gothenburg: BeFo.
- Lembke, K. E. (1886). Groundwater flow and the theory of water collectors (in Russian). *J. of the Ministry of Communications, no 2, 1886 and nos. 17-19, 1887*.
- Moye, D. G. (1969). Diamond drilling for foundation exploration. *Civil engineering Transactions Vol. CE 9, No 1*.
- Stille, B. (2016). *Grouting theory and grouting practice. Distribution of hydraulic properties and rock mass response with regards to grouting aspects and seepage into tunnels. Licentiate thesis*. , Sweden: Chalmers University of Technology.
- Stille, H. (2015). *Rock Grouting - Theories and Applications*. Stockholm: BeFo.
- Theim, G. (1906). *Hydrological methods*. Stuttgart, Germany: University of Stuttgart.
- Theis, C. (1935). The Relation between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Groundwater Storage. *Transactions on American Geophysical Union*, (ss. 518-524). Washington DC.

Tunnelbana mellan Fridhemsplan och Älvsjö är ett samverkansprojekt mellan staten, Stockholms stad och Region Stockholm. Regionen har i uppdrag att planera och bygga den nya tunnelbanelinjen. Linjen är fristående och därför behövs en ny depå byggas där tågen kan underhållas och ställas upp. Byggtiden beräknas vara cirka nio år.