

Ostlänken

Beräkningar

Delområde Stavsjö-Böksjö, Kolmårdstunneln och Malmölandet-Loddby

Nyköpings kommun, Södermanlands län

Norrköpings kommun, Östergötlands län

Bilaga D.2.2 till PM Yt- och grundvatten

2024-04-16



Dokumenttitel: Beräkningar, Delområde Stavsjö-Böksjö, Kolmårdstunneln och Malmölandet-Loddby
Skapat av: Sweco
Ärendenummer: TRV 2017/112658
Dokumentdatum: 2024-04-16
Namn i PDBi: OLP2-04-025-21-0_0-7703
Version: _

Innehåll

1. Inledning.....	4
2. Hydraultester.....	4
2.1. Falling head och slugtest.....	4
2.2. Provpumpning.....	7
2.3. Vattenförlustmätningar	8
3. Analytiska beräkningar av inläckage, utredningsområde och påverkansområde	10
3.1. Utredningsområde.....	10
3.2. Påverkansområde Skärningar	12
3.3. Brostöd och övriga anläggningar	36
3.4. Kolmårdstunneln	41
4. Grundvattenmodell Kolmårdstunneln.....	63
4.1. Inledning och syfte	63
4.2. Metod.....	66
4.3. Geologiska förutsättningar och modelldomän	67
4.4. Hydrogeologiska förutsättningar	71
4.5. Beräkningsmodell.....	75
4.6. Simuleringar	81
4.7. Resultat.....	84
4.8. Flödesvägar	94
4.9. Diskussion	98
4.10. Slutsats.....	99
5. Grundvattenmodell Bådstorp.....	99
5.1. Inledning och syfte	99
5.2. Geologiska förutsättningar	101
5.3. Hydrogeologiska förutsättningar	102
5.4. Kända parametrar och antaganden	103
5.5. Beräkningsmodell.....	105
5.6. Resultat	110
5.7. Diskussion.....	111
6. Referenser.....	112

1. Inledning

Denna PM beskriver hur beräkningar av hydrologiska egenskaper samt uppskattning av påverkansområde tillhörande PM Yt- och Grundvatten har utförts. Den går igenom vilka indata som använts, motiv till valda metoder, samt resultat för delsträckan Stavsjö-Loddbby.

Syftet med bilagan är att vara ett tekniskt underlag till de bedömningar om påverkan som sker av grundvattenavsänkningarna för delsträckan Stavsjö-Loddbby. Dokumentet ska, vid sidan om resultatet, främst tydliggöra hur påverkansberäkningar i grundvatten tagits fram. Påverkansområde används i sin tur för att ge underlag för att bestämma sakägarområdet.

Dokumentet börjar med att beskriva viktiga hydrogeologiska undersökningar längs med delsträckan (kapitel 2). Därefter beskrivs de analytiska beräkningarna av inläckage och påverkansområde (kapitel 3). Sist beskrivs de grundvattenmodeller som tagits fram för tunneln under Kolmården och skärningen vid Bådstorp (kapitel 4), där omständigheterna är för komplexa för att analytiska beräkningar ska räcka till.

2. Hydraultester

I detta kapitel redovisas metod och tolkning av de hydraultester som har utförts av Trafikverket inom ramen för systemhandlingsprojektering och framtagande av underlag till tillståndsansökan för vattenverksamhet. Hydraultesterna ger de hydrogeologiska egenskaper som krävs i en analytisk och numerisk modell för att beräkna inläckage och påverkan.

2.1. Falling head och slugtest

2.1.1. Metod

Hydrauliska tester av typen falling head samt slugtest har utförts i 51 punkter varav 41 har kunnat utvärderas. Syftet är att belysa jordens genomsläpplighet lokalt runt teströret. Testerna utfördes genom att en volym vatten momentant fylldes i ett grundvattenrör, alternativt användes en slug. Förändringen av vattennivå i röret mättes med en tryckgivare, nedsänkt i grundvattenröret. Tryckgivaren togs upp ur röret när grundvattennivån återhämtat sig till ursprungsnivå. Testerna genomfördes mellan 2016-04-14 och 2018-11-22. Resultatet har utvärderats med hjälp av programmet AQTESOLV Pro 4.0, enligt metod av Cooper-Bredehoeft-Papadopulos i första hand. Om denna metod inte varit representativ har annan metod använts, vilket framgår av kommentarsfältet i Tabell 1.

Metoden och utförandet ger enbart en lokal (meter-skala) uppskattning av genomsläppligheten runt rörets filterdel.

2.1.2. Resultat

Resultaten från utvärdering av hydrauliska tester i grundvattenrör sammanfattas i Tabell 1. Genomsläppligheterna (K) är små till måttligt stora, vilket indikerar liten till måttligt stor påverkan.

Tabell 1. Resultat av hydrauliska tester (falling head) utförda i grundvattenrör. I tabellen anges ID, borrhålstyp, jordart vid filter, magasintyp, utvärderad hydraulisk konduktivitet (K) och eventuell kommentar.

ID	Borrhålstyp	Jordart vid filter	Utvärderat som (öppet/slutet)	K [m/s]	Lösning och kommentar
15S113GU	2"		Slutet	$1,4 \cdot 10^{-5}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
15S122GU	2"		Slutet	$4,2 \cdot 10^{-4}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
16S114GU	2"			-	Torrt
16S115GU	2"		Slutet	$1,1 \cdot 10^{-5}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
16S116GU	2"		Slutet	$2,1 \cdot 10^{-6}$	Bouwer-Rice
16S117GU	2"		Slutet	$2,4 \cdot 10^{-6}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
16S119GU	2"		Slutet	$3,3 \cdot 10^{-5}$	Bouwer-Rice
16S122GU	2"		Slutet	$6,4 \cdot 10^{-6}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
16S124GU	2"			-	Rör ur funktion
16S126GU	2"			-	Torrt
16S127GU	2"		Slutet	$1,0 \cdot 10^{-4}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
16S131GU	2"			-	Stopp i röret
16S134GU	2"	Si Gr	Slutet	$6,0 \cdot 10^{-6}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
16S135GU	2"	Gr Sa Si	Slutet	$2,2 \cdot 10^{-7}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
17S113GU	2"	si le st Gr	Slutet	$2,3 \cdot 10^{-5}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
17S115GU	2"		Slutet	$4,3 \cdot 10^{-7}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
17S116GU	2"	si sa Gr	Slutet	$6,7 \cdot 10^{-6}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
17S122BR	4"		Slutet	$5,5 \cdot 10^{-7}$	Brunn, återhämtning. Theis
17S140GU	2"	si sa gr	Slutet	$6,7 \cdot 10^{-6}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
17S141GU	2"	gr sa le Si		-	Stopp i röret
17S144GU	2"			$1,3 \cdot 10^{-6}$	Bouwer-Rice. Dålig kurvpassning.

ID	Borrhålstyp	Jordart vid filter	Utvärderat som (öppet/slutet)	K [m/s]	Lösning och kommentar
17S149GU	2" plast		Slutet	$1,4 \cdot 10^{-7}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
17S150GU	2"	Inget material	Slutet	$1,9 \cdot 10^{-6}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
20S101GU	2"		Slutet	$6,2 \cdot 10^{-5}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
20S102GU	2"		Öppet	$4,9 \cdot 10^{-5}$	Bouwer-Rice
22S102GU	2"	st Gr	Slutet	$1,4 \cdot 10^{-4}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
22S103GU	2"	st Gr	Slutet	$4,8 \cdot 10^{-3}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos, Mycket snabb respons. Slug ut.
22S104GU	2"	gr Sa	Slutet	$3,2 \cdot 10^{-5}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
22S105GU	2"	Sa	Slutet	$8,4 \cdot 10^{-10}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos, Röret är igensatt, utv. skall ej användas.
22S106GU	2"	si sa Gr	Slutet	$9,5 \cdot 10^{-5}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
22S107GU	2"	gr Sa	Slutet	$8,6 \cdot 10^{-5}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
22S108GU	2"	gr G Sa	Slutet	$9,0 \cdot 10^{-4}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos, Mycket snabb respons. Slug in.
22S109GU	2"	(si) F sa	Slutet	$2,3 \cdot 10^{-8}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
22S110GU	2"	st si F sa	Slutet	$4,5 \cdot 10^{-8}$	Hvorslev, Dålig kurvpassning. För lite vattenpelare för att kunna göra om med slug.
22S111GU	2"	sa Gr	Slutet	$5,7 \cdot 10^{-5}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
22S113GU	2"	sa Gr	Slutet	$2,0 \cdot 10^{-3}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos, Mycket snabb respons. Slug ut.
22S114GU	2"	si sa Gr	Slutet	$1,8 \cdot 10^{-5}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos, Ganska snabb. Slug in.
22S117GU	2"	sa Gr	Slutet	$1,1 \cdot 10^{-4}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos, Snabb respons. Slug in.
22S118GU	2"	grSa	Slutet	$1,1 \cdot 10^{-2}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos, Mycket snabb respons. Slug in.

ID	Borrhålstyp	Jordart vid filter	Utvärderat som (öppet/slutet)	K [m/s]	Lösning och kommentar
22S119GU	2"	si Gr	Slutet	$3,8 \cdot 10^{-6}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
22S120GU	2"	Si Ti	Slutet	$3,8 \cdot 10^{-9}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
22S121GU	2"	grSaTi	Slutet	$2,1 \cdot 10^{-6}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
22S123GU	2"	(clsi)Fsa	Slutet	$1,7 \cdot 10^{-6}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos
22S124GU	2"	grSa	Slutet	$1,3 \cdot 10^{-4}$	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos, Ganska snabb. Slug ut.
9501	2"			-	Röret återhämtar sig inte

2.2. Provpumpning

2.2.1. Metod

Provpumpning är utförd i en punkt, 17S122BR, under perioden 2017-06-02 till 2017-06-15. Brunnen placerades centralt i den planerade skärningen vid Bådstorp. Filtret är placerat i ett öppet magasin, i den undre av två ändmoräner. För provpumpningen installerades en brunn med filterbotten på nivå +2 meter och filtertopp i nivå +6 meter, med 4 meter, 0,5 millimeter Johnson-filter utanför ett formationsfilter.

Provpumpningen var av typen constant head, vilket betyder att brunnen pumpas till en fast grundvattennivå som sedan bibehålls under hela provpumpningen. I detta fall sänktes först grundvattennivån till +8,5 meter i 7 dagar. Sedan sänktes grundvattennivån till +4,5 meter i 6 dagar. Det motsvarar 7,3 meter respektive 11,3 meters avsänkning från naturlig nivå innan start. Maxflödet under provpumpningen uppgick till cirka 3 l/min.

Övervakning utfördes i totalt 11 punkter utöver brunnen. Övervakningen skedde i en 270 meters radie ut från brunnen i två vinkelräta linjer, samt i en punkt 430 meter från brunnen.

Provpumpningen och dess resultat finns mer noggrant beskrivet i MUR Hydrogeologi (Trafikverket, 2021).

2.2.2. Resultat

Resultaten från utvärdering av provpumpning visas i Tabell 2.

Utvärderingen visar inget tydligt beroende av riktning och djup för hydraulisk konduktivitet. På grund av den låga hydrauliska konduktiviteten var påverkan vid provpumpningen mycket begränsad och absoluta majoriteten av avsänkning, >90%, skedde inom 25 meter från uttagsbrunnen, vilket försvårar möjligheten att dra slutsatser om geologiska formationens hydrauliska konduktivitet på en större skala. Det maximala pumpflödet på 3 l/min ger dock i sig en uppfattning om storleken av flöden som kan

förväntas vid måttliga avsänkningar från pumpning i små schakter i denna typ av morän.

Tabell 2. Resultat från provpumpning, I tabellen anges ID, borrhålstyp, utvärderad hydraulisk konduktivitet (K).

ID	Borrhålstyp	K [m/s]
17S122BR	139 mm brunn	$5,5 \cdot 10^{-7}$

2.3. Vattenförlustmätningar

2.3.1. Metod

Syftet med vattenförlustmätningar är att få kännedom om bergets genomsläpplighet för vatten i liten skala. Efter avslutad kärnborrning utförs vattenförlustmätningar med enkel- och dubbelmanschett. Vattenförlustmätningar är utförda i 3- eller 5-meterssektioner, samt hel- och halvhål. Vattenförlustmätningar har utförts i totalt 20 kärn- eller hammarborrhål.

Två olika metoder har använts för vattenförlustmätningar beroende på vilken noggrannhet som eftersöks. Där en högre noggrannhet eftersök så har WIC-utrustning använts, och i lägen där en lägre noggrannhet räcker så har mer konventionell metod använts.

Water Injection Control (WIC)

Vattenförlustmätningar med dubbelmanschett och enkelmanschett med en lägsta mätgräns på 2 ml/min. Mätningar med dubbelmanschett genomförs i ett trycksteg och mätningar genomförs under 15 minuter med 2 bars övertryck i mätsektionen. Mätningar med enkelmanschett genomförs för hela hålet samt för halva hålet. Dessa tester genomförs i 3 trycksteg per test med 2, 5 och slutligen 2 bars övertryck. Varje trycksteg är minst 5 minuter. För dubbelmanchettmätningar så har sektioner med en längd av 3 meter använts.

Mätgränsen för flöde motsvarar värde för hydraulisk konduktivitet av cirka $4 \cdot 10^{-10}$ m/s för 3-meters sektion med övertryck 2 bar.

I vissa borrhål har inte mätgränsen på 2 ml/min kunnat mötas. Där är istället lägsta mätgränsen 5 ml/min, vilket motsvarar ett värde för hydraulisk konduktivitet av $9 \cdot 10^{-10}$ m/s vid övertryck 2 bar på en 3-meters sektion.

Konventionell metod

För den konventionella metoden så används också enkelmanschett för hel- och halvhålmätningar, samt dubbelmanschetter för kortare sektioner. Sektionslängden har i dessa mätningar varit 5 meter och den undre mätgränsen för använd utrustning är 130 ml/min. I den konventionella metoden har ett specifikt sluttryck varit svårare att uppnå, men riktvärdet har varit 2-3 bars övertryck. Mätningen för varje sektion har pågått tills jämnt tryck och flöde uppnåtts i 10 minuter. Mätgränsen för flöde motsvarar värde för hydraulisk konduktivitet av cirka $1,2 \cdot 10^{-8}$ m/s för 5-meters sektion med övertryck 3 bar.

2.3.2. Resultat

Resultat från vattenförlustmätningar i kärnborrhål och hammarborrhål redovisas i Tabell 3. Tabellen anger den hydrauliska konduktiviteten i halv- samt helhål. Med halvhål avses den nedre halvan av hålet. Vid varje test anges en undre mätgräns för flöde vilket ger en indikation på vilket noggrannhet testet har. Punkter där hela hålet gett nollflöde redovisas ej vidare. I punkter där flöden i sektioner varit under den lägsta mätgränsen så används värdet för den undre mätgränsen för beräkning av K, vilket innebär att många av flödena i realiteten varit lägre än denna gräns och K följaktligen är lägre.

Resultaten tolkas vidare i kapitel 3.4.2.

Tabell 3. Sammanställning av resultaten från vattenförlustmätningar. Värden är geometriska medelvärden av 2-3 försök på angiven sektion. I tabellen anges ID, total hållängd, utvärderad hydraulisk konduktivitet (K) för hel- och halvhål samt undre mätgräns för flödestestet.

ID	Hållängd [m]	K halvhål [m/s]	<-Sektion [m]	K helhål [m/s]	<-Sektion [m]	Undre mätgräns [l/min]	Kommentar
15S1KB01	119,25	$2,6 \cdot 10^{-7}$	61,5-119,4	$2,8 \cdot 10^{-7}$	4,0-119,4	0,002	
15S1KB02	110,15	$2,0 \cdot 10^{-6}$	58,0-110,0	$3,7 \cdot 10^{-6}$	6,0-110,0	0,002	
16S1KB03	100,8	$2,8 \cdot 10^{-7}$	50,0-105,0	$4,5 \cdot 10^{-7}$	15,0-100,8	0,13	
16S1KB04	47,3	*	-	$4,2 \cdot 10^{-7}$	21,0-47,0	0,13	Nollflöde
16S1KB05	67,1	*	-	*	29,0-67,0	0,13	Nollflöde
16S1KB08	49,9	$2,2 \cdot 10^{-8}$	25,0-49,9	$6,3 \cdot 10^{-8}$	19,0-49,9	0,13	Sektion 15-19 m avbröts, vatten trycktes utanför casingen.
16S1KB09	49,4	$8,8 \cdot 10^{-9}$	28,0-49,4	$3,9 \cdot 10^{-8}$	7,0-49,4	0,002	
16S1KB11	69,7	$1,7 \cdot 10^{-8}$	35,0-69,7	$2,3 \cdot 10^{-7}$	3,0-69,7	0,13	
16S1KB12	32,1	$5,8 \cdot 10^{-9}$	13,5-32,1	$1,8 \cdot 10^{-7}$	20,0-32,1	0,13	
16S1KB13	77,15	$2,2 \cdot 10^{-7}$	33,0-77,0	$3,1 \cdot 10^{-7}$	11,0-77,0	0,13	
17S1KB15	92,9	$2,8 \cdot 10^{-7}$	43,5-92,9	*	-	0,13	Ej utfört hel
18S1KB17	101	$1,5 \cdot 10^{-8}$	50,0-100,0	$2,3 \cdot 10^{-6}$	7,0-100,0	0,005	
BVKB01	45,8	*	-	*	1,0-44,0	0,002	Nollflöde
BVKB02	53,4	$1,1 \cdot 10^{-6}$	32,5-52,5	$6,0 \cdot 10^{-6}$	13,5-52,5	0,002	
17HB101	100	$2,5 \cdot 10^{-7}$	5,0-100,0	$4,5 \cdot 10^{-6}$	5,0-100,0	0,005	
17HB102	100	$8,2 \cdot 10^{-7}$	50,0-100,0	$1,9 \cdot 10^{-6}$	5,0-100,0	0,002	
17HB103	120	$2,4 \cdot 10^{-9}$	60,0-120,0	$4,5 \cdot 10^{-8}$	6,0-120,0	0,005	

ID	Hållängd [m]	K halvhål [m/s]	<-Sektion [m]	K helhål [m/s]	<-Sektion [m]	Undre mätgräns [l/min]	Kommentar
17HB104	100	$7,8 \cdot 10^{-8}$	50,0-100,0	$9,0 \cdot 10^{-8}$	11,5-100,0	0,005	
17HB105	90	$7,1 \cdot 10^{-9}$	45,0-90,0	$9,5 \cdot 10^{-6}$	7,0-90,0	0,005	
17HB106	50	$8,8 \cdot 10^{-8}$	25,0-50,0	$3,4 \cdot 10^{-7}$	5,0-50,0	0,005	

* Nollflöde i sektionen

3. Analytiska beräkningar av inläckage, utredningsområde och påverkansområde

Influens-, utrednings- samt påverkansområde har beräknats med hjälp av analytiska formler för de delar av sträckan som bedöms ge grundvattenpåverkan till följd av grundvattenbortledning. I detta kapitel redovisas analytiska påverkansberäkningar för grundvattenpåverkan för skärningar (3.1), schakter för broar, (brostöd och plattamsbroar, 3.2) och Kolmårdstunneln (3.3).

3.1. Utredningsområde

Vid påverkan på grundvattennivån från tunnel och skärning kan vissa typer av objekt påverkas negativt. Syftet med ett utredningsområde är att avgränsa ett område som säkert omfattar påverkan från skärning och tunnel, utan att vara orimligt stort. Detta för att avgränsa det geografiska området inom vilket inventering av riskobjekt ska utföras. Metoden syftar därför till att göra konservativa bedömningar och hellre ta med ett för stort område än ett för litet. Beräkningar utförs för tunnel och skärning enligt metoder beskrivna nedan. På det beräknade området läggs en buffertzon på 100 meter åt vardera sidan vid tunnel och 50 meter åt vardera hållet för skärning.

Beräkningarna utförs punktvis var 20:e meter där spårlinjen går i tunnel eller i skärning.

3.1.1. Metodbeskrivning Skärningar

För att få en uppskattning av radien för influensområdet vid grundvattensänkning från skärning används Todd och Mays beräkningssätt anpassat för en utsträckt skärning utan radiellt flöde. Detta ger att influensavståndet åt vardera håll från skärningen är:

$$L_0 = h \sqrt{\frac{K}{W_0}} \quad \text{Eku. 1}$$

Där h är avstånd från terrassbotten till grundvattenytan, K är hydraulisk konduktivitet och W_0 är grundvattenbildningen.

Antaganden

Bedömningen av påverkansområde görs för driftskedet.

Som skärning ansätts terrassbotten som antas vara belägen 2,5 meter under spårets profil. Vidare antas även att grundvattennivån är densamma som markytans nivå.

$$h = \text{Marknivå} - \text{terrassbotten}$$

$$\text{Terrassbotten} = \text{Profilhöjd} - 2,5 \text{ m}$$

För att förenkla bedömningen antas alla jordarter och alla bergarter ha samma konduktivitet som en genomsläpplig morän. Konduktiviteten för morän antas konservativt vara $1 \cdot 10^{-5}$ m/s. Detta ger i de flesta fall en överskattning av påverkansområdet.

Grundvattenbildningen utgår från vad som enligt Rhode är en 10-års torka i området. Detta innebär 0 – 75 mm/år för finmaterial och 75 – 150 mm/år för morän, vilket ger en konservativ bedömning, i synnerhet i kombination med ett konservativt antaget värde på hydraulisk konduktivitet (se föregående stycke). Då vissa skärningar delvis har skär i berg, där grundvattenbildningen är lägre än morän, ansätts denna parameter till hälften av en konservativt skattad grundvattenbildning i morän. Ansatt värde är 37 mm/år.

Efter det att radier för påverkansområde har beräknats med antaganden enligt ovan kontrollräknas sträckor med isälvsmaterial och eventuellt ytterligare ställen där påverkan kan bli större. För dessa delar justeras områdets utbredning för hand. Det anpassas även efter så kallade ”positiva ränder”. En positiv hydraulisk rand är en gräns där grundvattenpåverkan från en skärning inte kan passera, såsom en sjö.

3.1.2. Metodbeskrivning Tunnel

För att få en uppskattning om påverkansområdet för bergtunnlar används en modell som bygger på tunnelns förläggingsdjup (Gustafson, Hydrogeologi för bergbyggare, 2009). Beräkningen avser här hypotetiskt helt otätade naturliga förhållanden som referens. Vid tätning kommer påverkansområdet till övervägande del bestämmas av vald genomsläpplighet på tätningen, och inte av bergets jungfruliga genomsläpplighet.

Influensavståndet R_{ia} beräknas enligt ekvationen nedan:

$$R_{ia} = d \cdot \tan \left(\pi \left(\frac{Q_p}{Q_{tot}} \right) \right) \quad \text{Ekv. 2}$$

Influensavståndet R_{ia} definieras som gränsen för det område inom vilket en viss del av det totala inläckaget från berg till en bergförlagd tunnel härstammar.

I beräkningen antas att 90% av flödet till tunnel härstammar från ett område som sträcker sig till avstånd R_{ia} på vardera sida om tunneln. Det innebär att 45% av flödet härstammar från vardera sida och kvoten Q_p/Q_{tot} ansätts som 0,45.

I modellen utgörs indata av det vertikala avståndet, d (m) mellan bergöverytan och tunnelns centrum. För bedömningen av påverkansområde för bergtunnlar i OLP2 används i detta skede emellertid markytans nivå istället för bergöverytan. Detta görs dels för att få en konservativ bedömning, dels på grund av att det saknas detaljerad information om bergöverytan.

I ett senare skede av projektet har en grundvattenmodellering utförts, se kap 4. Grundvattenmodellen visade ett större påverkansområde än det tidigare

utredningsområdet på vissa delar av Kolmårdstunneln. Därför utökades utredningsområdet med hänsyn till detta.

3.1.3. Resultat

Det sammantagna utredningsområdet för grundvatten kan ses i Figur 1.



Figur 1. Utredningsområde för grundvatten.

3.2. Påverkansområde Skärningar

3.2.1. Inledning

Bestämning av påverkansavstånd och influensavstånd är mycket osäker i praktiken. Syftet med denna beräkning var därför endast att redovisa möjliga påverkansavstånd, utifrån olika men rimliga parameteruppsättningar. Detta kombineras sedan med avstånden till de skyddsvärda objekt som identifierats vid tillfället.

Beräkningarna baserade på bästa möjliga indata för varje skärning. I många fall utanför skärningarna ligger skärningens dräneringsnivå högre än omkringliggande markyta. Det innebär att grundvatten endast kan påverkas indirekt genom bortledning av inläckande grundvatten längs skärningen och lokalt minskad grundvattenbildning med sänkta grundvattennivåer. Dessa påverkansberäkningar bygger på konservativa antaganden för att inte underskatta det troliga påverkansområdet. Detta betyder att påverkan i allmänhet borde bli mindre än vad som beräknats.

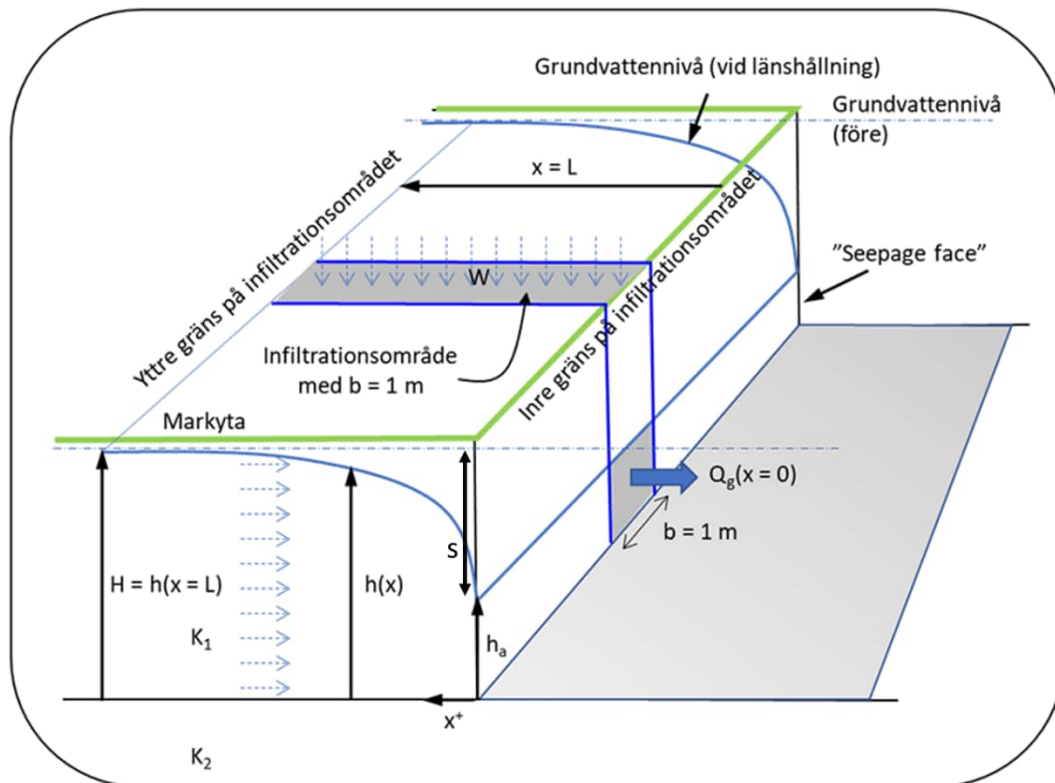
Denna beräkning av påverkansområde hade som mål att ta fram påverkansområden för varje skärningsområde som har identifierats i OLP2. Resultatet består av GIS-polygoner, som visar det beräknade median-påverkansområdet (mest troliga påverkansområdet)

för varje skärning. Påverkansområdet har tagit hänsyn till att olika delar av skärningen har olika djup, och är således större där skärningen är djupare och mindre där skärningen är grundare. Det totala påverkansområdet har sedan tagits fram genom att lägga ihop påverkansavstånden från alla punkter längs skärningen. I mer detaljerad skala kommer påverkansområdet i praktiken vara variationsrikt.

Det är viktigt att göra skillnad på påverkansavstånd och influensavstånd. Avsänkning i samband med anläggningsarbete medför att grundvattennivå (eller trycknivå, om det är ett slutet magasin) påverkas och blir successivt lägre med ett ökande avstånd från avsänkningen. Influensavstånd definieras som den bortre gränsen för sänkta grundvattennivåer, det vill säga att grundvattennivå är opåverkad bortanför influensavståndet. Influensområdet avser hela ytan inom influensavståndet. Påverkansavstånd definieras här som det avstånd där grundvattennivån är sänkt till en viss detekterbar, tillåten eller medgiven nivå, här valt till 0,3 meter under opåverkad nivå i jordlager och 1 meter under opåverkad nivå i berg. Påverkansområde avser hela ytan inom påverkansavståndet. Påverkansområdet kommer följaktligen alltid vara mindre än influensområdet. Påverkansområdet är således oftast det intressanta området för skyddsobjekt eftersom det relaterar till vilken förändring från vattenverksamheten som skulle kunna observeras. Utifrån påverkansområde bestäms sakägarkretsen, vilken ofta är aningen större än påverkansområde eftersom sakägarområdet inte enbart väljs utifrån beräkningar.

3.2.2. Formler

Den analytiska modellen är baserad på Todd & Mays (2005), vilken beskriver en formel för influensavstånd (Ekv. 3), en formel för inläckage (Ekv. 4) samt en ekvation för påverkansavstånd (Ekv. 5) för ett avlångt schakt i öppet magasin. Alla formler beräknar förhållandena för endast en sida av schakten åt gången. En schematisk bild av en sådan akvifer visas i Figur 2:



Figur 2. Schematisk bild över en avlång, öppen skärning där Ekv. 3 – Ekv. 5 är tillämpbara (SGU, 2019).

Parameterbenämningar och beskrivning kan ses i Tabell 4.

Tabell 4. Förklaring av parametrar i Ekv. 3 – Ekv. 5.

Symbol	Parameter	Beskrivning
L (m)	Influensavstånd	Avstånd för avsänkning från schaktsida till opåverkad grundvattenyta ($h(L) = H$).
K (m/s)	Hydraulisk konduktivitet	Jordlagrets/bergets genomsläpplighet för vatten. För bergsskärning avses naturligt otätad genomsläpplighet.
W (m/s)	Grundvattenbildning	Grundvattenmagasinets grundvattenbildning. Definieras utifrån nederbörd, avdunstning, marktyp, genomsläpplighet och markens magasineringsförmåga.
H (m)	Opåverkad akvifermäktighet	Höjden från magasinbotten till grundvattnets opåverkade trycknivå. Definieras utifrån akviferbotten. $H = h_a + s$
h_a (m)	Maximalt avsänkt akvifermäktighet	Den minsta akvifermäktigheten, som en följd av avsänkning. Definieras utifrån samma nivå som H . $h_a = H - s$
Q (m ³ /s)	Inläckage till schakt	Den vattenmängd per tidsenhet som läcker in till skärning från båda sidorna och botten vid stabila förhållanden. I beräkningarna redovisas Q som inläckage per sida och per meter skärning. För totalt

Symbol	Parameter	Beskrivning
		inläckage till en schakt måste Q dubbleras och multipliceras med skärningens längd.
B (m)	Schaktlängd	Den schaktlängd för vilket inläckaget (Q) definieras. Normalt satt till $b = 1$ m för att redovisa inläckage per längdmeter schakt.
$H(x)$ (m)	Påverkad grundvattennivå	Grundvattennivån som en funktion av avstånd (x) från avsänkningen. $0 \leq x \leq L$. $h(0) = h_a$. $h(L) = H$
s (m)	Avsänkning	Den effekt på grundvattennivå som uppkommer från uttag i syfte att uppnå nödvändig dränering. $S = H - h_a$

Formlerna som använts per sida redovisas som Ekv. 3 - Ekv. 5:

$$L = \sqrt{\frac{K}{W}(H^2 - h_a^2)} \quad \text{Ekv. 3}$$

$$Q = WLb \quad \text{Ekv. 4}$$

$$h^2(x) = \frac{W}{K}(2Lx - x^2) + h_a^2 \quad \text{Ekv. 5}$$

Ekv. 3 - Ekv. 5 föreslås för rådande förhållanden av SGU under deras handledning *Bedömning av influensområde avseende grundvatten*. SGU benämner denna analytiska beräkning som "Modell 3" (SGU, 2019) (Figur 2).

Ekv. 3 används för att beräkna enkelsidiga influensavståndet L, det vill säga avståndet mellan avsänkning och opåverkad grundvattennivå, inom vilket en avsänkning uppstår.

Ekv. 4 används för att beräkna inläckage till schakten, i synnerhet från det exponerade grundvattenmagasinet i sidorna av skärningen. Inläckaget motsvarar grundvattenbildningen per schaktmeter i det område som utgörs av påverkansavståndet om $b = 1$ meter. För totalt inläckage till hela schakten sätts $b =$ skärningens längd. Notera att denna formel, likt hela systemet som visas i Figur 2, endast gäller för ena sidan av skärningen. För att beräkna det totala inläckaget till skärningen måste det beräknade inläckaget dubbleras. Eftersom beräkningarna förutsätter liksidig avsänkning kring schakten spelar detta ingen roll för beräkningarna av påverkansavstånd, men är viktigt att tänka på vid framtagande av totalt inläckage till skärningarna. Ekv. 4 kan skrivas om för att ge ett uttryck för L åt varje håll (Ekv. 6):

$$L = \frac{Q}{Wb} \quad \text{Ekv. 6}$$

Ekv. 5 används för att beskriva en påverkad grundvattennivå (h) på ett avstånd x från skärningens kant. Detta används för att beräkna det avstånd där en viss nivå finns (t.ex. 0,3 meter under opåverkad grundvattennivå). För att lösa ut $h(x)$ tas roten ur båda sidorna av ekvationen, enligt Ekv. 7:

$$h(x) = \sqrt{\frac{W}{K}(2Lx - x^2) + h_a^2} \quad \text{Ekv. 7}$$

Föreslagen beräkningsgång enligt SGU (2019) är att först ta fram värdet på influensavståndet L (från en sida av skärningen) utifrån Ekv. 2. Därefter kan det ensidiga inläckaget beräknas fram med hjälp av Ekv. 4. För att få fram en profil av avsänkningstratten används Ekv. 5, vilken därefter kan användas för att beräkna påverkansavståndet (i dessa beräkningar 0,3 meter (jord) respektive 1 meter (berg) under opåverkad nivå). Påverkansavståndet benämns i denna rapport för $L_{0,3}$ (påverkansavstånd i jord) respektive L_1 (berg). För förklaring, se Figur 8.

3.2.3. Beräkning

Influensavståndet (L) enligt Ekv. 3 beskrivs utifrån fyra parametrar: hydraulisk konduktivitet (K), grundvattenbildning (W), akvifermäktighet (H) och avsänkt akvifermäktighet (h_a). I avsnitt 3.1.4. *Förutsättningar och antaganden* nedan diskuteras hur H och h_a för dessa beräkningar i stället beskrivits utifrån avsänkning s , vilken är känd och inte tillåts variera. Ekv. 4 beskriver hur inläckage Q för en sida av skärningen kan beräknas fram utifrån influensavstånd, och genom att skriva om ekvationen kan influensavståndet istället fås ut som en funktion av Q och W (Ekv. 6). Detta innebär att de två okända parametrarna L och Q styrs av två variabla parametrar (K och W) och två ekvationer (Ekv. 3 och Ekv. 6). De variabla parametrarna har ansatts vissa gränsvärden som diskuteras i avsnitt 3.1.4. *Förutsättningar och antaganden*.

Eftersom influensavstånd (L) och inläckage (Q) beror på två variabla parametrar vars exakta värden är svåra att definiera har en statistisk lösningsmetod valts.

- Hydraulisk konduktivitet (K) kan variera mycket över små avstånd och är därmed svår att uppskatta för en specifik plats. Därtill är värdet på K av stor vikt för utfallet för beräkningarna, då dess värde kan variera mycket för olika jordarter.
- Grundvattenbildning (W) är också okänd på en specifik plats, och kan därtill variera över tid.

Den stora osäkerheten i dessa variabla parametrar gör att en numerisk lösning har använts, vilket ger lösningar på påverkansavstånd L samt inläckage Q med olika värden för hydraulisk konduktivitet (K) och grundvattenbildning (W). Detta kan upprepas ett valfritt antal gånger för att ge en statistisk sammanställning av influensavstånd och inläckage, det vill säga median-, minimi-, maximumvärden etc. De lösningar som grupperar sig kring centralvärdet är de mest troliga utifrån indatas intervall, det vill säga att medianvärdet på influensavstånd är det mest troliga. För varje påverkansavstånd beräknas här cirka 10 värden fram för L och Q , vart och ett associerat med värden på K och W som löser Ekv. 8.

För dessa passageberäkningar har Ekv. 3 balanserats mot Ekv. 6. Ekvationen som används för att få fram influensavståndet L är således Ekv. 3 minus Ekv. 6 (se Ekv. 8), där båda termerna är ett uttryck för L.

$$\sqrt{\frac{K}{W}(H^2 - h_a^2)} - \frac{Q}{Wb} = 0 \quad \text{Ekv. 8}$$

När Ekv. 8 är lika med noll är influensavstånd L från Ekv. 3 lika stor som L från Ekv. 6, och med det finns då en parameteruppsättning för hydraulisk konduktivitet, grundvattenbildning och inläckage som ger ett värde på influensavstånd.

Att använda denna typ av numeriska beräkningar har fördelen att påverkansområdet för en viss skärning kan beräknas med en viss osäkerhetsmarginal för indataparametrarna, vilka anges i max-min-spann snarare än ett specifikt värde. Resultatet av beräkningarna beror således av vilka spann för tillåtna värden som har valts för parametrarna. Hur spannen har valts för varje enskild parameter framgår i avsnitt 3.1.4. *Förutsättningar & Antaganden*.

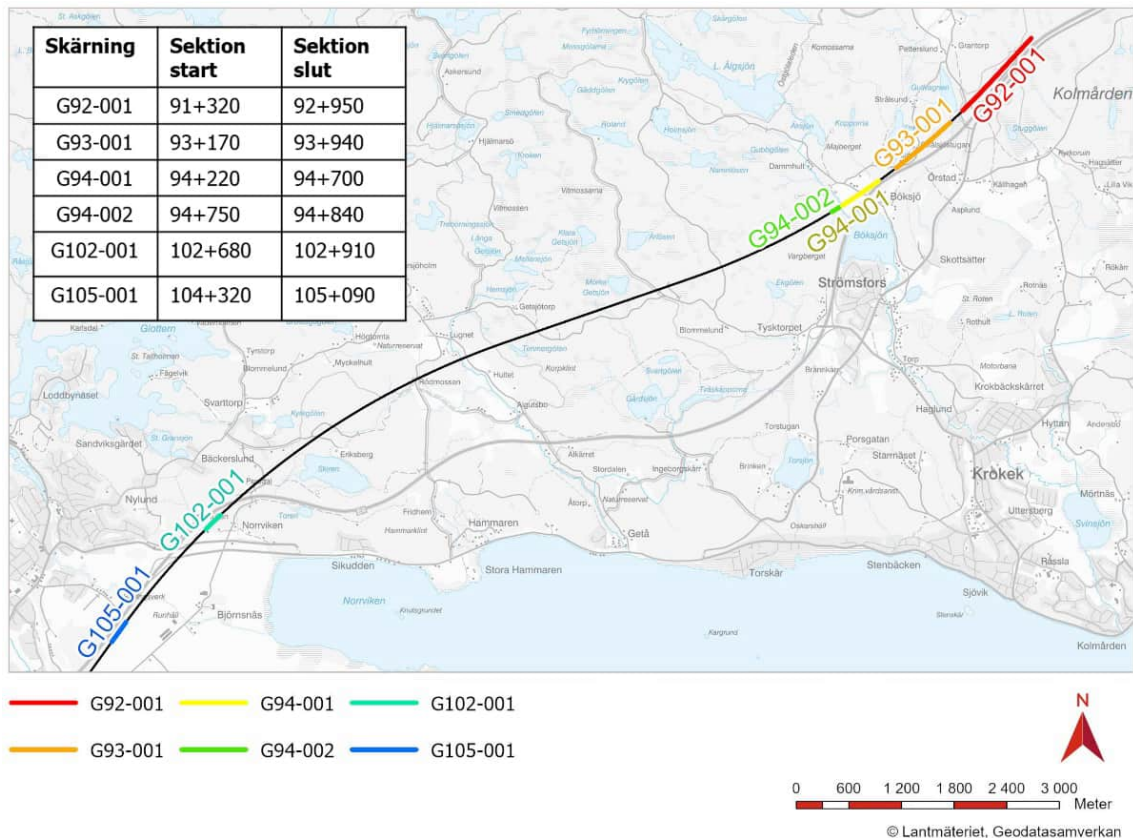
Resultaten av beräkningarna jämfördes med beräkningsresultat från andra formler, se avsnitt 3.1.9 *Jämförelse med andra beräkningsmetoder*. Detta för att utröna huruvida beräkningarna ligger i ungefär samma storleksordning som alternativa metoder, och på så vis få en uppskattning om resultatens rimlighet.

3.2.4. Förutsättningar & Antaganden

Översikt skärningar

I ett tidigare skede identifierades sex skärningar där risk för grundvattenbortledning föreligger på sträckan Stavsjö-Loddby, vilket räknas som vattenverksamhet.

Vattenverksamheterna längs med den planerade banans längd har givits ett ID baserat på huruvida yt- eller grundvatten berörs, längdmätning samt numrering. För dessa områden med skärningar har beräkning av påverkansavstånd genomförts. Figur 3 visar de skärningar där ovan beskrivna påverkansavståndsberäkningar har genomförts längs norra delsträckan.



Figur 3. Översikt av de skärningar som beräkningar för påverkansavstånd har genomförts för. Svart linje visar spårlinjen för planerad järnväg.

Skärningarna utgörs generellt av områden där spåret skär igenom högt belägna markpartier, antingen lokalt uppstickande kullar eller toppar, eller större, mer plåtåliknande höjdområden som spåret skär igenom vid en lång sträcka. Jordarterna högre upp i terrängen utgörs vanligen av morän eller berg i dagen, men våtmarker (torv) förekommer också, i synnerhet norr om Kolmårdstunneln. Skärningarna går därmed sällan genom lerlager och har därför antagits vara i öppna magasin.

Påverkansavståndet för olika skärningar beror till del på hur stor grundvattenavsänkningen är, vilket i sin tur beror på skärningsdjupet. Många av skärningarna går genom såväl jordlager som berg. Den beräkningsmetod som har använts för påverkansberäkningarna behandlar jordskärningar och bergskärningar separat, eftersom det är komplicerat att beräkna en kombinerad avsänkning i jord och berg på analytisk väg. Tabell 5 visar det största skärningsdjupet i jord samt berg för respektive skärning, samt den största grundvattenavsänkningen vid respektive skärningsdjup. Skärningens mäktighet för ett område beräknas som avståndet mellan markyta och spårens dräneringsnivå. Dräneringsnivån är ansatt till 2,5 meter under vald spårhöjd.

Tabell 5. Största skärningar för skärningarna på norra delsträckan.

Skärning	Största skärningsdjup jord / Största grundvattensänkning	Största skärningsdjup berg / Största grundvattensänkning
G92-001	5 m / 4 m	18 m / 17 m
G93-001	11 m / 10 m	30 m / 29 m
G94-001	3 m / 2 m	0 m / 0 m
G94-002	7 m / 7 m	22 m / 22 m
G102-001	9 m / 9 m	33 m / 33 m
G104-001	7 m / 7 m	0 m / 0 m

Grundvattennivåer

Alla skärningar går genom höjder i landskapet, antingen lokala eller mer utsträckta höjdområden. För att göra en konservativ, men rimlig, uppskattning av grundvattennivån vid skärningarna har GV-nivån 1 meter under markytan (m u.my.) använts för skärningarna norr om Kolmårdstunneln, och GV-nivån noll m u.my. för skärningarna söder om tunneln, då markflöde har observerats vid dessa platser. Detta innebär att grundvattenytan antas helt följa topografin upp på höjden, vilket troligtvis ger en överskattad uppskattning av influensavstånd och inläckage eftersom grundvattennivån generellt ligger längre under markytan på lokala, isolerade höjder jämfört med omkringliggande mark.

