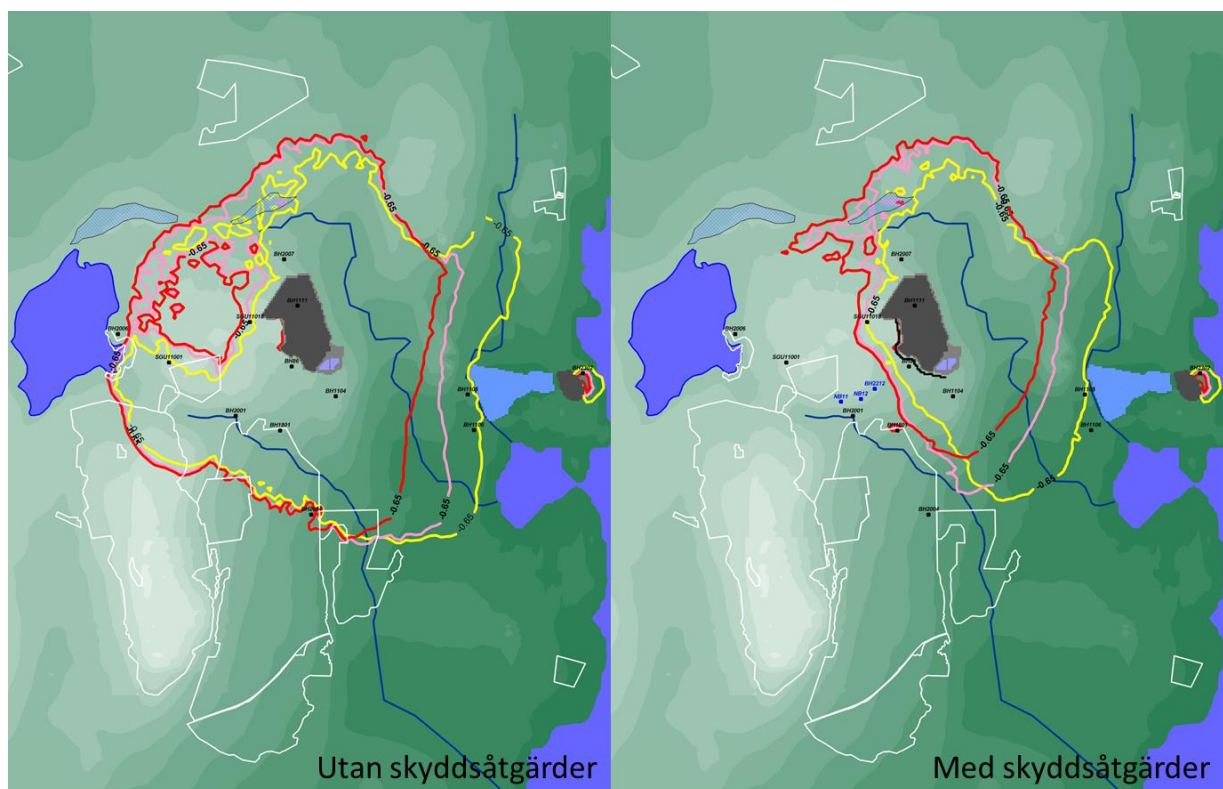




HYDROGEOLOGISK UTREDNING

*Heidelberg Materials ansökan om tillstånd till
täktverksamhet i Slite 2023*



2023-12-12

HYDROGEOLOGISK UTREDNING

Heidelberg Materials ansökan om tillstånd till täktverksamhet i Slite

Uppdragsnamn	1650142 SE-Slite Fältundersökningar
Uppdragsnummer	10330449
Författare	Jakob Eng, Johan Holmen, Johan Burman, Ida Kling Jonasson, Patrik Lissel, Robert Muller, Gustav Tennby
Datum	2023-12-12
Ändringsdatum	
Granskad av	Anna Vickman
Godkänd av	Jakob Eng

KUND

Heidelberg Materials Cement Sverige AB

KONSULT

WSP

Box 13033
402 51 Göteborg
Besök: Fabrikstorget 1
Tel: +46 10-722 50 00

Org nr: 556057-4880

wsp.com

Sammanfattning

Inför denna och tidigare tillståndsansökningar har de hydrogeologiska förhållandena i området runt File hajdar-täkten undersökts med de flesta av ämnesområdets undersökningsmetoder, med en omfattning som innebär att platsen kan anses vara en av Sveriges hydrogeologiskt mest undersökta platser. Området karaktäriseras av mörkelsten och kalksten med långa kontinuerliga vattenförande i princip horisontella lager. Det är alltså flera lager som leder grundvatten väl men stenen är mycket tätare i vertikalled. I eller på den lagrade kalkstenen finns revformationer vilka saknar de kontinuerliga vattenförande lagren. Geologin och topografin skapar extrema grundvattenfluktuationer som i många punkter uppgår till över 30 m årligen.

30 års kalkstenbrytning för att täcka en stor del av den svenska cementförsörjningen innebär ofrånkomligen ett stort hål. Därmed kommer inläckaget av grundvatten att öka till tåkten och en påverkan uppstå på omgivande grundvattensystem. För att minska påverkan planeras en rad åtgärder. Västra Brottet kommer tömmas på infrastruktur och tunnarna mot Östra brottet tätas. Därefter kommer Västra brottet att vattenfyllas för att istället bilda en sjö. Därmed kommer grundvattennivåerna stiga inom ett stort område kring Västra brottet. Runt File hajdar-täkten planeras skyddsåtgärder i form av ridåinjektering och infiltration av vatten i bergborrade brunnar under vegetationsperioden.

Ansökans successiva grundvattenpåverkan begränsas med skyddsåtgärder på ett sätt som innebär att påverkan kraftigt reduceras i västlig och sydlig riktning vilket bl.a. åskådliggörs på omslaget av denna rapport.

Dyhagens vattentäkt är belägen mellan File hajdar-täkten och Västra brottet. Totalt årligt uttag ur produktionsbrunnarna är nu 220 000 m³/år. För att undvika lägre lägsta grundvattennivåer än i dagsläget kommer produktionen att behöva sänkas något under sommarmånaderna. Med föreslagna skyddsåtgärder beräknas produktionsbortfallet uppgå till ca 8 000 m³/år. Efter att brytningen upphör och tåkten vattenfylls ökar uttagsmöjligheterna i produktionsbrunnarna högst avsevärt. Regionens vattenförsörjning kommer att kompenseras genom att en del av det inläckande vattnet till File hajdartaekten tillhandahålls för dricksvattenändamål och Heidelberg Materials bekostar ett nytt reningsverk

Den utökade tåkten medför att länshållningen ökar under de första 8 åren. Om man bara betraktar grundvattenbortledning är dock påverkan på grundvattenförekomsten Mellersta Gotland – Roma relativt oförändrad. Den ökade inströmningen balanseras av infiltration och inflöde från intilliggande vattenförekomster. Från det att länshållningen av Västra brottet upphör år 8 blir det istället en förbättring av vattenbalansen för grundvattenförekomsten Mellersta Gotland – Roma. All påverkan utgör i storleksordningen promille av vattenförekomsternas totala vattenbalans.

Utan skyddsåtgärder uppkommer en liten påverkan på Natura 2000-områdena söder om Filehajdar. Med avseende på det avrinningsområde som inkluderar Natura 2000-områdena söder om File hajdar-täkten, uppgår förlusten av berggrundvatten till ca 135 000 m³/år varav ca 40 000 m³/år under växtperioden. Våtmarksområdena huvudsakliga vattenförsörjning är dock nederbörd och ytvatten, så med avseende på det avrinningsområde som inkluderar Natura 2000-områdena söder om File hajdar-täkten, blir förlusterna av berggrundvatten på grund av utökningen av File hajdar-täkten knappt 3% utan skyddsåtgärder och endast 0,2% med skyddsåtgärder, av nettonederbörden för detta avrinningsområde.

Med skyddsåtgärderna infiltration i berg och ridåinjektering kompenseras hela förlusten av grundvatten inom Natura 2000-områdena under växtperioden med att den förlorade vattenvolymen tillförs berget med en fördelning som innebär att det naturliga årsmönstret och variationen bibehålls. Inget Natura 2000-område kommer därmed påverkas med minskade vattenflöden eller påtagligt sänkta grundvattennivåer.

En eventuell påverkan på Tingstäde träsk kommer att vara helt försumbar.

INNEHÅLL

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Historisk och pågående verksamhet	1
1.3	Planerad verksamhet	2
1.4	Bedömningsmetod	4
1.4.1	Klimatförändringar på norra Gotland	5
2	Övergripande orientering i områdets hydrogeologi	7
2.1	Avrinningsområden	7
2.2	Berggrund	8
2.3	Jordlager	9
3	Omgivning	10
3.1	Natura 2000	10
3.2	Vattenförsörjning	11
3.2.1	Dyhagen	11
3.2.2	Tingstäde träsk	12
3.2.3	Enskild vattenförsörjning	12
3.3	Grundvattenförekomster	13
3.4	Ytvattenförekomster	15
3.5	Deponier	15
4	Fältundersökningar – resultat och analys	16
4.1	Inledning	16
4.2	Utförda undersökningar	17
4.3	Sammanfattning av tidiga undersökningar	19
4.4	Grundvattennivåer	20
4.5	Undersökningar för att förfina den konceptuella modellen	20
4.5.1	Geofysiska undersökningar	21
4.5.2	Kartläggning av geologiska lineament	25
4.5.3	Spinner-flödesloggning	26
4.5.4	Hydrauliska tester i ytligt berg	26
4.5.5	Hydrauliska tester i djupt berg	28
4.5.6	Övriga observationer	30
4.6	Undersökningar av karst	31
4.7	Undersökningar för Natura 2000-områdena	32
4.7.1	Undersökningar för Grodvät	34
4.7.2	Ringinfiltrometer	37
4.7.3	Vattentemperaturer - kartläggning med drönare	37

4.8	Vattenkemiprovtagning	40
4.8.1	Isotopanalyser	41
4.8.2	Kemisk karaktäristik	43
4.8.3	Provtagning av klorid i den kommunala vattentäkten och kloridhalter i täkterna	48
4.9	Undersökningar inför skyddsåtgärder	49
4.9.1	Ridåinjektering – teknisk genomförbarhet och injekteringens tätande effekt	49
4.9.2	Provpumpningar	53
4.9.3	Infiltrationsförsök	54
4.10	Spårämnesförsök	57
4.10.1	Simulering av spårämnestesten i BH2212 i grundvattenmodellen	62
4.10.2	Simulering av spårämnestesten i SGU2017 i grundvattenmodellen	66
4.11	Inflöde av vatten till täkterna	67
4.12	Undersökningar för Tingstäde träsk	70
4.13	Hydrogeologiska risker vid vattenfyllnad av Västra och östra brottet	72
5	Konceptuell hydrogeologisk modell	73
5.1	Berggrund	73
5.1.1	Bergarter	73
5.1.2	Strukturgeologi	77
5.2	Jordlager	80
5.3	Tingstäde träsk	81
5.4	Grundvatten	82
5.4.1	Grundvattenbildning	83
5.4.2	Jordvatten och berggrundvatten	84
5.4.3	Grundvattennivåer och fluktuationsmönster	85
5.4.4	Analys av historisk påverkan	91
5.4.5	Salt grundvatten	96
6	Numerisk modell	98
6.1.1	Syfte och metod	98
6.2	Modellens uppbyggnad	98
6.2.1	Modellens storlek	99
6.2.2	Numeriskt beräkningsnät	100
6.2.3	Randvillkor - hydrauliska gränser	101
6.2.4	Vertikal indelning i geologiska och numeriska lager	102
6.2.5	Övergångszoner	104
6.2.6	Definition av de kommunala produktionsbrunnarna i den upprättade modellen	105
6.2.7	Krosszonen öster om File hajdar	105
6.2.8	Berggrundvattennivå och representativ grundvattennivå i berg och brunnar	105
6.2.9	Genomsläpplighet (K-värden) etc.	105

6.3	Nettonederbörd	108
6.4	Kalibrering	112
6.4.1	Sensitivitetsanalys	113
6.4.2	Kalibrerade grundvattennivåer	113
6.5	Gränsvärde för påverkansområde	114
6.6	Beräkning av salthalter	116
6.6.1	Saltvattenmodellen 2023	116
6.6.2	Gränsvärden	116
6.6.3	Kalibrering,	116
6.6.4	Visualisering och diskussion av salthalter för referenssituationen	116
7	Skyddsåtgärder	119
7.1	Ridåinjektering	120
7.1.1	Injekteringssträcka	120
7.2	Infiltration	121
7.2.1	Infiltrationsområde	121
7.2.2	Infiltrationsvolym	123
7.2.3	Kvalité på infiltrerat vatten	124
7.3	Modellering av skyddsåtgärder	125
7.3.1	Flödesvägar från infiltrationsbrunnar	128
7.3.2	Vattenmagasinen i File hajdar-täkten	132
8	Påverkan på omgivningen	133
8.1	Vatteninflöde till täkterna	134
8.1.1	Vatteninflöde till File hajdar-täkten	134
8.1.2	Vatteninflöde till Västra och Östra brottet	135
8.2	Grundvattennivåer och påverkansområden	136
8.2.1	Indirekt påverkansområde	136
8.2.2	Successiv utveckling av de indirekta påverkansområdena	147
8.2.3	Indirekt påverkansområde för grävda brunnar	155
8.2.4	Grundvattenförhållandenas utveckling i nollalternativet	155
8.2.5	Tillströmningsområde	161
8.3	Beräknad vattennivå för framtida täktsjöar	162
8.3.1	Täktsjön i Västra brottet	162
8.3.2	Täktsjön i File hajdar-täkten	163
8.3.3	Utvecklingen i nollalternativet	165
8.4	Geotekniska och hydrogeologiska risker av vattenfyllda brott	166
8.4.1	Geotekniska risker	166
8.4.2	Hydrogeologiska risker	166
8.5	Ytvatten	167
8.5.1	Grundvattenflöden i berget i lokala avrinningsområden	167
8.5.2	Flöde i Anerån	171
8.5.3	Tingstäde träsk	172

8.6	Dricksvatten	179
8.6.1	Dyhagens vattentäkt	179
8.6.2	Enskild vattenförsörjning	180
8.7	Grundvattenförekomster	181
8.7.1	Största påverkansområdets andel av nettonederbörden	181
8.7.2	Norra Gotland – Stenkyrka	183
8.7.3	Norra Gotland – Kappelshamn	184
8.7.4	Mellersta Gotland - Roma	185
8.7.5	Tingstädeåsen	187
8.7.6	Lärbro	188
8.8	Natura 2000-områden	188
8.8.1	Bojsvätar	188
8.8.2	Bälsalvret	189
8.8.3	Filehajdar	189
8.8.4	Forsviden	189
8.8.5	Grodvät	190
8.8.6	Hejnum hållar	190
8.8.7	Hejnum Kallgate	190
8.8.8	Kallgatburg	191
8.8.9	Tiselhagen	191
8.9	Kloridhalter i grundvattnet	192
8.9.1	Salthalter i grundvattnet kring Västra och Östra brotten vid vattenfyllning av täkterna	192
8.9.2	Framtida salthalter vid File hajdar-täkten och Dyhagens vattentäkt	193
9	Referenser	194

Bilagor

1. Karta - Alla borrhål
2. Hydrogeologisk fältrapport: Hydrogeologiska undersökningar runt File hajdar-kalkstenstäkt 2022 – 2023
 - A. Översiktskarta – Alla borrhål
 - B. Borrprotokoll
 - C. Sonderingsprotokoll
 - D. Utvärderade Hydraultester
 - E. Fältprotokoll borrhålsloggning
 - F. Utvärderade borrhålsloggar
 - G. Grundvattennivåer
3. GRUNDVATTENMODELL FÖR ANSÖKAN OM UTÖKADE TÄKTER 2023
 - A. Sensitivitetsanalys av modellens kalibrering
 - B. Jämförelse av två framtida situationer
 - C. Nollalternativet – variant 2
 - D. Förändring av grundvattenflöden i lokala områden. Beräkningsmetodik.

- E. Beräknad förändring av flödet av ytligt berggrundvatten i lokala avrinningsområden.
- F. Hur effekten av injektering av berget är inkluderad i modellen.
- 4. tTEM undersökning med samtolkning med SkyTEM och geologisk modell: Slite, Gotland rapport
 - A. Översikts och kvalitetskartor, tTEM och SkyTEM
 - B. Medelmotståndskarta, tTEM och SkyTEM
 - C. Profiler, tTEM och SkyTEM
 - D. tTEM systeminställningar
- 5. Ridåinjektering: File hajdar och västra brottet
- 6. Strukturgeologiska observation Filehajdar: Fältobservationer 2020, lineamentanalys 2022
- 7. Hydrogeologiskt utlåtande: risker vid vattenfyllnad av östra och västra brottet
 - A. Metodbeskrivning
 - B. Geotekniskt utlåtande
- 8. Beräkning av korrigerad nederbörd och evapotranspiration för nordöstra Gotland

ORDLISTA

Akvifär	Ett eller flera lager under markytan, av berggrund eller andra geologiska skikt, med tillräcklig genomsläpplighet för att medge betydande strömning av, eller uttag av, stora mängder grundvatten. En akvifär kan vara öppen eller sluten. I en öppen akvifär sammanfaller grundvattenytan med grundvattenzonens övre gräns. En sluten akvifär överlagras och underlagras av ett tätare geologiskt lager som gör att det uppstår ett grundvattentryck över grundvattenzonens övre begränsningsyta, dvs. grundvattnet kan stå under tryck. Om man installerar ett grundvattenrör i en sluten akvifär kommer grundvattenytan i röret att ligga på en nivå ovanför akvifärens övre begränsningsyta.
Artesiskt	I ett slutet grundvattenmagasin kan ibland grundvattnets trycknivå ligga över markytan, om så är fallet är grundvattenmagasinet artesiskt.
Grundvattenbildning	Grundvattenbildning syftar normalt på den mängd vatten som passerar nedåt genom en teoretisk yta, t.ex. markytan, bergöveryta e.dyl. Grundvattenbildning anges ofta i enheten mm/år.
Grundvattenyta	Den nivå där vattnets tryck är detsamma som lufttrycket (atmosfärstrycket).
Grundvattnets nivå alt. trycknivå	Summan av vattnets tryckhöjd och dess geometriska höjd. I ett grundvattenrör, en brunn eller ett borrhål ställer sig vattenytan på en sammanvägd trycknivå för alla de sprickor eller akvifärer som hålet står i kontakt med.
Hydraulisk konduktivitet	Det geologiska materialets genomsläpplighet för vatten per meter borrhål. Den hydrauliska konduktiviteten uttrycks i meter per sekund (m/s).
Indirekt påverkansområde	Det område inom vilket grundvattennivåerna sänks men grundvattnet inte nödvändigtvis strömmar mot bergtälten. Det indirekta påverkansområdet är större än tillströmningsområdet, se avsnitt 6.5.
Isotrop	Likformig oberoende av riktning.
Kalksten	Samlingsnamn för kalkhaltiga bergarter.
Konnekterad	Hydrauliskt sammankopplad.
Lagrad kalksten	Kalksten som avsatts i lager och har lägre lerhalt än märgelsten. För en mer detaljerad beskrivning, se avsnitt 2.2 och 5.1.1.
Manschett	Utrustning för att sektionera av ett borrhål i olika delar för att t.ex. kunna mäta vattentryck eller transmissivitet på olika djup. Kan vara flyttbar i gummi eller permanent av bentonit/betong
Märgel/Märgelsten	Kalksten som avsatts i lager och har hög lerhalt. För en mer detaljerad beskrivning, se avsnitt 2.2 och 5.1.1.

Nettonederbörd	Definieras som nederbörd minus evapotranspiration (avdunstning och upptag av växter).
Revkalksten	Kalksten som bildats av och runt tidigare revformationer. För en mer detaljerad beskrivning, se avsnitt 2.2 och 5.1.1.
Subhorisontell	Orientering av geologisk struktur i nära horisontellt plan.
Tillströmningsområde	Det område inom vilket grundvatten strömmar mot uttagspunkten (i det här fallet täkten). Ett tillströmningsområde behöver inte helt och hållet sammanfalla med ett indirekt påverkansområde. Ett tillströmningsområde kan vara mycket större än ett indirekt påverkansområde, tex i stora slutna akvifärer i sedimentära geologiska bassänger, men för svenska förhållanden och för den typ av system som vi analyserar i denna studie, är tillströmningsområdet normalt mindre än det indirekta påverkansområdet
Transmissivitet	Det geologiska materialets genomsläpplighet för vatten över bredden av en vattenförande struktur. Transmissiviteten beror av den hydrauliska konduktiviteten samt den vattenförande strukturen mäktighet (lagertjocklek) och anges i m^2/s . Tjockleken kan vara allt från en enskild spricka till ett helt borrhål.

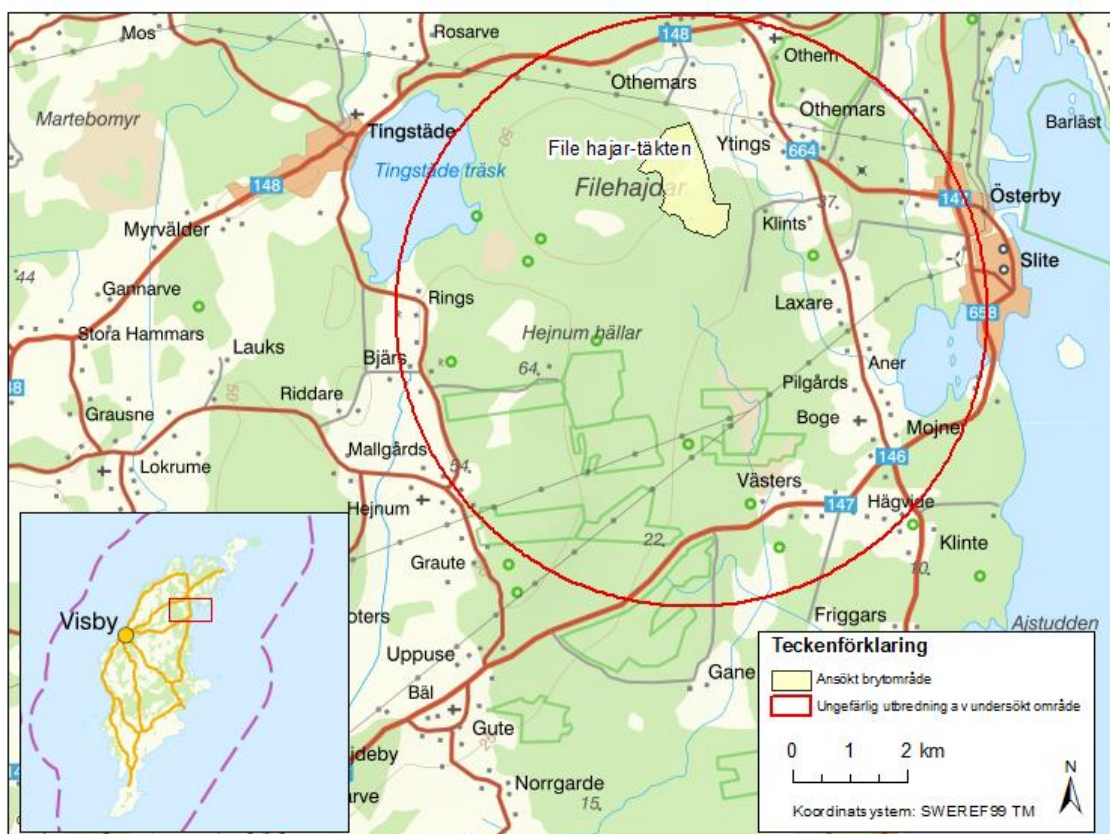
1 INLEDNING

1.1 BAKGRUND

Heidelberg Materials Cement Sverige AB (hädanefter benämnt "bolaget" eller "Heidelberg Materials") ansöker om tillstånd till fortsatt och utökad täktverksamhet i Slite. Denna rapport avser beskriva grundvattenförhållandena i det aktuella området och verksamhetens hydrogeologiska påverkan.

Täktverksamhet har pågått på platsen under lång tid. Både Heidelberg Materials och andra aktörer har genom åren utfört en rad olika undersökningar i det aktuella området. Heidelberg Materials fältundersökningar har huvudsakligen fokuserat på det område som redovisas i Figur 1. Samtliga genomförda undersökningar ligger till grund för de beskrivningar, beräkningar och bedömningar som redovisas i denna rapport.

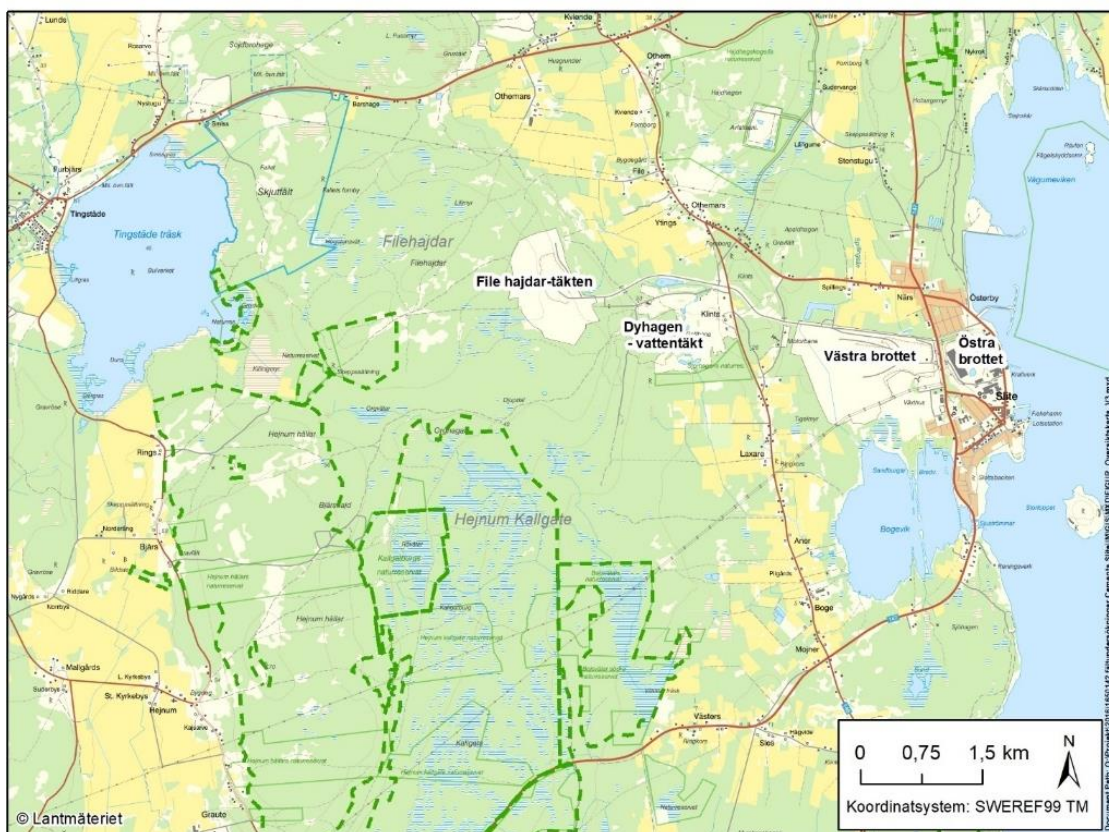
Nivåer anges i höjdsystem RH2000 enligt $\pm X$ m, om inte annat anges. Koordinater anges i koordinatsystem SWEREF 99 TM.



Figur 1. Ungefärlig utbredning av undersökningsområde för de fältundersökningar som har utförts på uppdrag av Heidelberg Materials inom röd cirkel. Infälld karta visar områdets lokalisering på Gotland.

1.2 HISTORISK OCH PÅGÅENDE VERKSAMHET

Heidelberg Materials bedriver idag täktverksamhet i två täkter i närheten av Slite, Västra brottet och File hajdar-täkten, se Figur 2. Brytningen i Västra brottet påbörjades i slutet av 1960-talet och i File hajdar-täkten i början av 1980-talet. Tidigare bröts kalksten också i en mindre tredje täkt – Östra brottet.



Figur 2. Översiktskarta.