Akvifermäktighet H (och h_a)

I formeln som rekommenderas av SGU (Todd och Mays, 2005) beror influensavståndet av akviferens mäktighet mellan avsänkningen och den täta botten (h_a , se Figur 2). Detta har relativt stor påverkan på utfallet, men ger orimliga resultat och är inte heller tillämpligt på att beskriva en bergskärning. Det viktigaste för dessa beräkningar har varit att vara konsekvent och bedöma rimligheten av de antaganden som görs, varför akviferens mäktighet under schaktbotten (h_a) har ansatts till 0. Av det följer $H = s$, d.v.s. akviferens totala mäktighet är lika stor som avsänkningen (se Ekv. 9). Avsänkningen är relativt känd och tillåts inte variera i den numeriska lösningen, och följaktligen gäller samma sak för akvifermäktighet (H). Motivet bakom att ansätta $h_a = 0$ grundar sig dessutom på faktumet att skärningarna går genom höjdområden med begränsad utsträckning. Inläckage från sidorna av schakten är således begränsade, såväl som påverkansområdets möjliga utbredning.

Avsänkning (s)

Avsänkning avser den nivåförändring i grundvattenyta som uppstår till följd av verksamheten. I dessa beräkningar definieras avsänkningen som skillnaden mellan antagen befintlig (opåverkad) grundvattennivå och projekterad dräneringsnivå (satt till 2,5 meter under spårhöjd). Om grundvattennivån ligger lägre än dräneringsnivån sker ingen avsänkning.

Avsänkningen har beräknats som skillnaden mellan det lägsta skärningsdjupet ned till dräneringsnivå (h_a) och den ansatta opåverkade grundvattennivån (H), se Ekv. 9:

$$H = h_a + s \leftrightarrow s = H - h_a \quad \text{Ekv. 9}$$

Eftersom grundvattenytan har ansatts till att följa topografin sker den största avsänkningen vid den största skärningen. Dräneringsnivåer har tagits fram för var tionde meter längs skärningarna och således har avsänkningen beräknats med 10-metersintervall. -

Avsänkningen har beräknats separat för jordlager och berglager. Eftersom många skärningar innebär en kombination av skärning genom jord och berg borde en modell helst räkna på den totala avsänkningen. Detta ger dock en mer komplex situation än vad modellen tillåter, och en rimlig förenkling bedöms vara att beräkna påverkansområden för jord och berg separat och redovisa det större området av de två. I det fall att berg överlagras av jord antas avsänkningen i berget vara lika med skärningsdjupet (antaget mättade förhållanden i berg).

Hydraulisk konduktivitet (K)

Hydraulisk konduktivitet i jord har i första hand tagits fram för etablering av gränsvärden där slugtester i grundvattenrör har använts. Det har antagits att röret som slugtestet har utförts i sitter i samma material/formation som skärningen sker genom. När det gäller jordskärningar går de i princip endast genom morän och torv. Moränen längs OLP2 antas vara bildad på liknande sätt överallt och således ha liknande egenskaper i alla skärningar. Alla grundvattenrör som valdes ut för dessa beräkningar har filter i moränen och gränsvärdena för alla områden är således satta utifrån min-K och max-K från slugtesterna. Vissa slugtester var svåra att lösa med den bäst lämpade lösningsmodellen och har därmed också uteslutits ur urvalet för maximum och minimum, likaså grundvattenrör som uppvisade defekt vid slugtestet (t.ex. torr innan, efter, stopp i röret). Torv bedöms vara en relativt tät jordart, i vilket grundvattenrör inte finns placerade. En konservativ ansats är att använda resultaten från grundvattenrören i morän för samtliga jordskärningar, då genomsläpplighet i torv sannolikt är lägre än så.

Eftersom varje slugtest endast ger egenskaperna lokalt runt varje rör har helheten bedömts genom att göra tester i många rör. Det ger ett bra stickprov som grund för att bedöma moränens hydrauliska konduktivitet som helhet.

Tabell 6 redovisar minimum och maximum från slugtesterna på norra delsträckan.

Tabell 6. Statistik från slugtester i jord på norra delsträckan.

Storhet	Värde	Enhet
Antal grundvattenrör	31	st.
Antal giltiga slugtest	20	st.
Minimum K	$1,4 \cdot 10^{-7}$	m/s
Maximum K	$4,0 \cdot 10^{-5}$	m/s

För bergskärningar kan inte värden från slugtester användas, då inga grundvattenrör är satta i berg. Vattenförlustmätningar i har dock utförts i samband med Kolmårdstunneln och sammanfattas i avsnitt 0, se Tabell 18. Utöver resultaten från

vattenförlustmätningarna har SGU:s grundvattenkartor (kartserie Ah) använts för att beskriva hydraulisk konduktivitet i området som helhet. I beskrivningen till grundvattenkartan över Östergötlands län (SGU, 1997) finns uttagsdata från brunnar i respektive bergart, med framräknat K-värde. Bergarterna i området utgörs framför allt av äldre, gnejsig granit, yngre granit och äldre sedimentbergarter. Hydraulisk konduktivitet (K) för bergarterna låg alla mellan $2\text{--}4 \cdot 10^{-8}$ m/s. För en mer konservativ bedömning valdes således gränsvärdena för K med lite marginal, i synnerhet uppåt. Tabell 7 redovisar minimum och maximum för bergskärningarna, utan tätning, på norra delsträckan:

Tabell 7. Satta min- och maxvärden för hydraulisk konduktivitet (K) i otätade bergskärningar.

Storhet	Värde	Enhet
Minimum K	$1 \cdot 10^{-8}$	m/s
Maximum K	$5 \cdot 10^{-7}$	m/s

Grundvattenbildning W

Grundvattenbildning styr påverkansområde såtillvida att högre grundvattenbildning leder till snabbare påfyllnad av akviferen, vilket gör att mer vatten finns tillgängligt för uttag och därmed minskar påverkansavståndet. En konservativ bedömning bör således underskatta grundvattenbildningen och inte ansätta för högt värde.

Området utgörs framför allt av moränpartier och berg i dagen i höjdområden, med lera i de mellanliggande dalarna. Jordarterna är därmed generellt morän/finjordar. I figur A1 i Grundvattenbildning i svenska typjordar (Rodhe et al, 2006) uppskattas grundvattenbildning i Sverige utifrån typjordart (grovt/morän/fint). I nordöstra Östergötland kan grundvattenbildningen uppskattas till 150–225 mm/år. Ett konservativt antagande är att gränsvärdena för grundvattenbildning är mellan 90–200 mm/år, vilket borde ta extrema torrår såsom 2018 i bättre beaktande.

Avsänkningstratt och medgiven avsänkning

I modell 3 (Ekv. 5) finns en ekvation som beskriver avsänkt GV-yta (h) som en funktion av avstånd (x) från avsänkningen (s).

Denna ekvation använder som indata grundvattenbildning (W), hydraulisk konduktivitet (K), influensavstånd (L), avstånd från avsänkningen (x) och akvi fermäktighet under avsänkning (h_a). När ett värde på L har erhållits via den numeriska lösningen kan således parameteruppsättningen som gav detta svar användas för att beräkna avsänkningstratten. Målet med detta är att uppskatta hur stor avsänkning är på ett visst avstånd, och i synnerhet beräkna på vilket avstånd som avsänkningen är 0,3 meter för jordskärningar och 1 meter för bergskärningar.

Målet med dessa beräkningar är alltså egentligen inte influensavstånd L, utan *påverkansavståndet*, där grundvattennivån ligger 0,3 meter under opåverkad nivå i jord och 1 meter under opåverkad nivå i berg. Som framgår av Ekv. 5 behövs dock L beräknas först. Påverkansavståndet betecknas som $L_{0,3}$ för påverkansavstånd i jord och L_1 för påverkansavstånd i berg. Sammanfattningsvis: L avser influensavstånd till helt

opåverkad grundvattenyta. $L_{0,3}/L_1$ avser påverkansavstånd: avståndet till nivån 0,3 meter (jord)/1 meter (berg) under opåverkad grundvattenyta. Se Figur 8 för exempel på en avsänkningstratt och skillnaden mellan L och $L_{0,3}$ samt L_1 .

Olika förutsättningar inom samma område

Vid långsträckta schakter (skärningar) kommer förutsättningarna att förändras längsmed schaktens längd, i och med att markytan ligger högre eller lägre på olika platser längs skärningen. Inläckage och påverkansavstånd varierar med avsänkningsmöjligheten. En konservativ ansats är att endast beräkna påverkansavstånd baserat på det största skärningsdjupet för varje skärning (enligt Tabell 5). Att använda detta påverkansavstånd för ett helt område gav dock en stor överskattning, i synnerhet för de delar där skärningen endast utgör en bråkdel av det största skärningsdjupet. Det är inte rimligt att en avsänkning på exempelvis 1 meter ger samma påverkansavstånd som en avsänkning på 20 meter, och detta måste speglas i form av ett mer detaljerat påverkansområde. Ytterligare beräkningar av påverkansavstånd genomfördes därmed för mindre skärningsdjup inom varje skärning: för en avsänkning motsvarande halva största skärningsdjupet (benämns "Medel skärningsdjup"), samt för en avsänkning motsvarande en tredjedel av det största skärningsdjupet (benämns "Grunt skärningsdjup"). Varje punkt i skärningen tilldelades ett påverkansavstånd som motsvarade skärningsdjupet i den punkten, vilket sammanlagt utgör påverkansområdet för hela skärningen.

Topografi & hydrauliska gränser

Det sista steget i att ta fram påverkansområde innebär mindre justering av gränsen utifrån topografi och positiva hydrauliska gränser.

Den valda beräkningsmodellen förutsätter, förutom en konstant grundvattenbildning och genomsläpplighet, en konstant grundvattennivå av oändlig utsträckning. I verkligheten kan grundvattenytan variera mycket över små avstånd, i synnerhet i områden med många relativt små och avgränsade magasin. Det är därmed inte osannolikt att påverkansområdet sträcker sig till områden där markyta och grundvattenytan ligger betydligt lägre än vid skärningen. De delar av påverkansområdet vars markyta ligger lägre än spårets dräneringsnivå har således tagits bort, då grundvattennivån i dessa perifera områden ligger lägre än den avsänkta nivån.

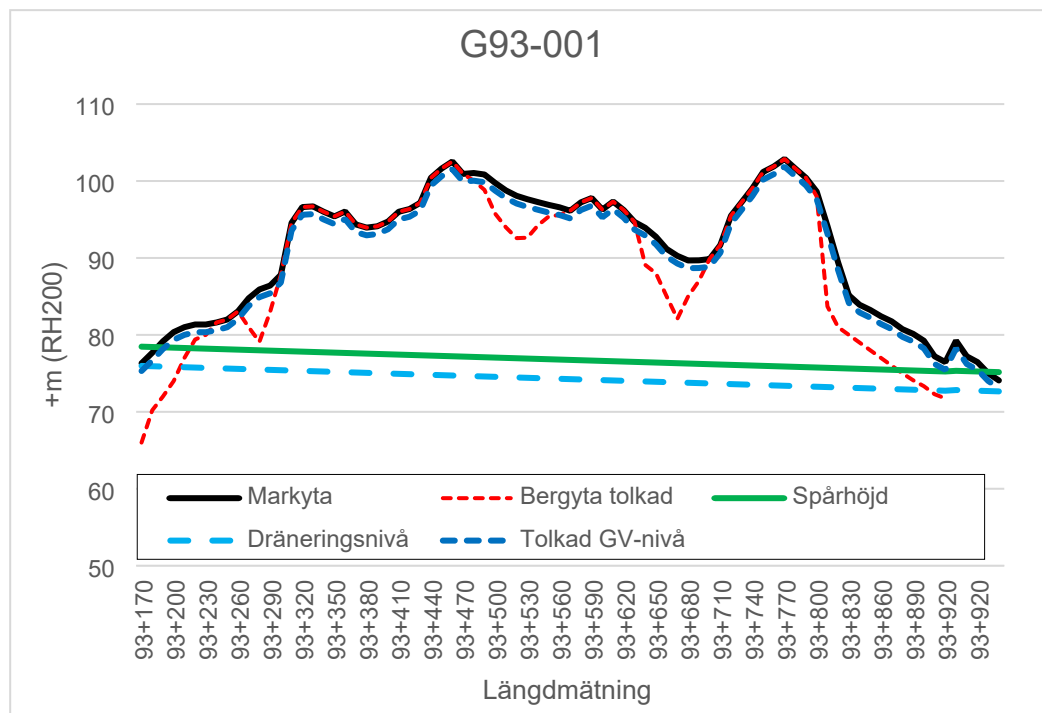
Hänsyn har även tagits till positiva hydrauliska gränser, i detta fall sjöar och större ytvattendrag som kan antas stå i kontakt med grundvattnet och bidra till opåverkade trycknivåer genom tillflöde till grundvattnet. De delar av påverkansområdet som överlappar sådant ytvatten har tagits bort.

Ovan nämnda inskränkningar och förenklingar är praxis och kan tolereras för det syfte som gäller för beräkning av påverkansavstånd och inläckage.

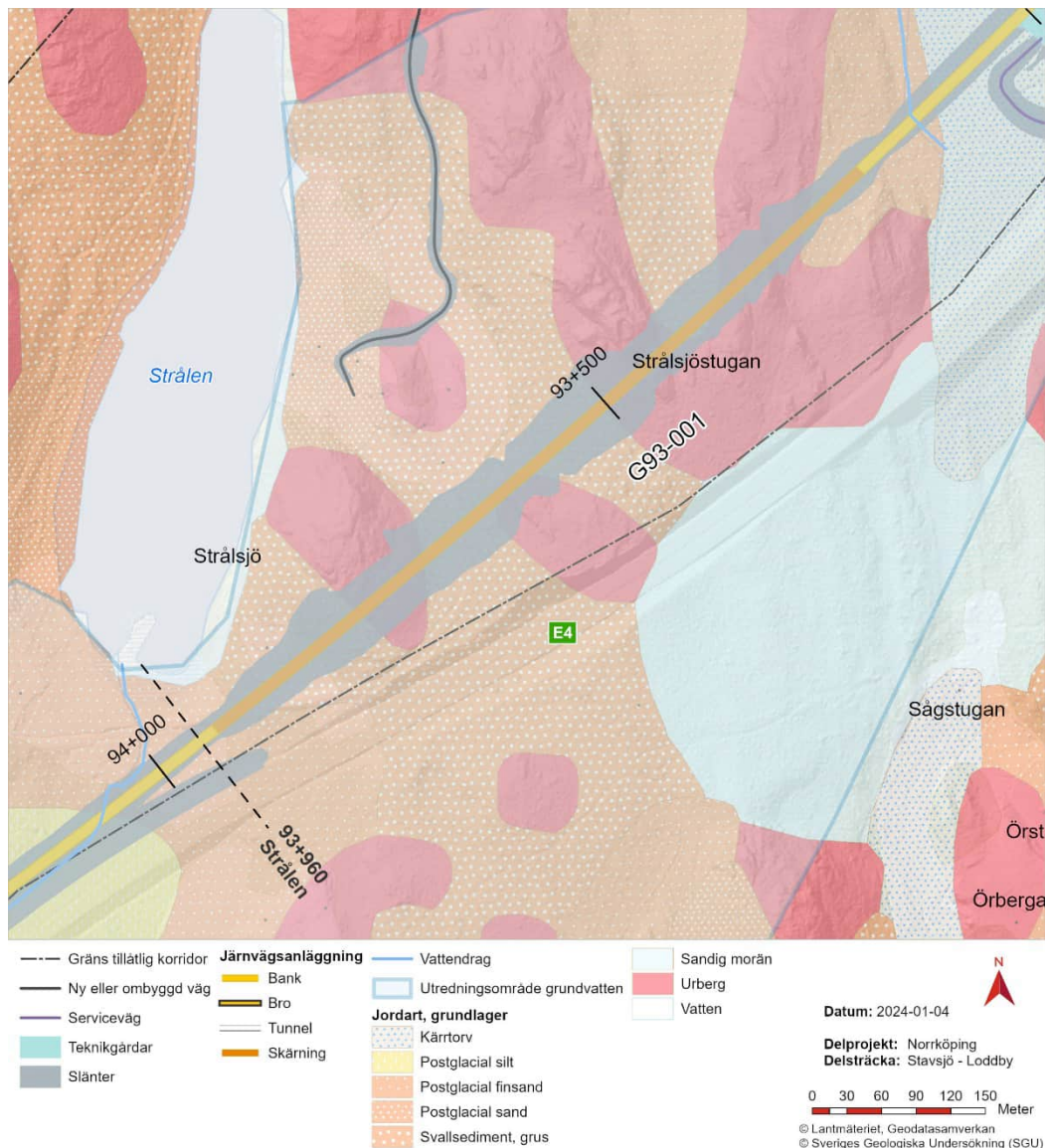
3.2.5. Exempel på beräkningsgång

För att ytterligare förklara hur beräkningen gick till i praktiken följer här ett exempel där påverkansområdet för skärning G93-001 är framtaget steg för steg:

Profil och karta över G93-001 redovisas i Figur 4 och Figur 5.



Figur 4. Profil av skärning G93-001.



Figur 5. Planvy av skärningen i G93-001 med jordartskarta som bakgrund. Blå linje är det sedan tidigare bedömda utredningsområdet.

Detta område innehåller djupa skärningar i både berg och jord. Norr om Kolmårdstunneln har ett antagande gällande grundvattennivån gjorts: opåverkad grundvattennivå är belägen 1 meter under markyta. Detta ger en rimlig, om än något konservativ, bedömning av grundvattennivån, som troligen ligger längre under marken i höjdområden. Eftersom grundvattennivån är kopplad till markytan innebär det att den största avsänkningen kommer att finnas vid det största skärningsdjupet, i och med antagandet om homogen geologi. Det största skärningsdjupet medför även det största inläckaget samt en större lokal påverkan.

Med hjälp av en antagen grundvattennivå kunde avsänkningen (s) beräknas som $s = \text{grundvattennivå} - \text{dräneringsnivå}$. Det största skärningsdjupet i jord är 10,5 meter och medför en avsänkning på 9,5 meter ($s_{\text{max, jord}}$). Det största skärningsdjupet i berg är 29,5 meter och medför en avsänkning på 28,5 meter ($s_{\text{max, berg}}$). Påverkansberäkning har utförts för dessa värden på avsänkning, vilket motsvarar skärningsdjupet i större delen av skärningen (se Figur 4). I kanterna av skärningen är skärningsdjupet dock

betydligt grundare, vilket innebär att ett lägre värde på avsänkningen måste användas för påverkansavstånd i kanterna. Beräkningar av påverkansavstånd har genomförts separat för de grundare delarna av skärningen, med lägre ansatta värden på avsänkningen.

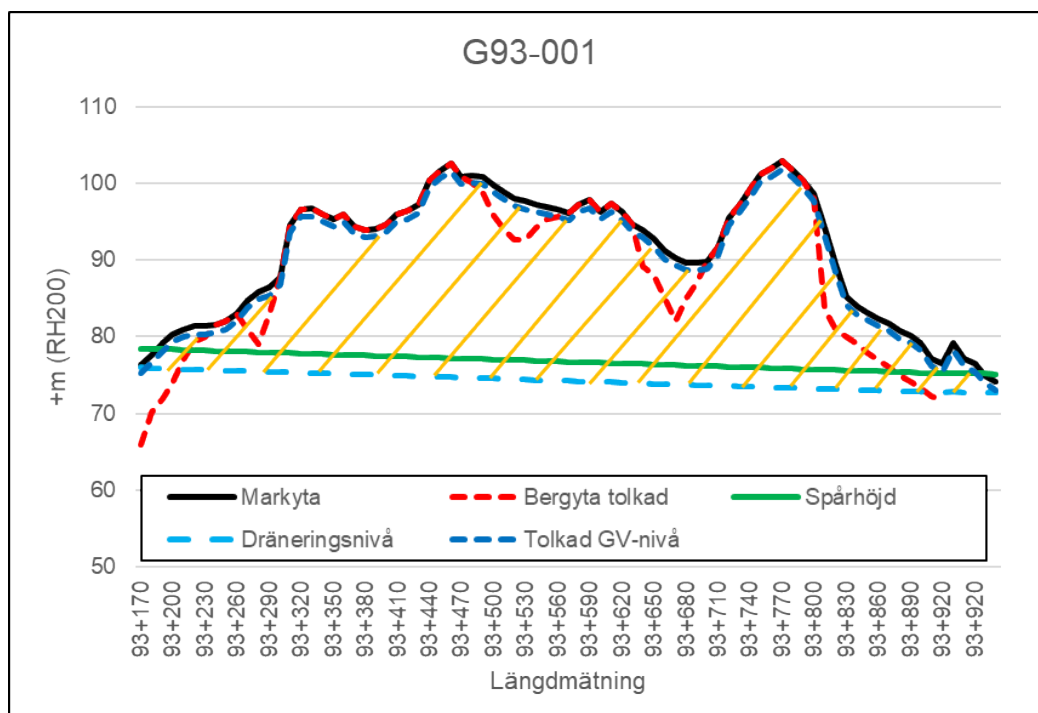
Övriga parametrar (hydraulisk konduktivitet och grundvattenbildning) är generella för hela norra delsträckan.

Följande indata har använts till beräkning av influensavstånd samt inläckage för skärning G93-001 (Tabell 8):

Tabell 8. Parametervärden och -gränser för beräkning av influensavstånd och inläckage i G93-001.

Parameter	Värde (m)	Undre gräns (enhet)	Övre gräns (enhet)
Maximal avsänkning i jord ($s_{\max, \text{jord}}$)	9,5	-	-
Maximal avsänkning i berg ($s_{\max, \text{berg}}$)	28,5	-	-
Hydraulisk konduktivitet för jord (K_{jord})	-	$1,4 \cdot 10^{-7}$ (m/s)	$4,0 \cdot 10^{-5}$ (m/s)
Hydraulisk konduktivitet för berg (K_{berg})	-	$1,0 \cdot 10^{-8}$ (m/s)	$5,0 \cdot 10^{-7}$ (m/s)
Grundvattenbildning (W)	-	90 (mm/år)	200 (mm/år)

Figur 6 visar hur profilvyn ser ut med beräknade antaganden om grundvattennivå och avsänkning:



Figur 6. Profil av G93-001. Den gulstreckade ytan visar var tolkad GV-nivå är större än dräneringsnivå, där avsänkning beräknas bli nödvändig och således där påverkansavstånd ska beräknas.

Parametrarna från Tabell 8 användes för att beräkna influensavståndet för jord och berg separat, inklusive tillhörande värden på inläckage. Varje influensavstånd beräknades numeriskt uppåt 10 gånger, tills en tydlig indikation på vilka värden influensavstånden kunde anta framgick. Antalet 10 bedöms vara fullt tillräckligt för att få fram ett tillräckligt ändamålsenligt värde som bästa uppskattning. Simuleringarna ger också gränserna för var uppskattningen av påverkansavståndet sannolikt återfinns. Av dessa värden kunde medianvärde på influens- och inläckage plockas fram.

För att ta fram påverkansavståndet ($L_{0,3}$ samt L_1) från influensavstånden (L) användes Ekv. 7. Beräkningar genomfördes för det största skärningsdjupet, samt hälften och en tredjedel av största skärningsdjup, för att spegla skärningens olika djup. Det är dessa avstånd som tillsammans ansåts som gränsen för påverkansområdet.

Tabell 9 visar resultaten av dessa beräkningar.

Tabell 9. Resultat av numerisk beräkning av $L_{0,3}$ samt L_1 (påverkansavstånd). Medianvärdet i dessa beräkningar har använts för bedömning av påverkansområde.

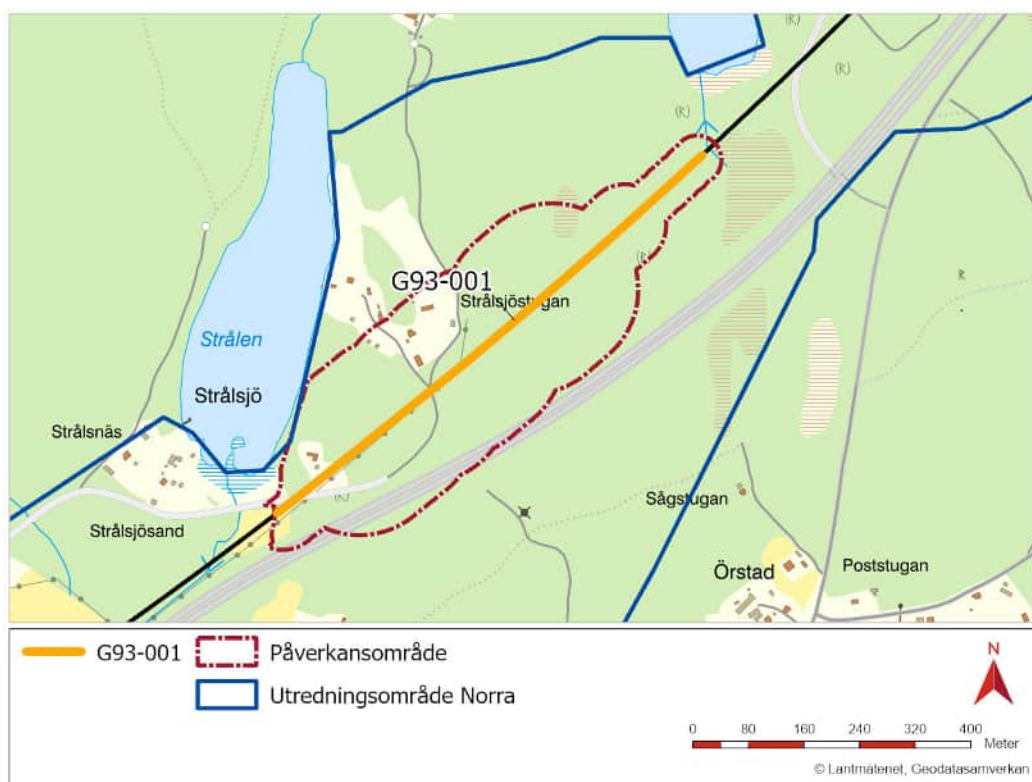
Påverkansavstånd	$L_{0,3}$ (Jord)	L_1 (Berg)
Avsänkning (m)	9,5	28,5
Antal körningar:	10	10
Median (m)	110	124

Påverkansavstånd	$L_{0,3}$ (Jord)	L_1 (Berg)
Min (m)	36	30
Max (m)	150	201
Standardavvikelse	34,5	47,1

Förutom den bästa uppskattning av påverkansavstånd i berg och jord, ger beräkningen även ungefärliga gränser för påverkansavståndets ytterligheter (givet att indatagränserna täcker in verkligheten egenskaper). Exempelvis gäller att påverkansavståndet i jord troligen är 110 meter, och inom osäkerhetsintervallet 36 till 150 meter. Bättre och mer lokal information för respektive skärning kan ge snävarare osäkerhetsintervall, men medianvärdet kommer inte påverkas i samma utsträckning. Ytterligare och/eller mer detaljerade indata bedöms därmed inte vara ändamålsenligt för bedömning av påverkansområde.

Med hjälp av resultaten i Tabell 7 kan påverkansavståndet i varje punkt längs skärningen bestämmas. Varje punkt i skärningen kommer att få värdet av ett påverkansavstånd, beroende på skärningens djup i den punkten. Det värde av $L_{0,3}$ (påverkansavstånd i jord) och L_1 (påverkansavstånd i berg) som är störst väljs, vilket indikerar om störst påverkan bedöms uppstå till följd av skärningen i jord eller berg. I exemplet ovan är L_1 större än $L_{0,3}$, vilket innebär att skärningen i berg bedöms ha större påverkan än skärningen i jord. Påverkansavståndet för de djupaste delarna av denna skärning är således 124 meter. På motsvarande sätt väljs ett värde på påverkansavstånd för de mindre djupa delarna av skärningen (medel skärningsdjup respektive grunt skärningsdjup). Alla dessa påverkansavstånd läggs ihop för att skapa *påverkansområdet*.

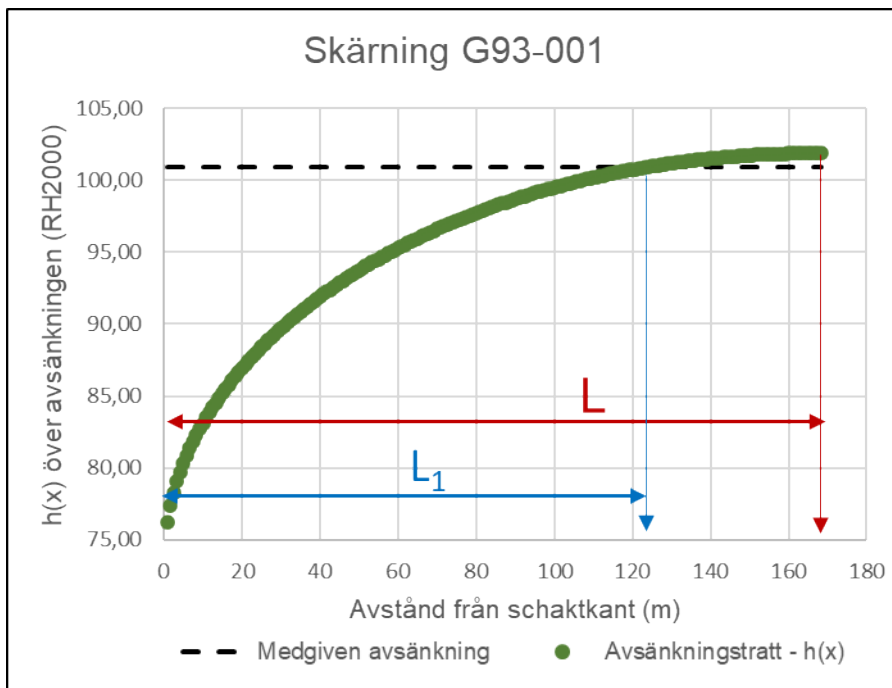
Figur 7 redovisar det slutgiltiga resultatet av beräknat påverkansområde (röd streckprickad linje) för G93-001, då de olika skärningsdjupen har tagits i beaktande. Detta kan jämföras med det sedan tidigare beräknade utredningsområdet (blå linje). Slutligen har påverkansområdet justerats utifrån topografi. De delar av påverkansområdet vars markyta ligger lägre än spårets dräneringsnivå har tagits bort. Hänsyn har även tagits till positiva hydrauliska gränser, i detta fall sjöar och större ytvattendrag som kan antas stå i kontakt med grundvattnet och bidra till opåverkade trycknivåer genom tillflöde till grundvattnet.



Figur 7. Påverkansområde för skärning G93-001.

Figur 7 visar det beräknade påverkansområdet för G93-001 baserat på konservativa uppskattningar. I detta område är påverkan ungefär likstor längs skärningens längd på ekvidistanta avstånd, men aningen smalare där skärningsdjupet avtar för att därefter upphöra. Detta speglar skärningens varierande djup längsmed skärningen, se Figur 4.

För varje punkt mellan skärningen och influensavstånd L kan grundvattennivån uppskattas med hjälp av Ekv. 7, vilket ger en avsänkningstratt enligt Figur 8:



Figur 8. Avsänkningstratt för maximal skärning i berg ($s = 28,5$ m). Den gröna linjen visar grundvattennivån (m.ö.h.) på ökat avstånd från skärningen. Där den gröna linjen når opåverkad nivå (+101,9 m) finns influensavstånd L . Den streckade svarta linjen visar 1 meter under opåverkad nivå (+100,9 m). Där den gröna linjen skär den svarta linjen finns L_1 , påverkansavståndet i Figur 7.

3.2.6. Underlag

Inhämtat underlag

- Jordartskartan (SGU)
- Bergnivå (SGU)
- Handledning: Bedömning av influensområde avseende grundvatten (SGU)
- Karta över grundvatten i Östergötlands län, SGU serie Ah nr 14

Underlag från Sweco

- Sonderingsdata (Sweco)
- Inmätt berg i dagen (Sweco)
- Spårhöjder och dräneringsnivåer OLP2 (Sweco)
- Mätningar och slugtester i grundvattenrör (Sweco)

3.2.7. Resultat

I Tabell 10 redovisas resultatet från de numeriska beräkningarna av påverkansavstånd från skärningar. Påverkansavstånden redovisas för det största skärningsdjupet i respektive skärning, för halva största skärningsdjup (Medel skärningsdjup) samt en tredjedel av största skärningsdjupet (Grunnt skärningsdjup). Dessa olika värden motsvarar beräknat påverkansavstånd för olika djupa delar av skärningen, där de djupaste delarna har ett större påverkansavstånd än de grundare delarna.

Tabell 10. Resultat av beräkning av påverkansavstånd för alla skärningar, avrundade till närmsta tiotal. Påverkansavstånden är medianen för samtliga beräkningar, redovisade för olika skärningsdjup för respektive skärning.

		Största skärningsdjup	Medel skärningsdjup	Grunnt skärningsdjup
	G92-001 91+320 - 92+950	80	40	10
	G93-001 93+170 - 93+940	120	60	40
	G94-001 94+220 - 94+700	80	10	-
	G94-002 94+750 - 94+840	110	50	20
	G102-001 102+680 - 102+910	100	70	70
	G105-001 104+320 - 105+090	60	50	30

Varje lösning för påverkansavstånd som redovisas i Tabell 10 har en specifik parameteruppsättning för Q, K samt W som tillsammans med avsänkningen (s, konstant för varje skärning) ger påverkansavståndet. Tabell 11 redovisar dessa parameteruppsättningar för påverkansavstånd för det största skärningsdjupet.

Tabell 11. Parameteruppsättningar för påverkansavstånden för största skärningsdjup i Tabell 10. Värdena för Q (inläckage), K (hydraulisk konduktivitet), W (grundvattenbildning) och s (avsänkning) ger tillsammans respektive påverkansavstånd.

	Skärning	Påverkansavstånd (m) [berg/jord]	Q (m ³ /s)	Q hela skärningen (l/s)	K (m/s)	W (mm/år)	s (m)
	G92-001	80 (jord)	7*10 ⁻⁷	2,1	6*10 ⁻⁶	150	4
	G93-001	120 (berg)	6*10 ⁻⁷	0,9	1*10 ⁻⁷	110	29
	G94-001	80 (jord)	7*10 ⁻⁷	0,7	2*10 ⁻⁵	150	2
	G94-002	110 (berg)	8*10 ⁻⁷	0,1	2*10 ⁻⁷	160	22
	G102-001	100 (jord)	5*10 ⁻⁷	0,2	7*10 ⁻⁷	130	9
	G105-001	60 (jord)	5*10 ⁻⁷	0,7	8*10 ⁻⁷	170	7

— Spårlinje

--- Påverkansområde

G92-001

G93-001

G94-001

G94-002

G102-001

G105-001

0 180 360 540 720 900 Meter

© Lantmateriet, Geodatasamverkan

The map displays the proposed railway line (Spårlinje) through the Bocksjö area. The line is shown as a black line with colored segments: red (G92-001), orange (G93-001), yellow (G94-001), green (G94-002), cyan (G102-001), and blue (G105-001). The map also shows various planning areas (Påverkansområde) outlined in red dashed lines, labeled G92-001, G93-001, G94-001, and G94-002. The map includes an inset showing the location within the larger region of Östergötland. A legend at the bottom identifies the line and planning areas by color and style. A scale bar and north arrow are also present.

— Spårlinje

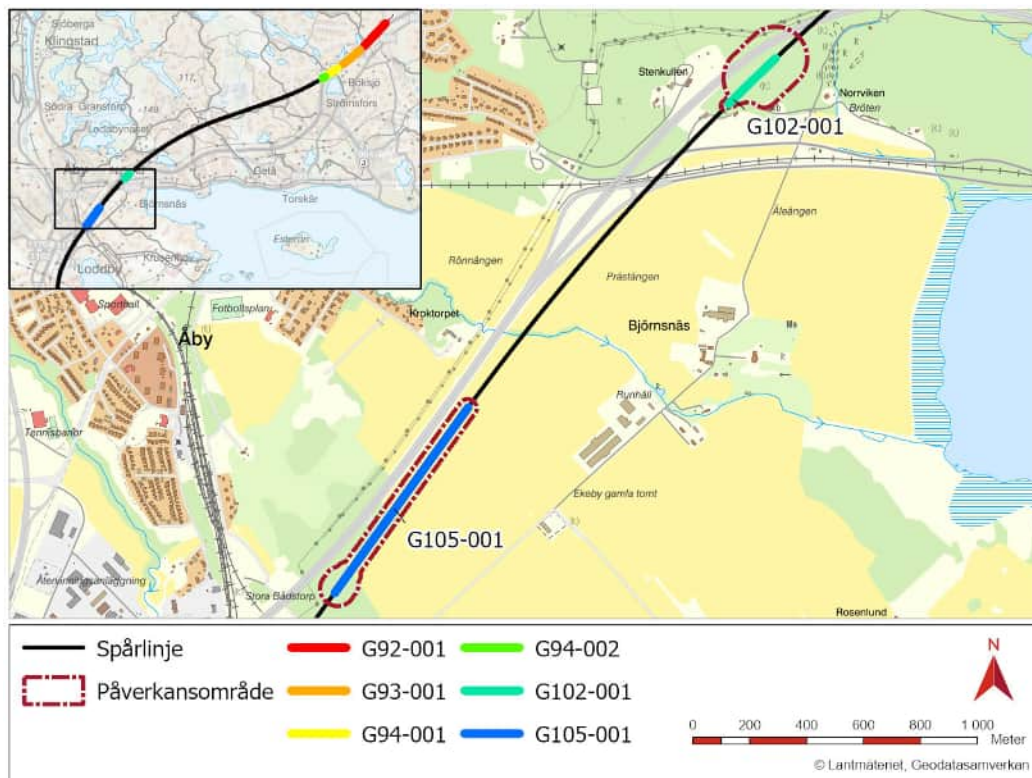
— Påverkansområde

G92-001 G93-001 G94-001 G94-002 G102-001 G105-001

0 80 160 240 320 400 Meter

© Lantmäteriet, Geodatasamverkan

31



Figur 11. Påverkansområde för de två skärningarna söder om Kolmårdstunneln.

3.2.8. Osäkerheter

Modell

Alla modeller är förenklade bilder av verkligheten, och med dem följer vissa antaganden och osäkerheter som måste tas i beaktande. Vald hantering av dessa antaganden och osäkerheter bedöms dock vara tillräckligt och ändamålsenligt, och i detta skede finns inga skäl att inhämta bättre och/eller ytterligare indata. Följande antaganden gäller för denna modell (SGU, 2019):

- Det öppna magasinet antas vara homogent och isotropt och dess hydrauliska konduktivitet, mellan markytan och anläggningens botten antas vara mycket större än den hydrauliska konduktiviteten under anläggningens botten, K_2 , det vill säga $K_2 \ll K_1$.
- Inläckaget av grundvatten till anläggningen (Q) antas vara i jämvikt med grundvattenbildningen (W) inom infiltrationsområdet L_b , det vill säga $Q = WL_b$. För det totala inläckaget till skärningar, från båda sidor av skärningen, gäller $Q = 2WL_b$.

Av antagandena ovan framgår det att skärningarna i OLP2 på flera punkter skiljer sig från de ideala, antagna förhållandena:

- Modellen förutsätter i princip att skärningen går genom en jordakvifer, och är alltså inte anpassade för bergskärningar. Berg kan dock också betraktas som ett kontinuum i större skala, men oavsett förbises effekterna av svaghetszoner och sprickor på påverkansavstånd. Påverkansområde i berg beror mer på

sprickornas riktning, storlek och sammankoppling, om vilket det är svårt att få en helhetsbild. Den information som finns om sprickor och deras genomsläpplighet har dock använts till beräkningarna.

- I de flesta områden går skärningarna genom höjdområden, vilket gör uppgifter om grundvattennivå, gradient och utsträckning av påverkansområdet betydligt mer komplicerat. Detta har inte tagits i beaktande för denna beräkning.

Påverkansavstånd är i denna modell beroende av hur stor avsänkningen är, vilket är direkt beroende av hur grundvattenytan ansätts. I detta fall har grundvattennivån ansatts att ligga i markyta, alternativt 1 meter under markyta, baserat på observationer av högt beläget grundvatten. Det innebär att antaganden gjorts så att avstånden blir överskattade snarare än underskattade. Detta bedöms vara en rimlig ansats då påverkansavstånden huvudsakligen är ämnade att vara ett av underlagen för att definiera sakägarområde.

Osäkerheten i påverkansområdena beror även på vilka lösningar som har nåtts via de numeriska beräkningarna. Ju fler körningar som gjorts, desto fler lösningar finns och desto bättre är det statistiska underlaget som utgör median (påverkansavstånd).

Underlag

En modell är aldrig bättre än underlag som används, och även om den information som var tillgänglig är i stort uppskattningar på olika sätt. Läget för bergöveryta och värden på hydraulisk konduktivitet är parametrar som har uppskattats utifrån undersökningar i enskilda punkter och inter-/extrapolerats till större områden. Grundvattenbildning är taget från litteraturen.

3.2.9. Jämförelse med andra beräkningsmetoder

Att uppskatta precisionen hos beräkningar av påverkansavstånd är svårt - detta till följd av ett stort antal okända parametrar, samt det stora urvalet av metoder (analytiska formler) som finns att välja på. De okända parametrarna har i detta PM behandlats med hjälp av rimliga spann för okända värden, som numeriskt löses samtidigt. Att uppskatta den valda metodens riktighet i jämförelse med andra metoder görs enklast genom att beräkna påverkansavstånd med samma indata och jämföra resultaten. Olika modeller ger något olika resultat, beroende på bakomliggande approximationer för respektive modell. Nedanstående jämförelser med resultaten från andra formler ska inte ses som en kontrollberäkning, eftersom det inte finns något som säger att en viss formel är mer korrekt än en annan. De ska ses just som jämförelser med alternativa, likvärdiga sätt att beräkna påverkansavstånd vid skärningarna, där eventuella likheter i resultaten kan tala för att den valda metoden är rimlig och vice versa.

För jämförelseberäkningarna användes 18 framräknade värden på influensavstånd (L) och påverkansavstånd ($L_{0,3}$, L_1) från 4 olika skärningar (G92-001, G93-001, G94-001 samt G94-002). Värdena på påverkansavstånd varierade mellan 34 och 157 m.

De övriga analytiska formler som användes till jämförelseberäkning redovisas i Tabell 12. Notera att Ekv. 11- Ekv. 14 används för att beräkna influensradie (R) och inte influensavstånd (L), men de två begreppen används ofta synonymt vid praktiska tillämpningar.

Tabell 12. Beskrivning av övriga analytiska beräkningsformler för influensavstånd som har använts för att jämförelse. Influenstradie R kan approximeras som influensavstånd L i detta PM.

Namn	Formel	Referens	Beskrivning
Sichardt	$L = 1750 * s * \sqrt{K}$ <i>Ekv. 10</i>	Cashman & Preene (2012)	En enkel formel som använder avsänkning, hydraulisk konduktivitet samt en faktor som kan ändras för ett cirkulärt influensområde. Ger generellt små värden på L och anses av vissa som inte nog konservativ.
Thiem-Dupuit	$Q = \frac{2\pi Ts}{\ln \frac{R_0}{R_E}}$ <i>Ekv. 11</i> $Q = AW$ <i>Ekv. 12</i>	Ferris et al (1962)	En kombination där två formler löses samtidigt iterativt. Ekv. 11 är baserat på Thiem-dupuits brunnsekvation. Ekv. 12 är en kontinuitetsekvation likt Ekv. 4. Metoden är därmed lik SGU:s modell 3, som använts i detta PM. R_E är en faktor som använder skärningens dimensioner för att approximera en motsvarande brunnsradie, se Ekv. 23. T är transmissivitet: $T = K*H$ $A = Lb$ (se Ekv. 4).
Gustafson	$R = \frac{sT\pi}{Q}$ <i>Ekv. 13</i>	Gustafson (2009)	Denna metod baseras på en lösning där en berganläggning approximeras med en rad infinitesimala brunnar. Formeln är därmed anpassad för grundvattensänkning i berg.
Gustafson tumregel	$R = 5H = 5s$ <i>Ekv. 14</i>	Gustafson (2009)	En enkel tumregel för anläggningar i berg. Influensavståndet uppskattas vara 5 gånger så stort som anläggningsdjupet under grundvattenytan.