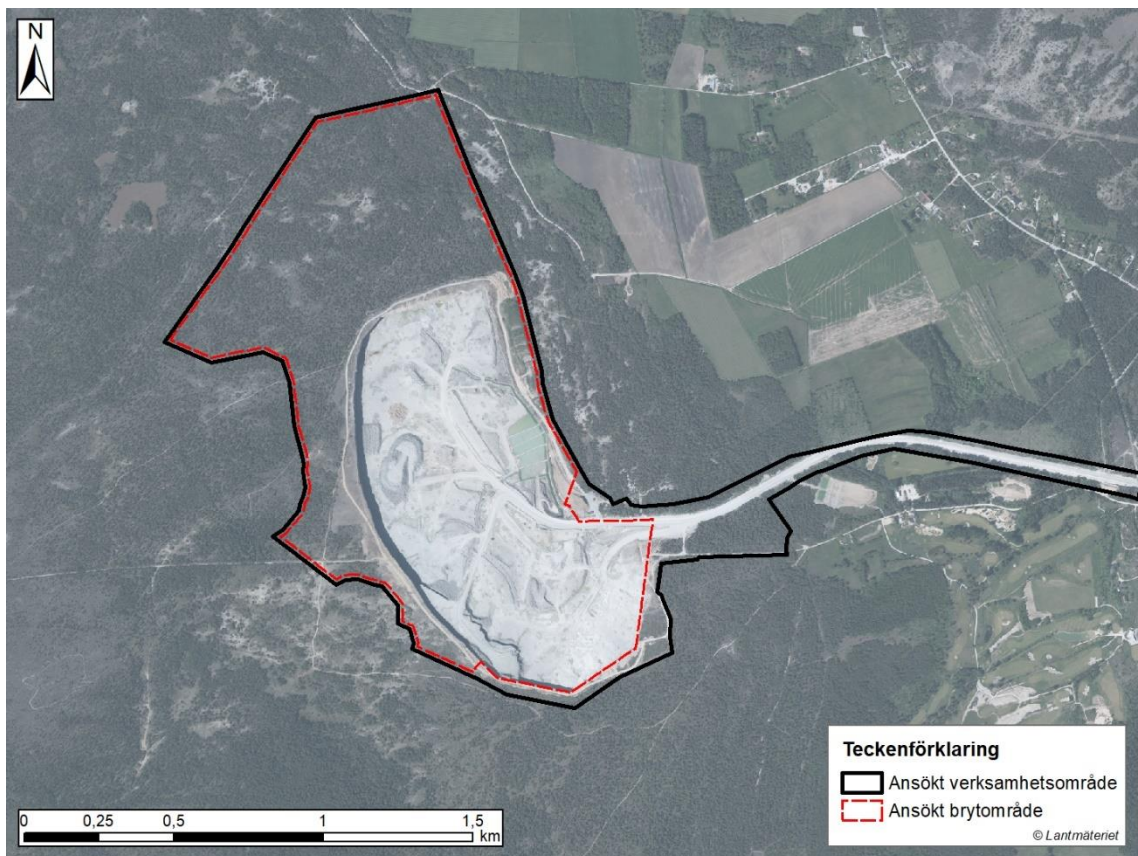
Östra brottet är beläget i anslutning till bolagets cementfabrik. Östra brottet används inte längre för kalkstensbrytning, men täkten behöver fortsatt länshållas eftersom den används för bland annat lagring av krossad kalksten.

Västra brottet är beläget vid Slite samhälles västra kant, ca 700 m från havet. Brytning har historiskt sett bedrivits i två pallar (nivåer). Den undre pallen (pall 2) har ett lägsta brytdjup på ca -48 m. Brytningen i denna pall har avslutats och pallen är nu nära vattenfylld med en vattennivå på ca -30 m. Bottennivån på den övre pallen (pall 1) ligger på -26 m.

File hajdar-täkten är belägen ca 3 km väster om Västra brottet och har en bottennivå på ca +20 m. Omgivande markyta sluttar svagt mot öster. Väster om täkten är markytan belägen på ca +50 m medan på östra sidan ligger markytan på ca +35 m.

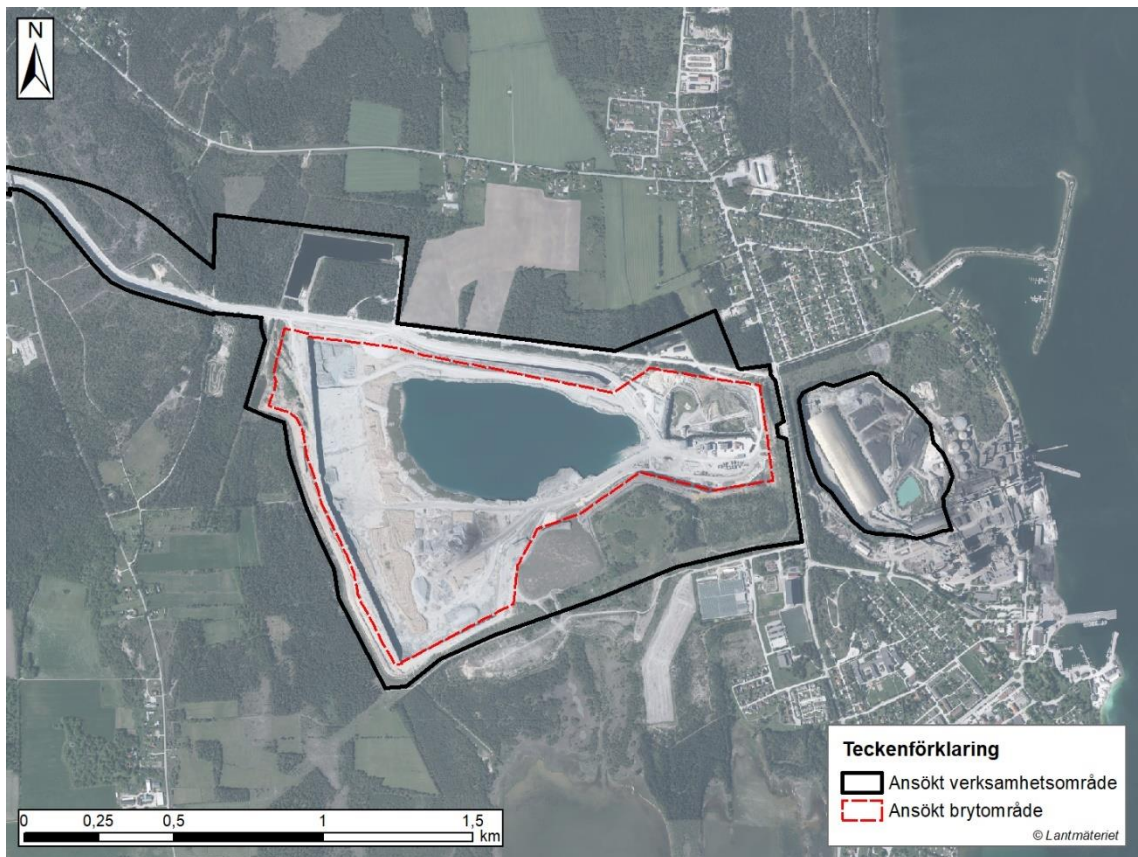
1.3 PLANERAD VERKSAMHET

Ansökan omfattar 30 års kalkstensbrytning vid och länshållning av File hajdar-täkten. Brytning kommer att bedrivas inom det område som redovisas i Figur 3 nedan. Brytdjupet blir som lägst +5 m. Inom den södra delen av File hajdar-täkten kommer ett eller flera vattenmagasin att anläggas. Magasinen får en total maximal lagringsvolym om ca 600 00 m³ och en bottennivå på ca +9 m.



Figur 3. Ansökt bryt- och verksamhetsområde vid File hajdar-takten.

Ansökan omfattar också ca 8 års kalkstensbrytning vid och länshållning av Västra brottet. Det ansökta brytområdet (Figur 4) och brytdjupet (-26 m) är detsamma som i nu gällande tillstånd.



Figur 4. Ansökt bryt- och verksamhetsområde vid Västra brottet.

När brytningen i Västra brottet har avslutats kommer samtliga anläggningar omlokaliseras, tunnarna mot Östra brottet stängas och länshållningen av Västra brottet upphöra. Täkten kommer långsamt börja vattenfyllas och sedermera bilda en täktsjö.

Östra brottet kommer fortsätta länshållas under obestämd tid. Länshållningsvatten från Östra brottet kommer att pumpas till Västra brottet till dess att täktsjön är full. Processvattenuttag kommer att göras från Västra brottet till fabriken. Heidelberg Materials planerar för en större ombyggnation av cementfabriken i Slite. Ombyggnationen kan komma att innefatta utjämning och mindre utökning av markytan inom Östra brottet, vilket kan få en marginell påverkan på grundvatteninflödet till tækten. En eventuell utjämning och utökning av markytan kommer att prövas inom ramen för bolagets kommande ansökan om nytt tillstånd till fabriksverksamheten. För att i denna rapport ge en samlad beskrivning av länshållningens påverkan på grundvattenförhållandena, som inte underskattar påverkan, har detta potentiella ökade inflöde beaktats i alla bedömningar. Det är fråga om en helt marginell förändring.

Heidelberg Materials avser även anlägga ett nytt transportband mellan File hajdar-tækten och Västra brottet. För detta krävs en ny tunnel under Solklintsvägen. Tunneln kommer att tätas för att minimera inläckaget av vatten. Det vatten som ändå läcker in i tunneln kommer ledas med självfall till Östra brottet.

1.4 BEDÖMNINGSMETOD

Rapporten utgår från de hydrogeologiska förhållandena i *utgångsläget*: den 31 december 2026, då det befintliga täkttillståndet löper ut. Det tillståndsgivna brytområdet är då helt utbrutet och alla tre täkter är länshållna.

Rapporten redovisar hur de hydrogeologiska förhållandena förväntas påverkas *om den ansökta verksamheten kommer till stånd*. Verksamhetens utformning och omfattning kommer att variera över tid. Det är mot denna bakgrund relevant att beskriva verksamhetens påverkan vid olika tidpunkter. Följande tidpunkter har bedömts vara relevanta. Tidsangivelserna anger ungefärligt antal år efter att det ansökta tillståndet tagits i anspråk.

- År 8: Precis innan verksamheten i Västra brottet avslutas och tækten börjar vattenfyllas.
- År 20: En betydande del av File hajdar-tækten är utbruten och Västra brottet håller på att vattenfyllas. Ungefär halvvägs mellan år 8 och 30.
- År 30: Precis innan verksamheten i File hajdar-tækten avslutas och tækten börjar vattenfyllas.
- År ca 70–90: Både File hajdar-tækten och Västra brottet har vattenfyllts och nya jämviktsförhållanden har inställt sig.

Rapporten redovisar även den förväntade utvecklingen i *nollalternativet*, dvs. att den ansökta verksamheten inte kommer till stånd. All kalkstensbrytning och länshållning avslutas då den 31 december 2026, när det befintliga tillståndet löper ut. Därefter börjar samtliga tre täkter fyllas med vatten.

Simuleringarna har gjorts med hjälp av en numerisk grundvattenmodell, som beskrivs i kapitel 6. Simuleringarna är gjorda för de olika grundvattenförhållanden som råder under året, representerat med olika simuleringar för månaderna april, juli, september och december.

Simuleringarna av påverkan av den ansökta verksamheten är även gjorda med respektive utan skyddsåtgärder. Under framtagandet av denna studie har flera olika utformningar av skyddsåtgärder studerats. Här redovisade och beaktade skyddsåtgärder är den utformning som visats ge bäst effekt.

Nuvarande förhållanden är simulerade med nuvarande klimat medan framtida scenarion är modellerade med av SMHI beräknat framtida klimat, se avsnitt 1.4.1 nedan. Det redovisas även

jämförande beräkningar av framtida grundvattenförhållanden med *nuvarande* klimat, men då anges det särskilt.

Alla beräkningar inkluderar den samlade påverkan från bergtäkterna, den kommunala vattentäkten och uttaget för mjölkgården norr om File hajdar-täkten.

Totalt har ett mycket stort antal simuleringar genomförts. I föreliggande rapport redovisas de scenarion som bedömts mest relevanta för att beskriva en framtida påverkan i olika aspekter. För en mer komplett sammanställning av olika simuleringar hänvisas till Modellrapporten i Bilaga 3.

1.4.1 Klimatförändringar på norra Gotland

SMHI har på uppdrag av WSP beräknat tidsserier med månatlig korrigerad nederbörd, evapotranspiration och nettonederbörd (den del av nederbörden som inte avdunstar och därmed kan bilda grundvatten) för utvalda delavrinningsområden på nordöstra Gotland för normalperioden 1991–2020 samt för de framtida perioderna 2021–2050 och 2071–2100 (Bilaga 8). Samtliga siffror som presenteras nedan kommer från dessa beräkningar.

SMHI har upprättat fyra klimatscenarier, så kallade RCP-scenarier ("Representative Concentration Pathways") för att beräkna framtida klimatförändringar. I denna utredning har klimatscenariot RCP4.5 använts som utgångspunkt vid samtliga beräkningar och modelleringar av de framtida grundvattenförhållandena på Gotland. RCP4.5 anses som det mest realistiska klimatscenariot. Vidare är skillnaderna mellan RCP4.5 och RCP8.5 inte av betydelse vad gäller den framtida grundvattensituationen. För RCP8.5 har liknande procentuella årsmedelvärdesförändringar beräknats. På månadsbasis finns vissa skillnader, men de bedöms inte vara så stora att de fodrar beräkning av framtida grundvattenförhållanden med både scenario RCP4.5 och RCP8.5.

De areaviktade värdena för klimatscenariot RCP4.5 som tagits fram av SMHI används i den numeriska grundvattenmodellen som beskrivs i kapitel 6. Den ansökta täktverksamheten kommer att pågå under 30 års tid, från ca år 2027 till och med år 2056. SMHI:s beräkningar för perioden 2021–2050 bedöms vara mest relevanta för den ansökta tillståndstiden. Efter att täktverksamheten i File hajdar-täkten har upphört kommer det ta lång tid för File hajdar-täkten att fyllas med vatten. SMHI:s beräkningar för perioden 2071 - 2100 bedöms vara mest relevanta för den tidsperiod då File hajdar-täkten fylls med vatten.

För nollalternativet – som innebär att verksamheten avslutas vid utgången av år 2026, varefter efter det tar ca 50 år för de tre täkterna att fyllas med vatten – är det relevant att ta hänsyn till SMHI:s beräkningar för perioden 2021 - 2050 under uppfyllnadsperioden. För nollalternativet och efter uppfyllnadsperioden, bedöms SMHI:s beräkningar för perioden 2071 - 2100 vara mest relevanta.

För perioden 2021–2050 beräknas nederbörden öka för årets samtliga månader, vilket gäller för både RCP4.5 och RCP8.5. Det enda undantaget är april månad i RCP4.5 vilken uppvisar en svag minskning. För perioden 2071–2100 beräknas nederbörden öka för samtliga månader, i både RCP4.5 och RCP8.5.

Evapotranspirationen beräknas också öka. Det gäller för årets samtliga månader i både klimatscenario RCP4.5 och RCP8.5, och för både perioden 2021–2050 och perioden 2071–2100.

SMHI har beräknat negativ nettonederbörd för perioden maj–juli för referensperioden 1991–2020. En negativ nettonederbörd innebär, i en numerisk grundvattenmodell, att ingen grundvattenbildning sker. I verkligheten innebär en negativ nettonederbörd att mer vatten avdunstar och transpireras av (tas upp av och avdunstar via) växter än vad som "fylls på" av nederbörd. Det innebär också att mer vatten avdunstar från öppna vattenytor såsom sjöar, än vad som "fylls på" av nederbörd.

För framtida scenarier, RCP4.5 och RCP8.5 under perioderna 2021–2050 och 2071–2100, beräknas en negativ nettonederbörd för månaderna maj och juni. Det gäller även för månaden juli i scenariot RCP4.5 för perioden 2071–2100. I Tabell 1 presenteras den beräknade nettonederbörden, där skillnaden mellan referensperiod och framtida perioder återfinns inom parentes.

Tabell 1. Nettonederbörd. Areaviktade medel för olika perioder och S-HYPE-modeller, baserade på observerade data och klimatmodellens resultat.

Modell (indata)		S-HYPE 16_h (observationer)	S_HYPE 16_d (klimatmodellens resultat) värden inom parentes - skillnad mellan referensperiod och framtida perioder för respektive klimatscenario					
Period		1991–2020	1991–2020		2021–2050		2071–2100	
			RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Månatliga summor [mm/månad]	januari	43,0	53,3	53,7	56,0 (+2,7)	56,7 (+3,1)	57,5 (+4,2)	60,4 (+6,7)
	februari	36,5	37,0	36,1	36,9 (-0,1)	36,5 (+0,3)	39,0 (+2,0)	37,1 (+0,9)
	Mars	22,4	34,0	32,8	35,2 (+1,2)	32,4 (-0,4)	32,7 (-1,4)	31,6 (-1,2)
	april	4,4	17,6	16,2	13,0 (-4,5)	14,4 (-1,8)	13,9 (-3,7)	10,7 (-5,5)
	maj	-13,5	-6,7	-5,7	-9,5 (-2,8)	-5,4 (+0,3)	-10,1 (-3,4)	-6,5 (-0,8)
	juni	-13,2	-13,7	-14,2	-10,5 (+3,3)	-13,3 (+0,9)	-12,0 (+1,7)	-14,4 (-0,2)
	juli	-1,7	-0,1	0,2	1,0 (+1,1)	1,2 (+0,9)	-1,4 (-1,3)	0,1 (-0,1)
	augusti	4,5	5,4	5,1	4,8 (-0,6)	4,4 (-0,8)	5,5 (+0,1)	3,2 (-2,0)
	september	8,8	23,3	23,1	24,6 (+1,3)	22,4 (-0,7)	21,5 (-1,8)	19,1 (-4,0)
	oktober	31,5	33,7	31,2	33,3 (-0,4)	32,6 (+1,4)	35,6 (+1,9)	33,8 (+2,6)
	november	46,4	44,7	46,3	47,7 (+3,0)	47,0 (+0,8)	45,5 (+0,7)	44,5 (-1,7)
	december	53,0	57,4	58,1	60,0 (+2,5)	57,0 (-1,1)	56,6 (-0,8)	57,4 (-0,7)
Årlig summa [mm/år]		222	286	283	293 (+6,8)	286 (+2,8)	284 (-1,8)	277 (-6,0)

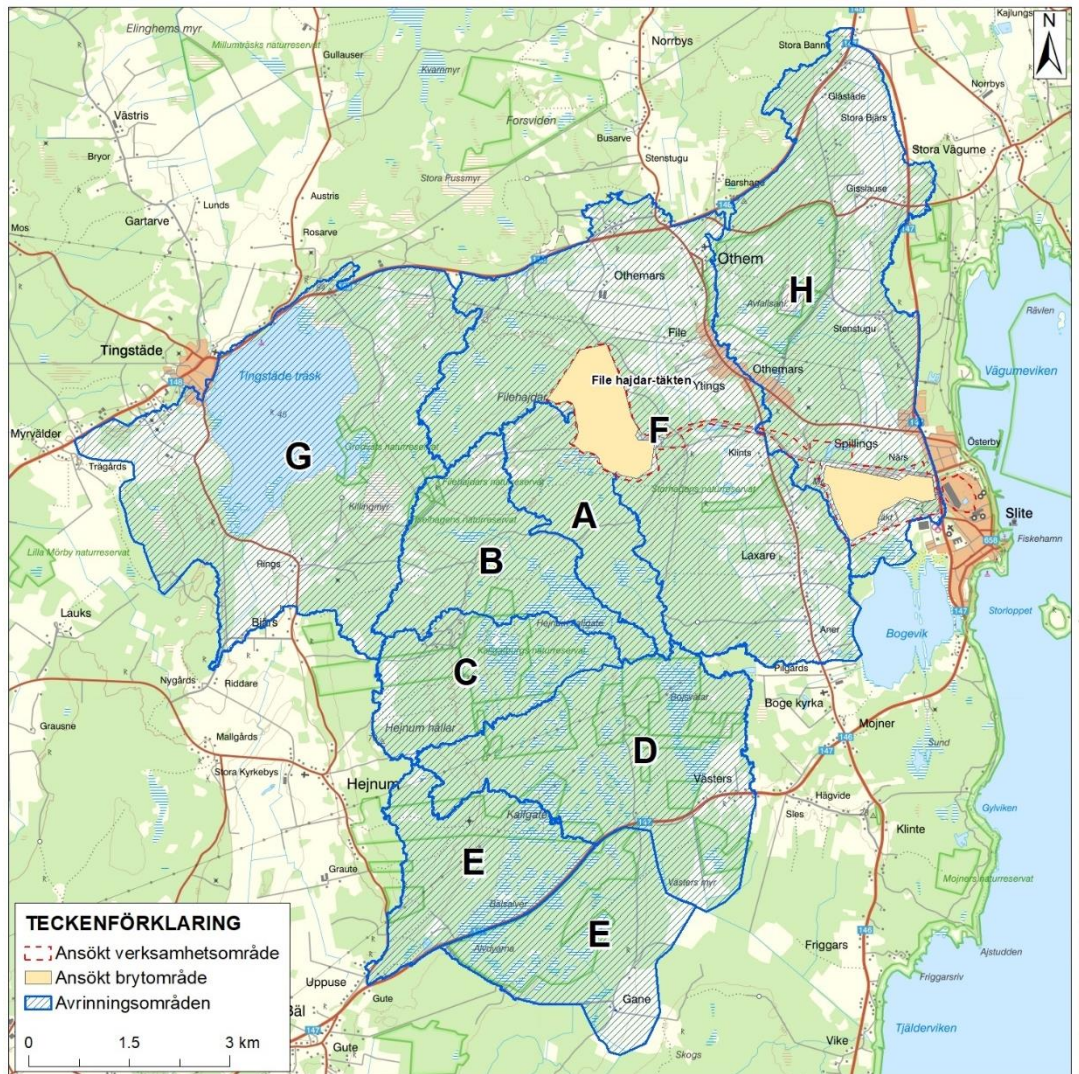
På Gotland sker idag (1991–2020) den största grundvattenbildningen under november, december och januari (Tabell 1). Under dessa månader väntas grundvattenbildningen öka något fram till år 2050 enligt både RCP4.5 och RCP8.5 även om ökningen är mindre för RCP8.5. Under perioden 2071–2100 väntas grundvattenbildningen öka markant under januari för bägge klimatscenerierna, men vara relativt oförändrad i november–december enligt RCP4.5 och minska något enligt RCP8.5. Den totala årliga nettonederbörden förväntas öka under perioden 2021–2050 enligt både RCP4.5 och RCP8.5. Under perioden 2071–2100 förväntas nettonederbörden i stället minska enligt både RCP4.5 och RCP8.5.

2 ÖVERGRIPANDE ORIENTERING I OMRÅDETS HYDROGEOLOGI

De hydrogeologiska förutsättningarna i området är komplexa. Detta kapitel avser ge en övergripande beskrivning av områdets hydrogeologi. I kapitel 5 finns sedan en mer detaljerad beskrivning.

2.1 AVRINNINGSMÖNSTRÄN

Det övergripande avrinningsmönstret i området illustreras med hjälp av avrinningsområden i Figur 5.



Figur 5. Avrinningsområden.

Avrinningsområdena A till D är alla delar av Vikeåns avrinningsområde och vattnet avrinner söderut där det, tillsammans med vatten från de två delområdena av avrinningsområde E (Bälsalver), rinner mot Tjalderviken. En liten del av File hajdar-täkten, både i utgångsläget och det ansökta alternativet, ligger inom avrinningsområde A. Merparten av täktens utbredning i utgångsläget och det ansökta alternativet ligger dock inom avrinningsområde F (Aneråns avrinningsområde), vilket har sin avrinning mot Bogevik. Avrinningsområde G rinner till Tingstäde träsk och från sjön sedan vidare mot nordväst.

Västra brottet är beläget inom Spillingsåns avrinningsområde, se avrinningsområde H i [Figur 5](#) ovan. Östra brottet är beläget närmast kusten av de tre täkterna, i ett område som avrinner mot Östersjön.

Avrinningsområdena kring Heidelberg Materials tre täkter kan därmed beskrivas som fem större områden: Anerån, Bälsalver, Spillingsån, Tingstäde och Vikeån. Områdets ytvattenförhållanden beskrivs i större detalj i den hydrologiska utredningen, ansökans bilaga B6.

2.2 BERGGRUND

Berggrunden på Gotland utgörs av en 250–800 m mäktig sekvens med äldre paleozoiska sedimentära bergarter som överlagrar det kristallina urberget. Inom det aktuella området vid Slite är djupet till urberget ca 400–500 m. För cementframställningen i Slite används de ytligaste ca 50 metrarna av den siluriska berggrunden, som stratigrafiskt brukar benämnas Slitelagren.

Gotlands berggrund har inte utsatts för någon omfattande tektonisk påverkan. De dominerande strukturerna i det sedimentära berget är därför nära horisontella, se [Figur 6](#).

Den horisontella riktningen på de dominerande strukturerna blir även styrande för grundvattenflödet i berget. Det vertikala grundvattenflödet förekommer genom vertikala sprickor.

På vissa ställen har karst bildats vilket innebär att sprickor har vidgats genom kemisk korrosion av karbonatmineral. Ytnära karst (epikarst) har utvecklats i den omättade zonen (över grundvattenytan). Djupare karststrukturer är ovanliga i området. Ofta bryts eller länkar karstifierade sprickor av vid lagergränser redan på 0,5 m till 1 m djup.

På andra delar av ön förekommer större och djupare strukturer som grottor och slukhål. I Sveriges Speleologsförbunds (SSF) grottdatabas finns ett 20-tal grottor angivna på Gotland som i varierande grad klassats som karstgrottor med Lummelunda som den mest kända (SSF, u.å.).

Förekomsten av karst tycks vara knuten till speciella kalkstenstyper. Karbonatrika, kristallina, sprickiga och homogent lagrade kalkstenar är mer benägna att påverkas av karst i jämförelse med lerigare varianter som finns i de lite djupare lagren i det aktuella området.



Figur 6. Kalksten med subhorisontella lager och enstaka vertikala sprickor.

De sedimentära bergarterna i området kan delas in i tre huvudtyper:

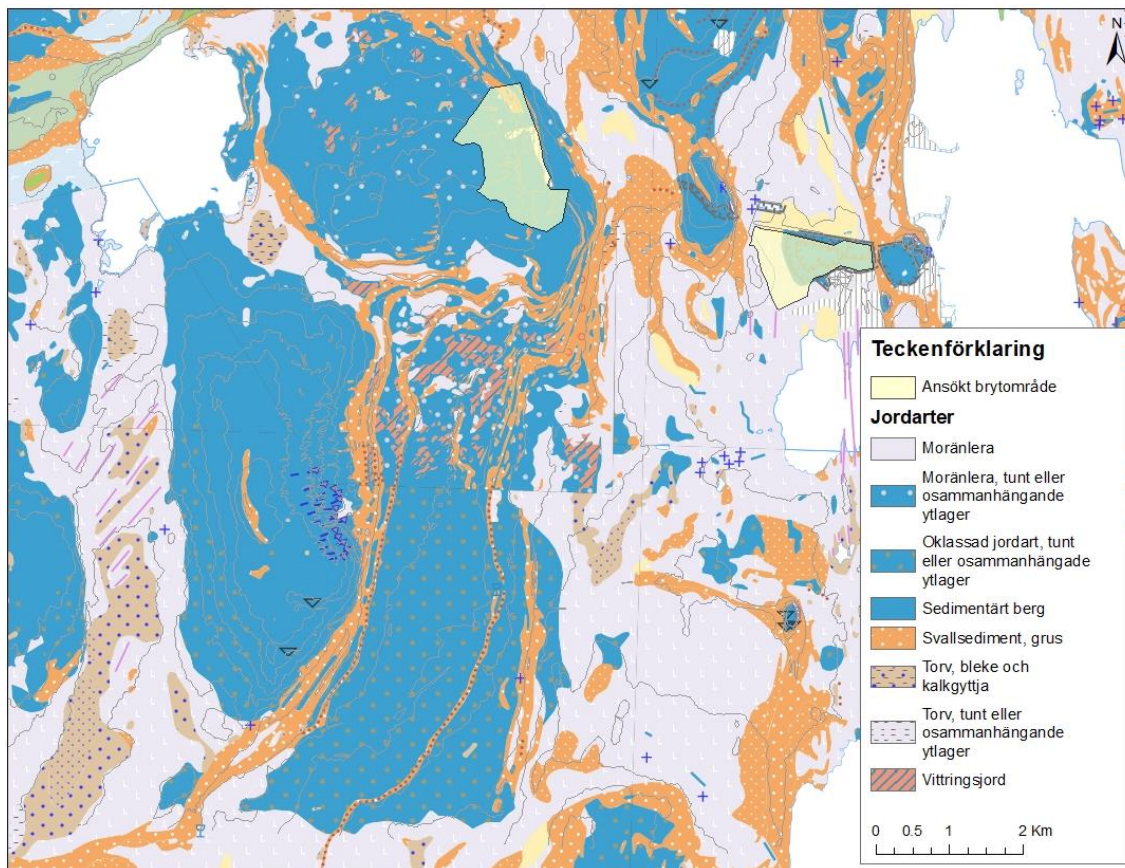
- **Lagrad kalksten** – Lagrad kalksten har horisontella eller subhorisontella vattenförande sprickor och är en relativt ren form av kalkbergart. Vatten transporteras mestadels i horisontella/subhorisontella lager och sprickor.
- **Märgel/märgelsten** – Märgel eller märgelsten är lagrad i likhet med den lagrade kalkstenen, med vattenflödet generellt i horisontella eller subhorisontella strukturer. Märgeln har dock ett större lerinnehåll och består av karbonat- och silikatbergarter, vilket gör den generellt mindre genomsläpplig (där det inte finns vattenförande lager). Till skillnad från kalkstenen har vertikala sprickor sällan vidgats av karst.
- **Revkalksten** – Revkalksten består av gamla revbildningar på vilka sediment sedan har lagt sig. Detta innebär att revkalkstenen inte har sammanhängande lager på det sätt som den lagrade kalkstenen och märgelstenen har. Revkalkstenen har oregelbunden struktur som ger heterogena hydrauliska förhållanden såväl horisontellt som vertikalt. Därmed finns det inte lika dominerande horisontella flöden i revkalkstenen, men epikarst förekommer som lokalt ökar den vertikala genomsläppligheten. I delar med mindre tydlig revformation används ibland begreppet *revartad kalksten*.