Formlerna i Tabell 12 har använts för att beräkna influensavstånd utifrån ett antal lösningsuppsättningar för olika områden, med avsänkningar i såväl jord som berg. Jämförelserna spretade åt olika håll, där vissa formler gav betydligt högre värden än initialt beräknat, och vissa formler gav betydligt mindre.

- Sichardts formel gav konsekvent influensavstånd som var cirka 10 % av det beräknade enligt metoden SGU modell 3, det vill säga endast en tiondel så stort influensavstånd. Som förväntat ger denna metod betydligt kortare influensavstånd, vilket talar för att denna metod inte lämpar sig för konservativa bedömningar, eller att de initialt beräknade influensavstånden är överdrivet försiktigt beräknade.
- Thiem-Dupuits formler gav influensavstånd som var 35-255 % av det initialt beräknade influensavståndet, men de flesta avstånden var inom +/- 40 %. Sammantaget gav detta ungefär lika stora influensavstånd, både aningen mindre och aningen större. Av alla jämförelsemetoder stod sig denna mest likt den initiala, vilket möjligen kan förklaras av att båda dessa metoder tar hänsyn till grundvattenbildningen i influensområdet.
- Gustafsons formel gav konsekvent influensavstånd som var cirka 300 % av det initialt beräknade influensavståndet, det vill säga ett 3 gånger så stort influensavstånd.
- Gustafsons tumregel gav influensavstånd som var 6-85 % av det initialt beräknade influensavståndet, sammantaget mindre influensavstånd.

Med dessa jämförelser kan de initialt genomförda beräkningarna som genomfördes utifrån SGU:s modell 3 (Todd & Mays) konstateras ligga i mitten av de 5 testade metoderna. Två av de övriga metoderna ger ett kortare influensavstånd (Sichardt och Gustafsons Tumregel), medan de övriga två ger i huvudsak större influensavstånd (Thiem-Dupuit och Gustafson), som mest uppåt 2-3 gånger större.

Sammanfattningsvis visar de jämförande beräkningarna inte några resultat som ger anledning att misstänka att de initiala beräkningarna är mindre trovärdiga, baserat på tillgänglig information.

3.2.10. Diskussion

De påverkansområden som redovisas i resultatdelen är en bästa uppskattning av hur grundvattennivåer kommer att påverkas i närheten av skärningarna, baserat på tillgänglig information om grundvattennivåer, hydraulisk konduktivitet etc. I praktiken är det den faktiska avsänkningen i driftskede som kan visa den sanna påverkan som skärningarna har på den omgivande grundvattennivån. Även propumpningar kan ge en bra indikation, men är förknippade med osäkerheter i och med att uttagspunkten är lokal i en heterogen miljö, i synnerhet vid propumpning i berg. En exakt överensstämmelse mellan beräknade påverkansavstånd och verklighetens påverkansavstånd är dock helt osannolikt – en viss avvikelse mellan uppskattning och verklighet är naturligtvis oundviklig.

Givet de okända parametrar som ligger bakom beräkningarna tyder resultaten från jämförelseberäkningarna på att den initiala metoden enligt SGU:s modell 3 ligger inom ett rimligt spann för influensavstånd. Olika metoder med olika formler kommer att ge olika resultat, men i detta fall ligger resultaten i ett rimligt spann. De enkla formlerna för överslagsberäkning (Ekv. 10 och Ekv. 14) ger ett kortare påverkansavstånd, vilket är väntat. De mer komplexa formlerna (Ekv. 11 och Ekv. 12) ger påverkansavstånd i ungefär samma storleksordning, där formeln som tar flest parametrar i beaktande (Thiem-Dupuit) ger resultat som ligger både högre och lägre för olika områden. Ett ännu mer konservativt antagande hade kunnat använda Gustafsons formel för områden som konsekvent är 3 gånger så stora för ytterligare säkerhet, men det ska nämnas att den formeln är framtagen för rena berganläggningar. Med tanke på de konservativa antaganden som redan är gjorda i valet av parametervärden och -spann bör ytterligare försiktighetsfaktorer inte behöva tas i beaktande.

3.3. Brostöd och övriga anläggningar

3.3.1. Inledning

Längs med den norra delsträckan förekommer passager över vägar och vattendrag, vilket innebär att ett antal brokonstruktioner kommer att tillkomma i samband med den nya järnvägssträckan. Dessa konstruktioner kan också förväntas kräva schakt och grundläggning med möjlig grundvattenbortledning. Det är i huvudsak broarnas stöd/ram som kräver schaktning vid anläggning, vilket innebär att detta avsnitt mestadels behandlar temporära grundvattenbortledningar. Varje schakt under grundvattenytan kommer att kunna fungera som en brunn med inläckage, och generar grundvattensänkning och påverkansavstånd.

Inom projektet förekommer även anläggandet av en fördröjningsdamm med tillhörande VA-ledningar för omhändertagande av länshållningsvatten från Kolmårdstunneln. Grundvattenpåverkan från denna anläggning diskuteras i kapitel 3.3.3.

3.3.2. Metod

Påverkansområden för broarna har beräknats på liknande sätt som för skärningarna, se metodbeskrivning i avsnitt 3.1.1. – 3.1.4. och exempel i avsnitt 3.1.5. Metoden är bäst lämpad för avlånga schakter såsom skärningar, men bedöms även fungera för punktschakter i de fall avsänkning för brostöd beräknas. Sammanfattningsvis innebär metoden att input i form av avsänkingsdjup samt rimliga spann för förväntade värden på hydraulisk konduktivitet, grundvattenbildning och inläckage ger influens- och påverkansavstånd genom en numerisk lösning. De generella förutsättningarna för hydraulisk konduktivitet, grundvattenbildning och inläckage är desamma som för skärningar, se avsnitt 3.2.4.

3.3.3. Förutsättningar och antaganden

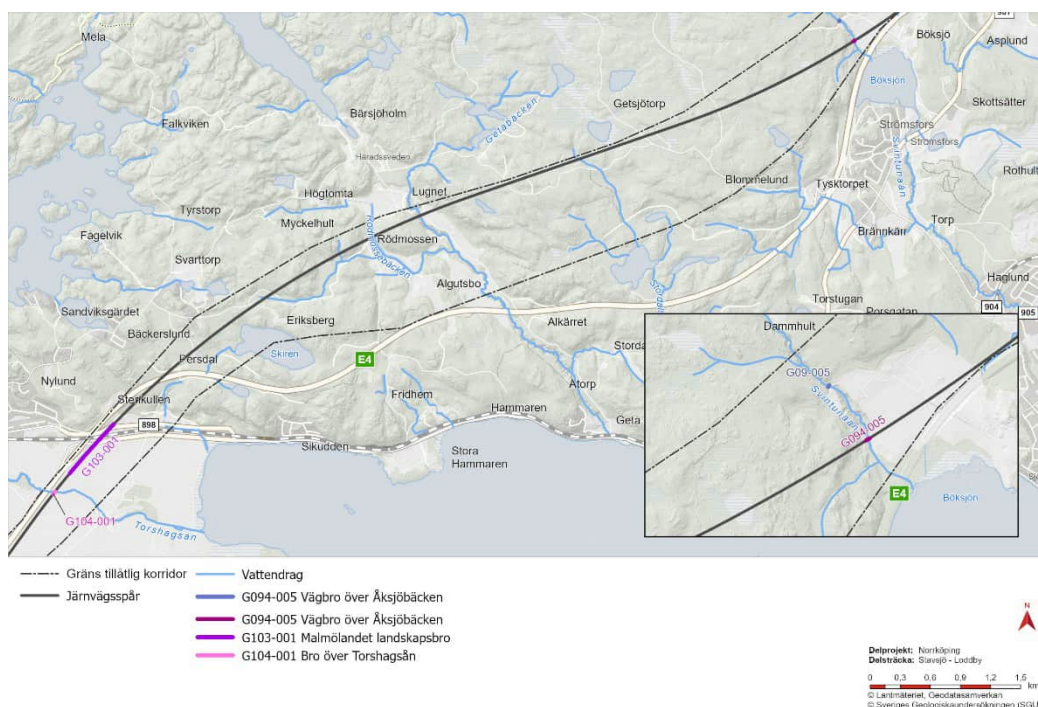
Konstruktioner med potential att påverka grundvattnet räknas som vattenverksamhet. Vattenverksamheterna längsmed den planerade banans längd har givits ett unikt ID baserat på huruvida yt- eller grundvatten berörs, längdmätning samt numrering. För dessa konstruktioner har beräkning av påverkansavstånd genomförts.

Ett antal anläggningar inom projektet har en grundvattenpåverkan som bedöms vara i samma storleksordning som påverkan från anläggandet av järnvägen. Av denna

anledning bedöms det inte vara nödvändigt att genomföra beräkningar av påverkansområde för dessa anläggningar. Listan nedan redovisar anläggningar där beräkning av påverkansområde inte genomförts för planerad grundvattenbortledning. För mer information om respektive anläggning och bedömning, se relevant kapitel i PM Yt- och grundvatten.

- G094-003 (A, B). Vägbroar för Böksjövägen över Ostlänken respektive E4. Km 94+488 – km 94+497.
- G102-002. Fördröjningsdamm med tillhörande VA-ledningar. Km 102+750 – km 102+800.
- G105-003. Vägbro för Krusenhofsvägen över Ostlänken. Km 105+270.
- G105-004. Järnvägsbro för Kardonbanans spår G1 över Ostlänken. Km 105+330.
- G105-005. Järnvägsbro för Kardonbanans spår G2 över Ostlänken. Km 105+420.

Figur 12 visar de vattenverksamheter där påverkansavståndsberäkningar har genomförts längs norra delsträckan.



Figur 12. Översikt av de fyra broar som beräkningar för påverkansavstånd har genomförts för.

Påverkansavståndet för olika vattenverksamheter beror till del på hur stor grundvattenavsänkningen är, vilket i sin tur beror på schaktdjupet samt bedömd grundvattennivå.

Grundvattennivån för respektive bro är taget från närmaste belägna grundvattenrör, av vilka det finns ett stort antal längs planerad spårlinje. Vanligen är dessa grundvattenrör belägna inom 100 meter av planerad bro och utgör därmed ett bra underlag för representativa grundvattennivåer. Till beräkningarna har uppmätt medelnivå använts för hela mätperioden som vanligen sträcker sig mellan åtminstone 2018 och 2022.

Tabell 13 visar den största schakten i jord samt den största grundvattensänkningen för respektive konstruktion. De schakter som endast utförs i de översta lagren av mäktiga lera bedöms inte kräva grundvattenbortledning.

Tabell 13. Största avsänkingsdjupen för brostöd på norra delsträckan.

	ID	Längdmätning (km)	Anläggning	Största schaktning jord / Största grundvattensänkning
	G094-004	94+729	Järnvägsbro över Åksjöbäcken	4,0 m / 4,0 m
	G094-005	94+729	Vägbro över Åksjöbäcken	3,6 m / 3,6 m
	G103-001	103+500	Landskapsbro Malmölandet	3,4 m / 2,9 m
	G104-001	104+000	Bro över Torshagsån	4,0 m / 2,0 m

G094-004 består av en kortare järnvägsbro över Åksjöbäcken som föreslås som en plattramsbro i ett spann. Järnvägsbro föreslås grundläggas med plattgrundläggning på packad fyllning i fast ostörd naturligt lagrad jord. Grundvattennivån kan förväntas ligga i eller kring nivå +70 enligt två närliggande grundvattenrör. Markytan ligger också omkring +70 meter, vilket innebär att hela schaktens djup antas medföra temporär grundvattensänkning i fast lagrad sand/blandkornig morän.

G094-005 utgörs av en kortare vägbro där Åksjöbäcken går över en befintlig enskild väg (serviceväg i driftskede), cirka 250 meter uppströms planerad järnvägsbro (G094-004). Åksjöbäcken går i dagsläget i en stentrumma, vilken kommer rivas ut helt och ersättas av en prefabricerad sluten plattrambro i samma läge. Plattramsbron föreslås läggas ned i vattendraget, som under byggtiden leds förbi platsen. Bron grundläggs på packad fyllning under vatten och botten och slänter i Åksjöbäcken grävs ut i erforderlig omfattning vid broläget. Schaktdjupet från befintlig väg bedöms uppgå till cirka 3,6 meter, vilket även motsvarar storleken på den tillfälliga grundvattensänkningen. I och med att undersökningar av jordlagerförhållanden och grundvattennivåer har liknande förutsättningar som för G094-004 antagits råda på denna plats.

G103-001 utgörs av en landskapsbro över Malmölandet, vilken bland annat passerar över E4 och järnvägen mot Nyköping. Bron planeras utföras med totalt 16 brostöd, varav

de sydligaste 10 stöden är placerade i djup lera där avsänkning inte bedöms bli aktuellt. De 4 nordligaste stöden (stöd 1-4) är belägna på en plats där jordens översta lager utgörs av sandig morän och det inte finns någon lera att skifta ur; anläggningen för dessa stöd blir således relativt ytlig och ger endast en relativt grund, temporär avsänkning. Marken vid de nästföljande två stöden (stöd 5 och 6) består av lera, vilken behöver skiftas ur vid anläggningen. Detta innebär att den djupaste grundläggningen, tillika största avsänkningen, utgörs av en permanent avsänkning vid stöd 5 och 6, km 103+280 – km 103+330. Påverkansområdet har därmed beräknats för en kombinerad samtidigt avsänkning för de båda stöden.

G104-001 består av en kortare bro över Torshagsån, där stöd ska placeras på båda sidor av ån. Stöden bedöms kräva en grundläggning på cirka 4 meter djup i lera-silt. Påverkansområdet blir av den anledningen relativt litet för denna plats.

3.3.4. Resultat

I Tabell 14 redovisas resultatet från de numeriska beräkningarna av påverkansavstånd. Påverkansavstånden redovisas för eventuella olika avsänkingsdjup för respektive skärning.

Tabell 14. Resultat av beräkning av påverkansavstånd för alla områden, avrundade till närmsta tiotal.

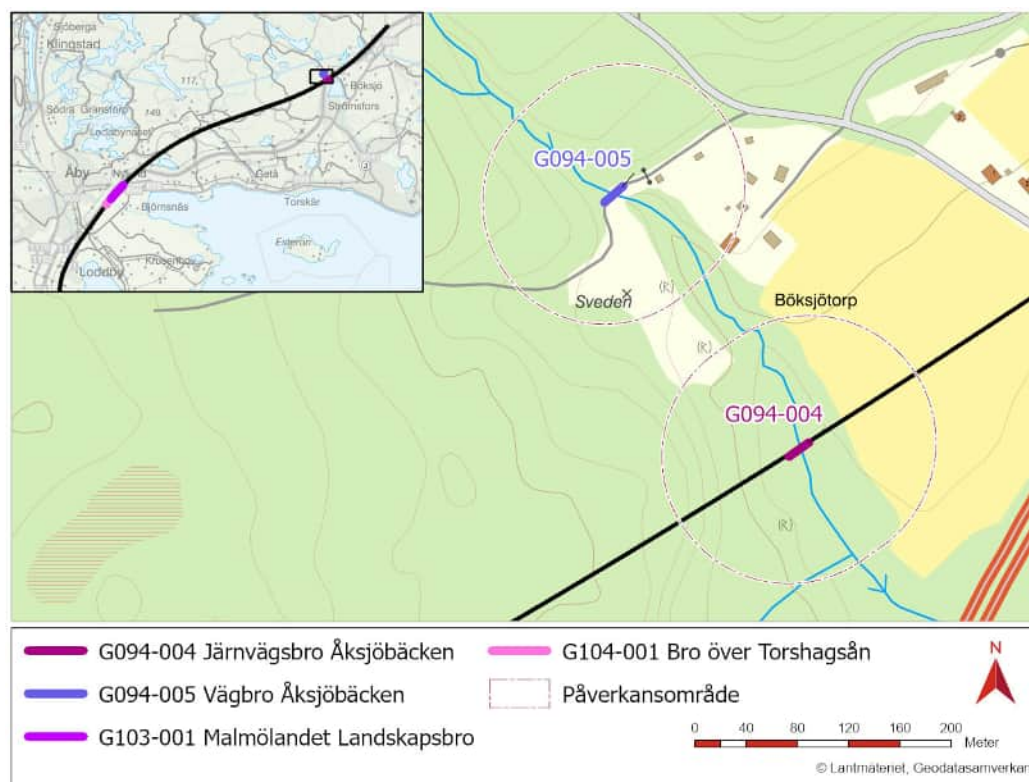
	ID	Temporärt påverkansavstånd	Permanent påverkansavstånd
	G094-004	99 m	-
	G094-005	95 m	-
	G103-001	30 m	90 m
	G104-001	20 m	-

Varje lösning för påverkansavstånd som redovisas i Tabell 14 har en specifik parameteruppsättning för Q, K samt W som tillsammans med avsänkningen ger påverkansavståndet. Tabell 15 redovisar dessa parameteruppsättningar för påverkansavstånd för det största skärningsdjupet.

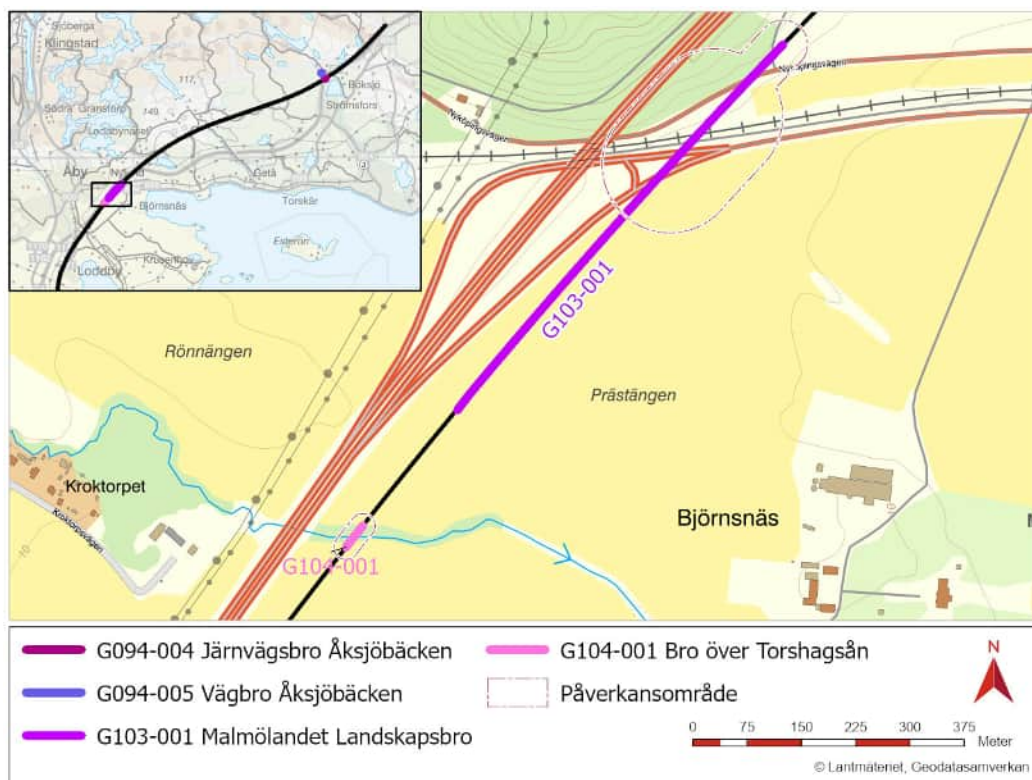
Tabell 15. Parameteruppsättningar för påverkansavstånden för största skärningsdjup i Tabell 14. Värdena för Q (inläckage), K (hydraulisk konduktivitet), W (grundvattenbildning) och s (avsänkning) ger tillsammans respektive påverkansavstånd.

	Skärning	Påverkansavstånd (m) [berg/jord]	Q (m ³ /s)	Q hela bron (l/s)	K (m/s)	W (mm/år)	s (m)
	G094-004	99 (jord)	$6,7 \cdot 10^{-7}$	0,03	$7,1 \cdot 10^{-6}$	140	4,0
	G094-005	95 (jord)	$6,7 \cdot 10^{-7}$	0,03	$8,3 \cdot 10^{-6}$	140	3,6
	G103-001	90 (jord)	$7,0 \cdot 10^{-7}$	0,01	$6,8 \cdot 10^{-6}$	150	3,9
	G104-001	20 (jord)	$1,0 \cdot 10^{-7}$	0,01	$9,0 \cdot 10^{-7}$	90	2,0

Figur 13 och Figur 14 visar påverkansavstånden i planvy.



Figur 13. Påverkansområde för broar över Åksjöbäcken.



Figur 14. Påverkansområde för brostöd för broar i södra delen av norra delsträckan.

3.4. Kolmårdstunneln

3.4.1. Inledning

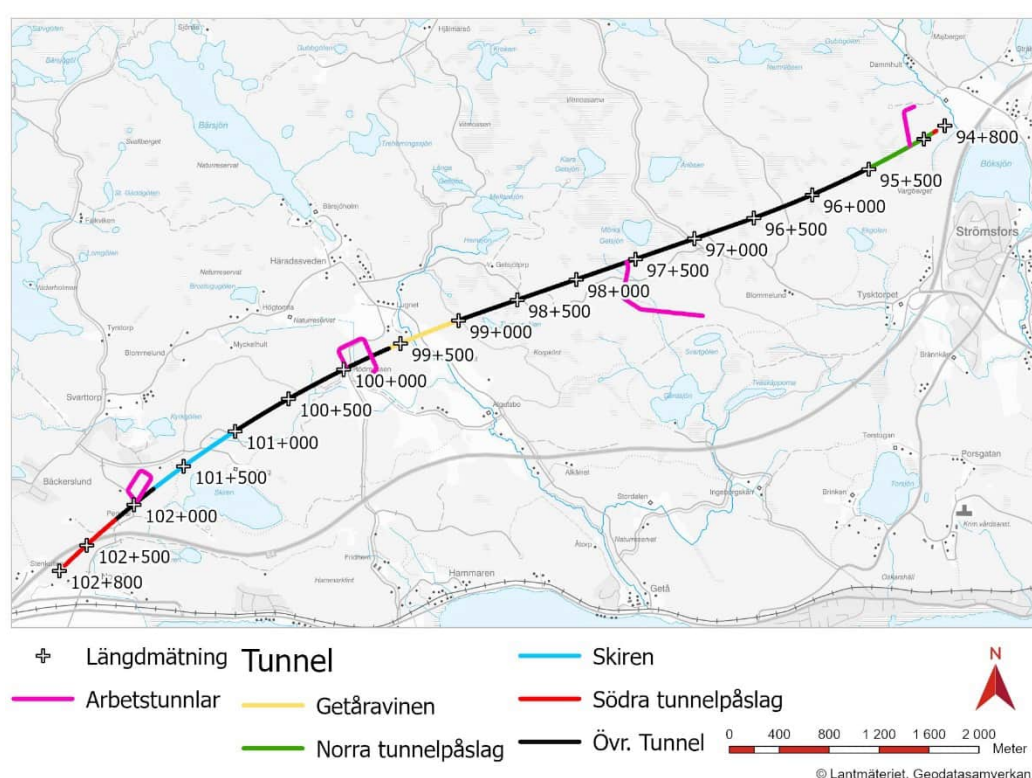
I detta kapitel redovisas analytiska beräkningar av inläckage till Kolmårdstunneln. Tunneln är cirka 8 kilometer lång och upp emot 150 meter djup, vilket innebär stora grundvattentryck och potentiellt stora inläckage om berget är permeabelt. Kolmårdstunneln kommer att passera en mycket variationsrik hydrogeologisk miljö, såväl med avseende på hydraulisk konduktivitet, grundvattenbildning som förläggningsdjup. Detta innebär stora metodologiska utmaningar och osäkerheter i att beräkna inläckage till och påverkan från de olika delarna av tunneln, såväl med numeriska modeller, men framför allt med analytiska modeller. Egenskaperna har framför allt inte klarlagts för att kunna medge mer precisa prognoser än vad som här indikeras. Kolmårdstunnelns påverkansområde har främst tagits fram genom en grundvattenmodell i programmet MODFLOW Flex, se kapitel 4. Anledningen till detta är graden av komplexitet som denna tunnel medför. För att kontrollera rimligheten i modellens resultat så utfördes också analytiska beräkningar av inläckage och påverkansområde till tunneln. Genom att jämföra modellen och de analytiska beräkningarna så kan resultaten från modelleringen få högre eller lägre trovärdighet.

Resultatet av analytiska beräkningarna består av ett influensområde som speglar maximal grundvattenavsänkning omkring för Kolmårdstunneln. Influensområdet har beräknats för varje 100 meters-sektion av tunneln, då egenskaper såsom djup och hydraulisk konduktivitet ändras längsmed tunneln. Därtill förekommer sprickzoner med lokalt högre genomsläpplighet längs tunneln. Det totala influensområdet har tagits fram genom att lägga ihop avsänkningar och influensavstånden från alla sektioner, inklusive arbetstunnlar, längs tunneln.

Syftet var att redovisa möjligt influens- och påverkansavstånd, utifrån rimliga antaganden om tunnelns, bergets och grundvattnets egenskaper. Beräkningarna baserades på bästa möjliga, men konservativt ansatt, indata. Dessa influensberäkningar bygger på konservativa antaganden för att inte underskatta maximalt möjligt påverkansområde.

Beräknat påverkansområde utifrån analytiska formler kan ses som ett komplement till resultaten från den numeriska modelleringen, och en kontrollberäkning för att se att analytisk och numerisk beräkning stämmer väl överens med varandra. Detta ökar trovärdigheten i resultaten för såväl analytisk som numerisk beräkning.

Figur 15 visar en översikt av Kolmårdstunneln med markerade intresseområden och arbetstunnlar.



Figur 15. Kolmårdstunnelns sträckning med längdmätning och arbetstunnlar markerade. De färgade sträckorna är områden med bedömt störst behov av injektering.

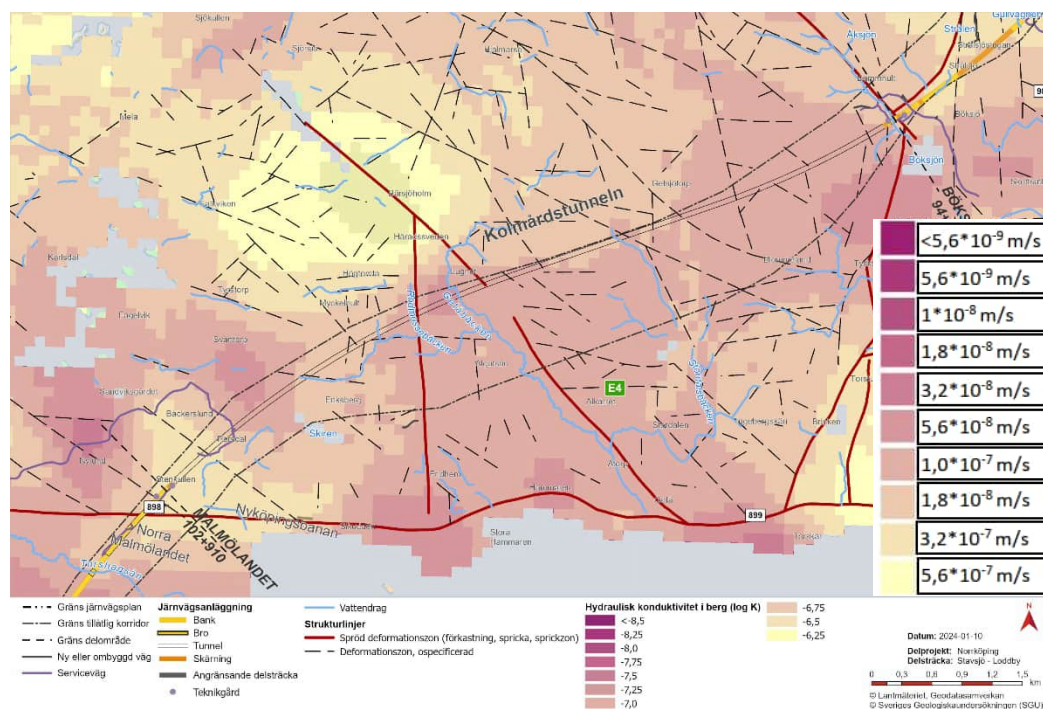
Vid analytisk beräkning av inläckage har tunneln delats upp i 100 meters-sektioner, då inläckage till bergtunnlar vanligen beräknas som specifikt inläckage: inläckage per 100 meter längd. Beräkningar av influens- och påverkansavstånd har utförts separat för alla 100 meters-sektioner av Kolmårdstunneln. Längs tunnelns sträcka på totalt 8 kilometer förändras förutsättningarna utifrån tunneldjup, geologi och därmed inläckage, samt landskapet och omgivningen. Att genomföra beräkningar för var 100:e meter i de analytiska beräkningarna har därmed bedömts vara en lämplig detaljeringsgrad.

3.4.2. Bergets hydrauliska konduktivitet

Bergets hydrauliska konduktivitet är en styrande parameter förknippad med betydande osäkerhet i bestämningen. För att bedöma den hydrauliska konduktiviteten i berg används främst data från vattenförlustmätningar som jämförs med information från SGU:s brunndata, (SGU, 1997).

Kartverket ”Hydraulisk konduktivitet i berg” från SGU har använts för att en bild över den storskaliga konduktiviteten i området. Figur 16 visar på ett urklipp från kartverket med Kolmårdstunneln i centrum. SGU:s data visar en hydraulisk konduktivitet i området som åtminstone varierar mellan $6 \cdot 10^{-9}$ till $6 \cdot 10^{-7}$ m/s med absoluta majoriteten av tunnelsträckningen i lägre delen av spannet.

I nordöstra delen av sträckning för Kolmårdstunneln beskrivs bestå av framför allt äldre, vanligen gnejsig granit för att övergå till yngre grovporfyrisk granit som ögongnejs. Därefter, ungefär i mitten av tunnelsträckningen beskrivs området bestå av äldre sedimentbergarter och i sydvästra delen av tunneln övergår berget till att bestå av framför allt yngre grovporfyrisk granit.



Figur 16. Karta över bergets hydrauliska konduktivitet i Kolmårdområdet från SGU, (SGU, 1997).

Generellt visar SGU:s data av hydrauliska konduktivitet i samma spann som data från vattenförlustmätningar utförda i borrhål inom området. SGUs data kommer från områden där det finns brunnar installerade, vilket är koncentrerat till bostadsområden. Detta syns bl.a. genom att SGUs data inte tar hänsyn till svaghetszoner om det saknas brunnar längs med dem. Som för vattenförlustmätningarna i kärn- och hammarborrhålen är brunnarna i medianvärde inte på det djup som den projekterade tunneln.

Vattenförlustmätningar från kärn- och hammarborrhål

I Tabell 16 redovisas resultat från utförda halvhålsmätningar där det finns och helhålsmätningar där data från halvhålsmätningar saknas. Halvhålsmätningarna antas vara mer representativa eftersom större delen av den projekterade bergtunneln drivs i stort djup med mycket bergtäckning. Som tidigare nämnts i förutsättningar avtar generellt vattengenomsläpplighet mot djupet. Längden på hammarborrhål varierar mellan 50-120 meter, för kärnborrhål varierar längden mellan cirka 30-110 meter.

Tabell 16. Sammanställning av konduktivitet i berg utvärderat från vattenförlustmätningar över delsträckan Stavsjö-Loddbys (från söder till norr längs sträckningen).

Område	Längdmätning *	Borrhål	Konduktivitet [m/s]	Kommentar
Skiren	101+550	15S1KB02	$1,3 \cdot 10^{-7}$	Halvhålsmätning
Böksjötorp	94+300	16S1KB11	$2,9 \cdot 10^{-8}$	Halvhålsmätning
Böksjötorp	94+600	16S1KB09	$9,9 \cdot 10^{-9}$	Halvhålsmätning
Böksjötorp	95+200	17HB106	$8,8 \cdot 10^{-8}$	Halvhålsmätning
Böksjötorp	96+300	17HB105	$7,1 \cdot 10^{-9}$	Halvhålsmätning
Böksjötorp	97+100	17HB104	$7,8 \cdot 10^{-8}$	Halvhålsmätning
Böksjötorp	98+000	17HB103	$2,4 \cdot 10^{-9}$	Halvhålsmätning
Getå	98+850	16S1KB08	$2,2 \cdot 10^{-8}$	Halvhålsmätning
Getå	98+850	16S1KB12	$1,0 \cdot 10^{-8}$	Halvhålsmätning, $K=0$. K har därför ansatts till $K_{\min}$ vid vattenförlustmätningens mätnoggrannhet
Getå	99+300	17S1KB15	$2,9 \cdot 10^{-7}$	Helhålsmätning, utgör underlag för K svaghetszon
Getå	99+450	16S1KB13	$2,2 \cdot 10^{-7}$	Helhålsmätning, utgör underlag för K svaghetszon
Skiren	101+050	16S1KB04	$1,0 \cdot 10^{-8}$	Halvhålsmätning, $K=0$. K har därför ansatts till $K_{\min}$ vid vattenförlustmätningens mätnoggrannhet
Skiren	101+500	17HB102	$5,0 \cdot 10^{-8}$	Halvhålsmätning
Skiren	101+650	18S1KB17	$9,1 \cdot 10^{-10}$	Halvhålsmätning
Skiren	101+900	17HB101	$1,5 \cdot 10^{-8}$	Halvhålsmätning
Kolmårdsbranten	102+500	14S1KB03	$2,8 \cdot 10^{-7}$	Halvhålsmätning

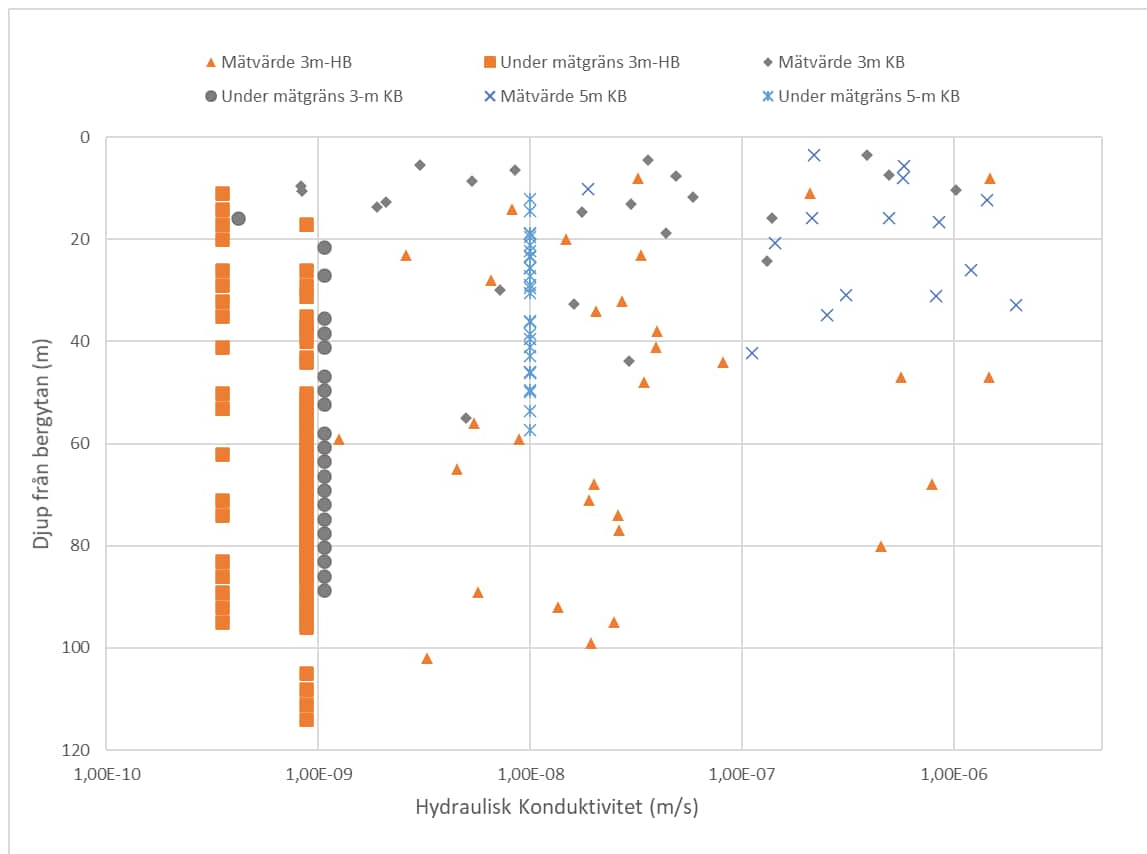
*Ungefärlig angivelse på längdmätning då kärn- och hammarborrhålen är inom korridoren.

Sektionsvisa vattenförlustmätningar

Samtliga sektioner vattenförlustmätningar från kärnborrhål och hammarborrhål har sammanställts med sektion och djup. Vid tolkning av hydraulisk konduktivitet har mätvärden delats upp beroende på mätsektionernas längd, 5 meterssektioner och 3 meterssektioner samt om de har utförts i kärnborrhål eller hammarborrhål då mätningarna har olika mätnoggrannhet. De borrhål som har vattenförlustmätts i 3m sektioner har utförts med övertryck om 0,2 MPa och motsvarande för 5 m-sektioner är 0,3 MPa övertryck. Mätgränsen för borrhål i 3 meterssektioner har varit 0,005 l/min förutom för 15S1KB02 och 16S1KB09 där mätgränsen har bedömts vara 0,002 l/min. För samtliga 5 meterssektionerna har mätgränsen bedömts vara 0,1 l/min. I Figur 21 sammanställs mätgränserna och motsvarande hydraulisk konduktivitet vid den undre mätgränsen.

Tabell 17. Sammanställning av mätgräns och motsvarande hydraulisk konduktivitet, K.

Borrhål	Undre mätgräns, Q (l/min)	Övertryck (MPa)	Hydraulisk konduktivitet vid undre mätgräns (m/s)
Kärnborrhål vattenförlustmätta i 5m sektioner, samtliga	0,1	0,3	$K \approx 1,0 \cdot 10^{-8}$
18S1KB17, 3m sektioner	0,005	0,2	$K \approx 1,0 \cdot 10^{-9}$
15S1KB02 och 16S1KB09, 3m sektioner	0,002	0,2	$K \approx 4,2 \cdot 10^{-10}$
Hammarborrhål, 3m sektioner, samtliga	0,005	0,2	$K \approx 8,8 \cdot 10^{-10}$

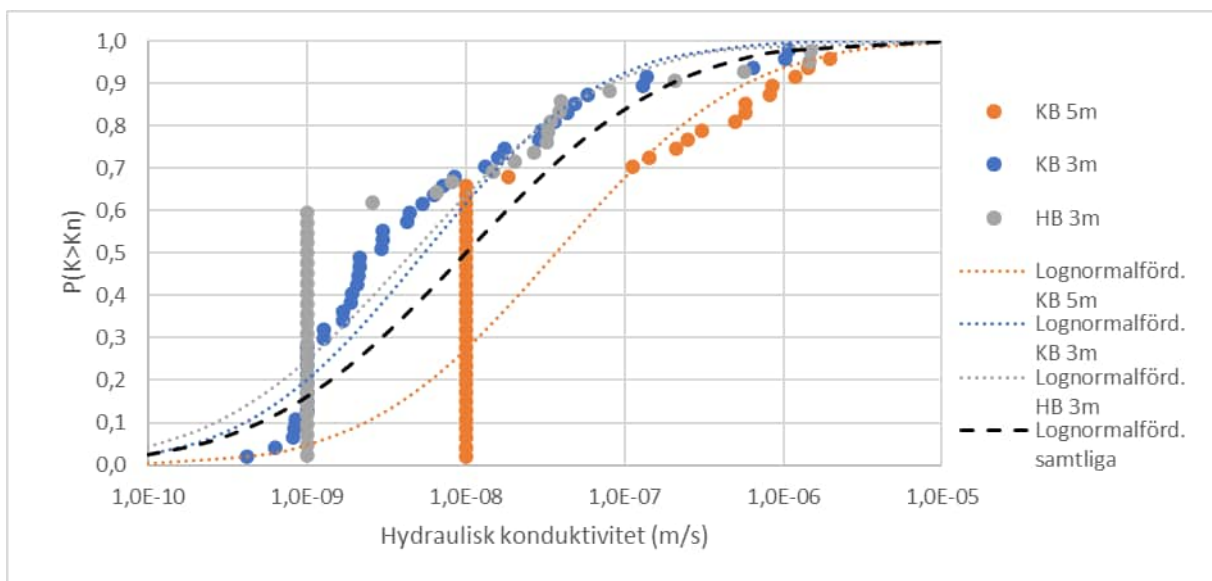


Figur 17. Sammanställning av vattenförlustmätningar från kärnborrhål och hammarborrhål, sektionvis. Höga genomsläppligheter är ovanliga på större djup.

Det finns ingen tydlig gräns för djupet mot hydraulisk konduktivitet, bedömningen är att yttligare berg visar högre flöde i vattenförlustmätningarna. En uppdelning har gjorts för mätvärden med bergtäckning, $H \leq 50\text{m}$, där större spridning ses i hydraulisk konduktivitet, och bergtäckning $H > 50\text{m}$.

Hydraulisk konduktivitet i ytnära berg

För bergtäckning 50 meter eller mindre har statistik tagits fram av aritmetiskt och geometriskt medelvärde samt olika percentiler på lognormalfördelning av sammanställda data från vattenförlustmätningar, se Figur 18 och Tabell 18. I resultaten som visas i Figur 18 ses en tydlig skillnad mellan tre- och fem-meters sektioner, det är sannolikt en typisk skaleffekt där tester i större skala (längre sektioner) generellt får högre hydraulisk konduktivitet på grund av att sannolikheten att en vattenförande spricka finns i sektionen är högre. Lognormalfördelningen är passad mot befintliga data och indikerar hur fördelningen kan se ut under mätgräns. Vattenförlustmätning i den översta sektionen har generellt varit mer uppsprucken än mätningar under den yttligaste mätsektionen. Därför har den mätsektion som ligger yttligast tagits bort för kärnborrhål 15S1KB02, 16S1KB09, 16S1KB11 och 18S1KB17 eftersom de inte antas representera berget i stort.



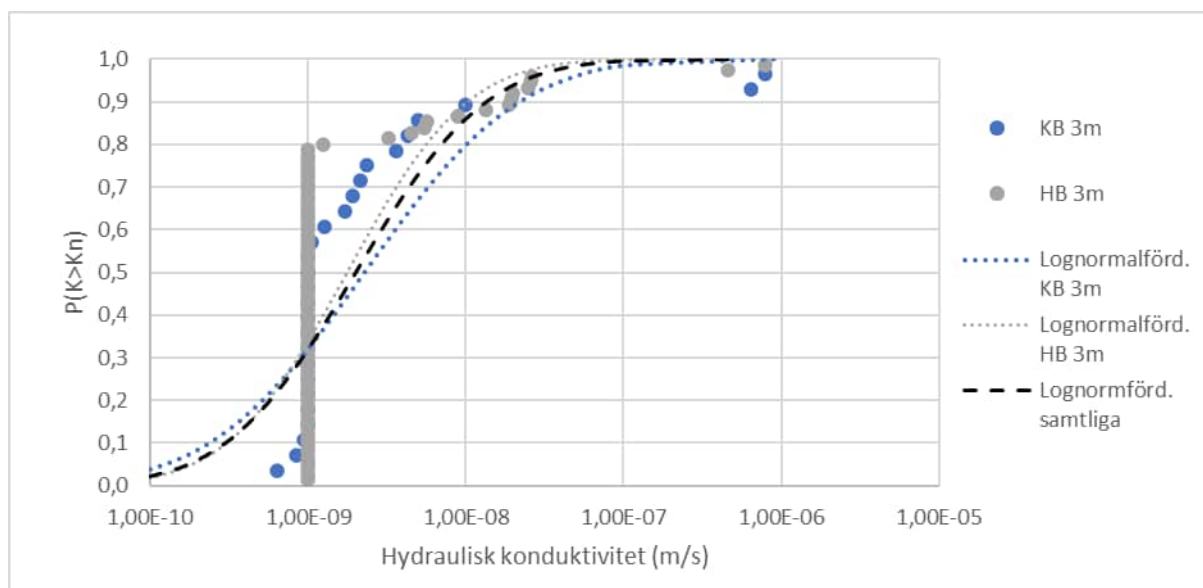
Figur 18. Hydraulisk konduktivitet i sektionsmätningar utförda vid $H \leq 50\text{m}$ representerat i prickar och kumulativ fördelningsfunktion i streckat.