Revkalkstenen tenderar att ligga överst i den sedimentära lagerföljden vid Slite och ofta har den tyngt ner underliggande lager vilket kan leda till lokala mer vertikala sprickzoner längst kanten än vad som i övrigt är vanligt i området.

Grundvattenflödet i berggrunden är till större delen koncentrerat till (sub-)horisontella lager, som förekommer både i kalkstenen och i den underliggande märgelstenen, men även i lagergränsen mellan dessa geologiska enheter.

2.3 JORDLAGER

Jordlagren i området utgörs huvudsakligen av ett tunt lager, starkt lerhaltig och relativt tät, vittringsjord i form av moränlera. På flera platser saknas vittringsjorden varvid underliggande kalksten går i dagen (blå färg på jordartskartan i Figur 7). På olika topografiska nivåer finns en rad strandavlagringar (strandvallar) med sand och grus avsatta under Östersjöns olika transgressionsstadier (orange färg på jordartskartan i Figur 7). Jordlagren har en avsevärt högre vattenhållande förmåga än berget, vilket innebär att det kan finnas ett grundvatten i jordlagren även under perioder när bergets grundvattentryck ligger många meter under jordlagren. Särskilt de större strandvallarna kan magasinera grundvatten under längre perioder.



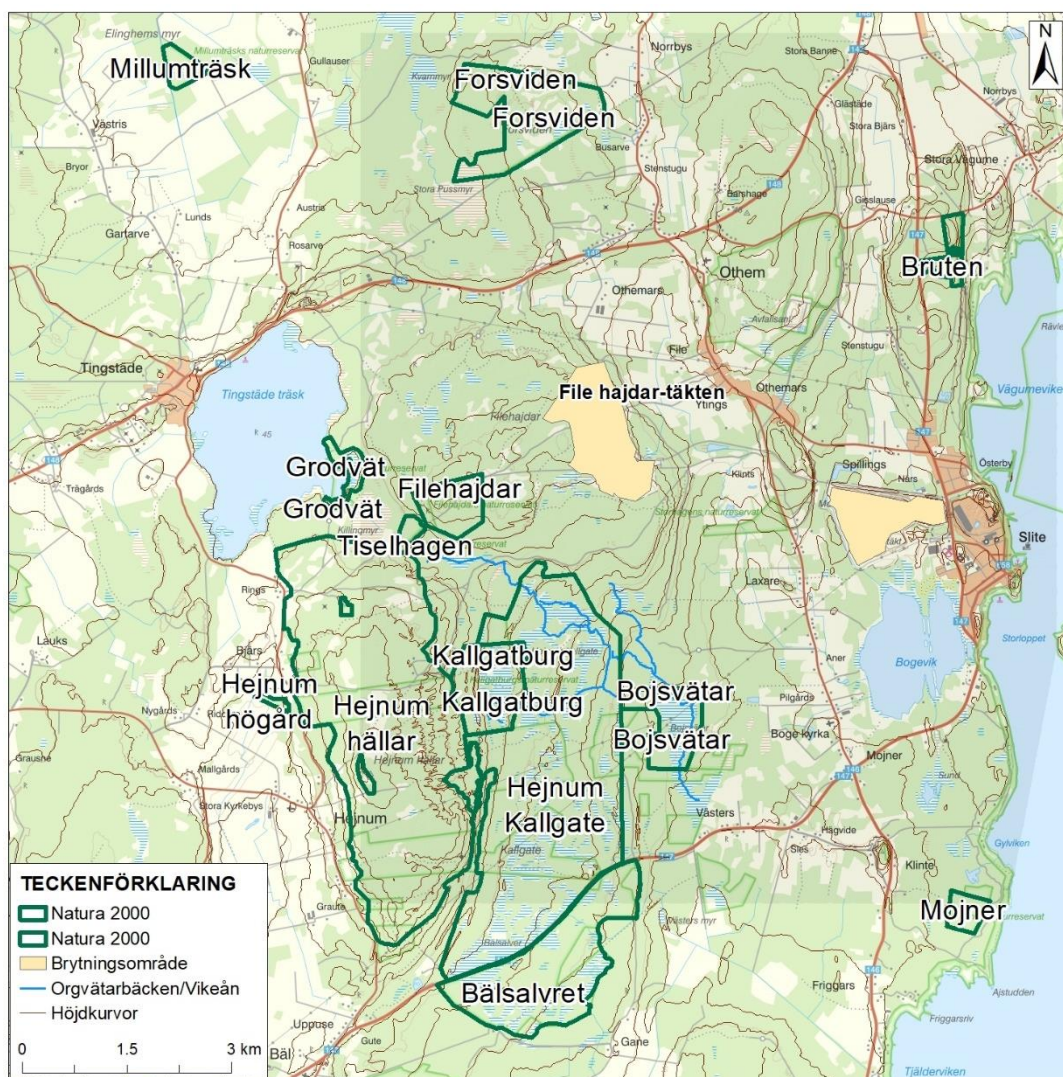
Figur 7. Jordarter i området.

Under våtmarker förekommer täta leriga sediment och bleke. Bleke är en kalkjordart och består huvudsakligen av kalciumkarbonat i form av kalцит, som fällts ut i till exempel sjöar genom aktivitet av kransalger.

3 OMGIVNING

3.1 NATURA 2000

Det finns ett flertal värdefulla Natura 2000-områden söder och väster om File hajdar-täkten, se Figur 7 nedan. Det närmsta Natura 2000-området är beläget ca 1,3 km väster om det ansökta brytområdet.



Figur 8. Natura 2000-områden.

Generellt sluttar området österut även om det lokalt förekommer sluttningar åt andra håll. Höjder i området utgörs av Filehajdar och Hejnum hällar. Även den norra delen av området, vid Forsviden, utgörs av ett höjdområde om än lägre än Filehajdar och Hejnum hällar.

Både Hejnum Kallgate och Bojsvåtar förses med vatten från såväl Hejnum hällar som Orgvåtarbäcken (se Figur 8). Bojsvåtar förses även med visst vatten från Filehajdar. Bälsalvret försörjs med vatten indirekt från Hejnum hällar via Hejnum Kallgate.

Tiselhagen får vatten från Hejnum hällar och Filehajdar. Grodvät förses med vatten från högre liggande områden öster om Grodvät.

Natura 2000-områdenas naturvärden beskrivs i ansökans bilaga B7.

3.2 VATTENFÖRSÖRJNING

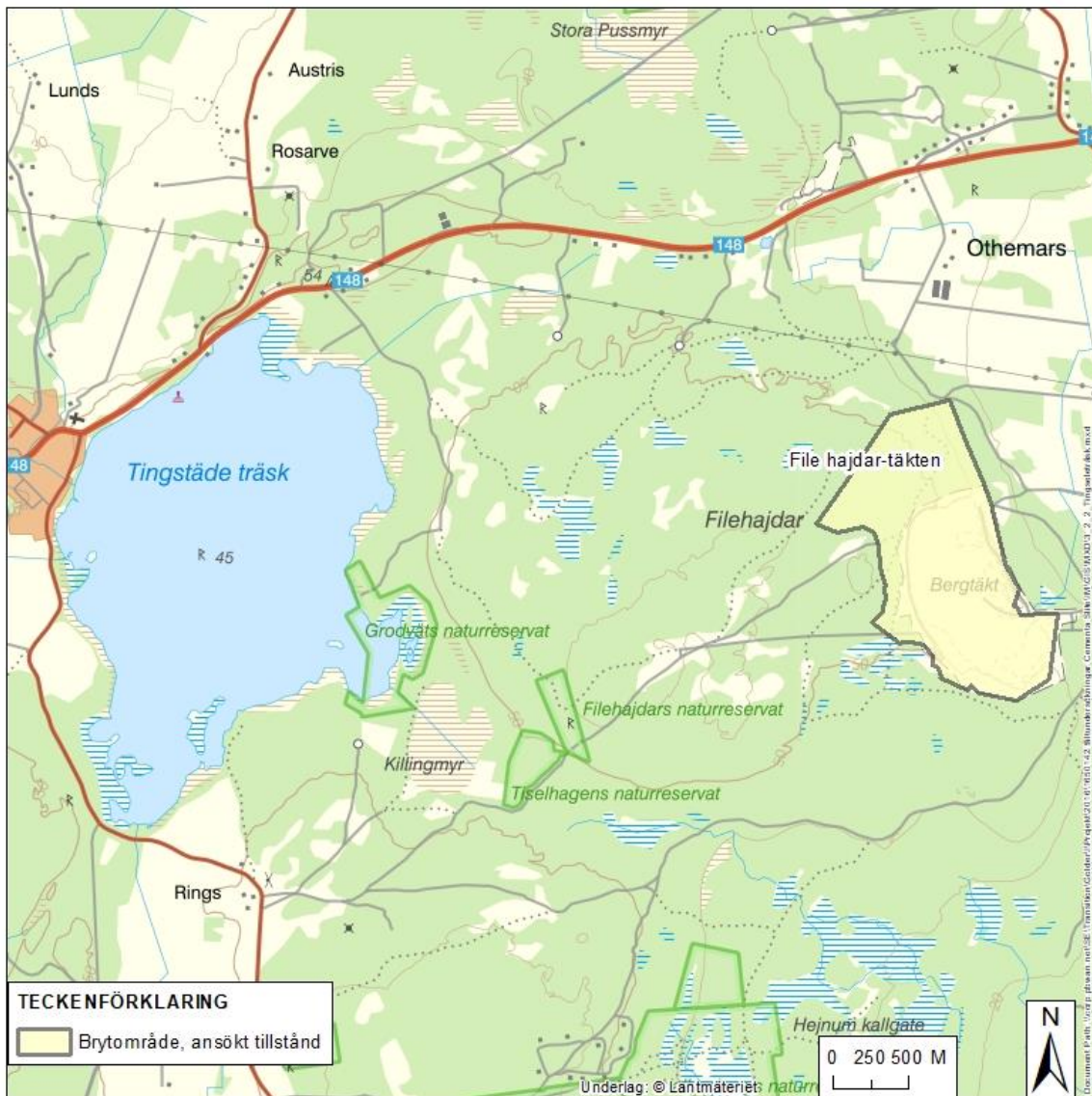
3.2.1 Dyhagen

Region Gotlands grundvattentäkt Dyhagen är belägen mellan File hajdar-täkten och Västra brottet. Vattentäkten försörjer Slite med vatten och har sju bergborrade produktionsbrunnar placerade i ungefärlig nord-sydlig linje med ett inbördes avstånd på mellan 150 och 500 m, borrhå till ca 40–60 m djup. Pumpbrunnarna är placerade i en äldre strandzon. Äldre undersökningar beskriver geologin som en krosszon i mägerstenen, t.ex. VIAK, 1974 & 1981. Geofysiska undersökningar visar att zonen stämmer relativt väl överens med brant stående strukturer kopplade till kantzonen av ett rev.

Dyhagens vattentäkt ligger i grundvattenförekomsten Mellersta Gotland-Roma, se avsnitt 3.3. Vattentäkten har en vattendom som medger ett årligt uttag om 220 000 m³/år.

3.2.2 Tingstäde träsk

Tingstäde träsk utgör en kompletterande vattentäkt för Visby och ligger ca tre kilometer väster om File hajdar-täkten, se Figur 9. Region Gotland har sedan 1966 tillstånd att leda bort en obegränsad volym vatten, så länge vattennivån i sjön regleras mellan +44,4 m och +45,1 m (angivet i höjdsystemet RH00) och det sker en viss minimitappning till Ireån. År 2019 fick Regionen tillstånd att sänka nivån till +44,2 m, dock endast under *en* av fem följande perioder: 15 augusti–15 januari 2020, 2021, 2022, 2023 eller 2024.



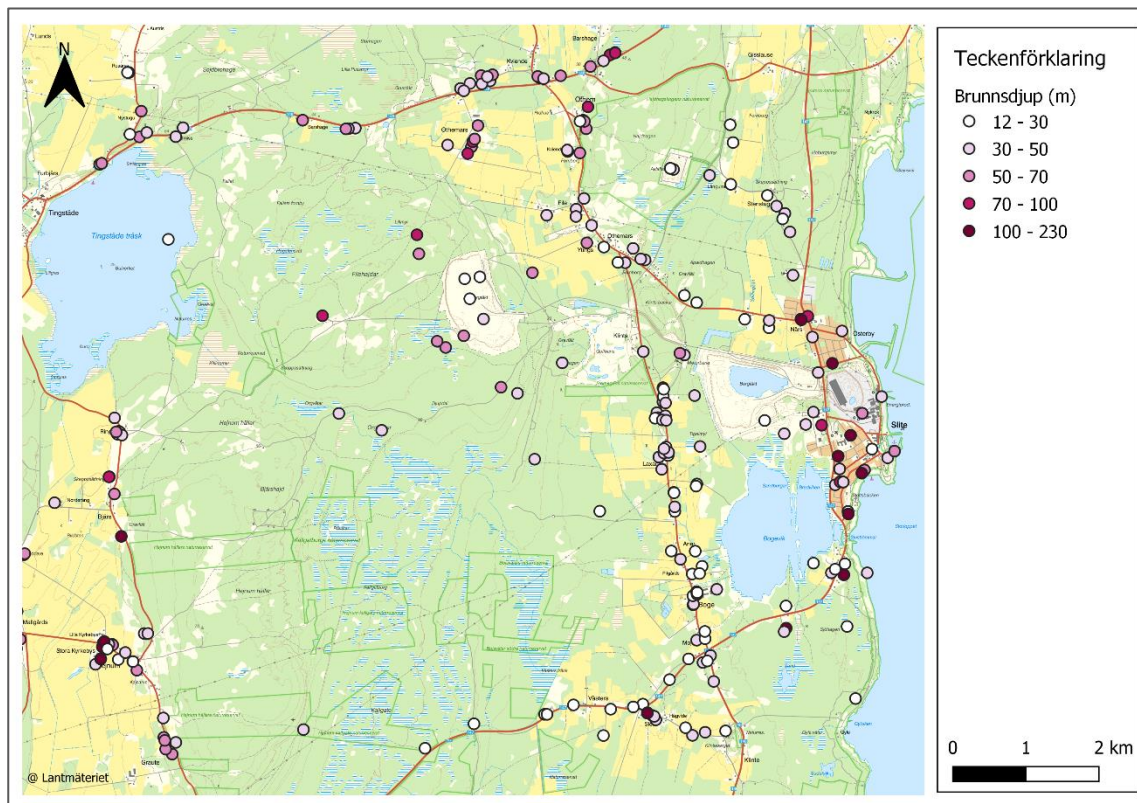
Figur 9. Tingstäde träsk.