Tabell 18. Statistik för hydraulisk konduktivitet vid bergtäckning, $H \leq 50\text{m}$.

Beräknade värden	Hydraulisk konduktivitet [m/s]	Passad normalfördelning	Hydraulisk konduktivitet [m/s]
Aritmetiskt medelvärde, K_a	$7,5 \cdot 10^{-7}$	10%-percentil	$5,1 \cdot 10^{-10}$
Geometriskt medelvärde, K_g	$1,0 \cdot 10^{-8}$	25%-percentil	$2,1 \cdot 10^{-9}$
Matherons förmodan, K_{3D}	$2,5 \cdot 10^{-8}$	50%-percentil	$1,0 \cdot 10^{-8}$
Maximalt uppmätt K, $K_{\max}$	$8,3 \cdot 10^{-5}$	75%-percentil	$4,8 \cdot 10^{-8}$
		90%-percentil	$2,0 \cdot 10^{-7}$

Hydraulisk konduktivitet i djupberg

För berg med bergtäckning mer än 50 m har statistik tagits fram av aritmetiskt och geometriskt medelvärde, K_{3D} med Matherons förmodan (Gustafson, 2009) samt olika percentiler på lognormalfördelning av sammanställda data från vattenförlustmätningar, se Figur 19 och Tabell 19. Underlag kommer från vattenförlustmätningar i 3 meterssektioner i kärnborrhål och hammarborrhål. För djupberg med bergtäckning, $H > 50\text{m}$ har inga mätningar gjorts med 5 meters sektioner.



Figur 19. Hydraulisk konduktivitet i sektionsmätningar utförda vid $H > 50\text{m}$ representerat i prickar och kumulativ fördelningsfunktion i streckat.

Tabell 19. Statistik för hydraulisk konduktivitet vid bergtäckning, $H > 50\text{m}$.

Beräknade värden	Hydraulisk konduktivitet [m/s]	Passad normalfördelning	Hydraulisk konduktivitet [m/s]
Aritmetiskt medelvärde, K_a	$2,9 \cdot 10^{-8}$	5 %-percentil	$3,0 \cdot 10^{-10}$
Geometriskt medelvärde, K_g	$2,0 \cdot 10^{-9}$	25 %-percentil	$7,2 \cdot 10^{-10}$
Matherons förmodan, K_{3D}	$2,8 \cdot 10^{-9}$	50 %-percentil	$1,9 \cdot 10^{-9}$
Maximalt uppmätt K, $K_{\max}$	$7,9 \cdot 10^{-7}$	75 %-percentil	$5,4 \cdot 10^{-9}$
		90 %-percentil	$1,4 \cdot 10^{-8}$

3.4.3. Tätning av tunnel

Tätning av tunneln förväntas i första hand ske som behovsstyrd cementinjektering i en eller flera skärmar. Vid specifika områden kan det bli aktuellt med annat tätningsmedel om så krävs. De värden som antagits för tätning längs med tunneln kommer från rimlighetsavvägning kring hur effektiv cementinjektering generellt är.

För konventionell cementinjektering så har tre antaganden gjorts:

- Tätningen sänker inte bergets hydrauliska konduktivitet med mer än 1/50
- Tätningen i kraftigt vattenförande berg ($K \geq 3 \cdot 10^{-6}$ m/s) sänker inte hydrauliska konduktiviteten under 1/10 av naturligt berg
- Tätningen kommer normalt inte att sänka konduktiviteten under $1 \cdot 10^{-8}$ m/s

Arbetskrävande cementinjektering, som enbart appliceras vid passage av sjön Skiren, sänker den hydrauliska konduktiviteten i injekteringsskärmen till $1 \cdot 10^{-9}$ m/s.

3.4.4. Analytisk beräkning

Inläckage

Påverkan från tunneln är i stor utsträckning beroende av inläckaget till tunneln, då detta styr hur mycket grundvatten som kommer att dräneras från ovanliggande jord- och berglager. En bedömning av påverkansområde kräver således information om bedömt inläckage. Notera att såväl inläckage som påverkansområde även har beräknats via numerisk modellering (se kapitel 4), och att det är resultaten från den numeriska modellen som används använts vidare i tillståndsansökan (MKB, projektering av åtgärder med mera). Analytiska beräkningar av inläckage används mest som en kontroll av de numeriskt beräknade resultaten, för att se om de två metoderna ger liknande resultat och därmed kan styrka resultaten.

Inläckage kan beräknas för såväl otätade (oinjekterade) förhållanden som tätade (injekterade) förhållanden. I första hand beräknas injekterat inläckage till tunneln, då detta ger en bästa uppskattning av hur inläckage till tunneln påverkar grundvattenförhållanden i driftskedet.

Otätat inläckage är beräknat per 100 m-tunnelsektion enligt formeln i Ekv. 15 (Gustafson, 2009), i vilken Q beror på bland annat hydraulisk konduktivitet (K) och grundvattentrycket (H). Av detta följer att de yttigare sektionerna av tunneln, samt de sektioner där sprickförekomster ger större genomsläpplighet, har större otätat inläckage.

$$Q = \frac{2\pi KH}{\ln \frac{2H}{r_t} + \xi} \quad \text{Ekv. 15}$$

Q – Inläckage till en otätad tunnel (m^3/s)

H – Djup från grundvattenytan till tunnelcentrum (m)

r_t – Tunnelradie (m)

K – Genomsnittlig hydraulisk konduktivitet vid tunnelnivå (m/s)

ξ - Skinfaktor (-). Har ansatts till 1 för samtliga beräkningar.

Otätat (oinjekterat) inläckage har beräknats för alla sektioner, och där inläckaget har bedömts vara för stort har ett tätat (injekterat) inläckage också beräknats, vilket antar inläckage efter tätningsåtgärder. Vanligen kan berget tätas ner till åtminstone <10 % av annars otätat inläckage som riktmärke, och beroende av huvudsakligen tätningsmedel samt tjocklek på skärmen.

Som H (djup från grundvattenyta till tunnelcentrum) så har grundvattenytan likställts med markytan. Förenklingen är utförd eftersom detaljerade data saknas samtidigt som de mätningar som finns pekar på att eventuella skillnader mot verkligheten blir nära försumbart för de djup tunneln är belägen.

Vid beräkning av inläckage har tunnelradien (r_T) beräknats som en ekvivalent radie där tvärsnittsarean för tunneln (inklusive servicetunnel) räknas om till radie enligt Ekv. 23.

Bergets hydrauliska konduktivitet är baserat på vattenförlustmätningar, och har funnits variera med djupet (se avsnitt o). Detta har givit en profil med gradvis minskande K-värden för större tunneldjup. Därtill har sprickzoner i berget identifierats, där ett lokalt högre värde på K används för de sektioner som passerar sprickzoner. Den hydrauliska konduktiviteten som beräknats från vattenförlustmätningar stämmer väl överens med den av SGU uppskattade hydrauliska konduktiviteten.

Som konduktivitetsvärde i analytiska beräkningarna så har ett sammanvägt K_{3D} valts för den nivå som tunneln befinner sig på och berget ovanför, se kapitel o. Det innebär att när tunneln är djupare än 50 m under markytan så beräknas ett genomsnittligt K-värde fram från den totala bergmassan ovan. Ett enhetligt K-värde har valts för de flesta sprickzonerna. K-värdet för sprickzoner är tydligt högre än bergmassan. Det höga K-värdet är lagt på en sträcka av 20 m, vilket är kraftigt över den uppskattade sträckan, förutom vid Getåravinen, km 99+00 – km 99+600. Vid Getåravinen har, i enlighet med numeriska modellen, ett sammanvägt högt K-värde lagts på en längre sträcka. Se sammanställning av K-värden längs sträckan i Tabell 20. I tabellen presenteras också de värden som valts på injekteringsskärmen. När K_{berg} understiger kriteriet för tätning (se o) implementeras ingen tätning.

Tabell 20. Valda konduktivitetsvärden längs med tunnelsträckan, för såväl otätat berg (K_{berg} Vägt3D) som injekterat berg (K_{inj}). Streck på K_{inj} innebär att ingen tätning ansätts på grund av tillräckligt lågt K_{berg} . Tunneldjup (från markyta till tunnelcentrum) anges som spann för de längre sektionerna, där tunneln når flera olika djup över sektionens längd.

LM från	LM till	Sektionslängd (m)	Tunneldjup (m)	K_{berg} Vägt3D (m/s)	K_{inj} 3D (m/s)
94+800	96+440	1640	20-103	$2,5 - 1 \cdot 10^{-08}$	$1 \cdot 10^{-08}$
96+440	96+460	20	102	$2 \cdot 10^{-07}$	$1 \cdot 10^{-08}$
96+460	97+500	1040	100-107	$1,4 - 1,3 \cdot 10^{-08}$	-
97+500	97+520	20	109	$2 \cdot 10^{-07}$	$1 \cdot 10^{-08}$
97+520	98+520	1000	106-133	$1,1 - 1,3 \cdot 10^{-08}$	-
98+520	98+540	20	128	$2 \cdot 10^{-07}$	$1 \cdot 10^{-08}$

LM från	LM till	Sektionslängd (m)	Tunneldjup (m)	K _{berg} Vägt3D (m/s)	K _{inj} 3D (m/s)
98+540	99+220	680	120-80	1,2 - 1,7*10 ⁻⁰⁸	-
99+220	99+240	20	80	3*10 ⁻⁰⁶	3*10 ⁻⁰⁷
99+240	99+660	420	87	2*10 ⁻⁰⁷	2*10 ⁻⁰⁸
99+660	99+880	220	102-90	1,4*10 ⁻⁰⁸	-
99+880	99+900	20	76	3*10 ⁻⁰⁶	3*10 ⁻⁰⁷
99+900	100+540	640	80-110	1,3 - 1,6*10 ⁻⁰⁸	-
100+540	100+560	20	102	2*10 ⁻⁰⁷	1*10 ⁻⁰⁸
100+560	101+100	540	112 - 96	1,2 - 1,4*10 ⁻⁰⁸	-
101+100	101+120	20	92	2*10 ⁻⁰⁷	1*10 ⁻⁰⁸
101+120	101+300	180	93	1,5*10 ⁻⁰⁸	-
101+300	101+620	320	93-86	1,5 - 1,6*10 ⁻⁰⁸	1*10 ⁻⁰⁹
101+620	102+380	760	86-48	1,6 - 2,5*10 ⁻⁰⁸	-
102+380	102+400	20	46	2*10 ⁻⁰⁷	1*10 ⁻⁰⁸
102+400	102+718	318	40-29	2,5*10 ⁻⁰⁸	1*10 ⁻⁰⁸

Tabell 21 visar vilka storleksordningar som är beräknade för otätat inläckage för olika tunneldjup, samt för sektioner genom bedömd sprickzon. I synnerhet sprickzonerna i Getåravinen har ett mycket högt beräknat inläckage, vars rimlighet diskuteras i avsnitt Osäkerheter.

Tabell 21. Beräknat otätat inläckage för olika tunneldjup och valda K enligt Tabell 20 ovan.

Tunneldjup [m]	Otätat inläckage (Q _{inj}) [l/min, 100 m]
0-30 m	6-80
30-50 m	11-50
50-60 m	12-30
>60 m	10-15
Sprickzoner	91 – 690

Tätat inläckage till tunneln beräknas enligt Ekv. 16 (Gustafson, 2012)

Följande ekvation ger inflöde till en tätad tunnel.

$$Q_{inj} = \frac{2\pi\bar{K}H}{\ln\left(\frac{2H}{r_t}\right) + \left(\frac{\bar{K}}{\bar{K}_{inj}} - 1\right) * \ln\left(1 + \frac{t}{r_t}\right) + \xi} \quad \text{Ekv. 16}$$

Q_{inj} – Inläckage till en tätad tunnel (m³/s)

H – Djup från grundvattenytan till tunnelcentrum (m)

r_t – Tunnelradie (m)

$\bar{K}$ – Genomsnittlig hydraulisk konduktivitet vid tunnelnivå (m/s)

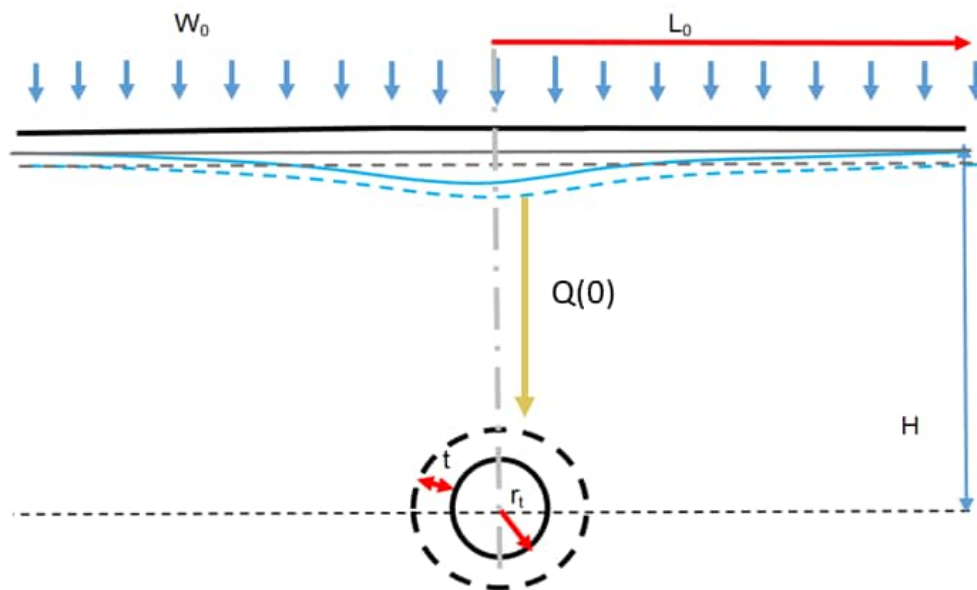
K_{inj} – Tätade zonens hydrauliska konduktivitet (m/s)

t – Tätade zonens medeltjocklek (m)

ξ - Skinfaktor (-). Har ansatts till 1 för samtliga beräkningar.

Vid beräkning av inläckage har tunnelradien (r_t) beräknats som en ekvivalent radie där tvärsnittsarean för tunneln (inklusive servicetunnel) räknas om till radie enligt Ekv. 23.

Figur 20 visar en schematisk bild av tunneln och påverkan på grundvattenförhållanden:



Figur 20. Profilvy av schematisk avsänkning till följd av inläckage till tunnel. W avser grundvattenbildning (nettonederbörd), L_0 avser påverkansavstånd, $Q(0)$ avser vertikalflödet från rakt ovanför tunneln, t avser den tätade zonens medeltjocklek och r_t avser tunnelns radie.

Inläckagen efter tätning har utgått från möjliga tätningsåtgärder för att kunna erhålla ett lägre inläckage i sektioner där det otätade inläckaget är stort. Detta förekommer i de ytligaste sektionerna vid tunnelpåslagen, men även vid sprickzoner, vid Getåravinen samt vid den skyddsvärda sjön Skiren. För att tydligare redovisa inläckaget har tunneln delats in i zoner. Dessa zoner används även för vattenbalans- och inläckageberäkningar för den numeriska modellen (se Figur 45 för zonindelning och Tabell 30 för beräknat inläckage från den numeriska modellen), för att enklare kunna jämföra resultaten mellan numerisk och analytisk modell. Tabell 22 sammanfattar sektioner med inläckage efter tätning. Inläckage redovisas i liter per minut och 100 meter, vilket har erhållits genom att ta läckaget per meter för respektive zon multiplicerat med 100 meter. I praktiken blir detta ett medelvärde för inläckage per 100 meter för respektive zon.

Tabell 22. Beräknat injekterat inläckage i tunnelsektionerna. Till beräkningen har K_{3D} använts. Inläckage redovisas i både totalt inläckage för hela zonens längd (l/min) samt per 100-meterssektioner i respektive zon (l per minut, 100 m).

Zon	Sektioner och totallängd [längdmätning, meter]	Injekterat inläckage (Q_{inj})		Kommentar
		[l/min]	[l/min, 100 m]	
2 – Norra tunnelpåslaget	94+800 – 95+500 700 m	63	9,0	Norra tunnelpåslaget. Ytligt berg med höga K-värden.
3 – Djup tunnel	95+500 – 99+200 3 700 m	475	12,5	Djup tunnel med generellt lågt K, men med förekomst av vissa sprickzoner med högre beräknat inläckage.
4 – Getåravinen	99+200 – 99+660 460 m	470	102,2	Getåravinen. Sprickzoner med höga K-värden.
5 – Djup tunnel	99+660 – 102+100 2 440 m	462	18,9	Djup tunnel med generellt lågt K, men med förekomst av vissa sprickzoner med högre beräknat inläckage.
6 – Södra tunnelpåslaget	102+100 – 102+720 620 m	62	10,1	Södra tunnelpåslaget. Ytligt berg med höga K-värden.
7 – Skiren	101+300 – 101+500 200 m	8	4,1	Skyddsvärd sjö med begränsad tillrinning, där påverkan på vattenbalansen ska begränsas så långt det är tekniskt och ekonomiskt möjligt.
8 – Getåbäckens avr.	96+900 – 101+300 4 400 m	1 159	26,3	Getåravinens avrinningsområde. Ett större område med sprickzoner med höga K-värden.
Hela tunneln (2+3+4+5+6)	94+800 – 102+720 7 920 m	1535	19,4	Hela tunnelns inläckage.

Beräknat injekterat inläckage kan jämföras med motsvarande värden från den numeriska modellen (se Tabell 30). Injekterat inläckage från de analytiska beräkningarna ligger högre än från den numeriska modellen, men generellt inom samma storleksordning, vilket ger trovärdighet till beräkningarna. Notera att såväl inläckage som påverkansområde även har beräknats via numerisk modellering (se kapitel 4), och att det är resultaten från den numeriska modellen som används använts vidare i tillståndsansökan (MKB, projektering av åtgärder med mera). Analytiska beräkningar av inläckage används mest som en kontroll av de numeriskt beräknade resultaten, för att se om de två metoderna ger liknande resultat och därmed kan styrka resultaten.

För att det beräknade inläckaget ska vara rimligt måste den vara lika med eller mindre än mängden tillgängligt vatten i området – det kan inte strömma in mer vatten i tunneln än det finns tillgängligt i berget. Dock sker också ett visst okänt tillskott till berget av förhöjd grundvattenbildning från avsänkningen, vilket är svårt att beräkna korrekt och därmed bortses från här. Vid inläckageberäkningar som ligger till grund för influensområde kan det därmed vara relevant att justera inläckage utifrån grundvattentillgång. Inläckage till tunneln kan ske från berget ovanför tunneln, men även från tunnelns sidor och botten. Vatten som läcker in i tunneln kan därmed ledas till tunneln över stora avstånd, via sprickor, och det är därmed svårt att säga hur mycket vatten i berget som finns tillgängligt för inläckage. En i synnerhet vattenförande spricka som står i kontakt med ett stort tillrinningsområde i jord, eller rentav en ytvattenkälla såsom sjö eller bäck, kan ha en mycket stor vattentillgång och begränsning av inläckage är därmed inte motiverat.

Ett generellt antagande har varit att grundvattentillgången styrs av grundvattenbildningen direkt ovanför tunneln (se beräkningsmetod enligt Ekv. 17-Ekv. 22 nedan), vilket utgör en ansats att förbättra den analytiska beräkningsmodellen utifrån naturliga förutsättningar. Detta innebär att den analytiska beräkningen inte tar hänsyn till med komplexa förhållanden såsom sprickförekomst, deras vattenledningsförmåga eller deras vattentillgång – detta är bortom den analytiska beräkningens målsättning som kontrollberäkning av modellen, vilken kan ta med komplexa grundvattenförhållande i beaktande. Antagandet om att grundvattenbildningen ovanför tunneln begränsar inläckage stämmer därmed sannolikt inte för de delar av tunneln där vattentillgången är god och beräknat inläckage – och i förlängningen influensområde – riskerar således bli underskattat. Det är dock viktigt att ha i åtanke att en god grundvattentillgång även indikerar att grundvattensänkningen till följd av inläckage blir mindre, vilket gör att ett mindre influensområde kan vara rimligt att anta även för dessa delar av tunneln.

För att kontrollera att beräknat inläckage till tunneln är rimligt har vertikalflödet rakt över tunneln beräknats och jämförts med grundvattenbildningen. Vertikalflödet rakt över tunneln, $q(0)$ (se Figur 20), har beräknats enligt Ekv. 17 (Gustafson, 2012):

$$q(0) = \frac{Q_{inj}}{\pi \cdot H} \quad \text{Ekv. 17}$$

där Q_{inj} = Inläckage till en tätad tunnel per meter (m^2/s)

och H = Djup från grundvattenytan till tunnelcentrum (m)

Om det beräknade vertikalflödet rakt över tunneln överstiger uppskattad grundvattenbildning måste inläckaget till tunneln justeras enligt följande.

Inledningsvis har det horisontella avstånd x från tunnelns centrumlinje där vertikalflödet motsvarar grundvattenbildningen beräknats enligt Ekv. 18 (Gustafson, 2012):

$$x = \sqrt{\frac{Q_{inj} \cdot H}{\pi \cdot q(x)}} - H^2 = \sqrt{\frac{Q_{inj} \cdot H}{\pi \cdot W}} - H^2 \quad \text{Ekv. 18}$$

där W = Grundvattenbildning (m/s)

Därefter har den del av det beräknade inläckaget till tunneln (Q_{inj}) som härstammar från området mellan tunnellen och x , $q(0-x)$, beräknats enligt Ekv. 19 (Gustafson, 2012):

$$Q(0-x) = Q_{inj} \cdot \left(\frac{2}{\pi} \cdot \arctan\left(\frac{x}{H}\right) \right) \quad \text{Ekv. 19}$$

Eftersom maximal infiltration lokalt antas vara lika med grundvattenbildningen (W) reduceras inflödet till tunneln enligt Ekv. 20.

$$Q_{inj-red} = Q_{inj} - Q(0-x) + W \cdot 2 \cdot x \quad \text{Ekv. 20}$$

Det reducerade inläckaget ($Q_{inj-red}$) kan således användas för beräkning av influens- och påverkansområde i det fall att det uppskattade inläckaget (Q_{inj}) är större än grundvattenbildningen. På så sätt överskattas inte inläckaget till tunneln till mer än tillgängligt vatten.

Influensområde

Influensområde avser det område där grundvattenbortledning – i detta fall inläckage till tunneln – orsakar sänkta grundvattennivåer. Detta kan jämföras med influensområdet som beskrivits och beräknats för skärningar och broar i kapitel 3. Likt hur influensområdet för skärningar utgörs influensområdet för hela Kolmårdstunneln av en sammansättning av alla delinfluensavstånd för respektive tunnelsektion à 100 meter.

Sänkta grundvattennivåer avser i sammanhanget för tunneln sänkta grundvattennivåer i berg. Grundvattennivåer i jord är dock kopplade till grundvatten i berg, då vatten i jord vanligen infiltrerar ned till berg i viss utsträckning. Inom influensområdet kan därmed sänkta grundvattennivåer i jord, och påverkan på grundvattenberoende skyddsobjekt, riskera uppstå även om bortledningen framför allt sker i berg.

Influensberäkning har genomförts för varje 100-meterssektion längs tunneln med hjälp av en enkel vattenbalansprincip, se Ekv. 21:

$$Q_{inj-red} = W2Lb \text{ [m}^3\text{/s]} \quad \text{Ekv. 21}$$

Likt påverkansberäkningarna för skärningarna (se avsnitt 3.1) kan inläckaget till tunneln antas vara en produkt av grundvattenbildningen W inom den area som utgörs av sektionens längd b och influensavståndet L . Ju större inläckage, desto större måste antingen grundvattenbildningen eller influensavståndet vara. Arealen för grundvattenbildning antas vara symmetrisk åt båda sidor om tunnels mittlinje, vilket innebär att influensavståndet L gäller åt två håll, därav en faktor 2 i ekvationen. Ekv. 21 kan skrivas om för att beräkna influensavstånd L för rådande förhållanden för tunneln i ekvation 20:

$$L = \frac{Q_{inj-red}}{W2b} \quad \text{Ekv. 22}$$

Formeln antar att influensavståndet baseras på den area som behövs för att grundvattenbildningen ska balansera inläckaget vid fortvarighetstillstånd ("steady state"). Inom influensområdet antas därmed sänkta grundvattennivåer i berg råda.

Arbetstunnlar

Liksom vid huvudtunneln utbildas även grundvattenavsänkningar vid otäta arbetstunnlar. Arbetstunnlar planeras på fyra platser längs med Kolmårdstunneln, se Figur 15. Arbetstunnlarna går från markyta ned till tunnelns djup i den sektion där

arbetstunneln ansluter till Kolmårdstunneln. Det otätade inläckaget är därmed stort i de ytliga delarna av arbetstunneln och lägre med större djup, där vissa delar kan vara helt täta. För delar av arbetstunnlarna kan det därmed också finnas behov av tätning, för vilket ett injekterat inläckage har beräknats.

Arbetstunnlarnas inläckage har i dessa beräkningar antagits bidra till ökat påverkansavstånd runtom arbetstunnlarnas sträckning, det vill säga separata påverkansområden för arbetstunnlarna. Influensavstånd (L) har beräknats för varje sektion av arbetstunnlarna på samma sätt som för tunnelns sektioner (se ekvation 20), men på grund av arbetstunnlarnas mer kompakta geometri finns det anledning att istället för influensavstånd per sektion redovisa influensradie för hela arbetstunneln. Grundvattenpåverkan från arbetstunnlarna antas därmed ske på ett homogent avstånd runtom arbetstunnlarnas sträckning, där avståndet (R) i alla riktningar ges av Ekv. 23:

$$R = \sqrt{\frac{2bL_{tot}}{\pi}} \quad \text{Ekv. 23}$$

R = Arbetstunnlarnas influensradie

b = Sektionernas längd

L_{tot} = Summan av alla beräknade influensavstånd för arbetstunnlarnas sektioner

Ekv. 23 beräknar i praktiken en *ekvivalent radie* för en area som i detta fall ges av 2bL_{tot}. Det innebär att influensområdets area är densamma som summan av alla separata sektioners influensområden, men istället fördelade med ett jämnt avstånd i alla riktningar runtom arbetstunneln.

Tabell 23 sammanfattar inläckageförhållanden för arbetstunnlarna.

Tabell 23. Inläckage för arbetstunnlar.

Arbetstunnel [Längdmätning]	Injekterat inläckage (Q _{inj}) [l/min, 100 m]
Böksjö [94+900-95+100]	1 – 7
Svartgölen [97+100-97+800]	1 – 11
Rödmossen [99+700-100+100]	3 – 11
Persdal [101+800-102+100]	3 – 11

3.4.5. Förutsättningar

Influensavståndet för huvudtunneln enligt Ekv. 22 beskrivs utifrån tre parametrar: Q, W och b. I detta avsnitt diskuteras hur värdet på dessa parametrar har ansatts.

Grundvattenbildning W

Jordarterna längs tunnelsträckningen kan grovt delas in i fyra olika regioner, med olika förutsättningar för grundvattenbildning.

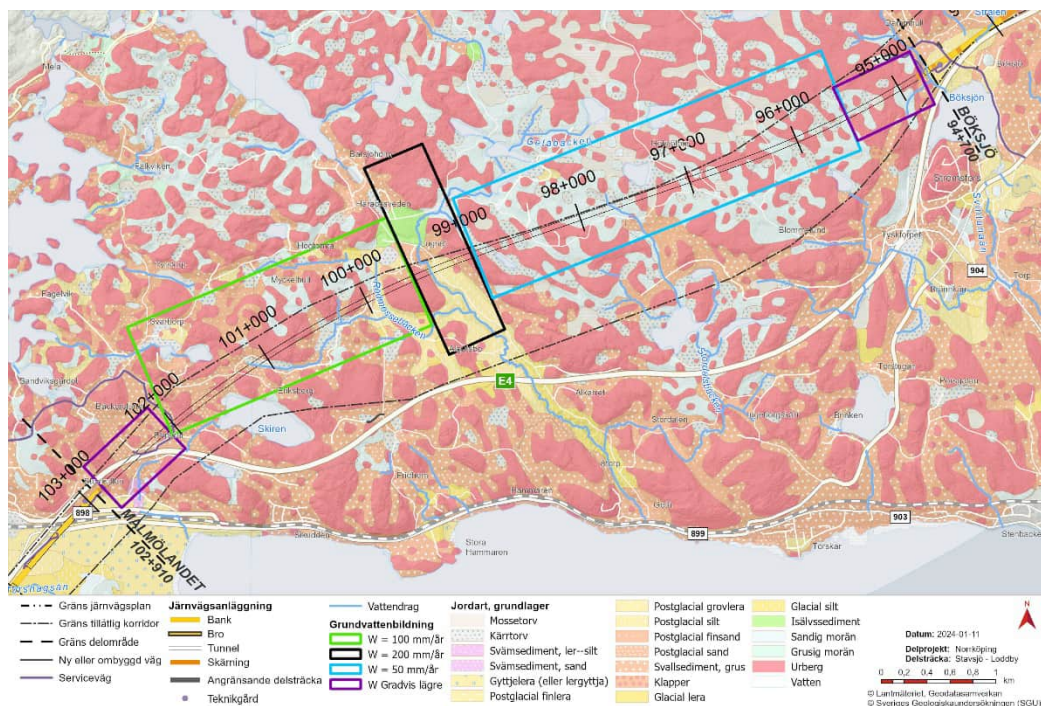
Längs den första delen av längdmätningen, mellan det norra tunnelpåslaget och Getåravinen, förekommer berg i dagen och endast tunna jordlager (morän) ovan berg. Grundvattenbildningen till berg bedöms därmed vara det som i synnerhet bestämmer mängden vatten som är tillgängligt för inläckage till denna del av tunneln. Värdet på grundvattenbildning i berg har för dessa beräkningar ansatts till 50 mm/år. Detta värde är vanligen använt för grundvattenbildning till berg för beräkning och modellering, och ligger därmed aningen lägre än det lägsta värdet (90 millimeter per år) för grundvattenbildning till jord och berg vid påverkansberäkningar av skärningar (se avsnitt 3.1.2.3).

I Getåravinen förkommer lera i markytan, med mer genomsläppliga jordar bestående av silt och sand under leran. Berggrunden i Getåravinen har visat sig vara av sämre kvalitet, med fler och större sprickor. Grövre, mäktigare och mer vitt utbredda jordarter i Getåravinen tyder på att vattentillgången är större i denna region, jämfört med övrig tunnel. Stora mängder vatten bedöms kunna infiltrera jordlagren och vidare ned i berget vid Getåravinen, och dessutom kan bäcken i ravinen antas medföra ytterligare vatten. Grundvattenbildningen uppskattas därmed vara cirka 200 millimeter per år i Getåravinen.

Efter Getåravinen och fram till det södra tunnelpåslaget förekommer större andelar sand och även viss andel isälvsmaterial. En uppskattning är att grundvattenbildningen kan vara dubbelt så stor som för den första regionen, cirka 100 millimeter per år.

Vid tunnelns påslag går tunneln snabbt nedåt, från ytan till större tunneldjup, vilket medför tätare berg och större avstånd till jordlager med större grundvattenbildning än berg. För att kunna representera detta i beräkningarna har två regioner mer gradvis minskande grundvattenbildning ansattas vid tunnelns kanter. W vid dessa sektioner har ansatts till att variera mellan 50 – 100 millimeter per år (för norra/södra påslaget) och det W som är ansatt för påverkansberäkningarna av skärning 4 respektive 5 (Norra respektive Södra tunnelpåslaget). För de första sektionerna av den norra delen av tunneln minskar således W gradvis från 160 till 50 millimeter per år, motsvarande minskning för den södra delen är från 130 till 100 millimeter per år.

Figur 21 visar antagen grundvattenbildning för de olika regionerna av tunneln.



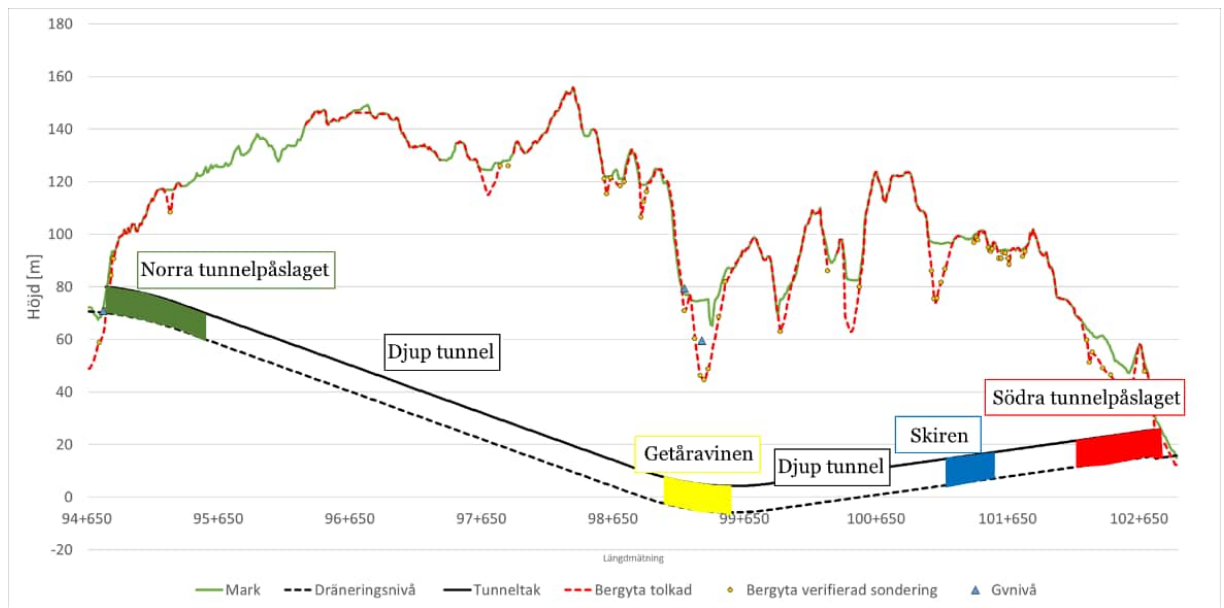
Figur 21. Jordarter längs Kolmårdstunneln enligt SGU:s Jordartskarta. Utifrån jordarterna har grundvattenbildningen delats upp i fem olika regioner: 200 mm/år (svart), 100 mm/år (grönt), 50 mm/år (blått) samt två regioner med gradvis minskande W med djupet vid tunnelns kanter (lila).

Sektionslängd b

Sektionslängden utgör influensområdets kortsida (se Figur 21), och har i dessa beräkningar ansatts till 100 meter. Detta eftersom inläckage är beräknat för varje 100 meter. Det som sedan beräknas för varje 100:e meter är influensavståndet L ut från tunneln. Att genomföra beräkningar för var 100:e meter har bedömts vara en lämplig detaljgrad.

Tunneldjup d

Tunneldjup (d) avser avståndet mellan markyta och tunnelcentrum och är ansatt per 100-meterssektion, utifrån den projekterade tunnelsträckningen. Eftersom grundvattennivån är ansatt till att också ligga i markytan innebär det att tunneldjup (d) och djup till grundvattenytan (H) är lika. Ett större tunneldjup under grundvattennivån ger större inläckage och influensavstånd, när alla andra parametrar är konstanta. Tunnelns djup varierar från markytan vid tunnelpåslagen ned till som djupast 142 meter strax innan Getåravinen, se Figur 22 och Tabell 20. De ytligaste sektionerna har ett djup på 0-20 meter.



Figur 22. Profil av Kolmårdstunneln med mark- och tolkad bergyta (bergytan har ej tolkats längs hela sträckan).

3.4.6. Resultat

Influensavstånd

I Tabell 24 redovisas resultatet från beräkningarna av prognostiserade influensavstånd, enligt Ekv. 22, det vill säga baserat på inläckage från en tätad tunnel. Beräkningarna visar influensområdets utbredning för normalsprickigt berg, det vill säga att sprickzonernas betydligt högre inläckage och större influensområde redovisas separat i tabellen. I verkligheten kommer influensområdesgränsen att vara mycket mer varierande till följd av sprickzoner i berget som lokalt ger upphov till avsänkningar på större avstånd än vad som beräknas inträffa för normalsprickigt berg.

Tabell 24. Resultat av beräkning av influensavstånd för Kolmårdstunneln med tätning. Resultaten redovisas sammanfattat för sektioner med liknande egenskaper.

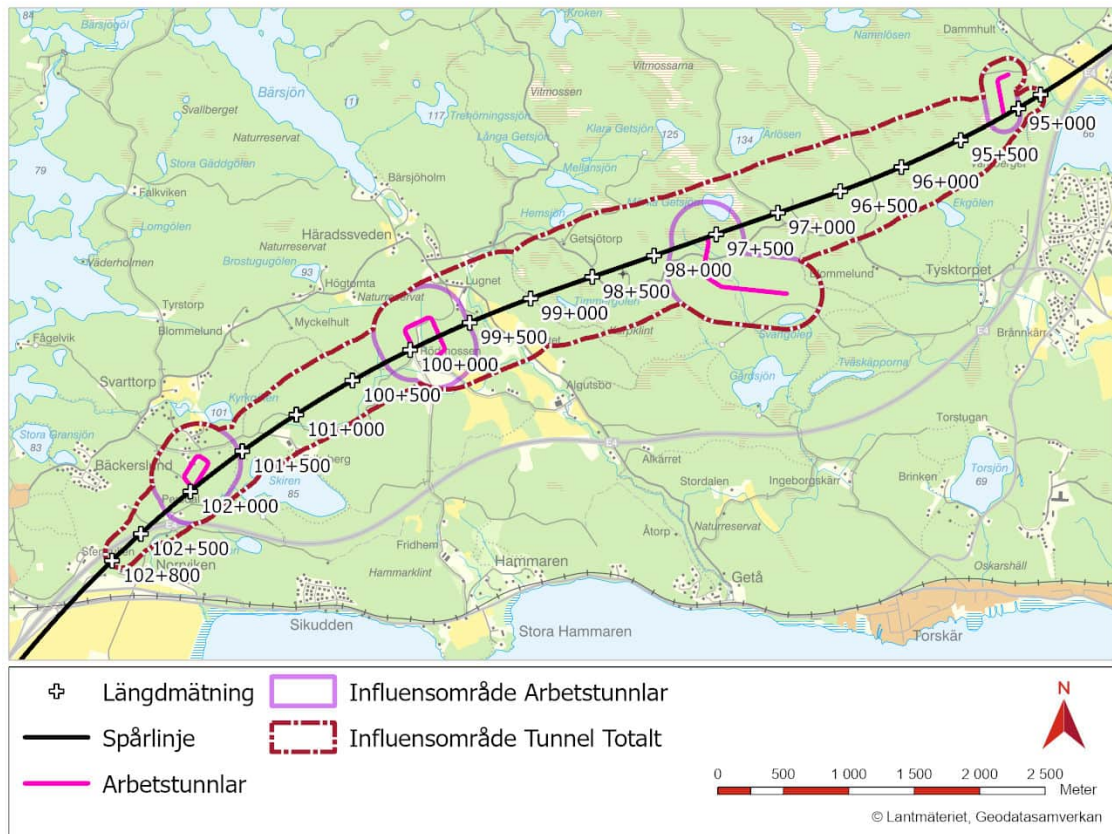
Zon	Sektioner och totallängd [längdmätning, meter]	Influensavstånd (L) [m]
Norra tunnelpåslaget	94+800 – 95+500 700 m	60 – 250
Djup tunnel	95+500 – 99+200 3 700 m	150 – 450
Getåravinen	99+200 – 99+660 460 m	430
Djup tunnel	99+660 – 102+100 2 440 m	240 - 280
Skiren	101+300 – 101+500 200 m	100
Södra tunnelpåslaget	102+100 – 102+720 620 m	90 - 200
Sprickzoner	10-20 m långa sektioner på olika platser inom Djup tunnel och Getåravinen	240 – 2 130

I Tabell 25 redovisas resultatet från beräkningarna av influensradie för arbetstunnlarna utifrån Ekv. 23.

Tabell 25. Influensradier för tätade arbetstunnlar.

Arbetstunnel [Längdmätning]	Influensradie (R) [m]
Böksjö [94+900-95+100]	130
Svartgölen [97+100-97+800]	270
Rödmossen [99+700-100+100]	240
Persdal [101+800-102+100]	250

Figur 23 visar det beräknade influensområdet enligt områdena i och Tabell 25.



Figur 23. Beräknat influensområde för Kolmårdstunnelns grundform. Influensområde för sprickzoner redovisas inte i denna figur, men kan antas ge lokalt flikigare influensområde beroende på sprickornas placering och hydrauliska konduktivitet.

Figuren ovan visar det sammansatta influensområdet för hela Kolmårdstunneln i tätat utförande, vilket är skapat utifrån varje 100 m-sektions samt arbetstunnlarnas influensavstånd L . Influensområdet är helt beroende av beräknat inläckage och bedömd grundvattenbildning, vilket kan ses genom att tunneln öster om Getåravinen generellt har aningen större influensavstånd än tunneln väster om Getåravinen, då grundvattenbildningen i öster bedöms vara mindre.

I figuren redovisas influensavstånd för respektive 100 m-sektion, vilket innebär att influensavstånd från sprickor inte inkluderas i beräknat influensområde. Det bedöms inte vara rimligt att enstaka kortare sektioner av tunneln skulle ha influensavstånd på flera kilometer medan övrig tunnel har influensavstånd omkring hundratals meter. I praktiken kan visserligen inläckage till tunneln uppkomma från mycket stora avstånd via genomsläppliga sprickor i berggrunden, men detta torde inte orsaka motsvarande sänkta grundvattennivåer i marken ovanför. Bedömt influensområde för sänkt grundvattennivå ser istället till tunneln som helhet och gör antagandet att sänkta grundvattennivåer uppstår mer homogent runtom tunneln, enligt redovisat influensområde i Figur 23.

3.4.7. Osäkerheter & Diskussion

Att beräkna påverkan på grundvatten i berg är välkänt svårt av många anledningar, men givet kända förutsättningarna har ett rimligt influensområde beräknats. Vid beräkning av influensområde för grundvatten i berg finns det sällan lika mycket indata att tillgå jämfört med beräkningar i jord, där grundvattenrör med relativ enkelhet kan sättas i jordlager och ge information om genomsläpplighet och grundvattennivåer. Därtill kräver beräkningar av bortledning av grundvatten i berg även ta effekter i jordlager i beaktande, då inte sällan jordlager ovan berg styr grundvattenbildning, magasineras tillgängligt vatten och är av stort intresse för skyddsobjekt.

Notera att såväl inläckage som påverkansområde även har beräknats via numerisk modellering (se kapitel 4), och att det är resultaten från den numeriska modellen som används använts vidare i tillståndsansökan (MKB, projektering av åtgärder med mera). Analytiska beräkningar av inläckage används mest som en kontroll av de numeriskt beräknade resultaten, för att se om de två metoderna ger liknande resultat och därmed kan styrka resultaten.

Undersökningar av hydraulisk konduktivitet (K) har visat att berget generellt är mycket tätt på de större djupen, och gradvis mer genomsläppligt närmare ytan. Ställvis förekommer mer permeabla och mycket permeabla sprickzoner i den relativt lågpermeabla bergmassan. När det gäller grundvattenpåverkan från berganläggningar är det således förekomsten av sprickor som i stor utsträckning bestämmer hur stor och var påverkan sker, eftersom det är i sprickor i berget som grundvattenströmning sker. I dagsläget kan en uppskattning av påverkan göras utifrån de kända sprickzoner som finns, men det är möjligt att sprickor som i dagsläget är okända ger upphov till påverkan på platser som inte förutsetts. Den stora osäkerhet som rör sprickförekomster – främst dess lägen, antal och genomsläppligheter – är därmed en potentiell felkälla, men en felkälla som måste accepteras i detta skede (ansökan om tillåtlighet för vattenverksamhet) och som har tagits i beaktande. I senare skeden inhämtas mer information om behov föreligger.