Tingstäde träsk utgör en ytvattenförekomst (SE640431-166731). Vattenförekomstens ekologiska status klassas som god. Den kemiska ytvattenstatusen är klassad som "uppnår ej god" med hänvisning till uppmätta halter av bromerad difenyleter samt kvicksilver och kvicksilverföreningar.

3.2.3 Enskild vattenförsörjning

Inom Slite tätort har samtliga fastigheter kommunal vattenförsörjning, däremot finns det på större avstånd ett fåtal fastigheter med enskild vattenförsörjning.

Inom undersökningområdet återfinns 274 brunnar enligt data från SGU:s brunnarsarkiv, samtliga bergborrade (SGU, u.å.a). Identifierade brunnar samt deras djup redovisas i Figur 10. Av dessa är 36 energibrunnar och 102 brunnar som används som enskilda vattentäkter. För övriga brunnar anges användning så som bevattning, industrivatten, observationsbrunn eller annan ospecificerad användning. Vissa brunnar är således borrhål som Heidelberg Materials låtit borra för undersökningar. De brunnar som Heidelberg Materials har fått kännedom om under samrådet inför förevarande tillståndsansökan, men som inte finns registrerade i SGU:s brunnarsarkiv, redovisas inte i Figur 10 nedan. Det beror på att Heidelberg Materials i de flesta fall inte vet exakt var dessa brunnar är belägna.

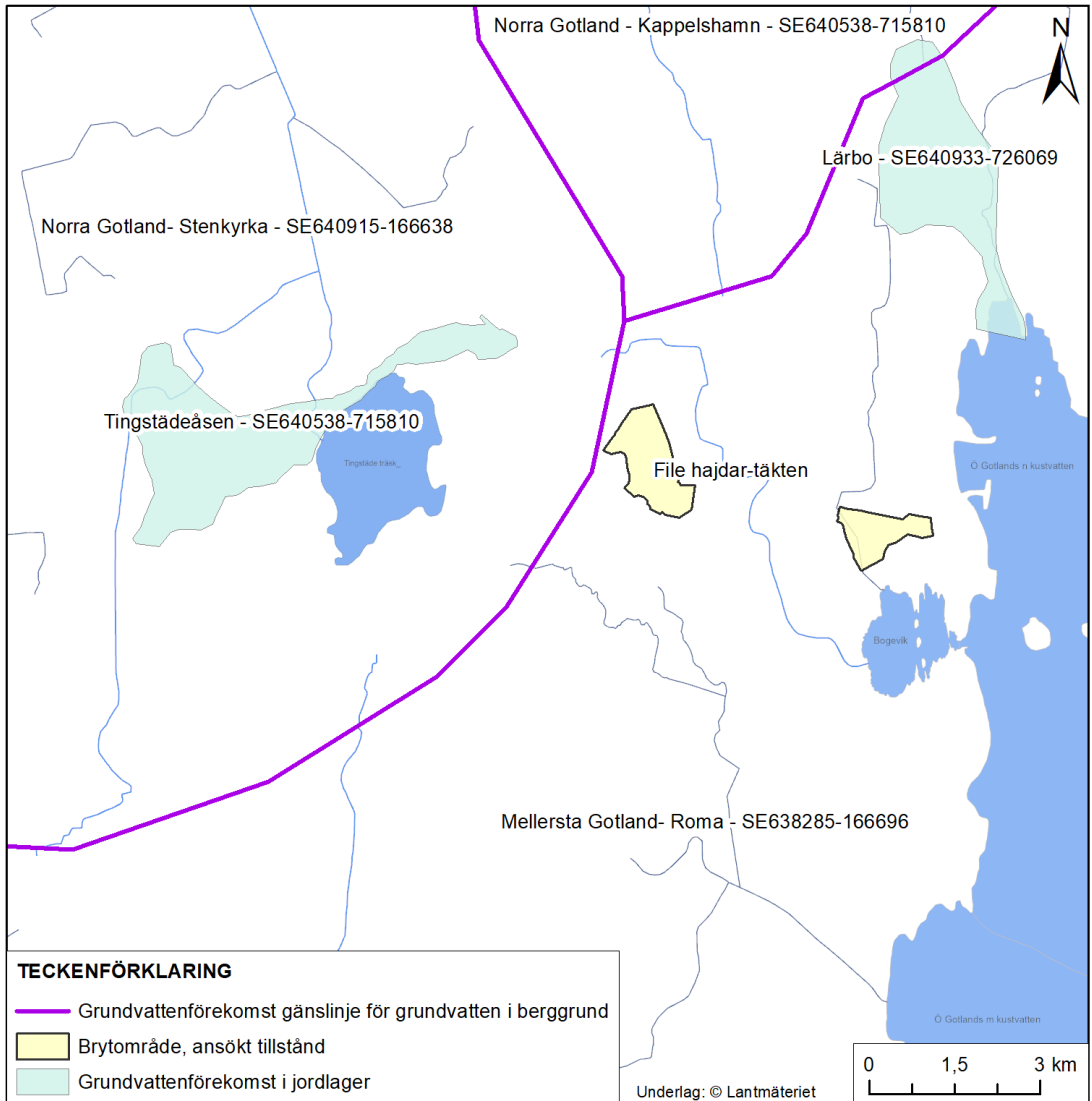


Figur 10. Brunnar inom eller nära undersökningsområdet enligt SGU:s brunnarsarkiv.

3.3 GRUNDVATTENFÖREKOMSTER

Västra brottet och File hajdar-täkten är båda belägna inom grundvattenförekomsten Mellersta Gotland-Roma. I närheten av File hajdar-täkten finns två andra grundvattenförekomster: Norra Gotland-Stenkyrka (väster om täkten) och Norra Gotland-Kappelshamn (norr om täkten). Samtliga är grundvattenförekomster i berg.

I närområdet finns också två mindre grundvattenförekomster av typen sand- och grusförekomst: Lärbro (nordost om verksamhetsområdet) respektive Tingstädeåsen (norr om Tingstäde träsk). Dessa vattenförekomster visas i Figur 11.



Figur 11. Grundvattenförekomster i närheten av Västra brottet och File hajdar-täkten.

Mellersta Gotland-Roma (SE638285-166696) har en bedömd uttagsmöjlighet på 20 000–60 000 l/h. Förekomsten anses ha en otillfredsställande kvantitativ status, då det inte bedöms finnas en säkerställd balans mellan vattenuttag och grundvattenbildning samt att det i området finns tydliga tecken på saltvatteninträngning. Förekomsten bedöms vidare ha en otillfredsställande kemisk status. Inom förekomsten finns två förenade områden, där höga halter av trikloreten och tetrakloreten respektive PAH har påvisats i grundvattnet. Vidare har det vid en provtagningspunkt uppmätts kloridhalter överstigande riktvärdet för god status (100 mg/l).

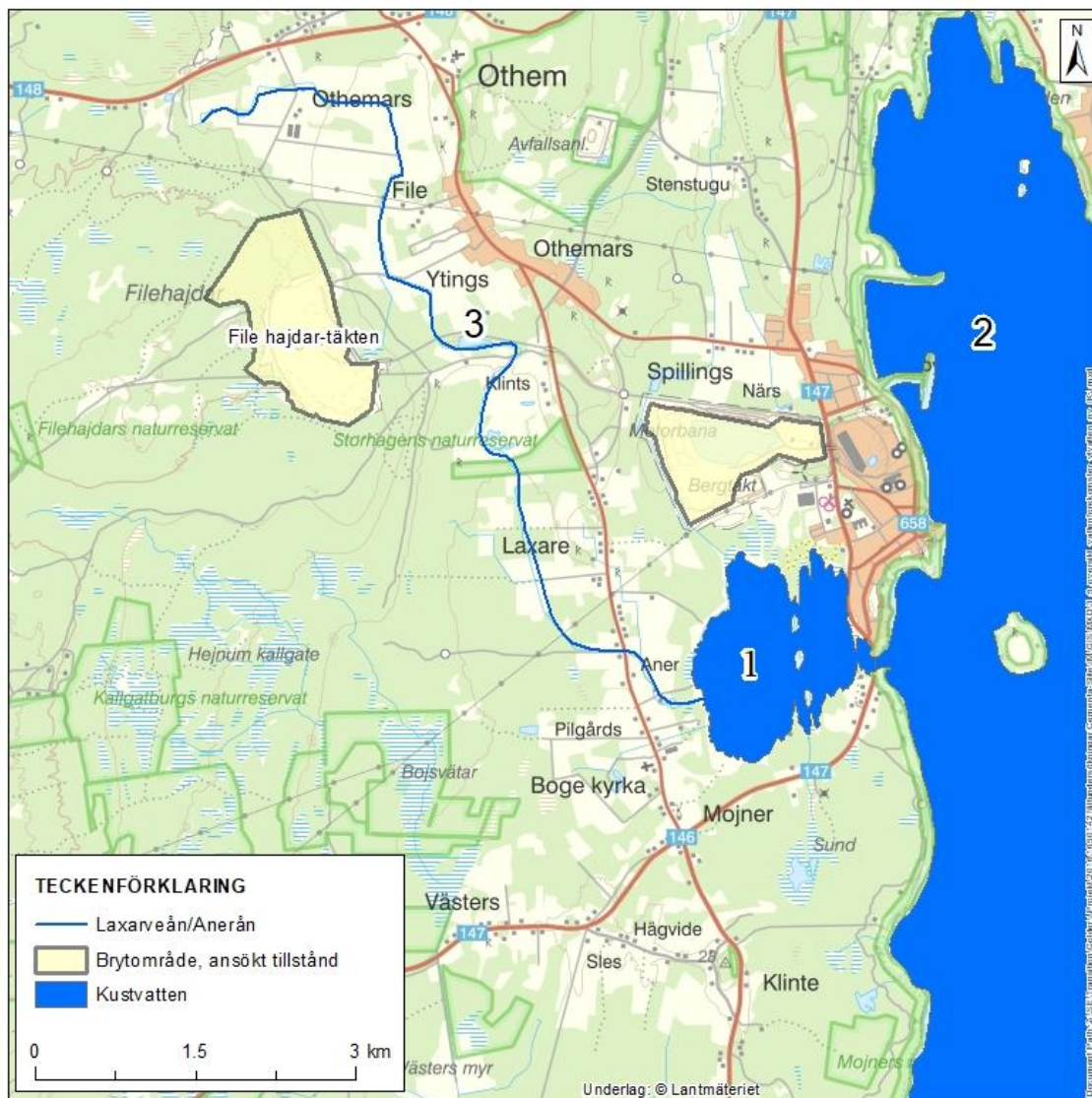
Norra Gotland-Stenkyrka (SE640915-166638) har en bedömd uttagsmöjlighet på 6 000–20 000 l/h. Den kvantitativa statusen bedöms vara god. Det finns inga indikationer på förhöjda halter av klorid, sulfat eller konduktivitet och det har inte rapporterats några större problem med möjligt vattenuttag inom förekomsten. Den kemiska statusen bedöms också vara god.

Norra Gotland-Kappelshamn (SE641632-167611) har en bedömd uttagsmöjlighet på 6 000–20 000 l/h. Den kvantitativa och kemiska statusen bedöms vara god, även om det finns mindre indikationer på saltvatteninträngning och därmed förhöjda kloridhalter.

Både Tingstädeåsen (SE640538-715810) och Lärbro (SE640933-726069) bedöms uppnå god kvantitativ och kemisk status. Det finns inga indikationer på kvantitativa problem inom förekomsterna. Utagsmöjligheten från dessa två magasin har inte bedömts.

3.4 YTVATTENFÖREKOMSTER

Utöver Tingstäde träsk (som beskrivs i avsnitt 3.2.2 ovan) finns ytterligare några ytvattenförekomster i närområdet. Öster om File hajdar-täkten rinner vattenförekomsten Laxarveån/Anerån (SE640357-167483) som längre nedströms mynnar i vattenförekomsten Bogevisken (SE640066-167754). Utanför Bogevisken ligger vattenförekomsten Östra Gotlands norra kustvatten (SE574170-190001), se Figur 12.



Figur 12. Ytvatten i närområdet: 1. Bogevisken, 2. Östra Gotlands norra kustvatten, 3. Laxarveån/Anerån.

För ytterligare information om dessa ytvattenförekomster, se ansökans bilaga B6.

3.5 DEPONIER

Längs södra kanten av Västra brottet finns tre sluttäckta deponier; Västra deponin, Östra deponin och en kommunal deponi. Västra och Östra deponierna ligger i utsprängda fickor i kalkstensbergrunden i direkt anslutning till Västra brottet. Mellan dessa deponier ligger den kommunala deponin på ursprunglig marknivå. Innehållet i deponierna och risken för spridning av föreningar från dem till den framtida täktsjön i Västra brottet beskrivs samlat i ansökans bilaga B4.