Sammantaget finns det osäkerheter i underlag som gör påverkan svår att uppskatta. Ett troligt påverkansavstånd har beräknats efter bästa förmåga, som med största sannolikhet överskattar påverkan snarare än att underskatta den. Storleksordningen för påverkan har troligtvis uppskattats till en rimlig nivå, men faktisk påverkans omfattning och lokalisering kommer att bli tydlig först när verksamheten utförs. Eventuella avvikelser från beräknat influensområde kommer att kunna hanteras under projekteringen och utförandet. Ny kunskap kommer att tillföras och inarbetas under projektets gång, inte minst via övervakning av grundvattennivåer, vilket kommer ge värdefull information om hur grundvattennivåer påverkas och hur detta ska hanteras.

Jämförelse med andra metoder för påverkansbedömning kan i viss mån minska ovan nämnda osäkerheter. Resultaten som presenteras i detta avsnitt ska ses som komplement till MODFLOW-modellen som satts upp för tunneln, vilken beskrivs i avsnittet nedan.

4. Grundvattenmodell Kolmårdstunneln

4.1. Inledning och syfte

Trafikverket har genomfört grundvattenmodellering av Ostlänkens sträcka genom Kolmården. Inom delsträckan planeras Ostlänken förläggas i bergtunnel.

Syftet med grundvattenmodellen är flerfaldigt och omfattar bl.a.:

Att öka den hydrogeologiska systemförståelsen i det aktuella delområdet och utgöra rådgivande underlag för hydrogeologiska frågeställningar,

- att studera tunnelns effekt på grundvattennivåer och flödesmönster i dess omgivning,
- att visualisera den förväntade påverkan på grundvattennivåer i såväl jord som berg,
- att uppskatta storleken på det inläckage som förväntas ske till tunneln,

att studera effekten av föreslagen injektering,

- att utgöra en delmängd i underlaget för tillståndsansökan till vattenverksamhet enl. kap. 11 MB.

Upprättad modell baseras på en rådande konceptuell förståelse av hydrogeologiska förhållanden avseende bl.a. magasinutbredning, hydrauliska ränder och hydrogeologiska parametrar.

4.1.1. Koordinatsystem

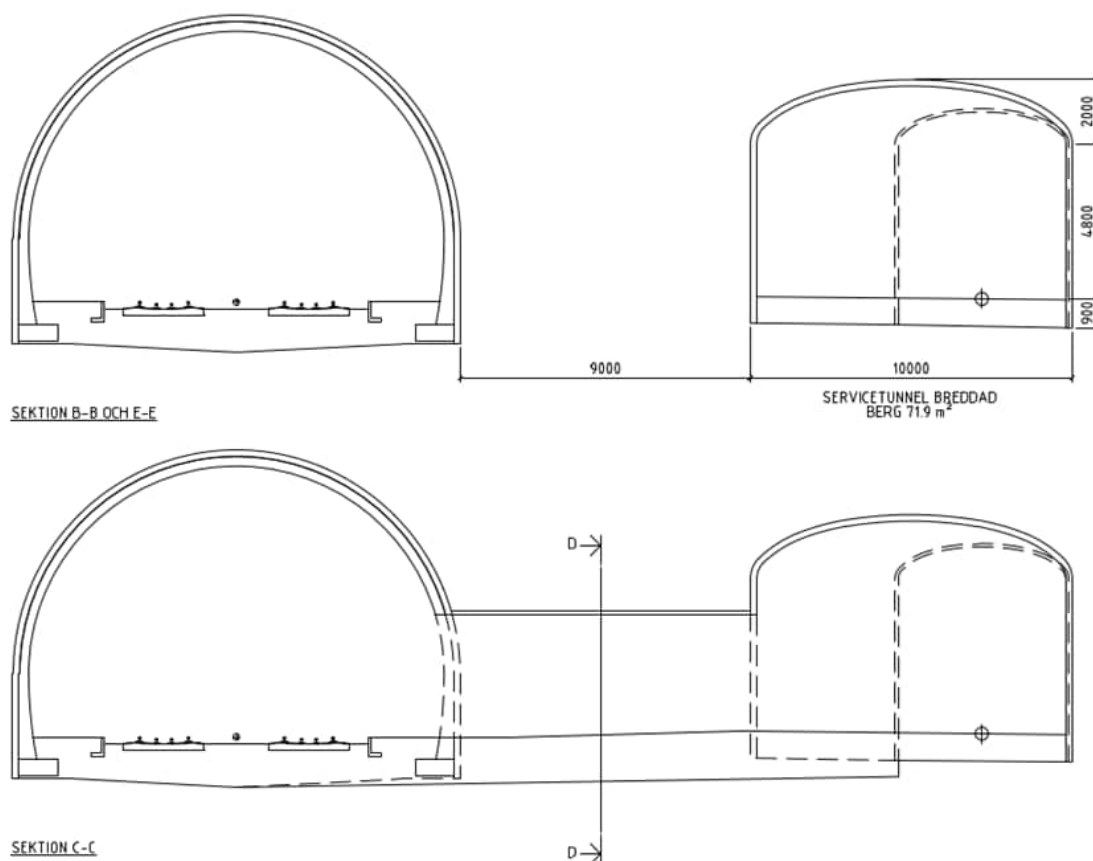
I projektet används koordinatsystem SWEREF99 1630 och höjdsystem RH 2000.

4.1.2. Förutsättningar, underlag och styrande dokument

Modellens utformning baseras på bl.a. tillgänglig information inom projektet som PM Bergteknik, MUR Geoteknik samt MUR Hydrogeologi från systemhandlingsskede. Annat underlag är genomförda grundvattenmätningar inom området samt höjdinformation från Lantmäteriet och jordartsgeologiska kartan, berggrundsgeologiska kartan och jorrdjupskartan från Sveriges Geologiska Undersökning (SGU).

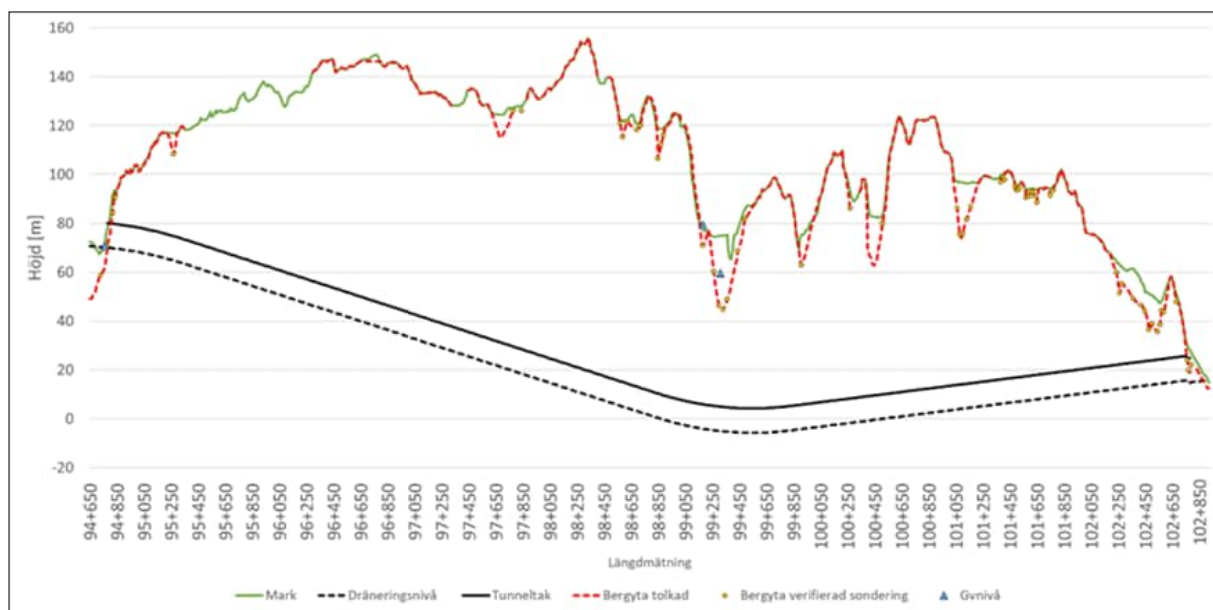
4.1.3. Översiktlig projektbeskrivning

Grundvattenmodellen är uppbyggd för att studera Ostlänkens sträckning vid Kolmården i Norrköpings kommun. Ostlänken planeras förläggas genom området i en djup bergtunnel (Figur 24) med planerade arbets- och servicetunnlar. Tunnelbottennivåer varierar från markytan till cirka 146 meter under markytan där den är som djupast (vid 98+300). Tunneln är cirka 8 kilometer lång och sträcker sig från cirka km 95+000 – km 103+000 (Figur 26).

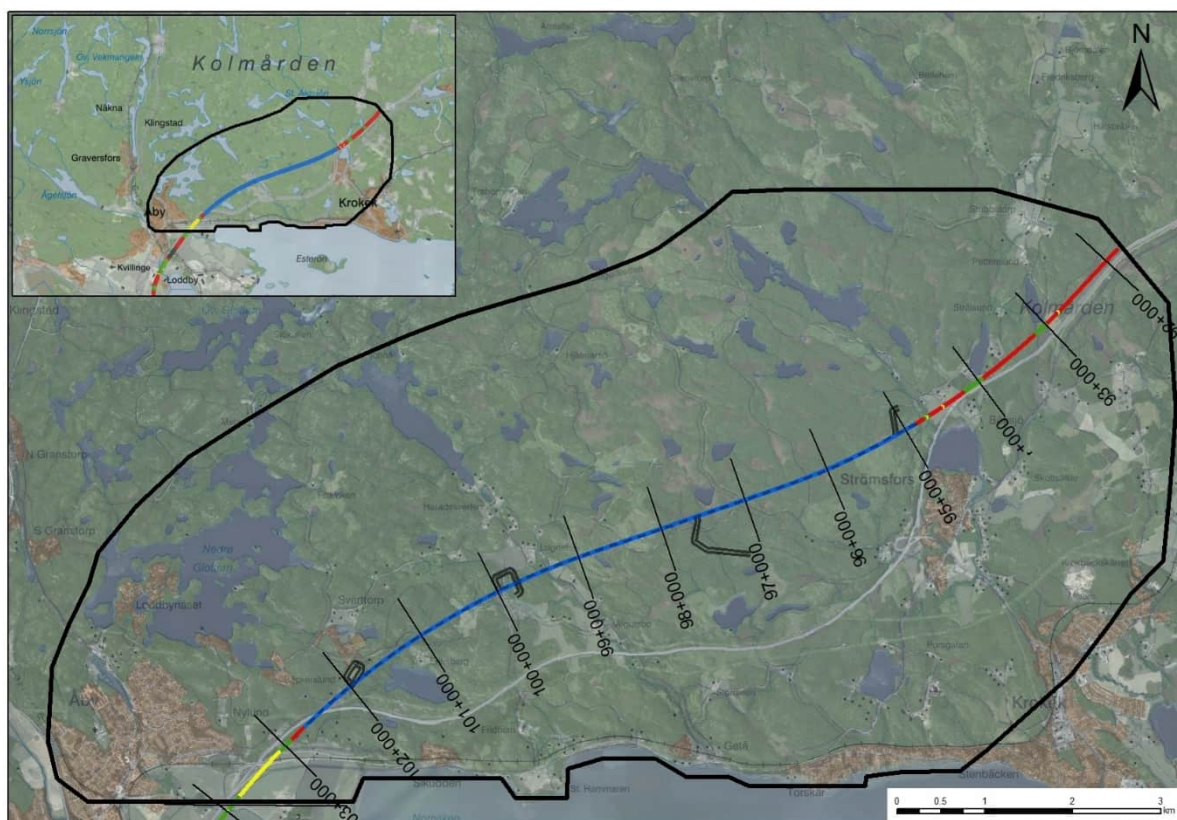


Figur 24. Schematisk skiss, tunnelstvärnsnitt planerade tunnlar. Bilderna visar olika delar av anläggningen. Spårtunnel har alltid samma tvärsnittsarea medan servicetunnel breddas i anslutning till de delar där spår- och servicetunnel är sammankopplade, var 400 meter. I modellen görs ingen distinktion mellan tunnlar och utrymmet som befinner sig mellan dessa. Det tolkas alltså som en sammanhängande dränering och överskattar därmed tunneltvärnsnittets storlek.

Tunneldrivning planeras utföras med förinjektering och sprängning. Schematisk profil av planerade tunneln redovisas i Figur 25. Det finns fyra arbetstunnlar längs sträckan, se Figur 26. Första arbetstunneln går parallellt med spårtunneln, cirka 250 meter norrut, och ansluter vid km 95+200. Nästa arbetstunnel går söderut från km 97+600 och mynnar vid sjön Svartgölen cirka 800 meter sydöst om km 97+300. Tredje arbetstunneln ansluter vid km 100+000 och går i en cirkel som kommer upp i markytan cirka 150 meter söder om km 99+800. Sista arbetstunneln ansluter vid km 102+000 och går i en cirkel norrut som kommer upp vid markytan rakt ovan anslutningspunkten för spårtunneln. Arbetstunnlarna har en total längd motsvarande cirka 2 kilometer.



Figur 25. Kolmårdstunnelns profil (km 94+800 – km 102+720). Mark- och bergnivåer är markerade i gröna respektive röda linjer. Tunneltak och tunneldräneringsnivå är redovisade med heldragen- respektive streckad svart linje.



Figur 26. Modellområdet (svart linje) med tunnelns sträckning (blå linje, 94+700 - 102+910). Val av modellområde beskrivs i kapitel 4.2 och 4.5.2.

4.1.4. Avgränsningar

Modellen avser ej att exakt spegla verkliga förhållanden, då detta i praktiken är omöjligt. Modellens storlek innebär att stora delar av området ej undersökts och att detaljerad kunskap om geometri och markegenskaper därför saknas. Detta medför att modellen i praktiken inte kommer att vara en exakt representation av verkliga förhållanden. I modellering har öppna databaser använts som kontrolleras/verifieras mot undersökningar, i den mån det har varit möjligt. I övriga delar av modellområdet har jordlagerföljder upprättats schematiskt och tolkat baserat på erfarenhet, rådande marknivåer, av SGU tolkade jordlager i markytan samt information inhämtat från jorddjupskartan (SGU).

4.2. Metod

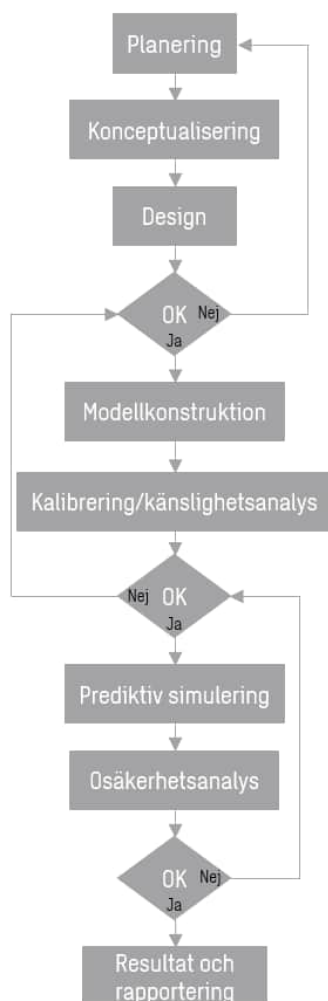
Grundvattenmodellering är i allmänhet en iterativ process där modellen utvecklas progressivt genom en serie av oberoende steg som upprepas och återbesöks allteftersom förståelsen för uppdraget ökar. Något förenklat kan modelleringsprocessen beskrivas av följande steg (vilket även visualiseras i Figur 27;

- Planering
- Konceptualisering
- Design och modellkonstruktion
- Kalibrering
- Scenarioberäkningar

I planeringsstadiet definieras modellens syfte och mål, på vilken nivå modellen ska hållas samt hur och till vilken nivå modellen ska verifieras inför framtagande av resultat.

Konceptualiseringen involverar att avgränsa modelldomänen samt beskriva det geologiska-, meteorologiska och hydrogeologiska systemet som kommer att ligga till grund för den numeriska modellen. Här beskrivs och förenklas de processer som ingår och är av betydelse för studien inom det område som anses relevant för att bedöma effekten av den studerade verksamheten. Den konceptuella modellen är inte unik och kan se ut på flera olika sätt. Vilket är en av anledningarna till att återbesöka och förfina konceptualiseringen succesivt när mer information blir tillgänglig eller när det finns anledning att utföra justeringar för att bättre spegla och återskapa systemets beteenden inom modelldomänen.

Design och modellkonstruktion innebär att den konceptuella modellen översätts till en matematisk beräkningsmodell med hjälp av lämplig programkod, dimensioner och nivå av diskretisering i såväl tid som rum.



Figur 27. Grundvattenmodelleringsprocessen visualiserad som flödesschema.

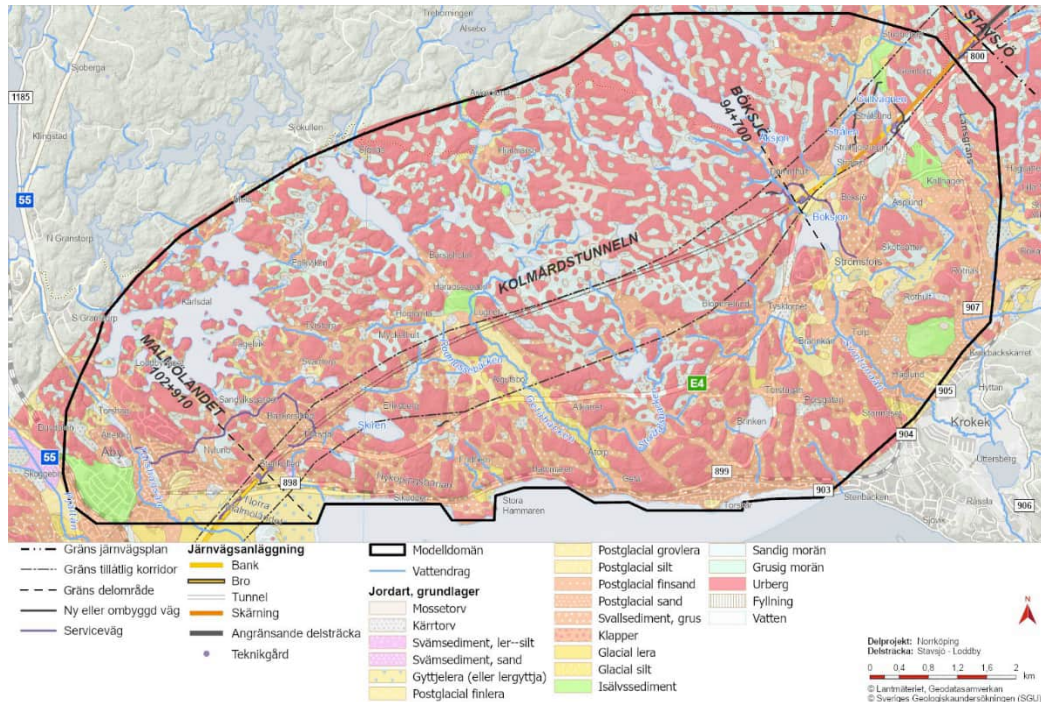
4.3. Geologiska förutsättningar och modelldomän

Anläggningen övergår i bergtunnel under ett kuperat skogsbeklätt höjdområde (Figur 28). Delområdet innehåller en stor andel våtmarker och flera mindre sjöar. Geologin i området domineras, med undantag för Getåravinen, av ytligt berg med svackor fyllda av sand, morän, torvmark eller en kombination av dessa. Getåravinen är en sprickzon/dalgång med jorddjup som överstiger 30 m.

Eftersom projektets undersökningsområde utgör enbart en liten del av modellområdet och därmed också området för fältundersökningar. Det innebär att den absoluta majoriteten av data gällande jorddjup och jordtyp kommer från externa källor. Tolkade jordlager i markytan har baserats på underlag från jordartsgeologiska kartan (SGU). Av modelltekniska skäl (diskretisering av celler) har jordarters planutbredning generaliserats grovt, med ökande avstånd från projektets intresseområde, nära modellens yttre ränder. Modellen innehåller följande geologiska enheter; lera, grus och sand, morän samt berg.

I Figur 28 redovisas också den valda modelldomänen. Modellområdet har begränsats med en buffertzona på cirka 3 kilometer från planerade tunneln. Då naturliga ränder i vissa områden var svåra att finna på ett relevant avstånd ansattes buffertzonen med en

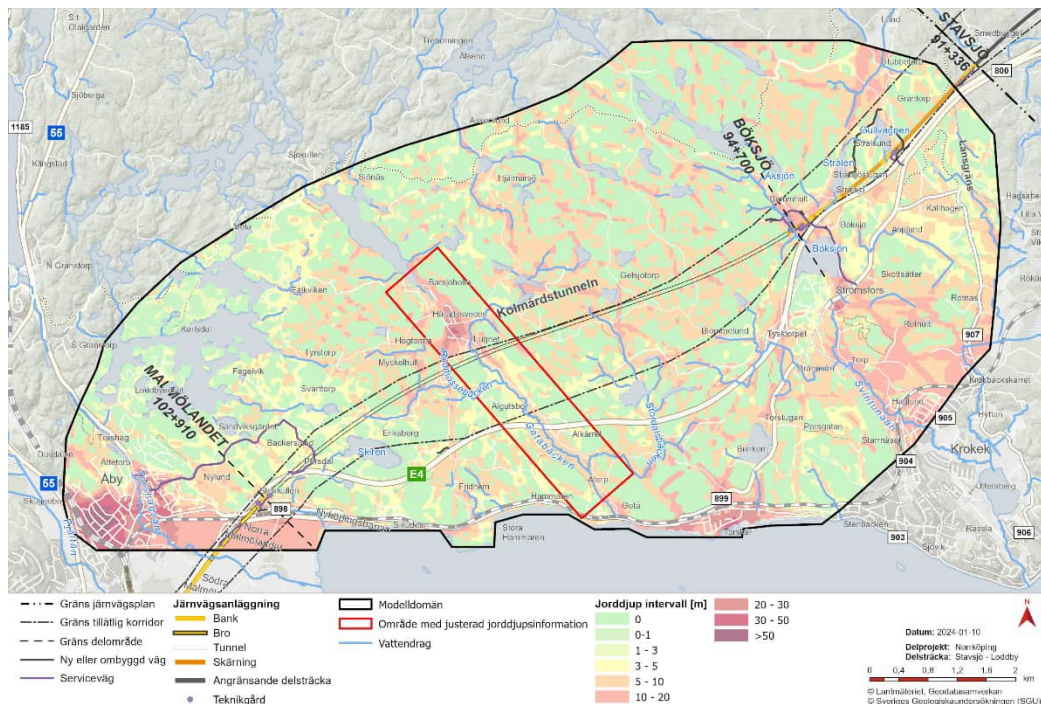
tillräcklig distans från tunneln för att modellerade resultat inte ska påverkas eller vara beroende av randvillkorstyp. Det förutsätts här finnas positiva ränder med Bråviken i syd/sydväst samt Glottern/Bärsjön i nordväst. I sydväst och nordöst begränsas modelldomänen huvudsakligen av förmodade grundvattendelare som har karterats med hjälp av en kombination av geografisk höjdinformation, jorddjup och jordarter. Randvillkoren i dessa lägen motsvaras av "no flow" och medger ingen transport av grundvatten över gränsen.



Figur 28. Antagen modellomän markerad med svart linje.

4.3.1. Jordlagerföljder

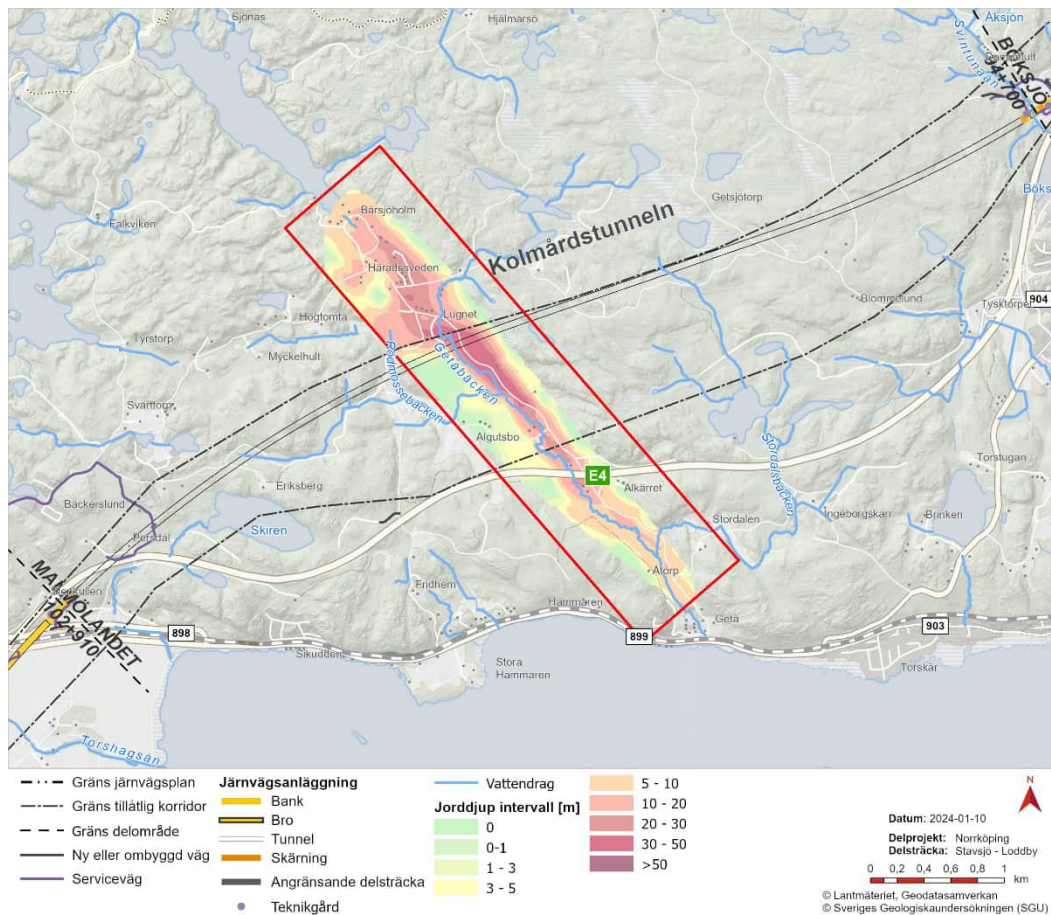
I Figur 29 redovisas de jorddjup som använts i modellen. Data kommer från SGUs jorddjupskarta. Vid sjöar, generellt, har ett förenklat antagande baserat på sjöns medeldjup legat till grund för modellens jorddjup. Vid Skiren har sjöns bottenprofil importerats från bottenkanning och ansatts som botten för det översta modellagret.



Figur 29. Jorddjupskarta över modellområdet som använts för tillämpning av jorddjup i modellen. Jorddjupsmodellen motsvarar information från SGU:s jorddjupskarta. I rödmarkerat område har jorddjupen justerats efter lokal sonderingsinformation.

I området kring Getåravinen har jorddjupen konstaterats vara avsevärt djupare än vad som antyds av SGU:s jorddjupsmodell. Här har jorddjupen i möjligaste mån anpassats efter observerade förhållanden (Figur 30) från undersökningar utförda fram till och med 2021. Under sent 2022 utfördes fältundersökningar längs Getåravinsens omgivning som i stort bekräftade de extrapoleringar och tolkningar som gjorts utifrån tidigare undersökningar och använts i modelleringen. Undersökningar under 2022 visar dock att dalgångens djupaste del är något överdriven i modellen. Jorddjupet avtar generellt snabbare mot dess kanter än vad som antagits, samt att djupet avtar något snabbare än modellerat både söder- och norrut i det område som markeras i Figur 30.

Undersökningarna i 2022 visade att SGU:s jordartskarta i stort stämmer. Ytan i dalgången består av högre andel finkorniga sediment när man rör sig mot sydöst. Mäktigheten på lager med högre andel finkorniga sediment ökar också mot sydöst. Under detta lager finns generellt sand, sandigt grus eller siltig sand ner till bergytan. Grundvattnets trycknivå följer i stort botten på ravinen, där finkorniga jordarter övergår till högre andel grovkornig jord, men tryckprofilen är mer komplicerad än så. Grundvattentrycket nära bergytan var i november 2022 flertal meter under ravinbotten, samtidigt som grundvattentrycket i rör med filter installerat strax under ravinbotten har ett tryck i nivå med, eller strax över ravinbotten.

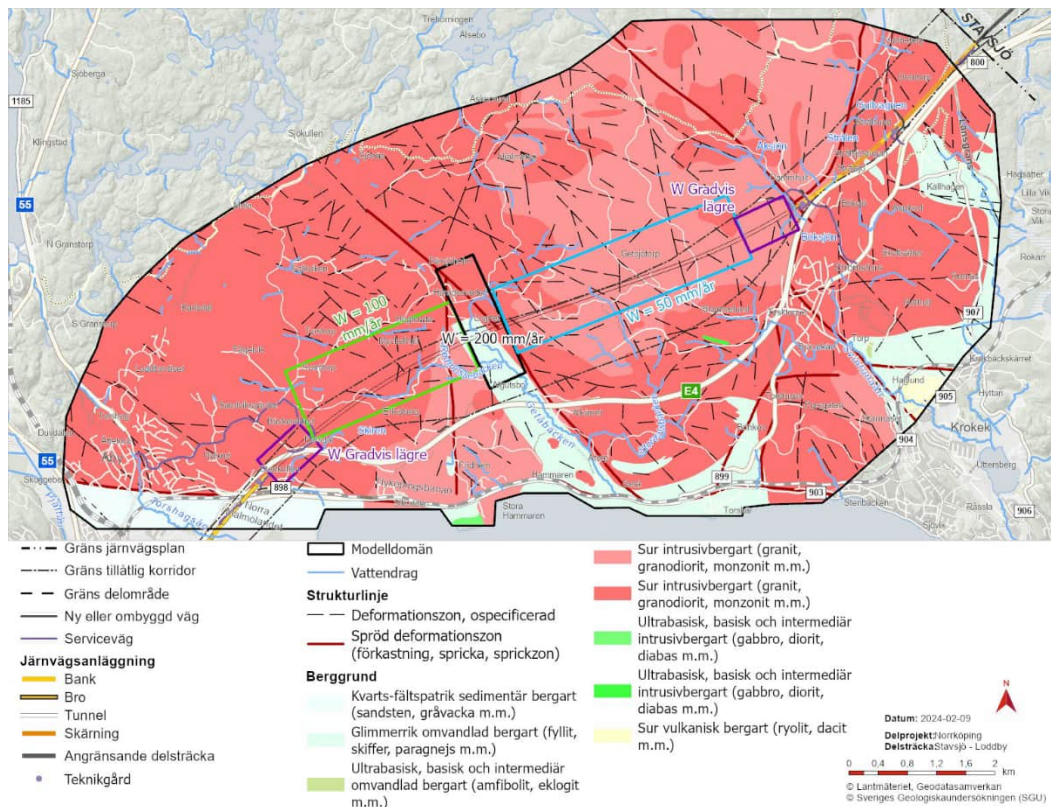


Figur 30. Justerad jorddjupsmodell i Getåravinen. Jorddjupen har framtagits med hjälp av interpolering av bedömda jorddjup vid sonderingar i området.

4.3.2. Berggrunds- och strukturgeologi

Berggrunden inom modellområdet består i huvudsak av gnejs och granit (Figur 31). En svaghetszon löper genom Getåravinen där bergarten vacka är dominerande. Vacka förekommer även i sydväst vid änden på Bråviken.

Dominerande riktningar för sprickstrukturer i området är enligt SGU huvudsakligen från nordväst till sydöst respektive nord till syd.



Figur 31. SGU:s berggrundskarta med Östlänkens centrumlinje. Svarta linjer redovisar tolkade strukturlinjer i berget.

4.4. Hydrogeologiska förutsättningar

4.4.1. Hydraulisk konduktivitet

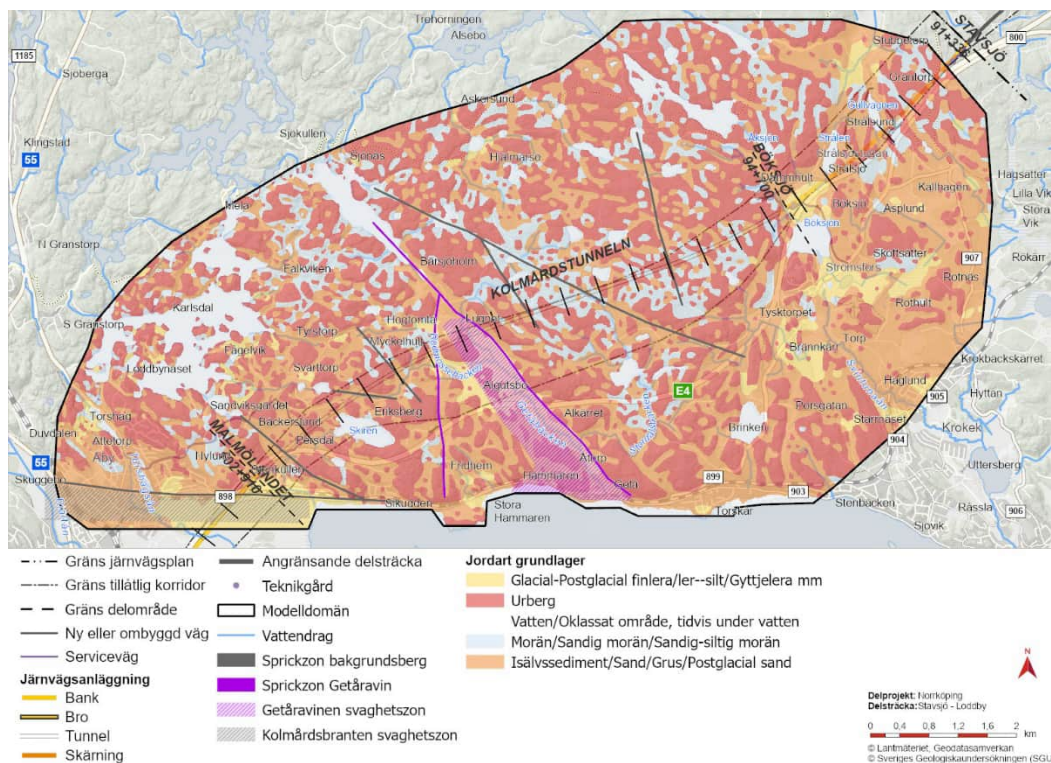
Hydraulisk konduktivitet i jord- och berglager i modellen har ansatts baserat på fälttester, erfarenheter och referenslitteratur. Samtliga ansatta hydrauliska konduktiviteter redovisas i Tabell 26 och below Tabell 27.

Ansatt hydraulisk konduktivitet i jord- och ytligt berg redovisas i Figur 32, ansatt hydraulisk konduktivitet i jord följer de jordlager som redovisas i figuren.

I fall där lera är dominerande jordart har det antagits förekomma friktionsjord mellan leran och berg; sand eller morän. Sand har antagits utgöra undre magasin vid lerområdet i Getåravinen, medan det i övriga fall antas vara morän.

Tabell 26. Ansatt hydraulisk konduktivitet i modellens översta jordlager och ytligt berg (isotrop). Redovisade värden har sitt ursprung i utförda hydrogeologiska tester i kombination med referenslitteratur och är en s.k. bästa uppskattning av förekommande jordars vattenförande egenskaper.

Jordlager	K (m/s)
Lera	$1 \cdot 10^{-8}$
Sand (och grus)	$1 \cdot 10^{-5}$
Morän	$5 \cdot 10^{-7}$
Berg i dagen	$2 \cdot 10^{-7}$



Figur 32. Redovisning av jordlager som underlag för hydraulisk konduktivitet. Omfattning av svaghetszoner och sprickzoner i berg.

Berg under markytan har delats upp i två olika konduktivitetsszoner beroende på djup från bergets överkant (<50m, >50m). Dessa lager ska beskriva den generella bergmassan och baseras på statistik från samtliga fälttester som utförts över området. Den hydrauliska konduktiviteten justeras vid sprickzoner och förmodade svaghetszoner. Konduktiviteten som tilldelas sprickzoner ska symbolisera en generell konduktivitet i svaghetszoner eller krosszoner som finns på ett antal platser i området vid Kolmården. Värdet baseras på utförda vattenförlustmätningar i områden där zoner av den typen misstänks. *Sprickzon Getå* representerar ytterkanten av området kring Getå, där den högst uppmätt hydraulisk konduktivitet förekommer. Mellan de två krosszonerna som benämns *sprickzon Getå* befinner sig området *Getåravinen svaghetszon* som ska representera ett område med mer vattenförande egenskaper än omgivande berg. Kolmårdsbranten tilldelats en svaghetszon då det är en dominerande struktur i området. Eftersom den inte skär bergtunneln har inga riktade undersökningar utförts inom

utbredningen för denna struktur. Egenskaperna antas i modellen motsvara de vid Getåravinen. Strukturerna har förenklats genom att tilldela hela zonen en generaliserad högre konduktivitet än omgivande berg. Sprickzoner och vattenförande strukturer har samma konduktivitet i samtliga modeller.

Det finns 17 bedömda svaghetszoner som i plan korsar tunneln. Dessa har identifierats genom strukturella formlinjer i SGUs berggrundskarta samt lineamentsanalys (Ingenjörsgelogisk prognos, 2021). Samtliga zoner som verifierats i undersökningsbörningar samt de långsträckta zoner som finns med i SGUs berggrundskarta är de som implementerats i modellen, vilket innebär att 10 svaghetszoner som i plan korsar tunneln finns med i modellen.

Beskrivning av beräkningar som ligger till grund för bergets hydrauliska konduktivitet och bergets tätning finns i kapitel o. I Tabell 27 redovisas vilken hydraulisk konduktivitet som ansatts olika enheter i berg samt vad som antagits för den tätade zonen kring tunneln för respektive zon och scenario. Eftersom endast en liten del av den totala bergmatrisen är undersökt råder det osäkerhet gällande bergets storskaliga hydrauliska konduktivitet. Av praktiska skäl är det dock nödvändigt att generalisera bergets vattenförande egenskaper över hela modelldomänen. För att hantera osäkerheten i detta generella antagande har modellen byggts upp i två olika uppsättningar där bergets hydrauliska konduktivitet motsvaras av den 90:e percentilen av utvärderade värden ($K_{90\%}$) respektive den beräknade effektiva storskaliga hydrauliska konduktiviteten enligt Matherons förmodan (K_{3D}).

Tabell 27 Ansatt hydraulisk konduktivitet i modellens berglager.

	Berglager	Konduktivitet (m/s)	K-Tätning (m/s)
K_{3D}	< 50 meter djup	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$
	> 50 meter djup	$2,9 \cdot 10^{-9}$	$2,9 \cdot 10^{-9}$
$K_{90\%}$	< 50 meter djup	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-8}$
	> 50 meter djup	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$
Gemensamt	Sprickzon bakgrundsberg	$2 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8}$
	Sprickzon Getå	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-7}$
	Getåravinen svaghetszon	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-8}$
	Kolmårdsbranten svaghetszon	$2 \cdot 10^{-7}$	-
	Skiren tätning	K_{3D}/K_{90}	$1 \cdot 10^{-9}$

4.4.2. Grundvattenbildning

Grundvattenbildning har ansatts till 200 mm/år för hela området. Den ansatta grundvattenbildningen är att betrakta som nettonederbörd eller potentiell grundvattenbildning som finns tillgänglig för infiltration. Den faktiska grundvattenbildningen i modellen beror dock av markens genomsläpplighet och gradienter. Eventuellt överskott av nettonederbörden leds bort i ett dräneringslager och representerar i verkligheten yttlig avrinning till diken m.m.

4.4.3. Grundvattennivåer

Grundvattennivådata från aktiva observationsrör inom området har använts för kalibrering av modellen. Placering av grundvattenrör i området redovisas i Figur 33 och rörens dimensioner och uppmätta nivåer sammanställs i

Tabell 28 och

Tabell 29. Grundvattenytan i området ligger generellt marknära förutom i Getåravinen där den uppmätts cirka 13 meter under markytan i de flacka områdena.

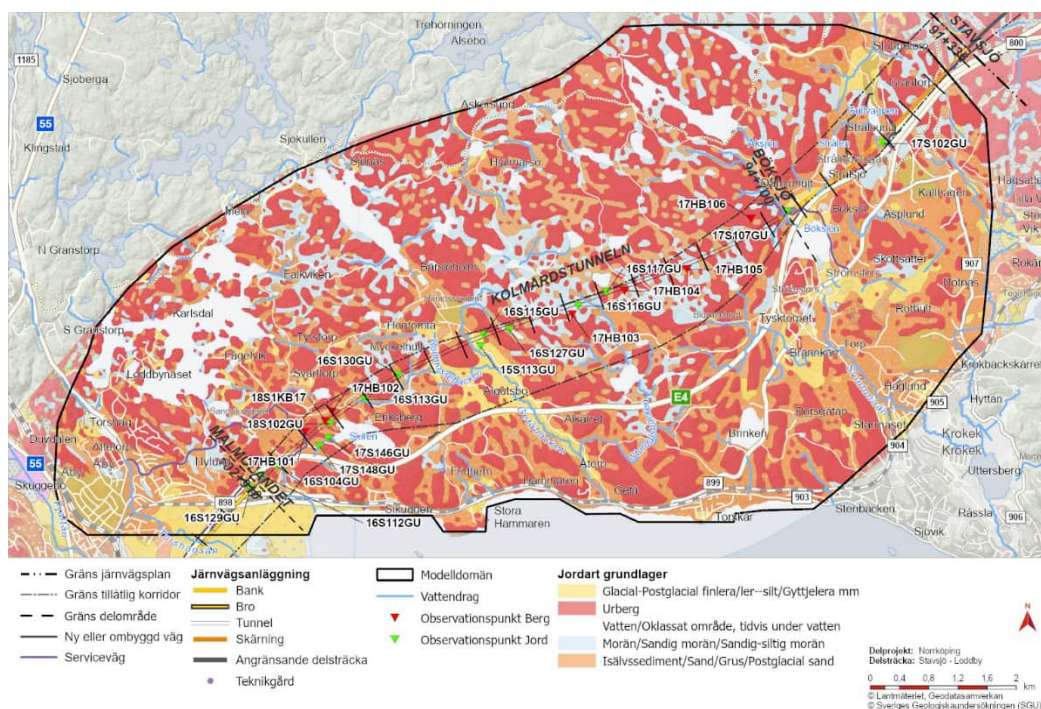
Grundvattenytan sammanfaller här relativt väl med ravinbotten. De flesta mätpunkterna för grundvatten är placerade rakt ovan eller nära spårinjen. Även de bergborrade mätpunkterna visar generellt marknära grundvattennivåer.

Tabell 28. Grundvattenrör i jord som har använts för kalibrering av modellen sammanställs i tabellen.

GV-rör	RH2000					
	Röröverkant	Marknivå	Medelnivå	Max-nivå	Min-nivå	Spetsnivå
15S113GU	73,6	72,3	59,2	59,7	58,8	40,4
16S104GU	45,7	44,6	44,4	44,6	43,8	38,7
16S113GU	97,6	96,4	96,2	96,7	95,7	84,1
16S115GU	79,7	78,8	78,2	79,5	76,4	71,7
16S116GU	129,5	128,4	128,0	128,3	127,0	126,2
16S117GU	129,5	128,9	128,1	128,6	126,5	125,9
16S127GU	120,0	118,8	118,8	118,9	118,3	106,0
16S129GU	15,8	14,7	10,8	10,8	10,8	10,3
16S130GU	84,2	82,6	82,4	83,6	81,3	70,7
17S107GU	73,5	72,4	68,8	69,3	68,4	52,8
17S148GU	77,0	75,9	74,9	75,4	73,5	73,0
18S102GU	93,3	92,3	91,6	92,3	90,9	90,3
17S102GU	76,4	76,4	74,2	75,4	73,8	59,9
17S146GU	85,9	85,9	84,0	84,4	83,3	81,1
16S112GU	31,1	31,1	28,9	30,5	27,7	25,6

Tabell 29. Observationspunkter i berg som har använts för kalibrering av modellen sammanställs i tabellen. I berg redovisas endast medelnivå då mätserier är mycket korta.

GV-rör	RH2000		
	Marknivå	Medelnivå	Spetsnivå
17HB101	102,7	101,4	2,9
17HB102	140,0	137,3	20,3
17HB103	138,7	136,0	39,0
17HB104	137,5	135,4	47,9
17HB105	118,2	117,5	67,5
17HB106	94,8	93,3	1,4
18S1KB17	84,7	81,3	-14,9



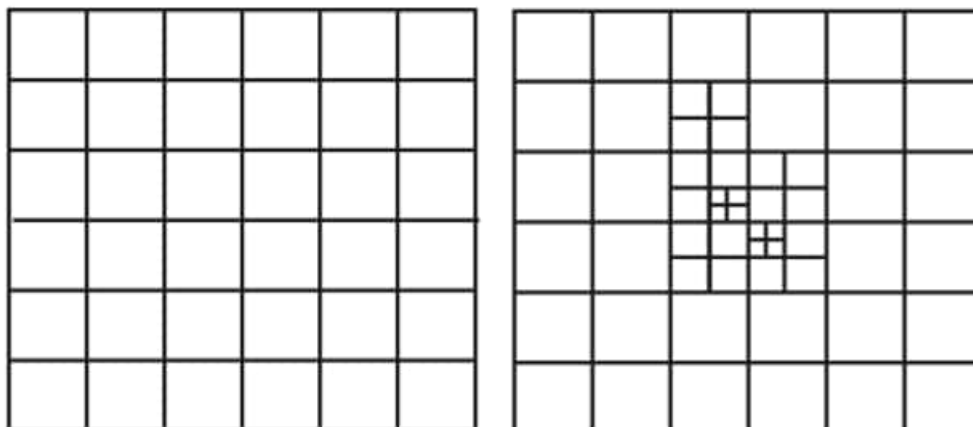
Figur 33. Redovisar grundvattenrör som har använts för kalibrering av modellen.

4.5. Beräkningsmodell

4.5.1. Programvara

Grundvattenmodellen har byggts upp och simulerats med den numeriska koden MODFLOW6 (USGS, 2022) i det grafiska användargränssnittet Model Muse 5.0 (Winston, 2022). Programmet är den sjätte kärnversionen av MODFLOW och bygger på en generaliserad finit-differensmetod med kontrollvolym (CFVD). Koden löser flödesekvationen för porösa medier i tre dimensioner. Metoden tillåter, till skillnad från tidigare iterationer av koden, att en cell tillåts stå i kontakt med flera celler (Figur 34).

Vilket möjliggör lokalt hög upplösning vid särskilt intressanta områden i modellen, utan att för den delen försämra modellens prestanda på ett sätt som gör den svår att hantera.



Figur 34. a) Rektangulär modellmatrix b) Rektangulär modellmatrix med "quadtree refinement".

4.5.2. Hydrauliska randvillkor

Stora sjöar i områden har antagits som positiva hydrauliska ränder, dvs med full hydraulisk kontakt mellan berg och sjö, och simuleras med randvillkoret "*Constant head*" (CHD). Nivån i sjöarna har ansatts till medelgrundvattennivån enligt data från SMHI.

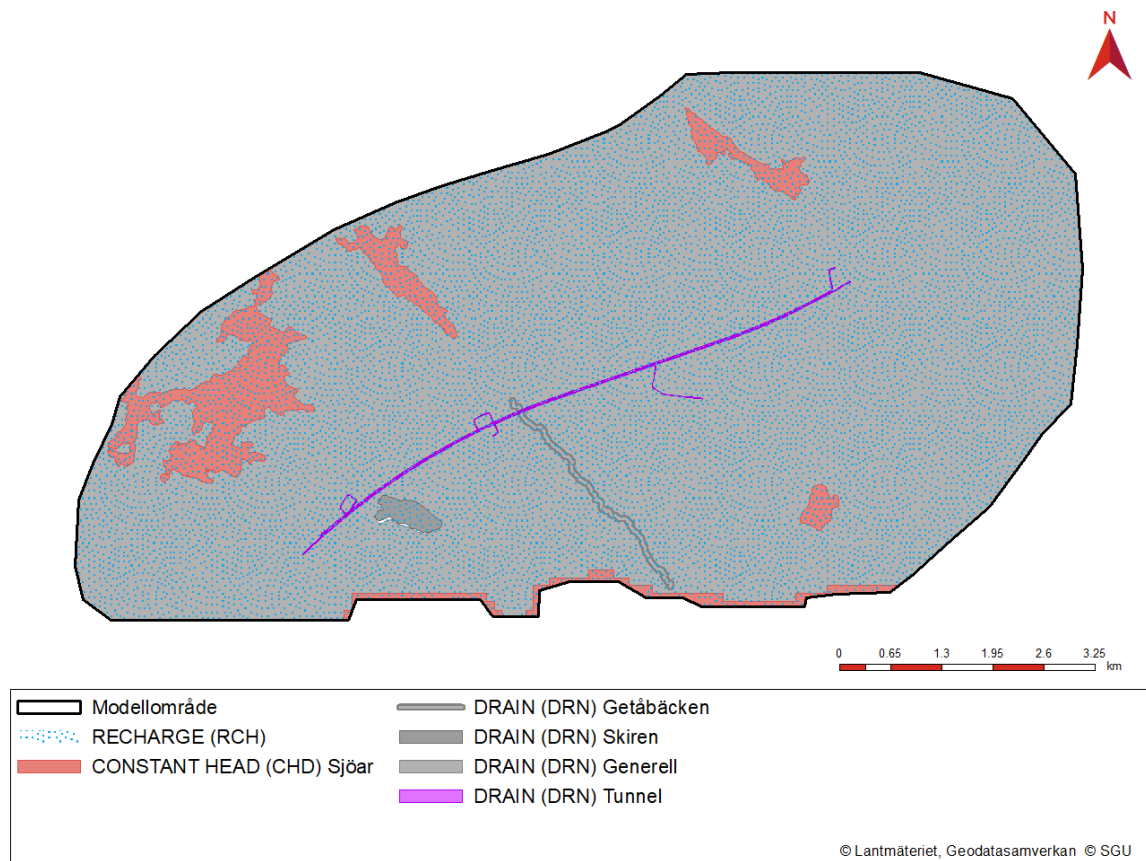
En generell dränering, "*Drain*" (DRN), har ansatts 0,5 meter under markytan för att simulera ytlig avledning av nederbörd till diken, vattendrag och sjöar. Den generella dräneringen syftar även till att hantera vatten som strömmar ut i utströmningsområden där grundvattenbildningen förväntas vara 0 och grundvattennivån står i markytan. Randvillkoret består av en dräneringsnivå och en konduktans. Konduktansen är en term som numeriskt beskriver flödesmotståndet mellan dräneringsvillkoret och cellen och dess angränsande celler. I det aktuella fallet har ett högt värde på konduktans valts för att säkerställa att flödesmotståndet inte begränsar möjligheten för vatten att strömma ut ur randvillkoret.

Modellområdet och hydrauliska ränder redovisas i Figur 35. I Getåravinen har Getåbäcken tillämpats som ett dräneringsrandvillkor (DRN) i ravinbotten. Randvillkoret är tilldelat i ett förmodat undre magasin då nivåmätning i området tyder på att bäcken står i hydraulisk kontakt med friktionsjorden. Sjön Skiren har simulerats som en dränering som följer sjöns bottenprofil. Dräneringsnivån har ansatts på +84,4 som bedöms vara Skirens medelvattenstånd och konduktansen har, likt den generella dräneringen, ett högt värde för att eliminera flödesmotstånd ut ur randvillkoret.

Ett topprandvillkor, "*Recharge*" (RCH), har ansatts för att simulera grundvattenbildningen över modellområdet. Grundvattenbildningen motsvaras av nettonederbörden som har bedömts vara 200 mm/år i medeltal. Randvillkoret placerar ett konstant flöde över de tilldelade cellerna. Andelen av den ansatta nettonederbörden som perkolerar ner i modellen beror av cellernas hydrauliska konduktivitet, det generella dräneringsrandvillkoret och topografin, som beskrivits tidigare i kapitel 0. Randvillkoret tillämpas inte för celler som redan är ansatta som *constant head* (CHD)

då detta inte tillåts av koden. Att det ändå redovisas i figuren syftar till att konceptuellt visa att nederbörd faller över hela modelldomänen.

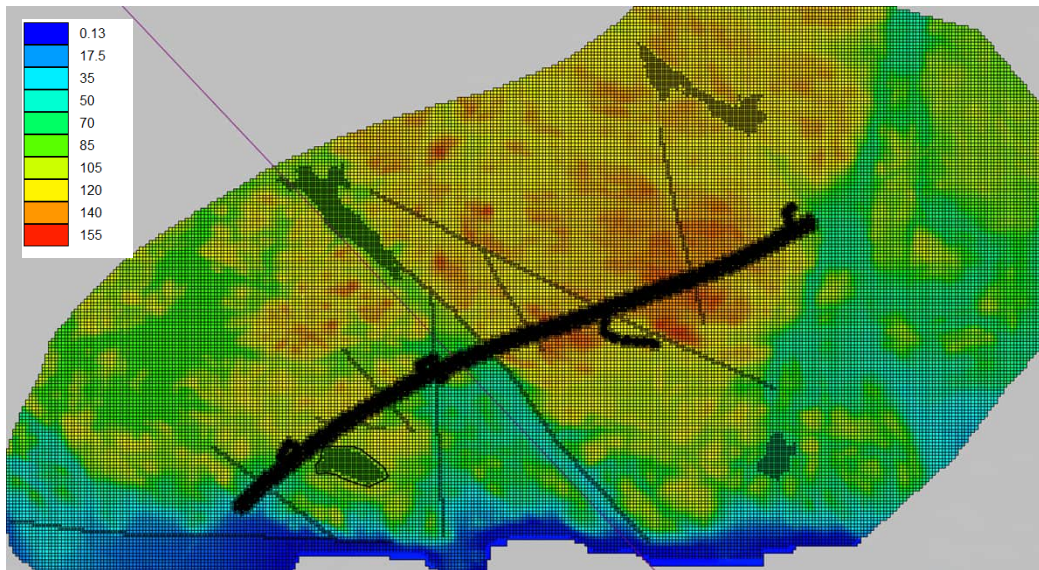
Modellens yttre randvillkor (beskrivna i kapitel 4.2) representeras i möjligaste mån av hydrauliskt stängda gränser ("no flow boundaries") vid topografiska grundvattendelare och constant head vid sjöar och vattendrag. Modellens undre yta representeras av ett no-flow randvillkor och medger alltså inget flöde in eller ut ur modellens botten.



Figur 35. Modellområde och randvillkor. Recharge tillämpas inte för fält som också tilldelats randvillkoret constant head (CHD).

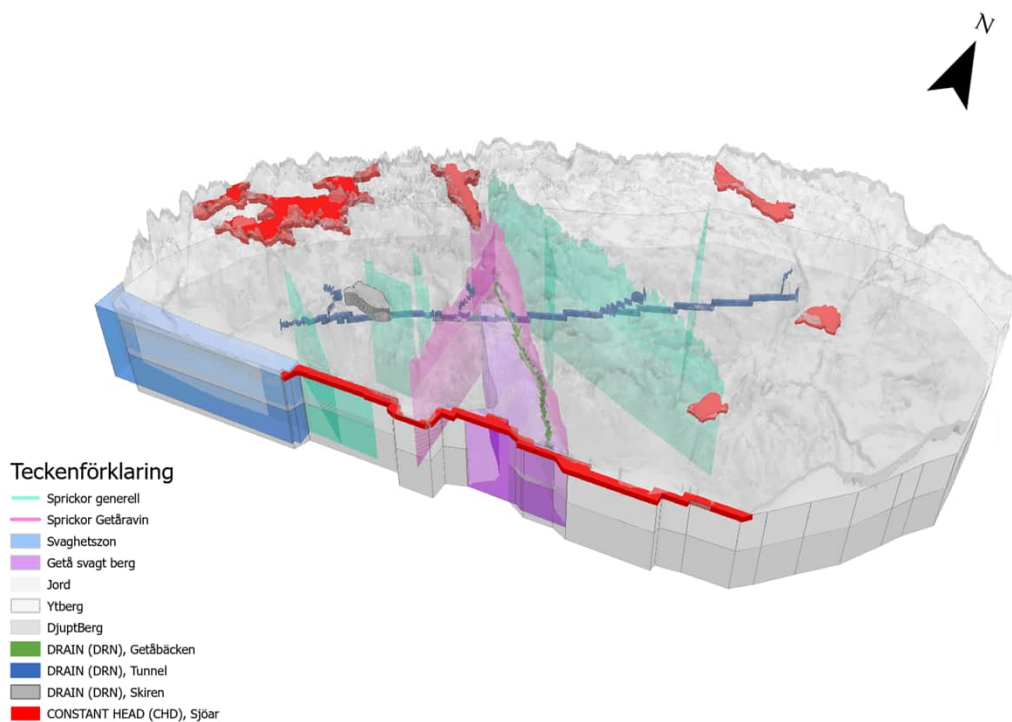
4.5.3. Modellens uppbyggnad

- Den hydrauliska beräkningsmodellen är uppbyggd av en tredimensionell matris tredimensionella celler, eller voxlar, av varierande storlek. Voxlarnas storlek varierar beroende på avståndet till tunnel och randvillkor. Närmst tunnel och arbetstunnlar är beräkningscellernas utbredning i plan cirka 10 meter x 10 meter, medan celler nära sjöar och sprickzoner motsvarar 20 meter x 20 meter och övriga delar av modellen motsvaras av celler med utbredningen 40 meter x 40 meter, se Figur 36.
- Modellområdet täcker ett område motsvarande knappt 67 km².

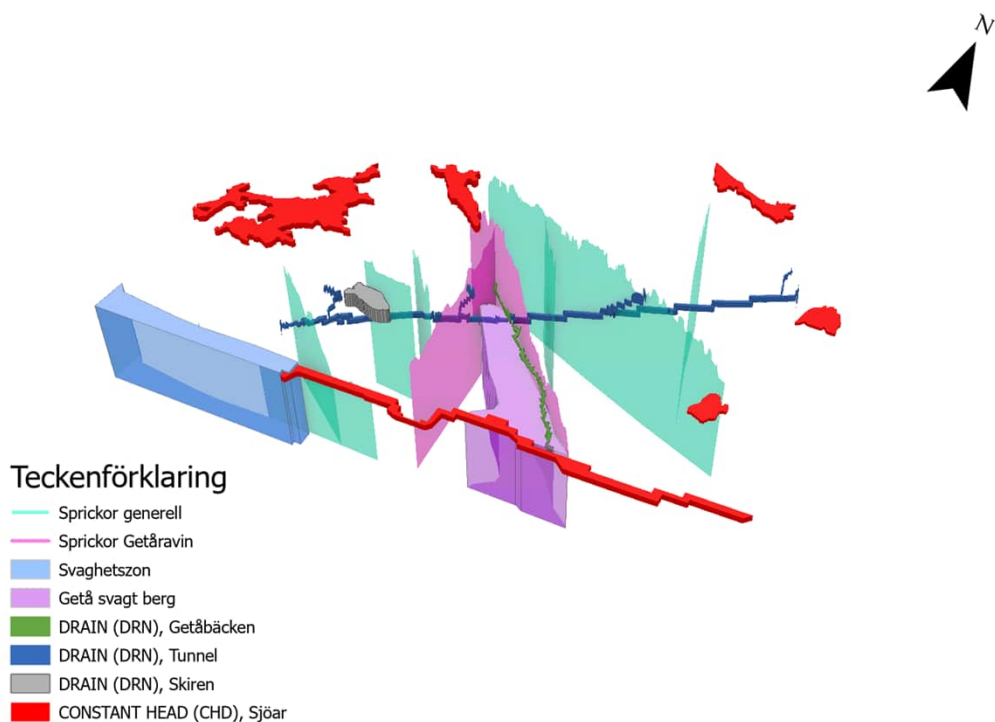


Figur 36. Modellens cellmatrix och överyta sedd uppifrån. Färgerna representerar modellens marknivå som plushöjd (RH2000). I figuren framgår att celldiskretiseringen (cellernas storlek) runt intresseobjekt som sjöar, vattendrag, sprickzoner och tunnel är väsentligt mindre än cellerna i övrig.

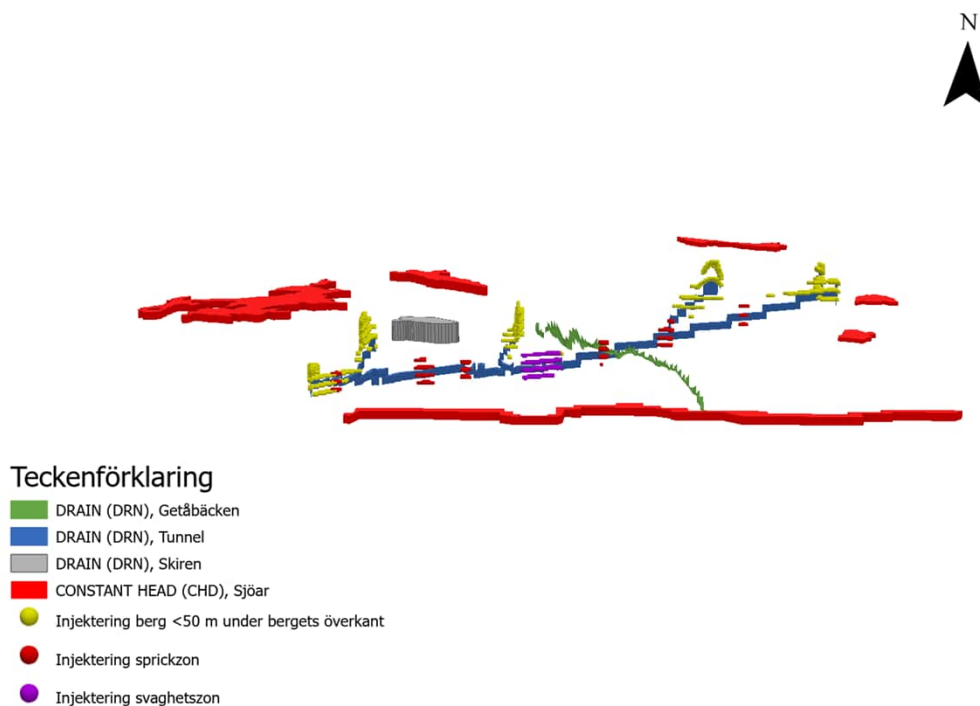
- Modellens överyta representeras av högupplöst höjddata från Lantmäteriet. Höjddatans upplösning har reducerats till 10 meter x 10 meter stora celler för att anpassas till modellens minsta cellstorlek.
- Modellens undre gräns består i hela modellområdet av berg som motsvarar en nivå på -150 (RH2000).
- Modellen har byggts i två uppsättningar. K3D, med en hydraulisk konduktivitet i berg som baseras på hydraulisk konduktivitet i berg som antas motsvara ett isotropt medelvärde beräknat statistiskt. K90% med en hydraulisk konduktivitet som antas motsvara den 90:e percentilen av bedömd hydraulisk konduktivitet i berg enligt ovan, se kapitel 4.4.1. K90% är därför ett konservativt högt antagande av bergets hydrauliska konduktivitet.
- I vertikalled har modellen byggts upp av fyra lager (jord (övre magasin), jord (undre magasin), berg med högre konduktivitet och berg med lägre konduktivitet) med olika ansatta hydrauliska egenskaper. Figur 37 och Figur 38 redovisar schematiska skisser av modellens uppbyggnad i 3D med modellerade jord- och berglager, svaghetszoner, sprickzoner, randvillkor samt den studerade tunneln.
- För de två ovan beskrivna modelluppsättningarna har tätning tillämpats där något av följande kriterier är uppfyllda (Figur 39 och Figur 40):
 - Bakgrundsbergets hydrauliska konduktivitet överskrider $1 \cdot 10^{-8}$ m/s.
 - När tunneln passerar sprick- eller krosszoner.
 - Vid passage av sjön Skiren.



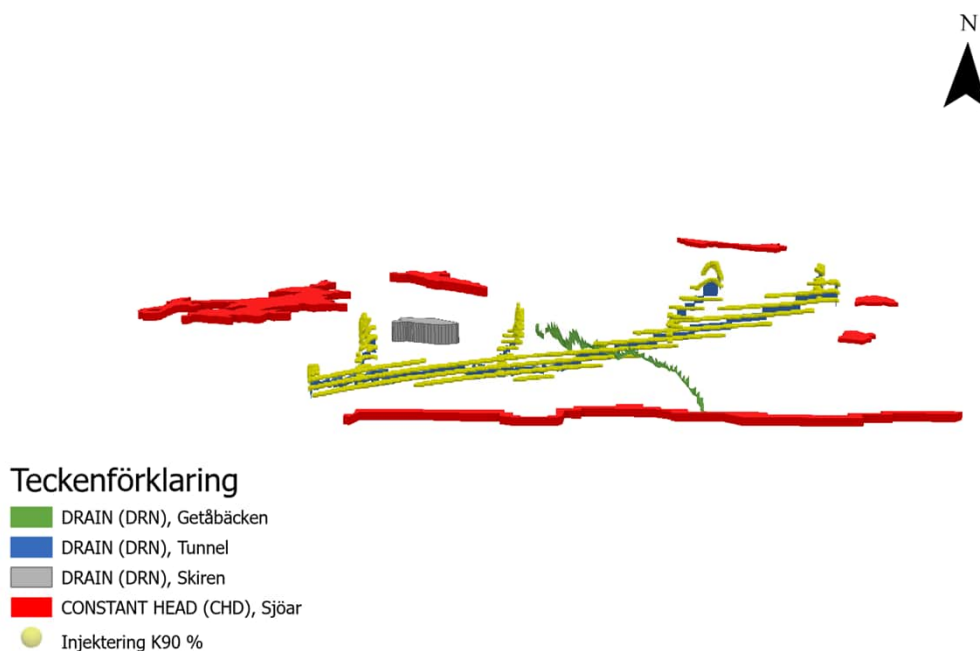
Figur 37. Modellens strukturer med randvillkor, lagerindelning och tunneldränering. Redovisningen är överdriven 10 gånger i vertikalled.



Figur 38. Modellens strukturer och randvillkor utan jord- och berglager. Redovisningen är överdriven 10 gånger i vertikalled.



Figur 39. Redovisar hur tätning har tillämpats för scenario med berg som motsvarar K3D. Injektering har tillämpats för sprickor och svaghetszon vid Getåravinen samt för berg <50 meter under bergytan. Av redovisningsskäl representeras tätningen i figuren endast av en punkt i cellens mitt. I praktiken omges tunneln fullständigt av en intakt injekteringsskärm.



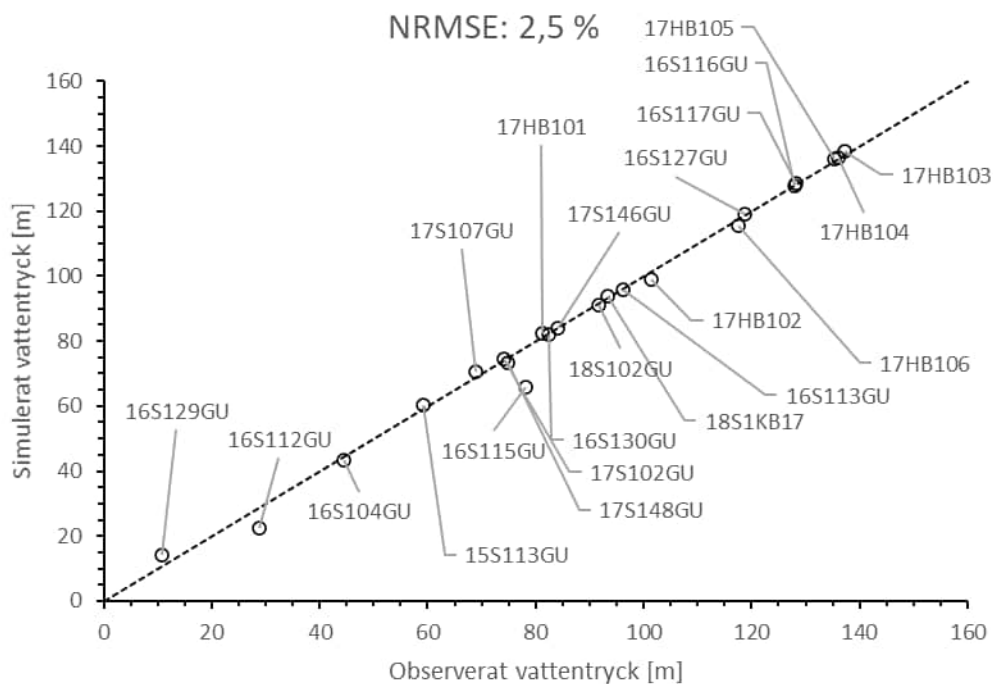
Figur 40. Redovisar hur tätning har tillämpats för scenario med berg som motsvarar K90%. Av redovisningsskäl representeras tätningen i figuren endast av en punkt i cellens mitt. I praktiken omges tunneln fullständigt av en intakt injekteringsskärm.

4.6. Simuleringar

Modellen består i två basmodeller (K3D och K90%) som båda representerar nollalternativet, dvs. situationen innan tunneln är närvarande i modellen. De två basmodellerna kalibreras mot ett urval av uppmätta nivåer i observationsrör för att säkerställa att modellen är en tillräckligt god representation av de rådande grundvattenförhållandena. Modellen validerades inte mot ett oberoende urval av grundvattenrör. Därefter har två driftskedessimuleringar genomförts där tunneln har introducerats som en dränering i modellen innanför en injekteringsskärm som tillämpats enligt föreskriven täthet.

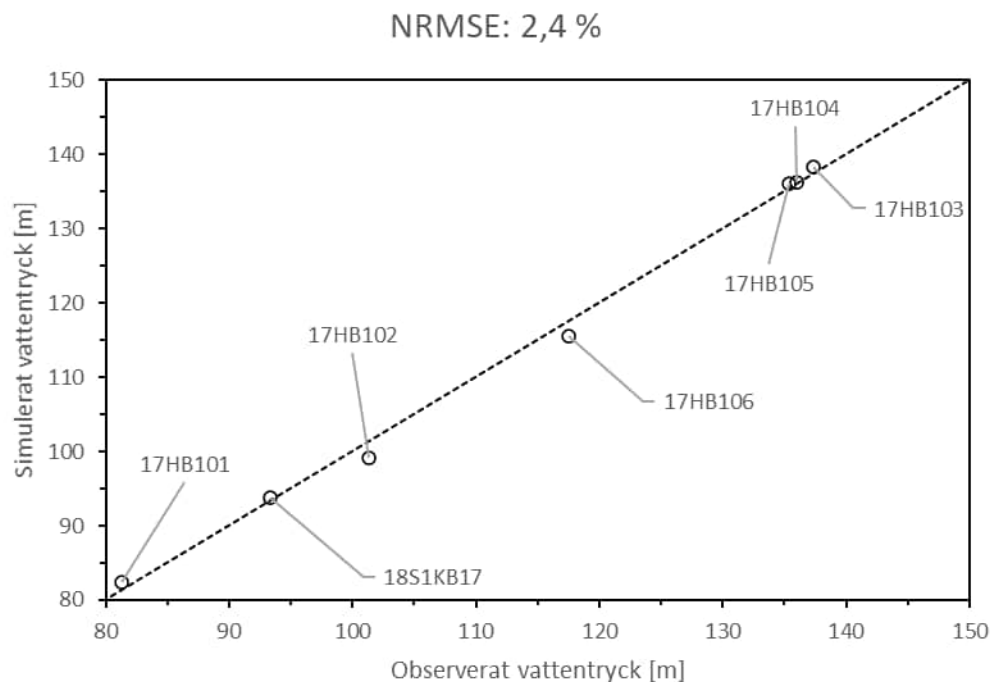
4.6.1. Kalibrering 1 - Basmodell K3D

Nollalternativet med K3D som styrande hydraulisk konduktivitet i berg kalibrerades mot uppmätta nivåer i 22 observationspunkter (grundvattenrör i jord och bergborrhål). Modellens förmåga att representera uppmätta nivåer utvärderades med *normalized root mean squared error*, NRMSE, vilket är ett mått på den kvadrerade skillnaden mellan uppmätta och simulerade värden. För K3D motsvarande NRMSE 2,5 % vilket anses vara en generellt liten avvikelse mellan uppmätta och simulerade grundvattennivåer, Figur 41.



Figur 41. Kalibrering av nollalternativ för modell K3D. NRMSE = 2,5 %. Modellen är därefter inte validerad mot ett oberoende urval av grundvattenrör.

Om endast bergborrhålen studeras, framgår att avvikelsen mot uppmätta värden minskar något, se Figur 42.



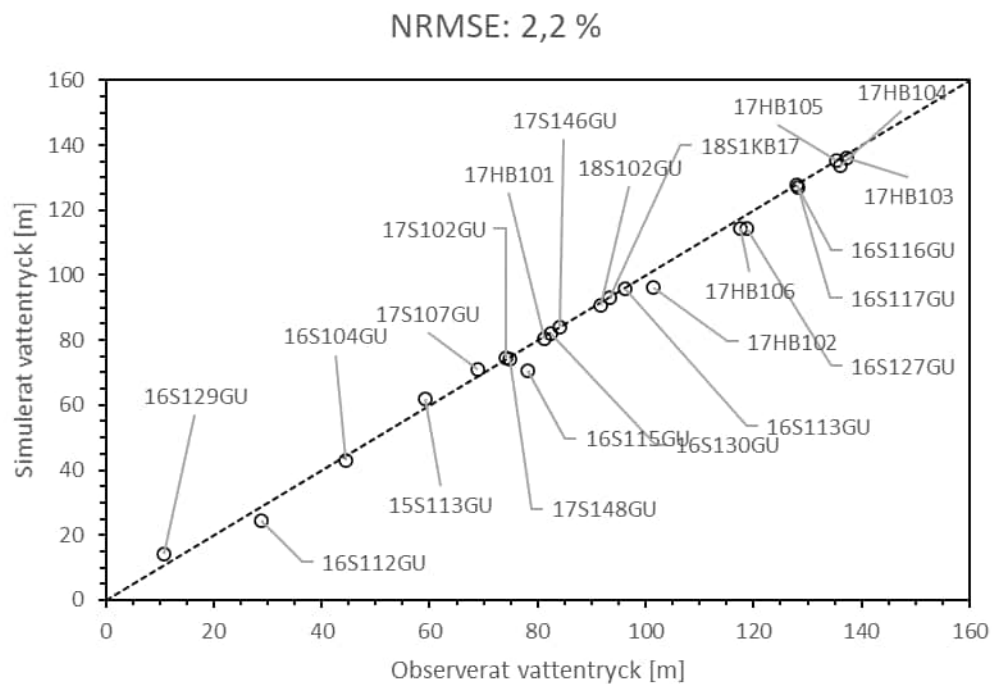
Figur 42. Kalibrering av nollalternativ för modell K3D med endast bergborrhål. NRMSE = 2,4 %. Modellen är därefter inte validerad mot ett oberoende urval av grundvattenrör.

4.6.2. Kalibrering 2 - Basmodell K90%

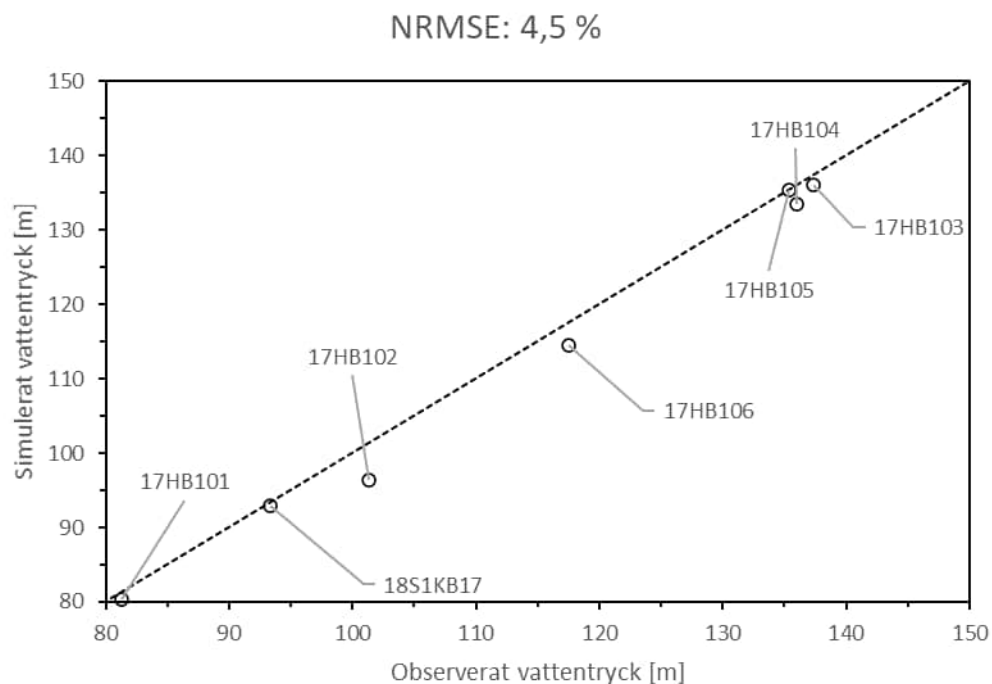
Nollalternativet med K90% som styrande hydraulisk konduktivitet i berg kalibrerades på motsvarande sätt. Beräknad NRMSE var 2,2 % vilket även i det fallet anses vara en liten avvikelse mellan uppmätta och simulerade grundvattennivåer, Figur 43.

Om endast bergborrhålen studeras, framgår att avvikelsen mot uppmätta värden är något större för alternativet med K90% som styrande hydraulisk konduktivitet för berg Figur 44. Anledningen till att den totala felmarginalen är mindre mot samtliga observationspunkter tycks bero på en större avvikelse vid observationspunkt 16S115GU vilket i sin tur tycks bero på observationsrörets funktion och/eller placering.

Rensat för den avvikande observationspunkten så ger kalibreringen en lägre felmarginal totalt sett för alternativet med K3D som styrande.



Figur 43. Kalibrering av nollalternativ för modell K90%. NRMSE = 2,2 %. Modellen är därefter inte validerad mot ett oberoende urval av grundvattenrör.



Figur 44. Kalibrering av nollalternativ för modell K90% med endast bergborrhål. NRMSE = 4,5 %. Modellen är därefter inte validerad mot ett oberoende urval av grundvattenrör.

4.6.3. Simulering 1 - Tunnlar med K3D

När modellen var kalibrerad genomfördes simuleringar (modellkörningar) för att studera effekterna av tunneln för scenario K3D. I detta scenario har de delar av tunneln som passerar genom sprickzoner och anläggningsdelar som rör sig i bergets översta 50 meter tätats. Injekteringszonen förväntas i praktiken vara cirka 6 meter tjock. Då cellmatrisen närmast tunneln består av kubformade celler med sidan 10 meter, har en transmissivitet som omvandling varit nödvändig för att erhålla korrekt k -värde. Principen för detta har varit att beräkna den förväntade transmissiviteten för injekteringsskärmen enligt Ekvation 24.

Ekvation 24. Beräkningsmetod för ekvivalent k -värde till cellmatris.

$$\frac{b_{inj}}{k_{inj}} = \frac{b_{cell}}{k_{cell}} \quad \text{Ekvation 24}$$

Tätningens hydrauliska konduktivitet har justerats enligt ovan för att motsvara $1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Injekteringszonen vid Getåravinens svaghetszon och sprickor vid densamme har en hydraulisk konduktivitet motsvarande $3 \cdot 10^{-7}$ m/s respektive $2 \cdot 10^{-8}$ m/s och har tillämpats på motsvarande sätt. Vid sjön Skiren har cirka 300 meter av tunnel tätats antagits kräva mer omfattande tätningsinsatser. Den modellerade injekteringszonen antas därför ha en hydraulisk konduktivitet motsvarande $1 \cdot 10^{-9}$ m/s, vilket är en hög ambitionsnivå för tätning. Tätningens hydrauliska konduktivitet har justerats enligt samma beräkningsmodell för anpassning till cellstorlek till en antagen sex meter tjock injekteringsskärm.

4.6.4. Simulering 2 - Tunnlar med K90%

När modellen var kalibrerad genomfördes simuleringar (modellkörningar) för att studera effekterna av tunneln för scenario K90. I detta scenario har hela tunneln en 6 meter tjock injekteringszon med en hydraulisk konduktivitet som motsvarar $2 \cdot 10^{-8}$ m/s för bergets översta 50 meter och $1 \cdot 10^{-8}$ för berg på större djup än 50 meter. Injekteringszonen vid Getåravinens svaghetszon och sprickor vid densamme har en hydraulisk konduktivitet motsvarande $3 \cdot 10^{-7}$ m/s respektive $2 \cdot 10^{-8}$ m/s. Vid sjön Skiren har cirka 300 meter tätats med mer omfattande insatser och injekteringszonen antas ha en hydraulisk konduktivitet motsvarande $1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Injekteringen har tillämpats på samma sätt som i beskrivs i kapitel 4.6.3.

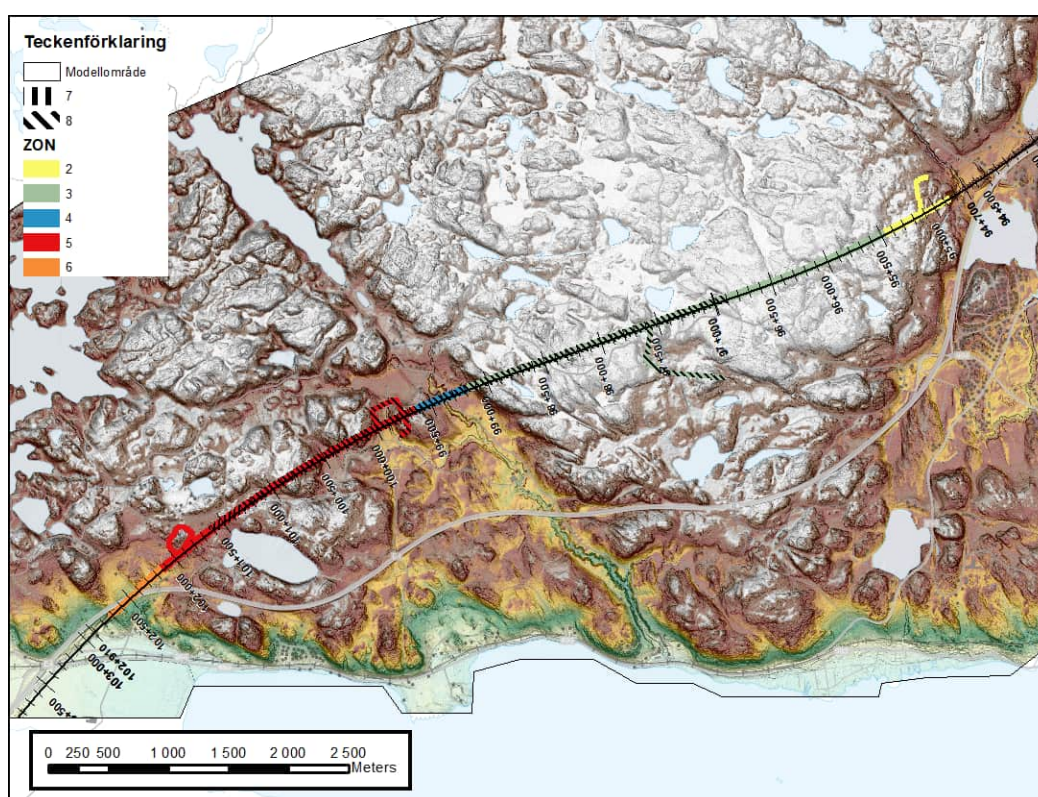
4.7. Resultat

Resultaten från modelleringen beskriver avsänkningen runt tunneln som följer av tunneln i driftskede. Avsänkningen redovisas som randen för $>0,3$ meters tryckpåverkan i jord och >1 meters tryckpåverkan i berg. För att studera inläckaget till tunneln har en vattenbalansberäkning utförts med hjälp av programmet *Zonebudget (ZONEBUD)* som kan beräkna vattenbalansen eller vattenbudgeten för definierade områden i modellen.

4.7.1. Vattenbalans

Vattenbalans har studerats för ett antal utvalda intresseområden som redovisas i Figur 45 och resultat har sammanställts i Tabell 30. Resultaten presenteras som inläckage per minut och 100 meter tunnel och har beräknats för hela anläggningen per löpmeter. Detta innebär helt enkelt att inläckaget avser samtliga delar (spårtunnel, servicetunnel och eventuella arbetstunnlar) inom respektive zon där spårtunnel och servicetunnel räknas som en sammanslagen parallell tunnel och arbetstunnel räknas som en ytterligare adderad längd inom zonen.

Inläckaget efter injektering till ner till $1 \cdot 10^{-8}$ m/s beräknas analytiskt i medeltal cirka 19 l/min*100 meter tunnel för hela tunneln. I den numeriska lösningen är motsvarande siffra cirka 10 – 60 l/min*100 meter. Alltså i samma storleksordning vilket ger trovärdighet i beräkningen.



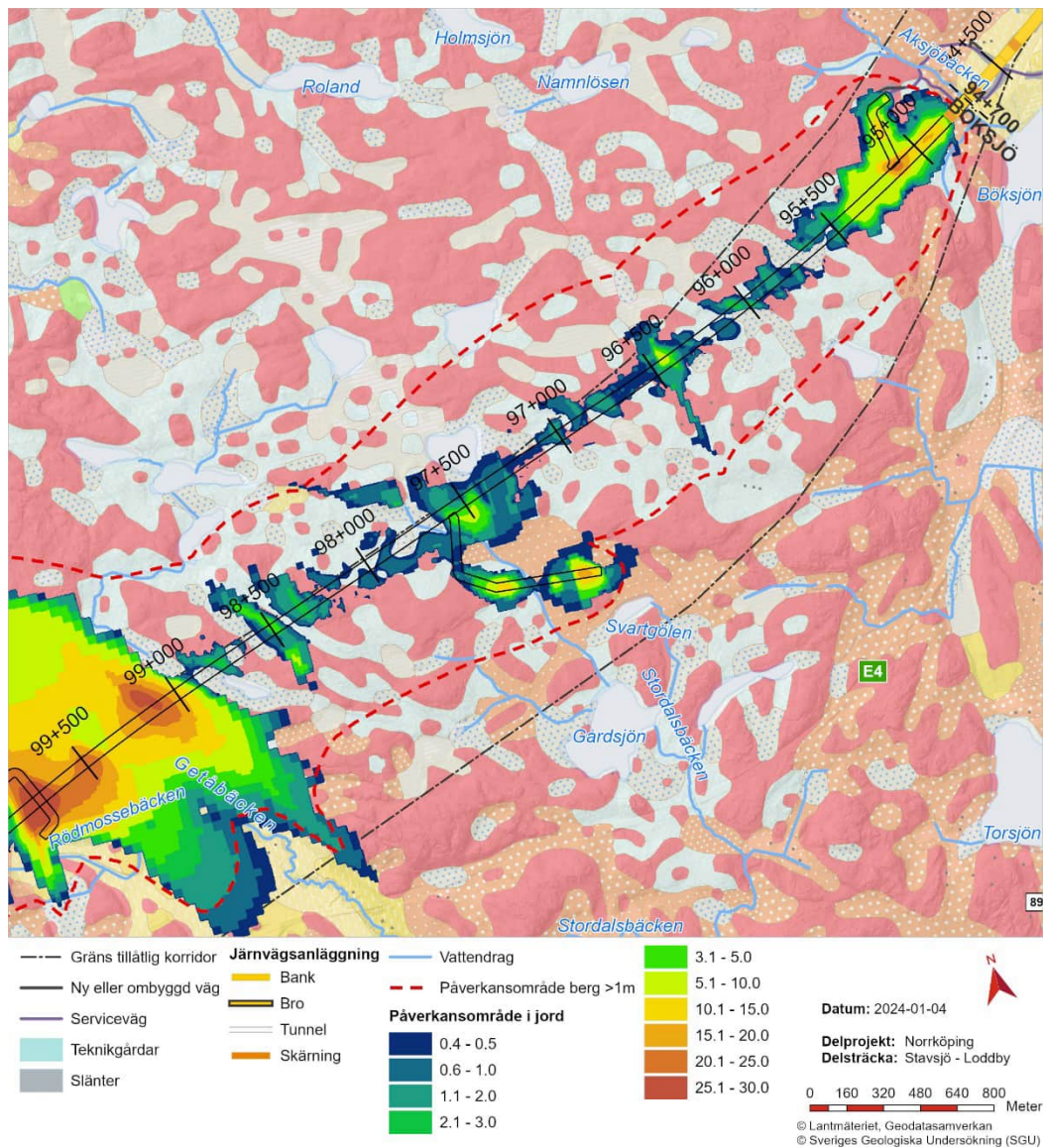
Figur 45. Delområden för beräkning av vattenbalans (inläckage till tunneln).