4 FÄLTUNDERSÖKNINGAR – RESULTAT OCH ANALYS

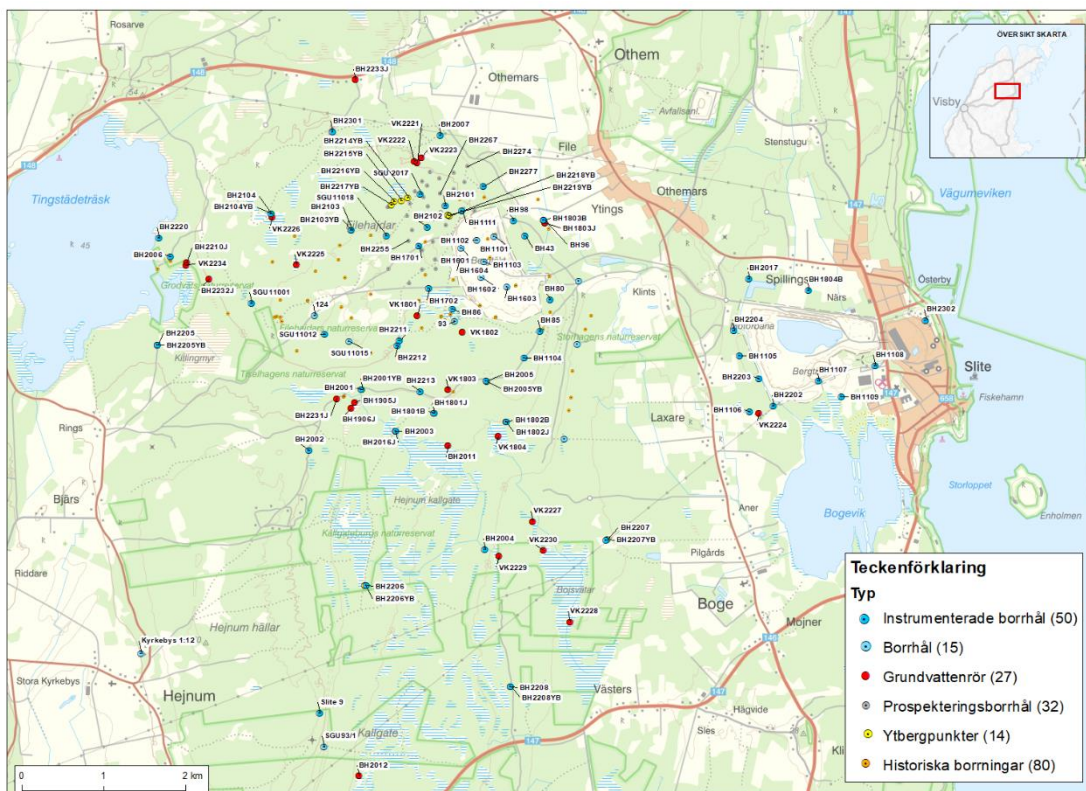
4.1 INLEDNING

File hajdar-området är ett av Sveriges geologiskt och hydrogeologiskt mest välundersökta områden. Ett stort antal undersökningar har gjorts i eller omkring området under det senaste dryga halvsekle. En fördel med geologisk och hydrogeologisk data är att den inte blir inaktuell, utan ny kunskap adderas till vad som tidigare var känt. Å andra sidan är naturen alltid komplex. Det går inte att beskriva varje sandkorn eller spricka i berget. Istället arbetar man med en typ av systemanalys som brukar benämnas konceptuell geologisk/hydrogeologisk modell. Den konceptuella modellen beskriver de förutsättningar som gör att grundvattennivåer och grundvattenflöden förekommer som de gör under olika förhållanden, vilket bl.a. inkluderar topografi, geologi och grundvattenbildning. En ytterligare beskrivning av vad som kan förväntas ingå i en konceptuell modell ger SGU i sin handledning för "Bedömning av influensområde avseende grundvattenbortledning" (SGU, 2019). En mer ingående beskrivning finns också i den omfattande och aktuella boken inom svensk hydrogeologi vid namn *Grundvattenboken* (Sparrenbom & Jeppson, 2022). En jämförelse kommer att visa att det samlade kunskapsunderlaget i detta fall är avsevärt mycket större än vad som är brukligt.

De undersökningar som utförs i området bidrar alla till att utveckla och förfinna den konceptuella modellen eller med andra ord: förståelsen för det hydrogeologiska systemet. Varje nytt borrhål som har borrats har placerats på en plats där en kunskapslucka har identifierats och ett behov av platsspecifik kunskap har förelegat. Varje ny borrhålsundersökning eller applicerad ny undersökningsteknik har valts för att ge en kompletterande information, för att belysa en ny aspekt eller för att ge kompletterande bevis för en indikation från en annan typ av undersökning. Med tiden blir därmed de avvikelser en undersökning kan ge på den konceptuella modellen mindre och mindre.

Detta kapitel avser beskriva de undersökningar som gjorts i området. Samtliga dessa undersökningar har bidragit till den konceptuella modell som därefter beskrivs i kapitel 5. Först listas de fältundersökningar som har utförts i området och som ligger till grund för denna rapport. Därefter följer en beskrivning av de tidigaste undersökningarna i området. Sedan beskrivs undersökningar gjorda för ett visst värde eller företeelse, följt av undersökningar med bredare syfte strukturerade efter undersökningstyp. I Bilaga 2 finns en mer detaljerad beskrivning av tidigare ej publicerade fältundersökningar genomförda under perioden 2022–2023.

De undersökningshål som finns i området visas i Figur 13 nedan. Alla borrhål där hydrauliska tester eller nivåmätningar *inte* gjorts efter 2016 redovisas som historiska borrhål oavsett om dessa fortfarande är brukbara eller ej.



Figur 13. Översikt samtliga undersökningshål, redovisas även i större format i Bilaga 1.

4.2 UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR

Nedan listas samtliga undersökningar som har genomförts inom aktuellt område och som nämns i föreliggande rapport.

SGU började med undersökningar 1922 och har genomfört bl.a. följande undersökningar till dags dato:

- Kartlagt vattendjup och bottensediment i Tingstade Träsk
- Borrat över 50 borrhål
- Strukturgeologisk kartläggning
- Provpumpningar
- Slugtester
- Kartlagt djupt saltgrundvatten
- SkyTEM-undersökningar
- Borrhålsloggningar
- Undersökt infiltrationsmöjligheter för vattenproduktion
- Jordartskarterat området i skala 1:25 000 (tidigare 1:100 000).

Under 1950-talet genomförde **VIAK** följande undersökningar:

- Provpumpning i File hajdar vattentäkt.

Golder senare sammanslaget med **WSP** har sedan 1990 och till dags dato genomfört följande geologiska och hydrogeologiska undersökningar på uppdrag av Heidelberg Materials:

- Strukturgeologisk kartering
- Provpumpningar
- Slugtester

- Manschetttester
- Resistivitetsloggar.
- Flerhålsprovpumpningar för att undersöka bergets heterogenitet och hydrauliska konduktivitet
- Enhålspumptestar för att undersöka bergets hydrauliska konduktivitet
- Borrhålsloggning
 - Spinner-flödesloggning för identifiering av vattenförande strukturer och bergets hydrauliska konduktivitet
 - Mätning av elektrisk konduktivitet och temperatur för att mäta salthalter på olika djup
 - Optisk borrhålsfilmning för identifiering av kaviteter och markanta strukturer
 - Akustisk borrhålsfilmning för identifiering av kaviteter och markanta strukturer
 - Naturlig Gamma-loggning för att karakterisera berget
- Manschetttester för att identifiera vattenförande strukturer och bergets hydrauliska konduktivitet
- Slugttester för att undersöka markens (jord och berg) hydrauliska konduktivitet
- Infiltrationsförsök för att bekräfta den konceptuella modellen och bergets hydrauliska konduktivitet
- Spårämnesförsök för att undersöka flödesvägar i berget och bergets effektiva porositet
- Resistivitetsmätningar för att undersöka anomalier i berget genom:
 - Resistivitet och Inducerad polarisation profiler
 - tTEM-undersökningar
- Georadarmätningar för att undersöka anomalier i berget (ingen användbar data)
- Ridåinjektering längs med Västra brottets västra kant (1,5 km) för att täta sprickor i berget
 - Vattenförlustmätningar för kontroll av ridåinjektering och hydraulisk konduktivitet
- Ridåinjektering längs två 50 m-sträckor vid File hajdar-täkten
 - Vattenförlustmätningar för kontroll av ridåinjektering och hydraulisk konduktivitet
- Jordprovtagning för att undersöka strandvallarnas lagringsförmåga, hydraulisk konduktivitet och porositet
- Ytvattenflödesmätningar med salt för att kalibrera ytvattenflöde i den numeriska modellen
- Kartläggning av vattentemperatur för att identifiera ursprunget av utströmmande vatten genom:
 - Loggermätningar
 - Mätningar med IR-utrustad drönare
- Vattenprovtagning för karakterisering av vattnets ursprung
- Vattenprovtagning av stabila isotoper för karakterisering av vattnets ursprung
- Strukturgeologisk kartering och lineament-tolkning för att kartlägga strukturer i bergvägg
- Grundvattenloggar i jord (24 st) för att övervaka grundvattennivåer i jord och därigenom bekräfta den konceptuella förståelsen

- Grundvattenloggrar i berg (63 st) för att övervaka grundvattennivåer i berg och därigenom bekräfta den konceptuella förståelsen
- Permanentmanschetter för mätning av grundvattentryck i två sektioner av borrhål (8 st)
- Ringinfiltrometertester för att utvärdera hydraulisk konduktivitet i jordarten bleke
- Kartläggning av utströmmande grundvatten längs Grodväts strandkant mot Tingstäde träsk
- Sonderingsborrat för undersökning av jordmäktighet i strandvall
- Provtagning av bottensediment i Tingstäde träsk för att undersöka den hydrauliska konduktiviteten genom:
 - Constant rate of Strain-försök (CRS)
- Slagsondering
- Spetstrycksondering
- Jord-bergsondering för att undersöka djup till berg
- Skruvprovtagning.

Heidelberg Materials har även anlitat andra externa aktörer för andra undersökningar, varav flera har relevans även för den hydrogeologiska utredningen. Dessa undersökningar redovisas närmare i bilaga B5, B6, B7 och B8 till ansökan.

4.3 SAMMANFATTNING AV TIDIGA UNDERSÖKNINGAR

Redan 1922 kartlades bottensedimenten och vattendjupet i Tingstäde träsk av G. Lundkvist (1940) på SGU. Heidelberg Materials har år 2016 och 2023 låtit upprepa dessa undersökningar i syfte att identifiera eventuella förändringar, se vidare i kapitel 4.12 nedan.

Under 40- och 50-talen borrades ett antal borrhål på File hajdar, främst i prospekterings syfte för mineral och vattentäkt.

Tullström (1955) skrev rapporten *Hydrogeologiska förhållanden inom Slite köping på Gotland* för SGU 1954, vilket bl.a. inkluderade en kartläggning av djup till saltgrundvatten runt Slite. Grundvattnet i de havsnära delarna av Gotland har varit salt åtminstone sedan Littorinahavet täckte området för ca 7000 år sedan.

Den närbelägna kommunala vattentäkten anlades i slutet av 50- och början av 60-talet. En rad undersökningar har genomförts i samband med anläggandet av denna vattentäkt och inför en eventuell utökning av densamma (VIK, 1974 & 1981). Dessa undersökningar har bidragit till den hydrogeologiska förståelsen för området. Bl.a. identifierades i genomförda provpumpningar en N-S-zon, benämnd "krosszonen", med förhöjd hydraulisk konduktivitet i vilken uttagsbrunnarna är placerade. Utifrån nya geofysiska undersökningar (ex. Geovista 2021; Dahlqvist et al., 2015) kan bildningen som krosszon ifrågasättas, men det hydrauliska beteendet stämmer överens med mer sentida tester, se vidare i kapitel 4.5.1 nedan. Från vattentäkten har även erhållits pumpflöden, nivåmätningar och uppmätta kloridhalter. För flöden och nivåer finns kontinuerliga månadsvisa mätserier från 90-talet tills dags dato samt punktvisa mätningar längre tillbaka. Det finns dessvärre inga serier med vattennivåmätningar från tiden före vattentäktens anläggande.

SGU borrade främst under 1970-talet över 50 borrhål i området. SGU genomförde i samband med detta även en strukturgeologisk kartläggning, provpumpningar och slugttester (SGU, 1977). Under framförallt 70- och 80-talen mättes grundvattennivåer manuellt med två eller fyra veckors frekvens i ett flertal borrhål på File hajdar och Hejnum hållar (SGU, u.å.b).

I samband med Heidelberg Materials tillståndsansökningar har kunskapsunderlaget utökats med ytterligare undersökningar. Inför 1990 års tillståndsansökan genomförde Golder Associates AB

(Golder, 1991) en strukturgeologisk kartering, provpumpningar, slugteter, manschetter och resistivitetsloggningar. Den strukturgeologiska karteringen bedöms alltså vara relevant för att beskriva vattenförande lager i märgelstenen. Lägen och uppmätta transmissiviteter för zoner har jämförts och lagts till de motsvarande mätresultat som tagits fram på senare år (se avsnitt 4.5.3).

4.4 GRUNDVATTENNIVÅER

Under 2014 installerades sex mätstationer för kontinuerlig grundvattennivåövervakning. Två av mätstationerna installerades vid Västra brottet och fyra installerades nära File hajdar-täkten. Data från mätstationerna utgör de längsta högupplösta mätserierna i området.

I dagsläget mäts nivåerna kontinuerligt i 87 borrhål (berg) eller grundvattenrör (jord) inom undersökningsområdet, varav 24 grundvattenrör där 10 är installerade i mäktiga jordlager (BHXXXJ) och 14 i tunna jordlager inom våtmarksområden (VKXXX), se Figur 13. Merparten av observationspunkterna avser grundvatten i berg och det är även för denna observationstyp som längst tidsserier finns att tillgå. I de äldsta observationspunkterna startade mätningarna i slutet av 1960-talet och har fortgått fram till idag, om än inte helt kontinuerligt. Under hela utredningsperioden har nya borrhål tillkommit, både i jord och i berg, där grundvattennivåer mäts kontinuerligt. Tryckgivare är i dagsläget (augusti 2023) installerade i 79 observationsbrunnar. Åtta av dessa är permanent avmanschetterade borrhål där mätningar görs med två tryckgivare, en i övre magasin och en i undre magasin. Tryckgivarna mäter kontinuerligt grundvattennivåer. Således utförs kontinuerliga mätningar över en längre tidsperiod i ca 87 punkter. Utöver detta har grundvattennivåer även mätts manuellt i samband med fältundersökningar.

Under våren 2021 genomfördes en studie av möjligheterna att beräkna grundvattennivåer för de tidsperioder då det saknas bra uppmätta tidsserier. Idén var att utifrån befintliga tidsserier och t.ex. meteorologiska data kunna beräkna grundvattennivåerna vid olika tillfällen, för att sedan i ett nästa steg kunna bedöma historisk påverkan från t.ex. täktverksamheten. Arbetet gjordes som ett examensarbete för masterexamen för två studenter på Chalmers tekniska högskola (Ali & Patel, 2021). Studien visar att de exceptionella nivåfluktuationerna på File hajdar gör tidsserierna ytterligt känsliga för mätfrekvensen. I dagsläget går det därmed inte att göra den här typen av modellerade nivåer med en tillräcklig noggrannhet för att göra relevanta studier av eventuell påverkan. I framtiden (om ca 5–7 år), när de högupplösta tidsserierna är längre, bör det dock vara möjligt.

All nivådata samlas i en databas. För samtliga nivåmätningar, se Bilaga 2.G. Övergripande tolkning av resultaten från nivåmätningarna presenteras i kapitel 5.4.3.

4.5 UNDERSÖKNINGAR FÖR ATT FÖRFINA DEN KONCEPTUELLA MODELLEN

Sedan 2016 har Heidelberg Materials årligen låtit utföra omfattande fältundersökningar. Undersökningarna har syftat till att verifiera och förfinas den upprättade konceptuella modellen och förståelsen av det studerade hydrogeologiska systemet. Undersökningar har genomförts på nya platser och baserat på nya typer av frågeställningar som har väckts av antingen Heidelberg Materials självt eller remissmyndigheter i samband med tidigare tillståndsprövningar och samråd. Flera undersökningar görs med många syften och är nedan beskrivna med andra huvudsyften, men alla undersökningar bidrar till att förfinas den konceptuella modellen. Ett antal av de undersökningar som gjorts det gångna året kan dock beskrivas som att först och främst bidra till den konceptuella modellen och beskrivs därmed under detta kapitel.