Tabell 30. Resultande inläckage från modellberäkningar.

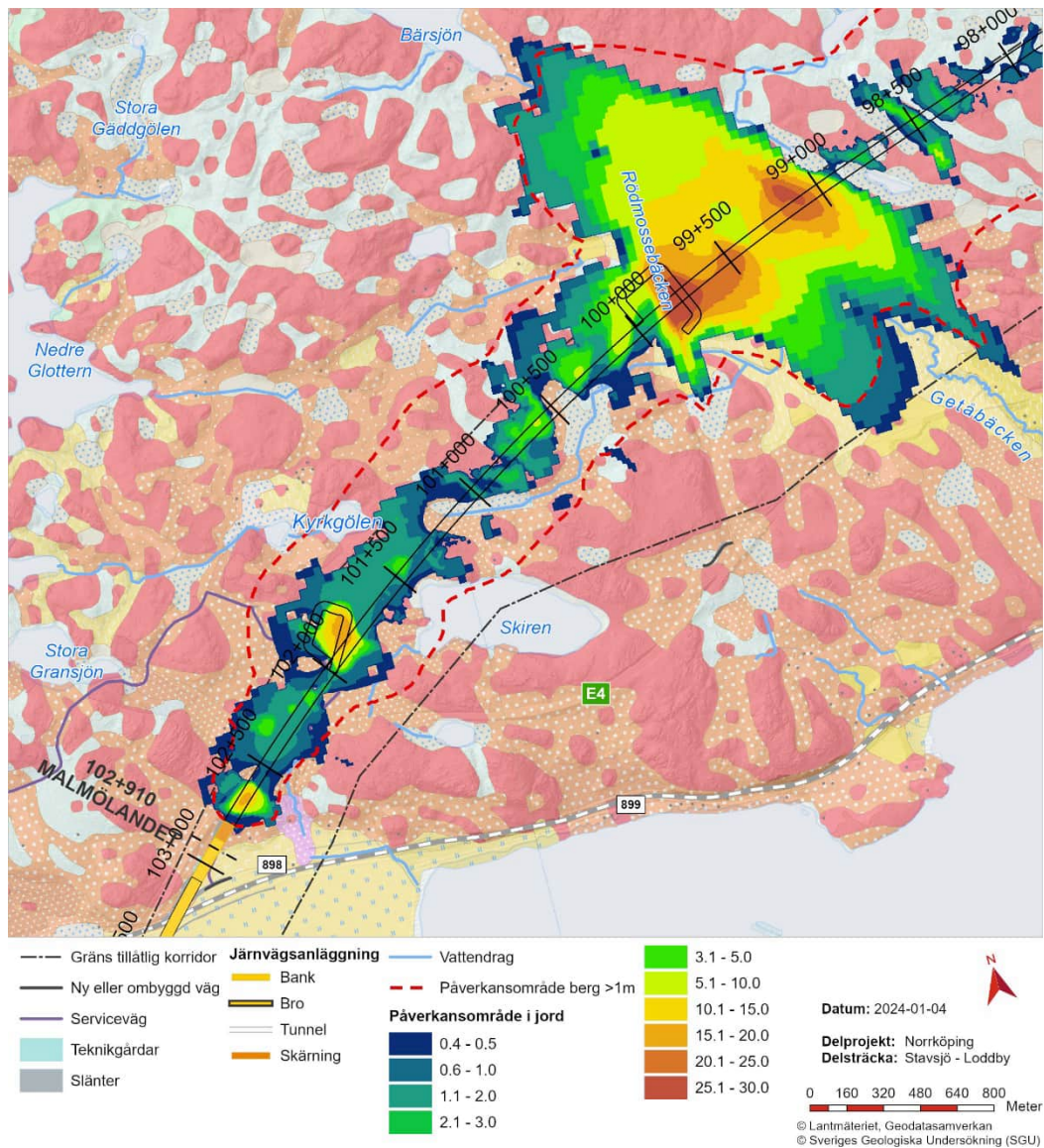
Zon	Längd, inkl. arbetstunnlar (m)	K ₃ D	K90 %
		Läckage l/min	Läckage l/min
2 – Norra tunnelpåslaget	980	79	157
3 – Djup tunnel	4695	433	1024
4 – Getåravinen	465	263	314
5 – Djup tunnel	3880	329	707
6 – Södra tunnelpåslaget	580	52	131
7 – Skiren	330	13	24
8 – Getåbäckens avr.	6100	877	1567
Hela tunneln (2+3+4+5+6)	10600	1156	2333

4.7.2. Påverkansområde K3D

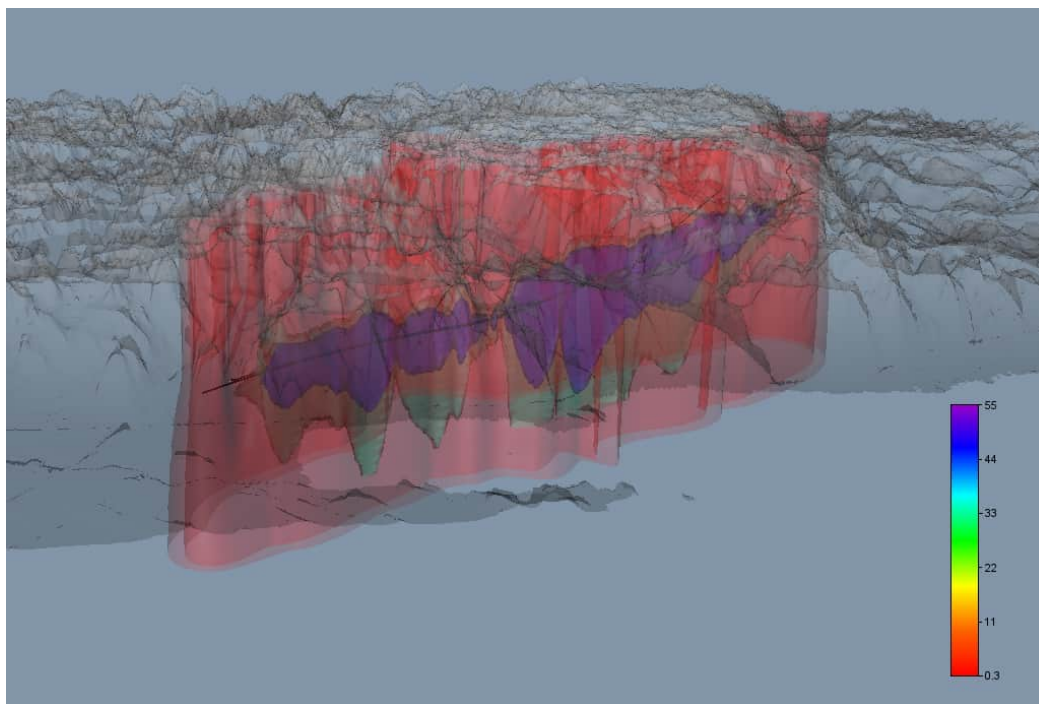
Beräknat påverkansområde till följd av tunneln med tillämpad injektering för K3D redovisas i Figur 47. Påverkansområdet jord och berg redovisas för grundvattentryckpåverkan >0,3 meter i jord och >1 meter i berg. För berg redovisas avsänkningen på nivån +15 som i modellen motsvarar en nivå där störst andel av tunneln befinner sig inom angränsande modellager. Eftersom påverkansområdets utbredning i berg är avsevärt större än i jord redovisas separata påverkansområden.



Figur 46. Påverkansområde i jord och berg för simuleringar med K3D som styrande hydraulisk konduktivitet i berg, sträcka 94+700 – 99+000.



Figur 47. Påverkansområde i jord och berg för simuleringar med K3D som styrande hydraulisk konduktivitet i berg, sträcka 99+000 – 102+500.

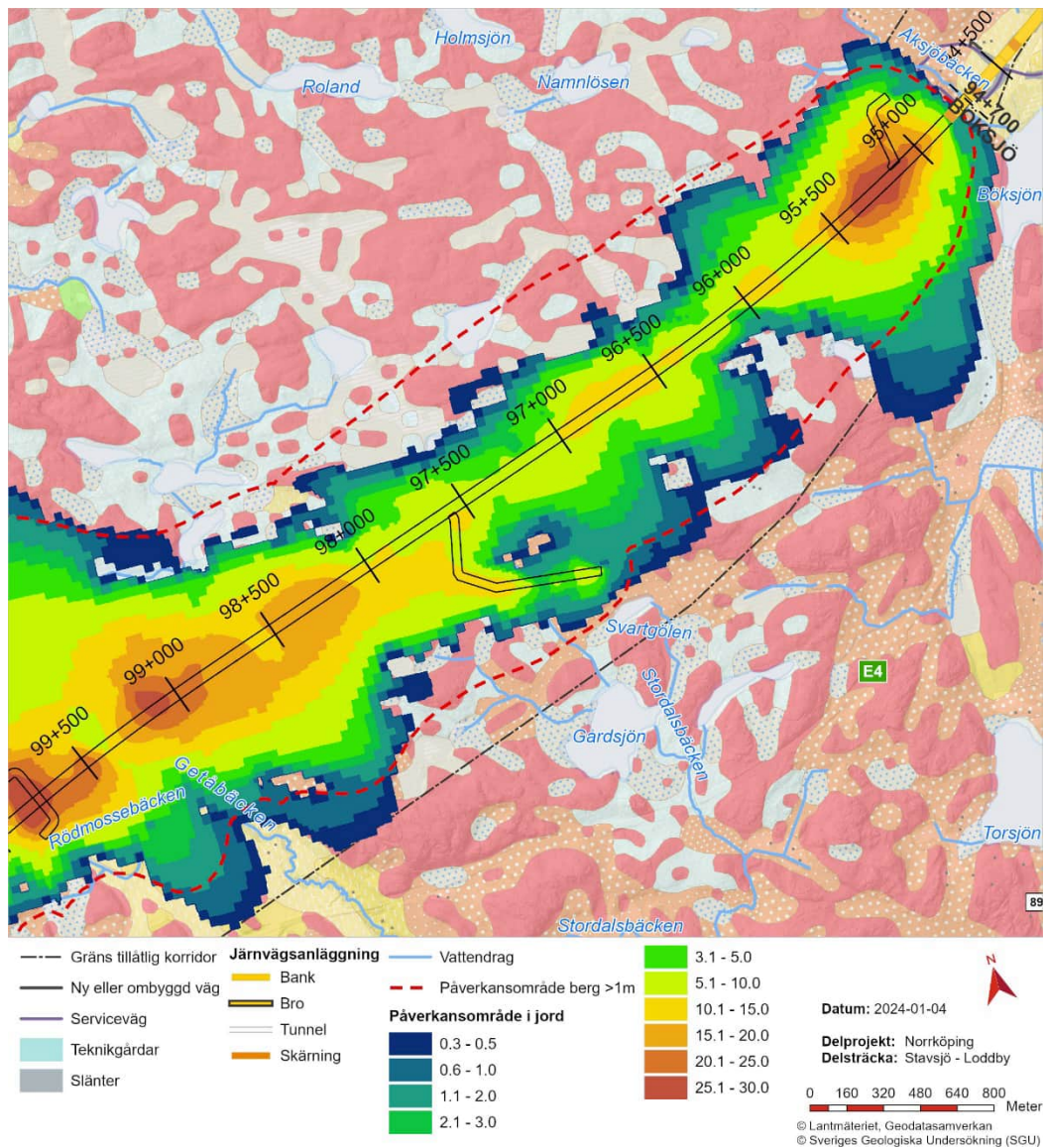


Figur 48. Illustration av påverkansområdet för K3D i 3D med isoytor vid trycksänkningen 0,3, 1, 35 och 50 m.

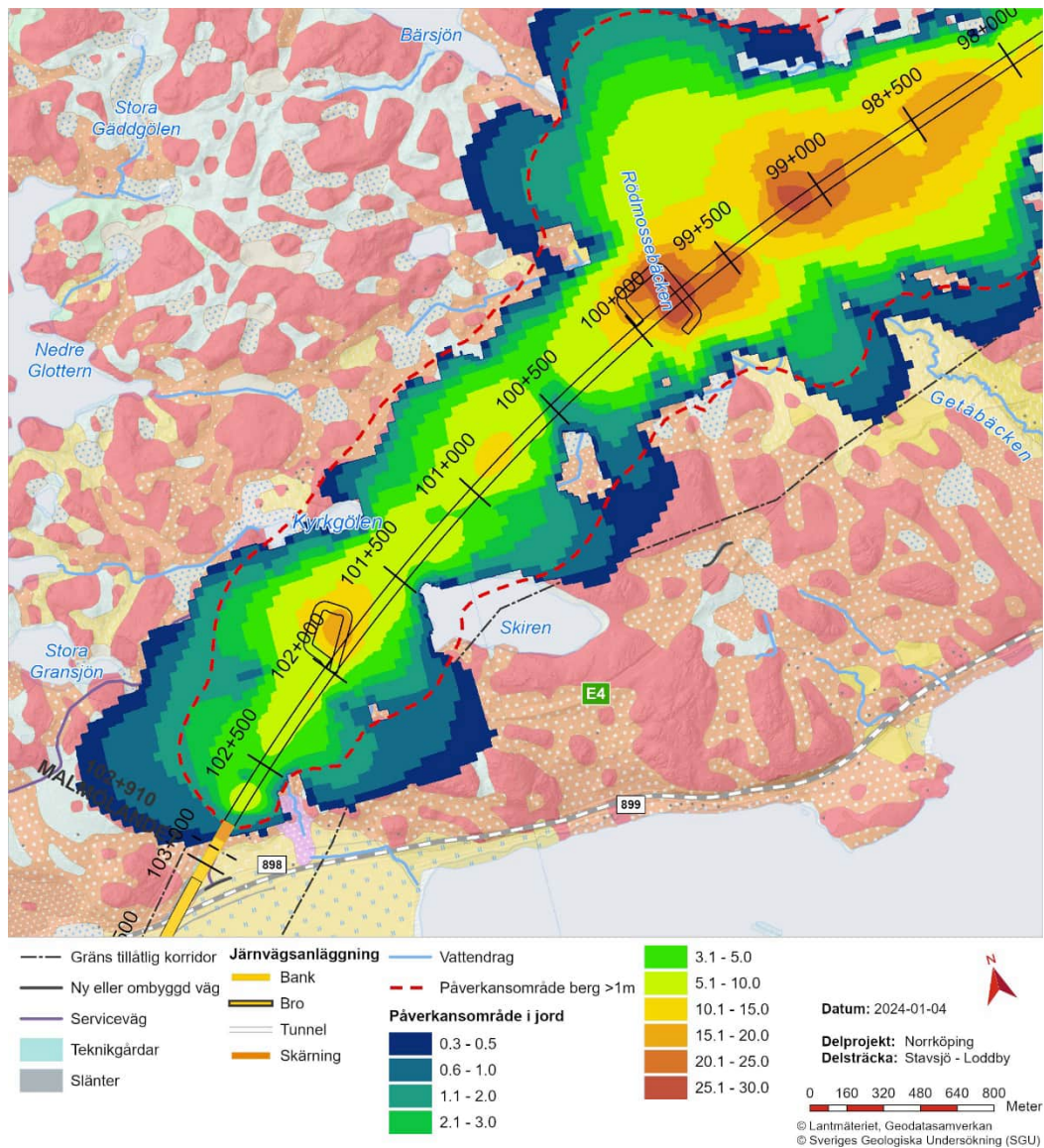
4.7.3. Påverkansområde K90%

Beräknat påverkansområde till följd av tunneln med tillämpad injektering för K90% redovisas i Figur 47. Påverkansområdet jord och berg redovisas för grundvattentryckpåverkan $>0,3$ meter i jord och >1 meter i berg. För berg redovisas avsänkningen på nivån +15 som i fall med K3D då det ger mest relevant jämförelse.

I delar av påverkansområdet är avsänkningen större än jordlagrets totala mäktighet, i dessa områden bedöms jorden dräneras fullständigt och lokalt ej längre vara en del av den mättade zonen.



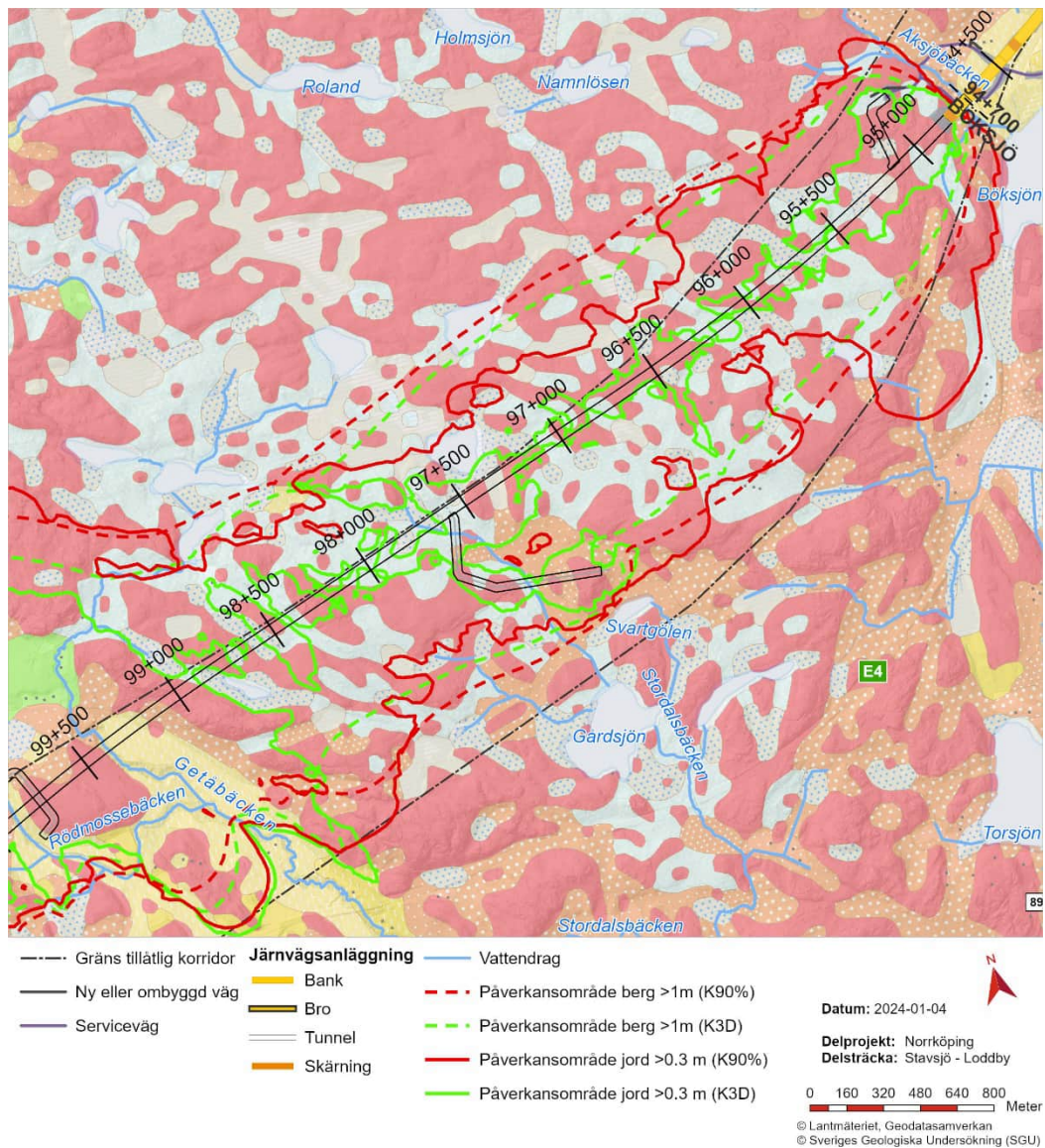
Figur 49. Påverkansområde i jord och berg för simuleringar med K90% som styrande hydraulisk konduktivitet i berg, sträcka 94+700 – 99+000.



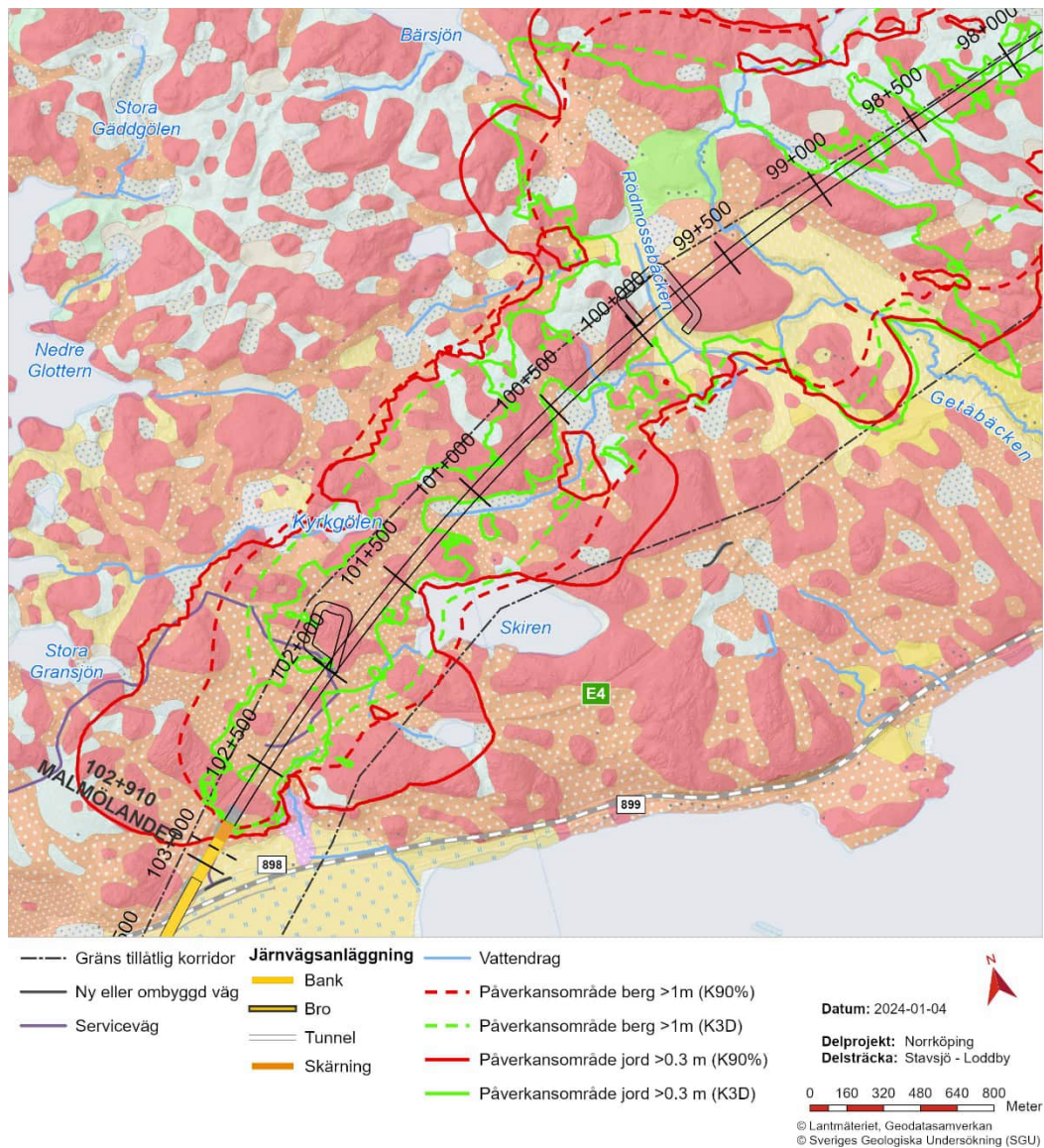
Figur 50. Påverkansområde i jord och berg för simuleringar med K90% som styrande hydraulisk konduktivitet i berg, sträcka 99+000 – 102+500.

4.7.4. Resultatjämförelse

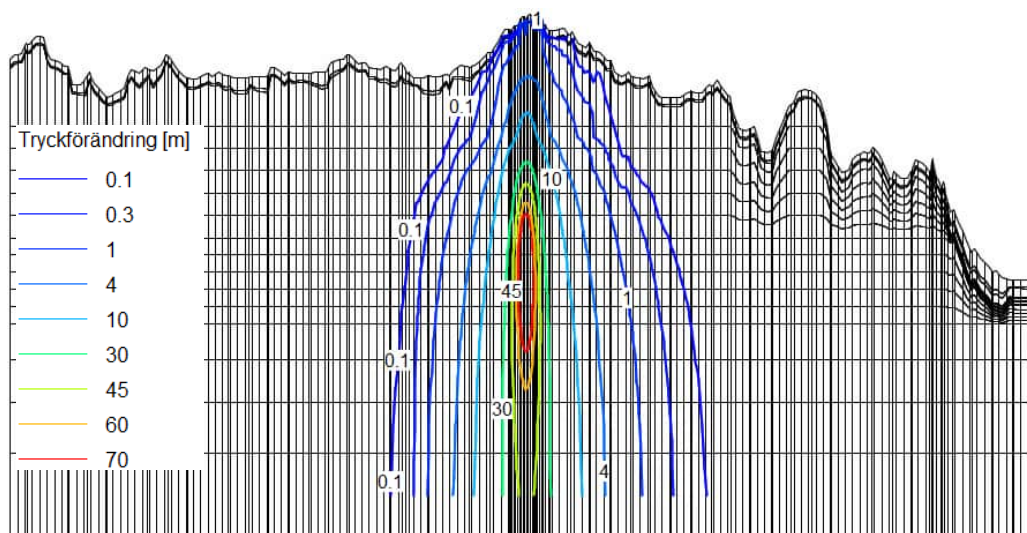
Jämförelse mellan påverkansområden för de två scenarierna illustreras i Figur 51. I Figur 53 och Figur 54, jämförs avsänkningen för de två olika alternativen (K90 % och K3D) på djupet i en utvald sektion vid 98/300.



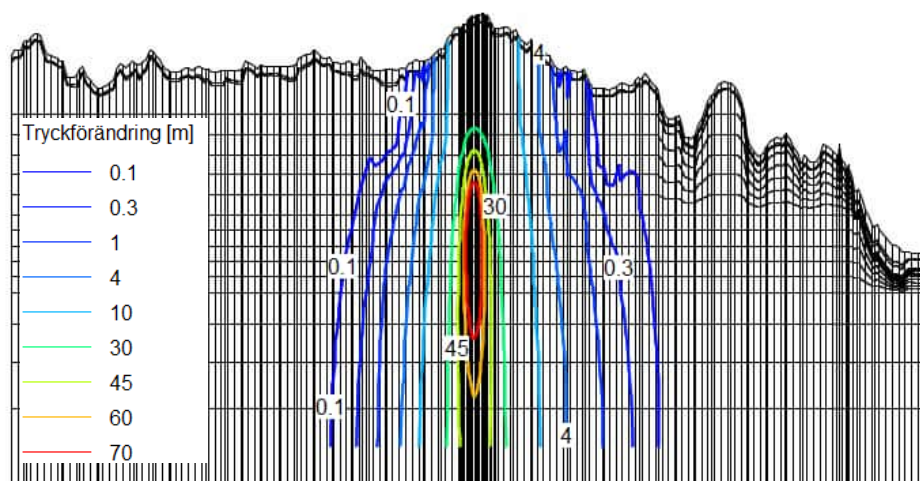
Figur 51. Jämförelse mellan påverkansområden beräknade för K3D respektive K90 % för sträcka 94+700 – 99+000.



Figur 52. Jämförelse mellan påverkansområden beräknade för K3D respektive K90 % för sträcka 99+000 – 102+500.



Figur 53. Tryckförändring som isolinjer till följd av tunneldränering. Profil från norr till söder vid längdmätning cirka 98/300 för scenario K3D. Observera att modellprofilen är överdriven 10 gånger i vertikalled.



Figur 54. Tryckförändring som isolinjer till följd av tunneldränering. Profil från norr till söder vid samma längdmätning för scenario K90%. Observera att modellprofilen är överdriven 10 gånger i vertikalled.

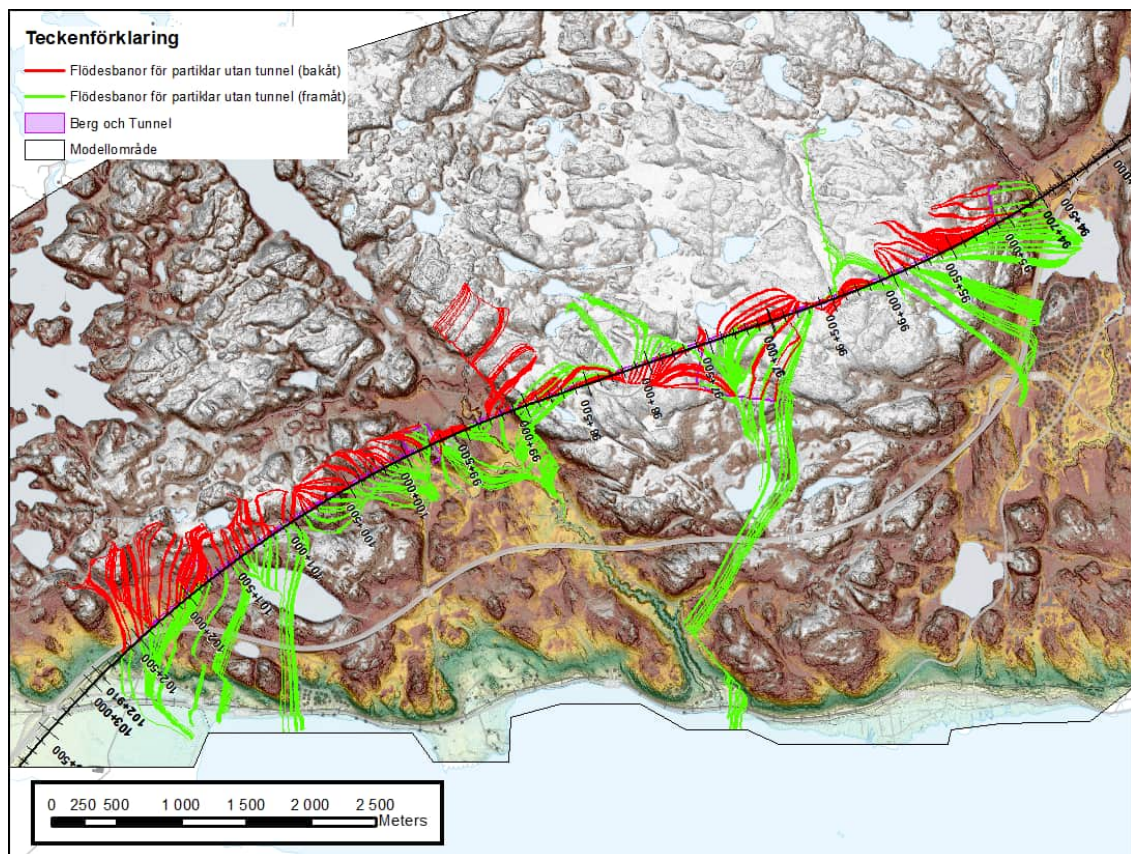
4.8. Flödesvägar

Flödesmönstret har studerats för partiklar som placerats längs tunnellen i såväl nollalternativet som när tunneln är byggd. Studien genomfördes med programvaran Modpath som medger flödesspårning både bakåt och framåt i tid för utvalda celler i modellen. Resultatet redovisas för modell K90% i Figur 55 och Figur 56. Som framgår av figuren går majoriteten av flödet som passerar ut ur modellen genom de dräneringsceller som utgör tunneln för driftskedessimuleringen medan flödet innan passerar och rör sig mot förväntat utströmningsområde.

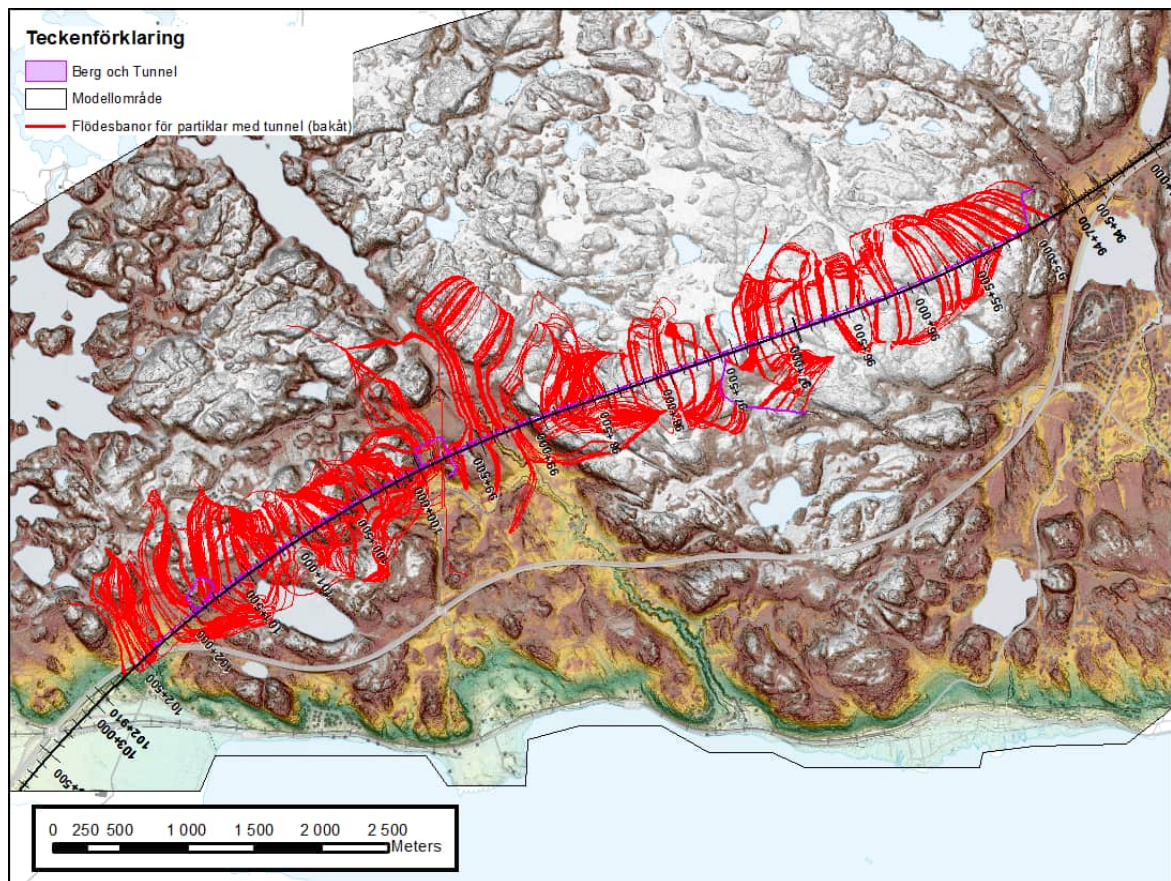
Flödet som studeras utgår i samtliga fall från punkter som placerats på tunnelnivån varför det inte återspeglar flödet i jordlager eller ytligt berg över tunneln.

Flödet har också studerats för partiklar som placerats i randen kring sjön Skiren för att översiktligt bedöma hur flödesmönster kan förändras mellan Skiren och tunneln före och efter att tunneln är byggd (Figur 57 samt Figur 58). I figurerna framgår att flödet innan tunneln i huvudsak rör sig från inströmningsområden till Skiren och därefter mot Bråviken (blå linjer motsvarar flödet till Skiren från omgivningen och gröna linjer flödet ut från Skiren). Då tunneln är byggd tar sig delar av flödet istället in mot tunneln vilket är att förvänta (blå linjer motsvarar flödet till Skiren från omgivningen och röda linjer flödet ut från Skiren).

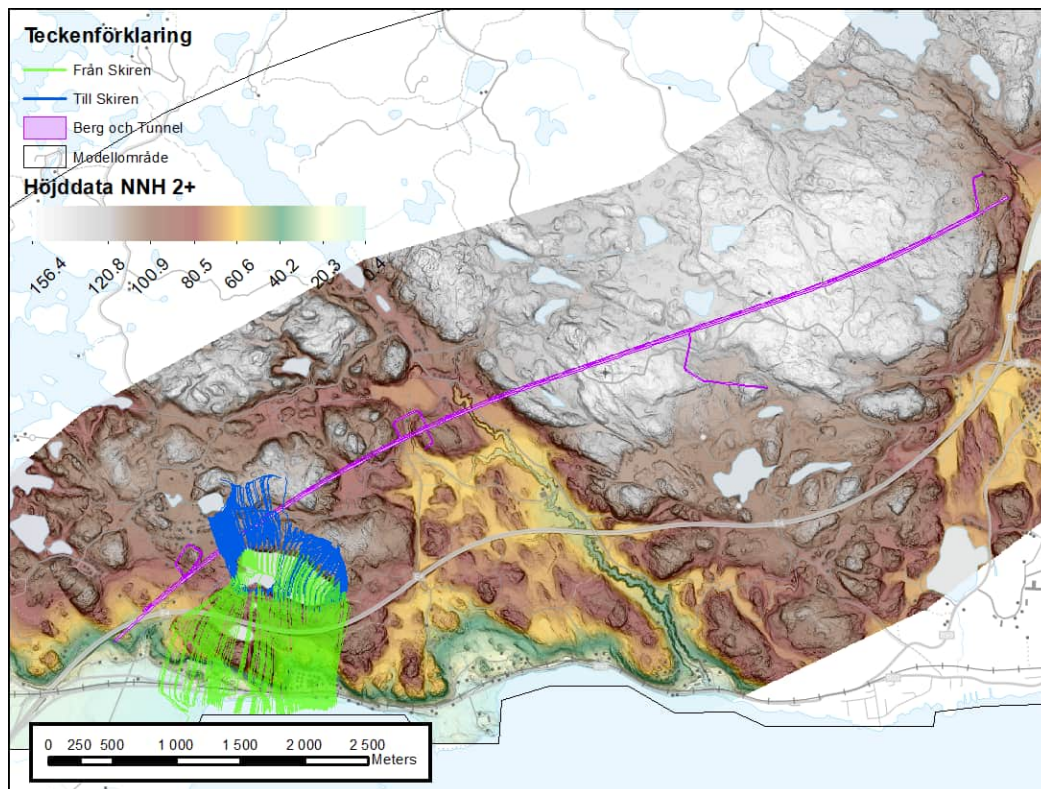
Det förväntas inte vara några väsentliga skillnader i flödesmönster mellan alternativet K90% och K3D och har ej studerats i modellen. Redovisningen bygger på flödesvägar som studerats för alternativet K90%



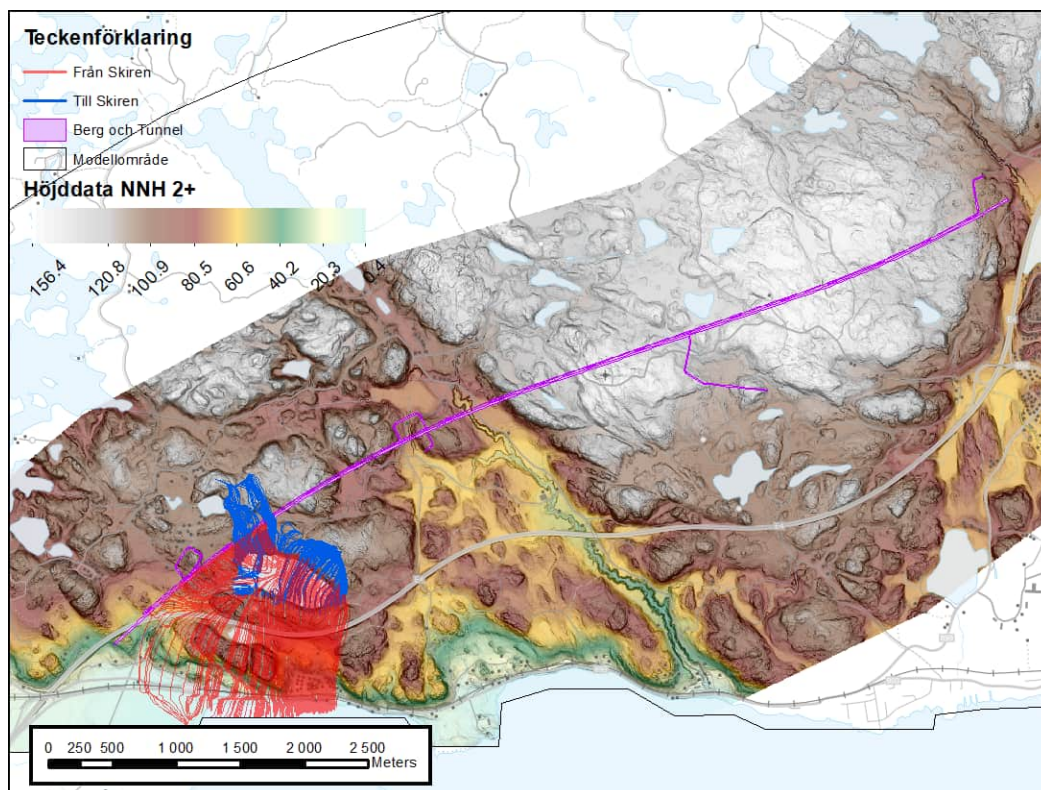
Figur 55. Flödesmönster innan tunneln är byggd i modell med K90% som styrande hydraulisk konduktivitet i berg. Partiklarna placerades utmed tunneln på dess faktiska nivå i modellen. Aktuell figur redovisar flödets väg från dess ursprung till dess slutpunkt (röda linjer representerar varifrån en partikel härrör och gröna linjer var en partikel hamnar om de släpps vid en position på tunnelsträckningen).



Figur 56. Flödesmönster efter tunneln är byggd i modell med K90% som styrande hydraulisk konduktivitet i berg. Partiklarnas läge motsvarar de i föregående figur. Aktuell figur redovisar flödets väg från dess ursprung till dess slutpunkt (röda linjer representerar flödet till bakåt från partiklarnas position. Inga spårvägar framåt i tid redovisas i figuren eftersom samtliga flödesbanor redan befinner sig vid sin slutposition, dvs. tunneln). Exempelvis går det att urskilja att det finns sammanhängande bergpartier norr om tunneln och Getåravinen som saknar partikelbanor, vilket beror på positionen av vattenförande zoner och däremellan tätare berg.



Figur 57. Flödesmönster vid och förbi Skiren innan tunnel är byggd (nuläge). Partiklarna placerades utmed Skirens rand i jordlager och rör sig från inströmningsområde mot Skiren (blå färg) och från Skiren till utströmningsområde (grön färg).



Figur 58. Flödesmönster vid Skiren efter att tunneln är byggd (driftskede). Partiklarna placerades utmed Skirens rand i jordlager och rör sig från inströmningsområde mot Skiren (blå färg) och från Skiren till utströmningsområde (röd färg).

4.9. Diskussion

Kalibreringen av modellen resulterar i beräknade förtroendenivåer för studerade scenarier. Vad som framgår är att avvikelsen mellan simulerade och observerade nivåer i sammanhanget är liten vilket tyder på att modellen är en god representation av rådande förhållanden. Då grundvattennivåer i praktiken varierar så är det dock relevant att påpeka att modellens basnivåer representerar en ögonblicksbild då det hydrogeologiska systemet befinner sig i sitt bedömda medeltillstånd, samt att detta är en av många rimliga modeller som kan sättas upp över området.

Randvillkoren i modellen har tillämpats på ett förenklat sätt där endast större sjöar representeras som positiva ränder. Vid Skiren och Getåbäcken har ett dräneringsrandvillkor ansatts för att ta hand om överskottsvatten som förväntas avrinna naturligt. Dräneringsnivån vid Skiren motsvarar dess medelnivå. Vid Getåbäcken har även ett dräneringsrandvillkor ansatts i undre magasin genom Getåravinen. Dräneringsnivån har anpassats till observationsnivån i närliggande observationspunkter vilket motsvarar cirka 7 meter under markytan. Detta motiveras med att den förmodade svaghetszonen i ravinen står i bättre hydraulisk kontakt med nedströms vattendrag än övrigt berg i området, vilket medför att nivån förväntas inställa sig på en lägre nivå. Övriga vattendrag och mindre sjöar motsvaras av samma generella dräneringsrandvillkor som modellen ansatts för övriga delar av modellen. Randvillkoret (dränering) kan endast avlägsna vatten vid sin respektive tröskelnivå, men inte tillföra vatten. För ändamålet anses denna förenkling ge en relevant representation av förhållandena inom modellområdet. Effekter av tillskott från uppströmsliggande sjöar via vattendrag (över modelldomänens yttre rand) och liknande processer är inte representerat i modellen. Dock, ska påpekas, befinner sig Getåbäckens tillrinningsområde helt inom modelldomänen och bör därmed realistiskt återspegla tillrinningen till densamme.

En effekt av att vissa mindre sjöar har modellerats som randvillkoret *drain* är att påverkansområdet i vissa fall kan breda ut sig över sjön. Det är i praktiken inte realistiskt att vi får en avsänkning av nivån i sjön på det sätt som modellen antyder utan ska snarast ses som att sjöns befintliga avrinning (överskott) reduceras vilket innebär en minskad direkt genomströmning.

Sprick- och krosszoner samt svaghetszoner har generaliserats grovt i modellen. Dessa zoner är introducerade som lodräta strukturer med samma bredd. I verkligheten är det dock mer realistiskt att zonernas stupning (lutning mot horisontalplanet) så väl som bredd varierar. Eftersom kunskapen strukturers geometri är begränsad har förenklingarna varit nödvändiga.

En anledning till den ställvis stora påverkan på trycknivåerna kan också misstänkas bero på en, för områden med isälvsmaterial eller sand i markytan, potentiellt konservativt antagen grundvattenbildning. Högre grundvattenbildning medför ett större inläckage men i högre grad bibehållna nivåer vid ytan.

Resultaten tyder på att bergets naturliga genomsläpplighet och inte minst injekteringens genomsläpplighet har avgörande påverkan på det beräknade påverkansområdet. Det är också tydligt att påverkansutbredning är som störst nära tunnelns nivå och avtar närmare markytan (Figur 53 och Figur 54).

4.10. Slutsats

Trots att de förenklingar som beskrivs i kapitel 4.8 har varit nödvändiga möjliggör en numerisk modell att i högre grad beskriva modellområdets heterogenitet än en analytisk beräkning som ofta förutsätter oändligt utsträckt magasin med plana och jämntjocka geologiska enheter.

Vid jämförelse mellan de olika modellscenarierna framgår, som förväntat, att ett tätare berg leder till mindre utbredning av påverkansområdet så väl som ett lägre inläckage till tunneln. Påverkansområdet i jordlagret är i allmänhet större där ytan domineras av mer genomsläppligare jordar. Vid vertikalt stående sprickzoner fortplantar sig påverkan i samtliga ovanliggande geologiska enheter, inklusive jordlager. Förutsatt att grundvattenbildningen är tillräcklig innebär detta att inläckaget vid sprickzoner ökar.

Beräknade inläckagemängder bedöms erfarenhetsmässigt som realistiska jämfört med andra jämförbara tunnelprojekt i berg.

Då genomförda modellberäkningar har utförts stationärt, dvs. tills jämvikt råder, är det realistiskt att anta att den fulla utbredningen av påverkansområdet är en realistisk uppskattning av hur tunnelns påverkansområde breder ut sig i permanentskedet givet de förutsättningar som råder för modellen. Under den transienta delen av avsänkingsförloppet, innan tunneln står i jämvikt med sin omgivning kan påverkansområdet förväntas vara mindre i utbredning, samtidigt som inläckaget under samma tidsperiod är större.

5. Grundvattenmodell Bådstorp

5.1. Inledning och syfte

Trafikverket har genomfört översiktlig grundvattenmodellering av Ostlänkens sträcka genom Bådstorp. Inom delsträckan planeras Ostlänken förläggas genom schaktarbeten och skärning genom en avgränsad men markerad moränrygg.

Syftet med grundvattenmodellen är flerfaldigt och omfattar bland annat:

- att teoretiskt försöka belysa identifierade grundvattenrelaterade problem,
- att erhålla ökad förståelse för den hydrogeologiska situationen i det aktuella delområdet och utgöra ett stöd för hydrogeologiska frågeställningar,
- belysa antaganden och prognoser kring hydrogeologiska problemställningar, fram för allt genomförande av planerad grundvattenavsänkning i driftskedet baserat på ett antal olika scenarios avseende utförande (tråg vs. skärning med slänter) och
- att ge underlag för tillståndsansökan om vattenverksamhet enl. kap. 11 MB.

Upprättad modell är översiktlig och baseras på en konceptuell uppfattning av rådande hydrogeologiska förhållanden avseende bl.a. magasinutbredning, hydrauliska ränder och hydrogeologiska parametrar.

Modelleringen avser att verifiera och visualisera utförande och bedömningar av planerad avsänkning av grundvattennivåer i området i driftskedet för de olika varianterna av utförande som presenterats inom projektet.

5.1.1. Förutsättningar, underlag och styrande dokument

I projektet används koordinatsystem Sweref 99 1630 och höjdsystem RH 2000.

Modellens utformning baseras på bl.a. tillgänglig information via projektet så som MUR Geoteknik, MUR Hydrogeologi, tidigare genomförda projekt inom området samt data från Sveriges Geologiska Undersökning (SGU), såsom jordartsgeologiska kartan, berggrundsgeologiska kartan och jorrdjupskartan.

5.1.2. Översiktlig projektbeskrivning

Grundvattenmodellen är uppbyggd över Ostlänkens sträckning vid Bådstorp i Norrköpings kommun. Ostlänken planeras förläggas genom området i en djup jordskärning som i sitt färdiga skede når som djupast knappt 20 från nuvarande högsta markyta till anläggningens bottennivå.

5.1.3. Avgränsningar

Modellen kan inte och avser inte att exakt spegla verkliga förhållanden avseende geologi, hydrogeologi och grundvattenbildningsförhållanden. Undersökta förhållanden i och i närheten av planerade undermarksarbeten har försökt översiktligt efterliknas i modellen. I övriga delar av modellområdet har jordlagerföljder upprättats schematiskt och baserat på erfarenhet, rådande marknivåer, av SGU tolkade jordlager i markytan samt information inhämtat från jorrdjupskartan (SGU).

5.1.4. Läsanvisning

Detta kapitel beskriver upprättandet av en översiktlig grundvattenmodell som framtagits i syfte att verifiera, utvärdera och visualisera den krävda grundvattenavsänkningen i samband med den aktuella sträckningens driftskede.

Kapitlet redovisar först kända och antagna förutsättningar med avseende på hydrogeologi och geologi inom området (avsnitt 5.2 och 5.3).

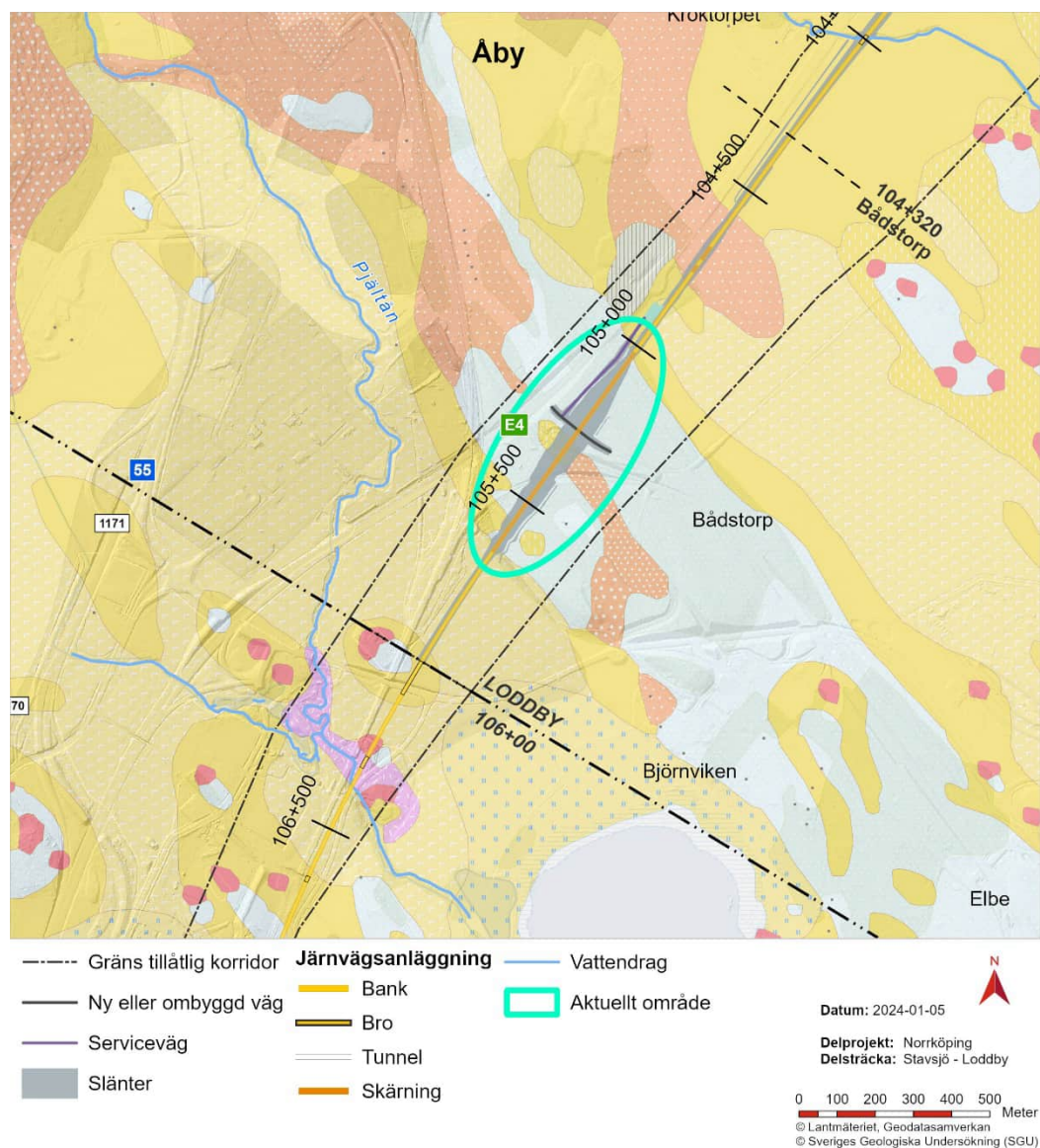
I avsnitt 5.4 och 5.5 redovisas modellens översiktliga uppbyggnad tillsammans med ansatta hydrauliska ränder samt kända och nyttjade hydrogeologiska parametrar, tillsammans med översiktliga beskrivningar av planerade arbeten som förväntas beröra och beröras av rådande grundvattensituation.

Avsnitt 5.6 omfattar de modelleringsresultat som valda scenarios och simuleringar lett fram till, tillsammans med kortfattade kommentarer kring resultaten.

Avsnitt 5.7 omfattar en kortfattad diskussion kring uppbyggnaden av modellen, resultat samt osäkerheter i resultaten och tolkningarna.

5.2. Geologiska förutsättningar

Den aktuella moränryggen som går i nordvästlig - sydöstlig riktning är på båda sidor omgiven av låglänt slättlandskap bestående av lera överlagrat morän som i sin tur överlagrar urberget, se Figur 59.

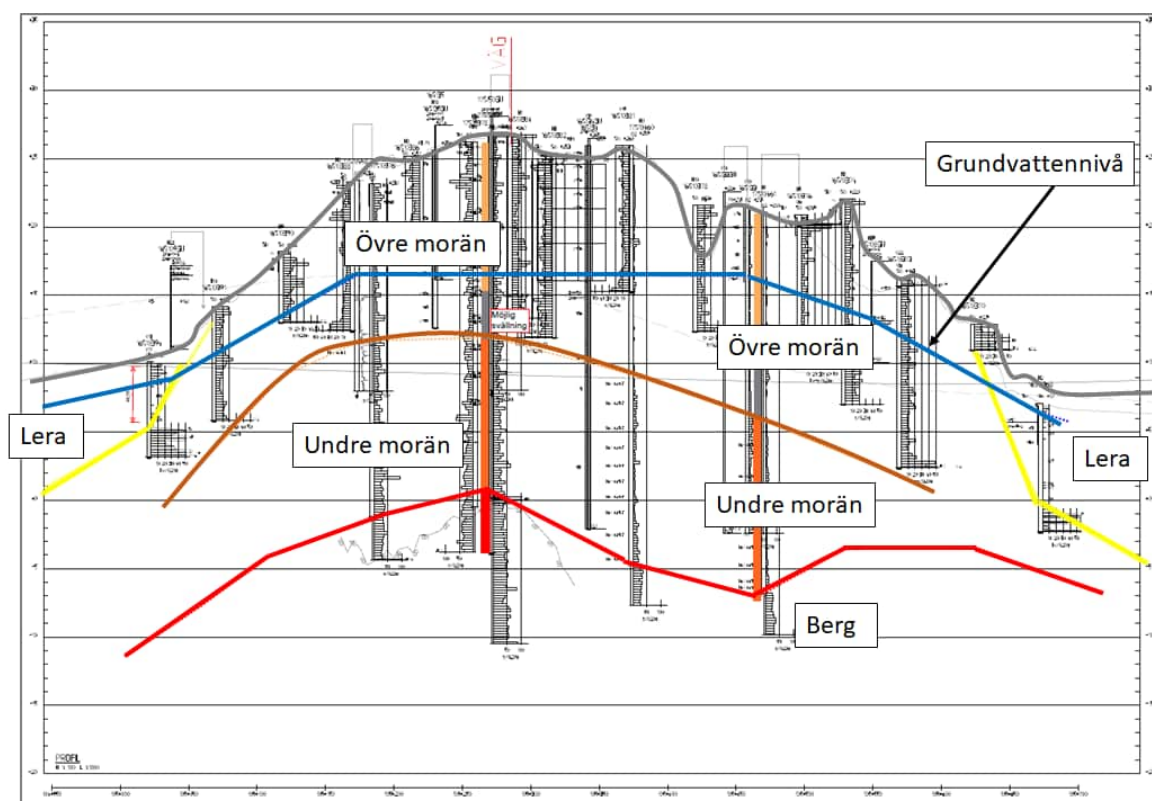


Figur 59. Jordartsgeologisk karta, Ostlänkens centrumlinje och det aktuella området markerat med turkos ellips.

Moränryggen har i genomförda undersökningar visat sig vara heterogen i två lager. Den undre delen bedöms som tätare och med högre andel grovkorn i sin sammansättning. Den övre moränen har en högre andel silt och är inte lika hårt packad. Jorddjupet i området kring planerad anläggning varierar som mest mellan 25 och 30 meter enligt sonderingar, och bergets överyta återfinns på nivåer som varierar mellan -10 och ± 0 meter. Djup till berg minskar vinkelrätt mot moränryggens formation.

Moränryggens högsta punkt i området för planerad skärning når cirka +26 meter. Omgivande låglänta slätter ligger nordost och sydväst om moränryggen med marktytor på mellan +6,5 respektive +9 meter. Marktytans nivåer, bergöveryta och tolkade

jordlagerföljder längs den planerade skärningen redovisas översiktligt nedan i Figur 60 tillsammans med bedömd grundvattennivå genom formationen.



Figur 60. Profil Bådstorp med tolkade jordlagerföljder, djup och grundvattennivå.

5.3. Hydrogeologiska förutsättningar

Grundvattenytan ligger generellt cirka 10 meter under markytan centralt i höjdryggen och närmar sig markytan i de kringliggande låglänta områdena. Där markytan övergår från morän till lera återfinns grundvattennivån mycket marknära.

Grundvattennivåernas årsvisa fluktuation i moränryggen når knappt 1,5 meter och strömningsriktningen i formationen går generellt från nordväst mot sydost, samt vinkelrätt ut från formationens höjdrygg, då denna fungerar som en grundvattendelare. Grundvattnet strömmar slutligen ut i Lindöfjärden längs med strandkanten i Björnviken, i formationens sydöstra ände.

Grundvattenbildning till åsformationens sker främst i områden med friktionsjord i dagen.

5.4. Kända parametrar och antaganden

5.4.1. Jordlagerföljder

Projektets undersökningsområde utgör enbart en liten del av det totala modellområdet, varför antaganden avseende jordlagerföljder och jorddjup utanför projektområdet har behövt göras.

Jordlagerföljder i kända punkter och längs kända och tolkade profiler har i upprättad modell försökt efterliknas i största möjliga mån. Undersökningar har varit koncentrerade nära spårinjen. Inom områden där lokala data saknas har antaganden baserat på erfarenheter och SGUs jordart- samt jorddjupskarta legat till grund för ansatta jordlagerföljder och jorddjup i modellen. Tolkade jordlager i markytan har till stor del baserats på underlag från jordartsgeologiska kartan (SGU) som stämmer väl överens med utförda undersökningar centralt i modellen, men generaliserats grovt, speciellt i modellens randområden. I modellen har lera, grus och sand, morän samt berg införlivats, se vidare under avsnitt 5.5.

5.4.2. Hydrauliska konduktiviteter

Uppmätta och beräknade hydrauliska konduktiviteter från utförda hydraultester, genomförd provpumpning och siktprover har använts för att representera friktionsjorden i moränryggen. Moränen har i modellen betraktats som en homogen friktionsjord, d.v.s. den uppdelning i övre och undre morän som redovisas från geotekniska undersökningar har valts att bortse från. De undersökningar som bedöms som mest tillförlitliga för den övre delen av moränen (i vilken merparten av anläggningen planeras utföras) redovisar en ungefärlig högsta hydrauliska konduktivitet om $1 \cdot 10^{-7}$ m/s för moränen.

Övriga hydrauliska konduktiviteter i jord- och berglager i modellen har ansatts baserat på erfarenheter och referenslitteratur. Samtliga ansatta hydrauliska konduktiviteter redovisas i Tabell 26.

Tabell 31. Ansatta hydrauliska konduktiviteter i modellens jord- och berglager.

Jordlager	K _x	K _y	K _z
Lera	$1 \cdot 10^{-8}$ m/s	$1 \cdot 10^{-8}$ m/s	$1 \cdot 10^{-8}$ m/s
Sand och grus	$1 \cdot 10^{-5}$ m/s	$1 \cdot 10^{-5}$ m/s	$1 \cdot 10^{-5}$ m/s
Morän	$1 \cdot 10^{-6}$ m/s	$1 \cdot 10^{-6}$ m/s	$1 \cdot 10^{-6}$ m/s
Berg	$1 \cdot 10^{-8}$ m/s	$1 \cdot 10^{-8}$ m/s	$1 \cdot 10^{-8}$ m/s

5.4.3. Grundvattenbildning

Grundvattenbildning har ansatts till 100 mm/år över områden med friktionsjord i dagen (grus och sand samt morän). I övriga delar av modellen (med lera och berg i dagen) har grundvattenbildningen konservativt ansatts till 0 mm/år. Grundvattenbildningen till moränryggen bedöms ske dels lokalt via nederbörd, men även via uppströms förekommande mer genomsläppliga jordar (sand och grus i nordväst). Grundvattenbildningen till själva moränen bedöms som relativt låg, bl.a. baserat på

resultat från jordprovtagning och propvpumpning, d.v.s. själva moränen bedöms i sig vara relativt tät. Grundvattenbildningen om 100 mm/år är itererad fram i kalibreringen av basmodellen, och gav de mest rättvisa resultaten m.a.p. grundvattennivåer i moränryggen och ansatt hydraulisk konduktivitet.

5.4.4. Grundvattennivåer

Grundvattennivådata från observationsrör inom moränryggen och de lägre liggande områdena nordost och sydväst om denna har legat till grund för den upprättade basmodellen. Översiktligt tolkade grundvattennivåer i moränryggen redovisas i profilen i Figur 60 ovan.

5.4.5. Planerade undermarksarbeten

Den dränerande anläggningen är cirka 600 meter lång och når i driftskedet som djupast knappt 20 meter, från nuvarande högsta markyta till skärningens bottenivå. Anläggningen sträcker sig från cirka km 105+030 till km 105+650.

För att på enklast sätt kunna införliva önskade schaktbotten- och dräneringsnivåer i modellen har tråg och skärningar delats upp i tio sektioner med en ansatt medeldräneringsnivå. Skärningen kommer utföras som en helt dränerad lösning där vatten avleds söderut. I Tabell 32 samt Figur 61 redovisas modellerade sektioner.

Tabell 32. Modellerade planschakter med önskade dräneringsnivåer.

Sektion	Drännivå
1	+ 7,9 m
2	+ 7,9 m
3	+ 7,9 m
4	+ 7,6 m
5	+ 6,6 m
6	+ 6,3 m
7	+ 6,1 m
8	+ 5,9 m
9	+ 5,9 m
10	+ 5,9 m



Figur 61. Modellerad schaktubrednad, med sektioner och dräneringsnivåer.

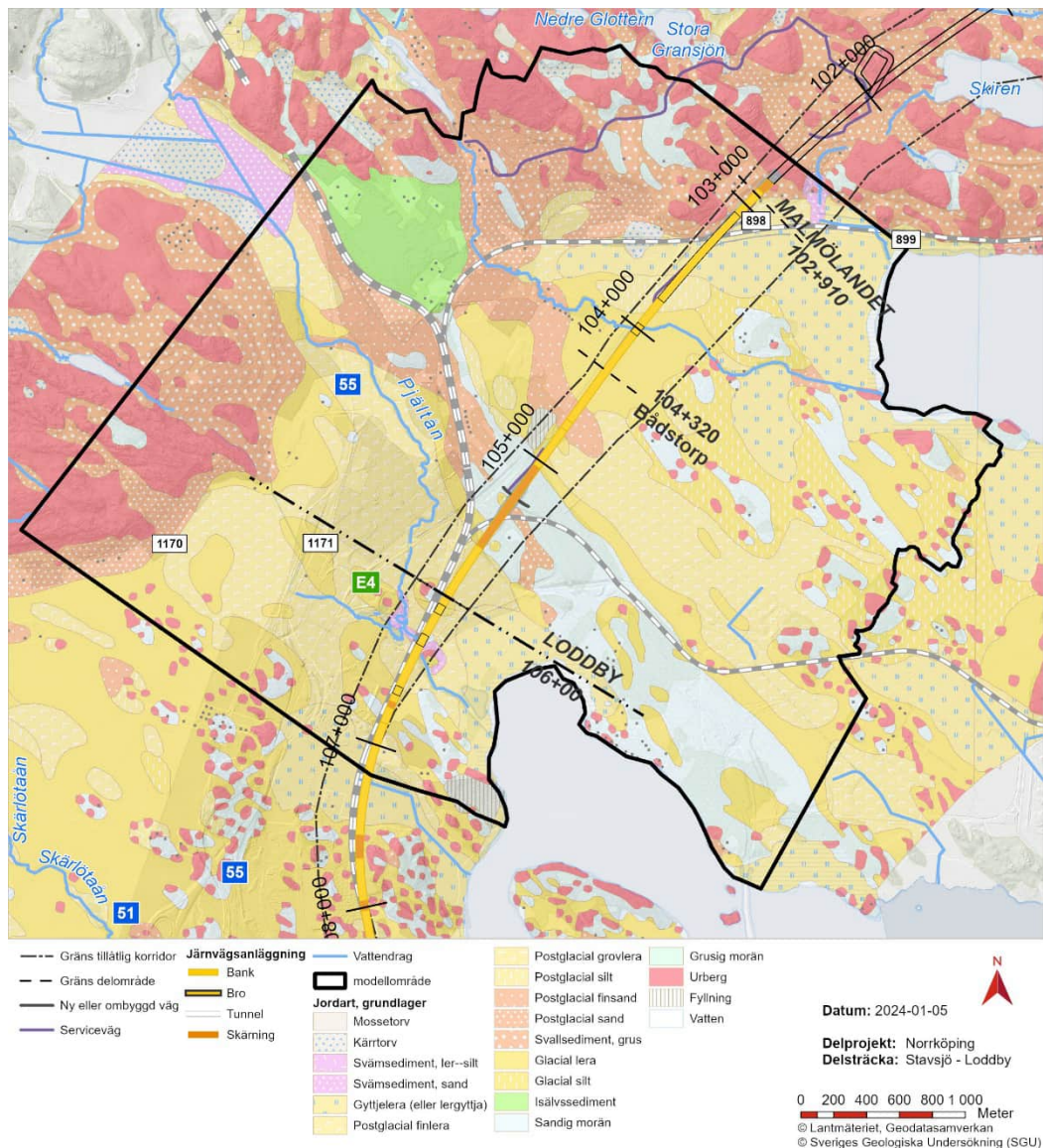
5.5. Beräkningsmodell

5.5.1. Programvara

Grundvattenmodellen har byggts upp och simulerats i beräkningsprogrammet Visual MODFLOW Flex, Version 6.1 (Schlumberger Water Services). Programmet löser numeriskt flödesekvationen för porösa medier i tre dimensioner med hjälp av finita differensmetoden.

5.5.2. Modellområde och hydrauliska ränder

Modellområdet har begränsats till höga berglägen (bedömda fasta vattendelare) i väst och norr samt i Östersjöns ytvatten i öst och sydöst. Modellområdet redovisas i Figur 62.

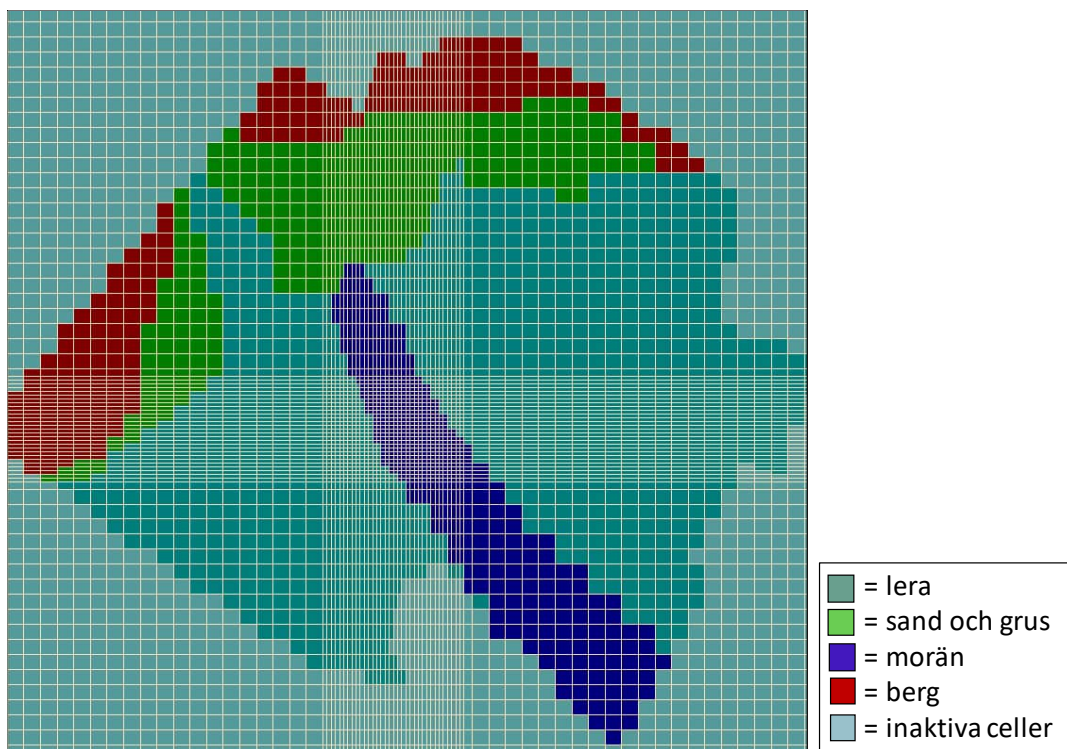


Figur 62. Jordartsgeologisk karta tillsammans med modellområdet.

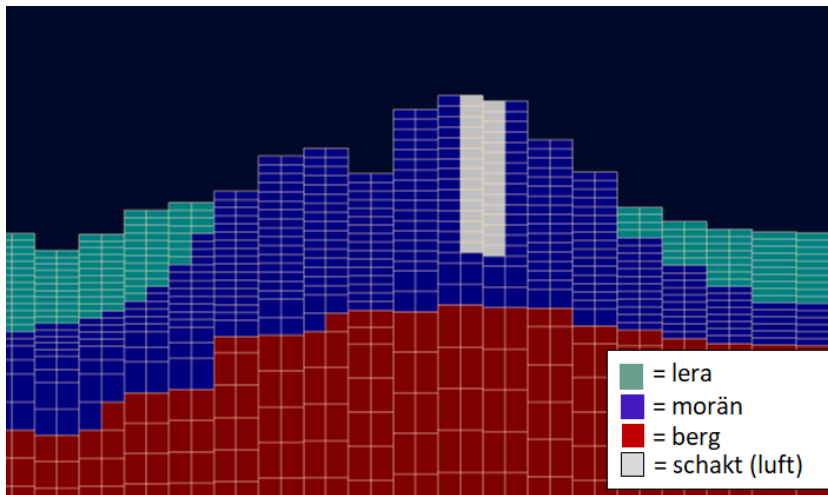
5.5.3. Modellens uppbyggnad

- Den hydrauliska beräkningsmodellen är uppbyggd av ett system av rätvinkliga celler i form av kuber. Cellerna är ordnade i rader, kolumner och lager. Cellerna kan ha olika storlek och form relativt varandra och varje cell tilldelas värden på hydrogeologiska parametrar för att efterlikna verkligheten.
- Den uppförda grundvattenmodellen representerar ett område motsvarande knappt 18 km².

- Cellerna i modellen är mindre i området med den planerade skärningen och ökande i storlek mot ytterkanterna. Detta har gjorts för att behålla en numerisk stabilitet i beräkningarna samtidigt som noggrannheten och upplösningen i påverkansområdet kring schakterna behöver vara tillräckligt god.
- Figur 63 visar en översiktlig bild av modellens översta lager med modellerade (schematiskt ansatta) jord- och berglager.
- I vertikalled har modellen byggts upp av fyra lager (lera, grus och sand, morän samt berg) med olika ansatta hydrauliska egenskaper, se Tabell 31 ovan. Jordlagerföljder och mäktigheter har införts genom handpåläggning, rad för rad, kolumn för kolumn för bästa möjliga representation av verkliga förhållanden. Modellens jordlager har förenklats genom att endast representeras av ett homogent moränlager istället för två, se Figur 64.



Figur 63. Modellens överyta med inkorporerade jord- och berglager.

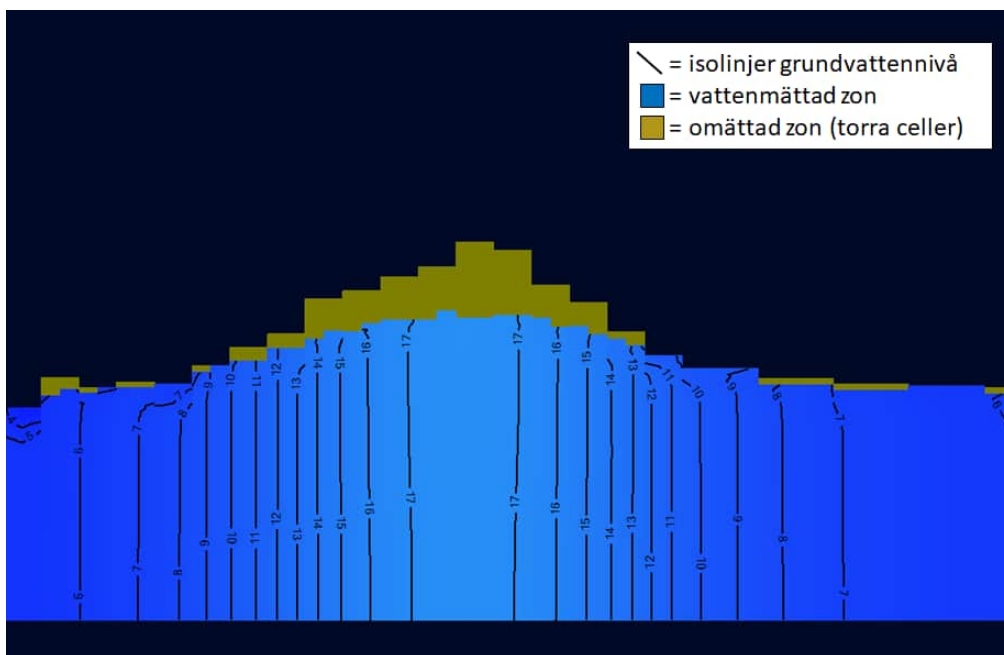


Figur 64. Ett utsnitt/profil av modellen genom Bådstorp.

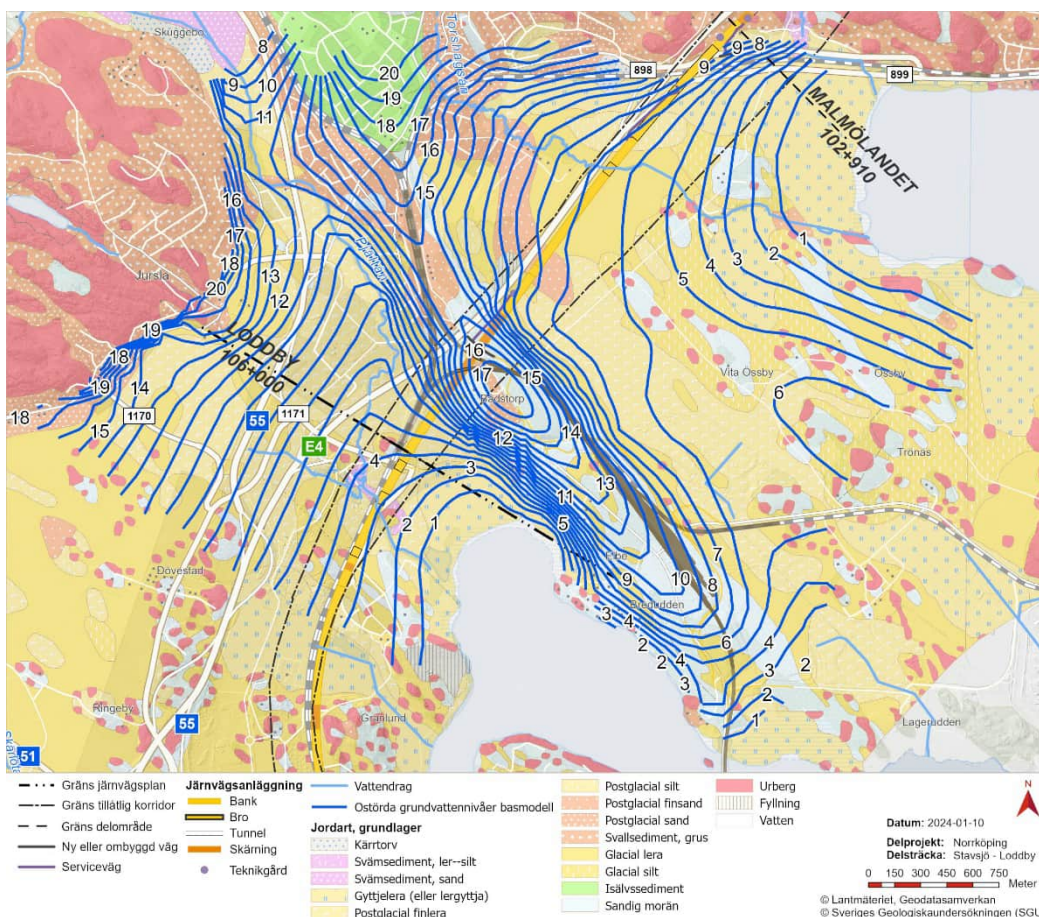
- Modellens överyta representeras av högupplöst höjddata från Lantmäteriet.
- Modellens underyta består i hela modellområdet av berg och sträcker sig ner till nivå -30 m.
- Ränderna i anslutning till Östersjön har ansatts till medelnivå +0,1 (SMHI Stations-ID 35101, uppmätt medelytvattennivå mellan år 2018 och 2020).
- Dränfunktion ligger över hela modellen (på nivå 0,5 meter under markyta) för att bli av med överskottsvatten.

5.5.4. Kalibrering

Basmodellen har mycket översiktligt kalibrerats för att uppnå rådande grundvattenförhållanden inom det aktuella området i moränryggen. En profilbild från området med modellerade ostörda grundvattennivåer redovisas i Figur 65 nedan och en plankarta med modellerade ostörda grundvattennivåer i basmodellen redovisas i Figur 66.



Figur 65. Ostörda grundvattennivåer (modellerad "head") genom aktuell del av moränryggen i upprättad basmodell.



Figur 66. Ostörda grundvattennivåer (modellerad "head") i basmodellen innan byggnationen.

Kalibreringen av basmodellen har utförts genom försök att variera moränens hydrauliska konduktivitet samt försök att öka grundvattenbildningen med 25 % över

friktingsjordarna. Dessa båda försök bedömdes resultera i alltför felaktiga grundvattennivåer genom moränryggen (jämfört med tolkade nivåer presenterade i Figur 60 ovan).

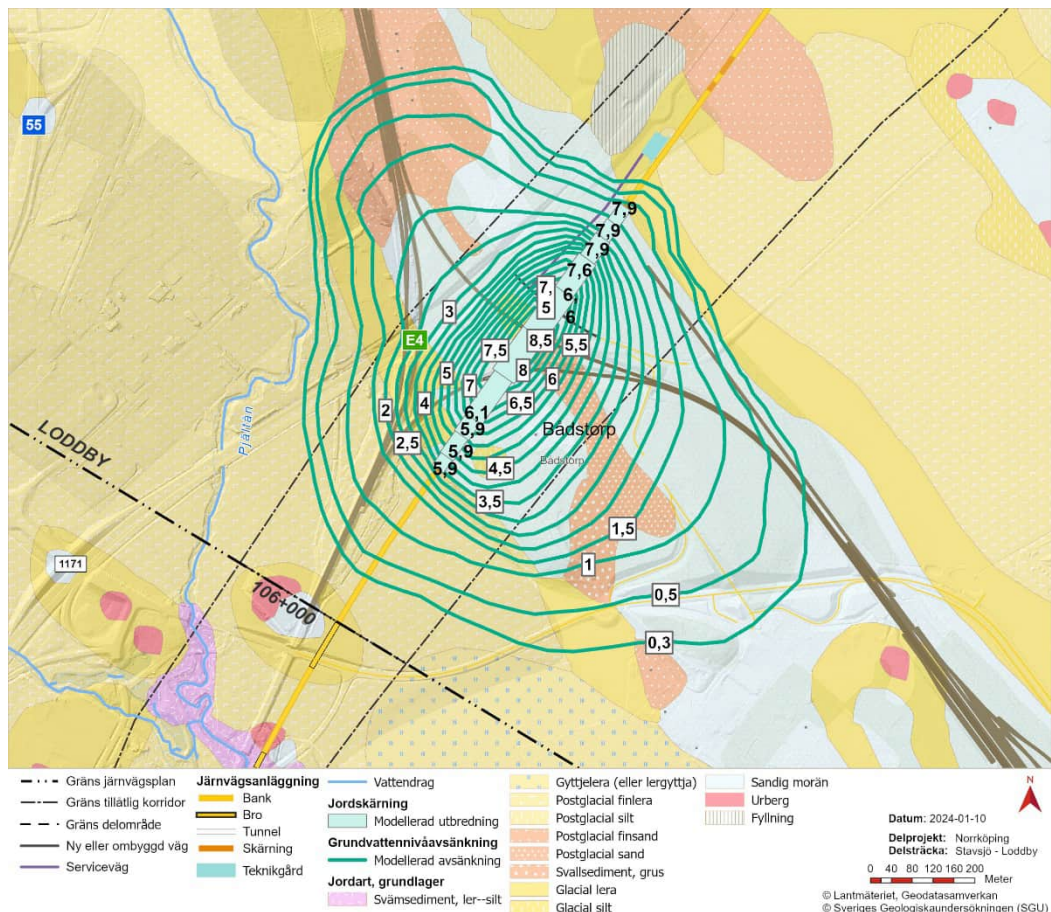
5.5.5. Simulering

Simuleringar har utförts genom att en s.k. "drain" läggs in på önskad drännivå i respektive sektionens botten. Detta åstadkoms genom att ansätta en konstant trycknivå i respektive sektion motsvarande den önskade nivån på grundvattenavsänkningen (drännivå). I modellen beräknas flödet därmed som ett passivt inläckage över hela ytan. Simuleringen har genomförts under stationära förhållanden, d.v.s. ett fortvarighetstillstånd eller drift under mycket lång tid.

5.6. Resultat

I avsnittet redovisas resultatet med koppling till syftet att ge underlag för tillståndsansökan för vattenverksamhet. Resultatet avser således beräknad utbredning av grundvattensänkningar – påverkansområdet, samt hur stora grundvattensänkningar blir, för att bedöma effekter på riskexponerade objekt.

Figur 67 visar avsänkningen kring planerad skärning som isolinjer. Linjerna motsvarar en skillnad mot basmodellen (Figur 66). Av resultatet går att utläsa ett avsänkingsområde med störst utsträckning längs med moränryggens riktning och avtagande mot åkermarken som omgärdar moränryggen.



Figur 67. Resultat grundvattenavsänkning. Redovisade isolinjer avser grundvattenavsänkning i meter relativt modellerade ostörda nivåer (vita skyltar). Svarta siffror längs skärningen avser behövd avsänkningsnivå.

5.7. Diskussion

Modellresultaten och de slutsatser som kan dras från dessa baseras på ett antal antaganden. Resultaten från simuleringar är starkt beroende av ansatta hydrauliska parametrar, först och främst hydraulisk konduktivitet, men även ansatta grundvattenbildningsförhållanden spelar stor roll.

- Resultaten är känsliga för variation och storlek av K, framför allt för moränen.
- Ingen regelrätt känslighetsanalys har genomförts utöver den som gjordes i kalibreringsarbetet med basmodellen. Ändringar av hydraulisk konduktivitet och grundvattenbildning i basmodellen genererar icke önskvärda ostörda grundvattennivåer i moränryggen.
- Generellt sträcker sig påverkan en bit längre ut i leran sydväst om moränryggen jämfört med åt nordost. Detta beror på ett antal olika förutsättningar men framför allt modellerade ostörda grundvattennivåer i förhållande till önskade dräneringsnivåer.

6. Referenser

Gustafson, G. (u.d.).

Gustafson, G. (2009). *Hydrogeologi för bergbyggare*. Formas.

Havs- och Vattenmyndigheten. (2019). *Havs- och vattenmyndighetens författningssamling - Havs och vattenmyndighetens föreskrifter om klassificering och miljö kvalitetsnormer avseende ytvatten*. Havs- och Vattenmyndigheten.

Litoral Natur AB. (2018). *Biotopkartering av vattendrag - Ostlänken delprojekt Norrköping*. Norrköping: Litoral Natur AB.

Länsstyrelsen Östergötland. (2019). *Vattenarkivet*. Hämtat från <https://ext-geoportal.lansstyrelsen.se/simple/?appid=3268b15a99a34a1bbc4182ae661bae87>

SMHI. (den 2 April 2019). *Ladda ner data från Svenskt Vattenarkiv*. Hämtat från <https://www.smhi.se/data/hydrologi/sjoar-och-vattendrag/ladda-ner-data-fran-svenskt-vattenarkiv-1.20127>

Sweco. (2016). *Rapport Naturvärdesinventering utförd 2015*.

Sweco. (2018). *Referensprovtagning OLP2 Stavsjö-Bäckeby*.

Trafikverket. (den 30 Juni 2020). *Dataproduktspecifikationer, väg- och vägtrafikdata*. Hämtat från <https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/vag/data-om-anlaggningen-vag/dataproduktspecifikationer-vag--och-vagtrafikdata/>

Trafikverket. (2021). *Ingenjörsgelogisk prognos*.

USGS. (den 07 07 2022). *USGS*. Hämtat från MODFLOW 6: USGS Modular Hydrologic Model: <https://www.usgs.gov/software/modflow-6-usgs-modular-hydrologic-model>

VISS. (den 01 Januari 2020). *Vatteninformationssystem Sverige*. Hämtat från <https://viss.lansstyrelsen.se/>

Winston, R. (2022). *ModelMuse version 5.0: U.S. Geological Survey Software Release*. Reston, VA: USGS.



TRAFIKVERKET

Trafikverket, 172 90 Sundbyberg. Besöksadress: Solna Strandväg 98.
Telefon: 0771-921 921, Texttelefon: 010-123 50 00

www.trafikverket.se