Initialt fokuserades arbetet på att undersöka bergets genomsläpplighet (hydrauliska konduktivitet), hur denna varierar mellan olika områden och på olika djup i berget. Stor vikt lades vid kontakten med den kommunala vattentäkten. Provpumpning genomfördes under längre tid i borrhål i File hajdar-täkten, med observationer i ett stort antal omgivande borrhål i täkten samt brunnar i den kommunala vattentäkten. Grundvattennivåer mättes i ett stort antal borrhål och

tryckgivare installerades för högupplösta nivåmätningar i fler borrhål. I flera äldre borrhål utfördes manschetttester, enhålspumptester/ infiltrationstester, borrhålsfilmning samt geofysisk loggning (Akustisk televiwer [ATV], temp, resistivitet, NGAM). Vidare gjordes flera mindre studier för specifika frågeställningar, t.ex. bedömdes grundvattenbildning från ytvattendike till Anerån och platser med utströmmande grundvatten karterades.

De sammantagna resultaten från manschetttesterna och de olika typerna av borrhålsfilmning visade tydligt att den huvudsakliga delen av grundvattenströmningen sker i ett fåtal distinkta lager/sprickor. Undersökningarna bekräftade således den tidigare bilden av att bergets transmissivitet är knutet till ett antal subhorisontella (nästan horisontella) lager som särskiljs av relativt tätt berg. Data från den akustiska borrhålsfilmningen användes för att förfina nivåangivelsen på de transmissiva lager som identifierades med manschetttester.

Undersökningarna visade att den horisontella strömningen är koncentrerad till horisontella vattenförande lager och att den vertikala strömningen är koncentrerad till enstaka vertikala sprickor.

Undersökningarna visade också att File hajdar-täkten, med dess dåvarande utformning, hade en obefintlig påverkan på grundvattennivåerna på större avstånd än några hundratal meter från täkten. Pumpstesterna visade på högre transmissiviteter och fler vattenförande strukturer åt söder/sydöst än mot norr/nordväst relativt File hajdar-täkten. Den högre transmissiviteten i söder/sydöst av File hajdar-täkten antogs bero på en framträdande revstruktur i detta område.

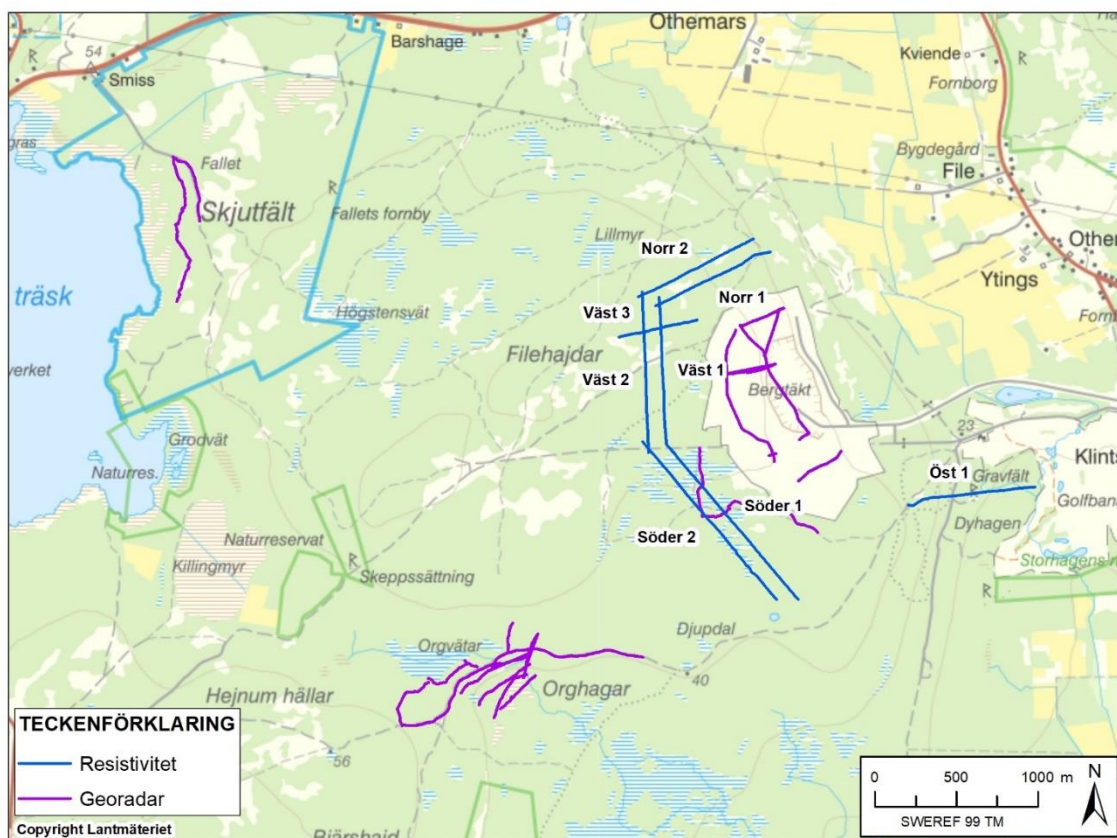
I täkten identifierades ett vattenförande sammanhängande lager i mörkstenen med kombinationen ATV- och manschettundersökningar (Golder, 2017). Det identifierade lagret ansågs vara kopplat till ovan nämnda revstruktur och inte till de större regionala vattenförande lagren som finns i området. Däremot bedömdes det identifierade lagret stå i kontakt med den så kallade "krosszonen" i öster vari kommunens dricksvattenbrunnar är placerade. I de borrhål som undersöktes med ATV kunde det tillsammans med borrobbservationer identifieras flertalet vattenförande sprickor.

4.5.1 Geofysiska undersökningar

Under perioden 2015–2017 genomförde SGU SkyTEM-undersökningar (helikopterburna geofysiska undersökningar som mäter markens resistivitet) över File hajdar-området med syftet att upprätta en tredimensionell geologisk modell ned till ca 200 m djup (Dahlqvist et al., 2015; 2017a). Undersökningarna genomfördes i två omgångar. I samband med detta gjordes även geofysiska loggningar (ATV-loggning, NGAM) i borrhål nära File hajdar-täkten i kalibreringssyfte. Resultaten från dessa undersökningar har varit värdefulla för att avgränsa revkalksten och mörksten.

I samband med SGU:s SkyTEM-undersökningar genomförde både P.-G Alm (2016) och GeoVista AB (2016; 2017) geofysiska borrhålsloggningar med metoderna televiwer, ATV och temperatur (vattentemperatur) och i den senare undersökningen av GeoVista AB loggades även elektrisk konduktivitet i borrhålen. Borrhålsloggningarna utfördes i borrhål i och omkring File hajdar-täkten. Syftet med borrhålsloggningen var att få en bild av borrhålsväggen och lokalisera eventuella sprickor samt att kalibrera den tredimensionella geologiska modellen. Temperatur- och konduktivitetmätningarna genomfördes sedan för att indikera eventuella vattenförande sprickor. Datakvaliteten på mätningarna var i regel god och flertalet vattenförande misstänka/troliga sprickor av varierande storlek identifierades.

För att undersöka förekomsten av mer vattenförande strukturer i berget så som karst, genomfördes under september och november 2021 geofysiska undersökningar med markradar och resistivitet. Inom resistivitetsundersökningen mättes åtta resistivitetsprofiler på sammanlagt 8 km i området kring File hajdar-täkten, se Figur 14.



Figur 14. Profiler för resistivitet och georadar från undersökningen 2021.

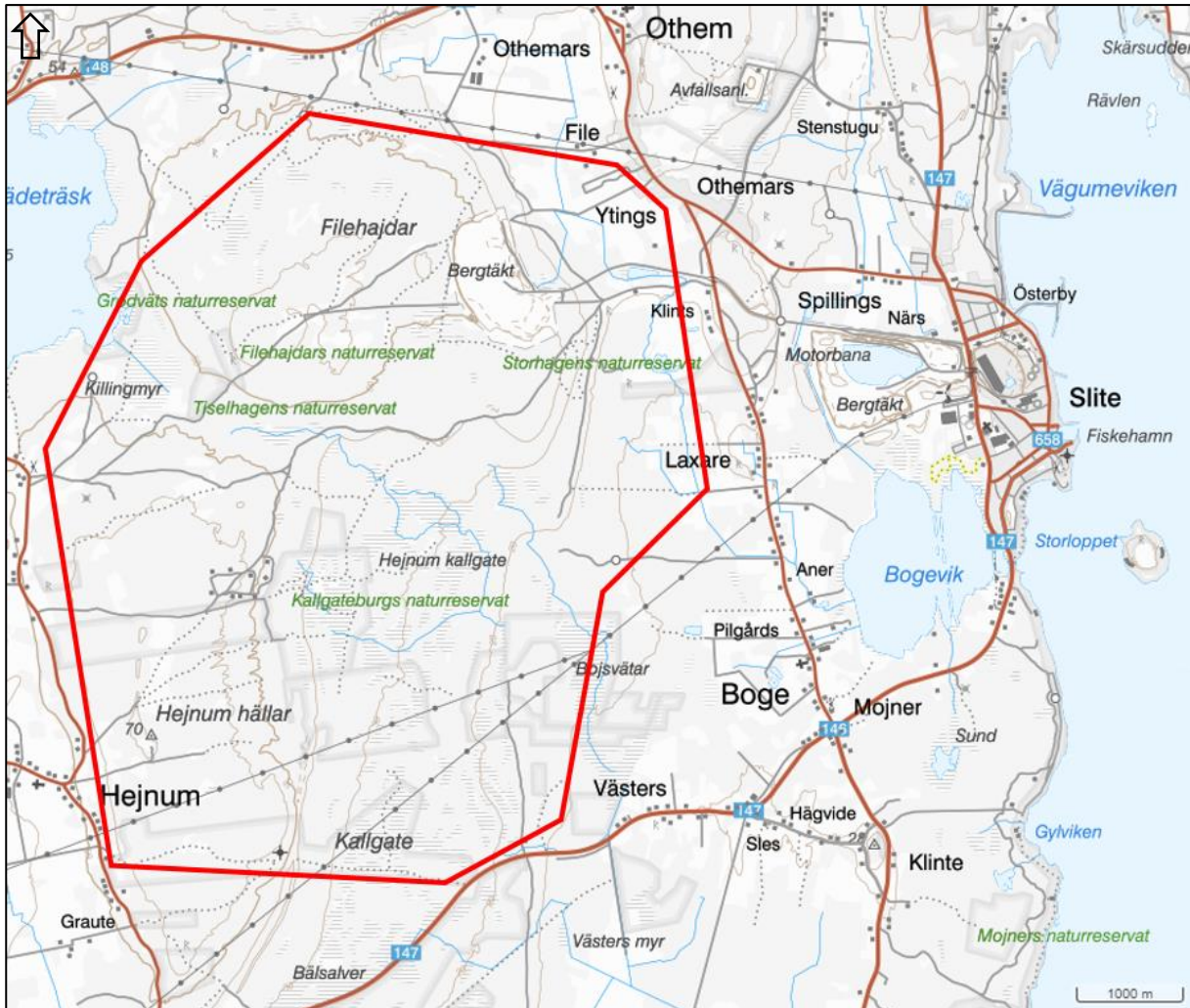
Data erhållen från markradarundersökningarna var av så pass dålig kvalitet att de inte gick att utvärdera. Resistivitetsmodellerna är av mycket god kvalitet, har lågt anpassningsfel och har förhållandevis god samstämmighet i parallella profiler samt i skärningspunkter i korsande profiler. Modellerna är således geologiskt trovärdiga.

Resistivitetsundersökningen visade att berggrunden i den norra samt i den större delen av den västra profilen är mer högresistiv jämfört med berggrunden söder om File hajdar-täkten. Den relativt höga resistiviteten kan bero på att denna del av File hajdar är torrare och/eller innehåller lägre halter av lermineral, dvs. att berggrunden här sannolikt utgörs av revkalksten.

I de norra och västra profilerna återfanns en eller flera mer ytliga, horisontella/subhorisontella strukturer från markytan ned till ca 20–30 m djup, ofta med en mäktighet på ca 10–15 m. Denna typ av struktur sammanfaller ofta vid markytan med topografiska lågpunkter. En av dessa strukturer blev undersökt med ett borrhål i den norra profilen och konstaterades sammanfalla med ett lager med högre lerinnehåll.

Fem till sex tydliga lågresistiva anomalier identifierades i den norra, västra och östra profilen. Vidare identifierades ett flertal mindre distinkta anomalier i de södra profilerna. Den tydligaste av dessa anomalier undersöktes vidare med en tvärprofil (resistivitet) och ett borrhål. Anomalin sammanföll med en ökad halt av ler-, salt- och vattenhalt i borrhålet. Utifrån resistivitetsmodellerna och borrhånsresultaten drogs slutsatsen att denna struktur inte utgör karst, utan snarare mörk ler med förhöjda ler- och salthalter. Anomalin kopplades till ett mot väster/nordväst stupande lager av mörk lersten som identifierats i SGU:s SkyTEM-undersökningar (Dahlqvist et al., 2017). Övriga identifierade anomalier i området bedöms även de främst vara kopplade till variationer i lerinnehållet i kalkstenen. I den östra profilen identifierades tre lågresistiva anomalier där en av dessa sammanföll med läget för den kommunala vattentäkten. Alla eller någon av dessa tre anomalier bedömdes vara den geologiska struktur som i äldre undersökningar (bl.a. Viak, 1974) benämnts krosszonen.

För att få en mer detaljerad tolkning av utbredningen av framför allt revkalksten och mägersten, men även andra kalkstensformationer, genomfördes under perioden oktober och november 2022 geofysiska undersökningar med metoden tTEM vid och omkring File hajdar. Med tTEM-metoden mäts markens elektriska motstånd (resistivitet). Data samlas in genom att en sändare och en mottagningsantenn dras bakom en fyrhjulig. För att undvika risken för markskador begränsades körningen till redan befintliga stigar inom det undersökta området, se Figur 15.



Figur 15. Ungefärligt område undersökt med tTEM-mätningar inom röd markering.

Markens resistivitet kan tolkas om till information om olika geologiska lager och enheter. Resistivitetsdata som samlades in med tTEM har tolkats utifrån SGU:s resistivitetsintervall för olika geologiska material på Gotland (Dahlqvist et al., 2015).

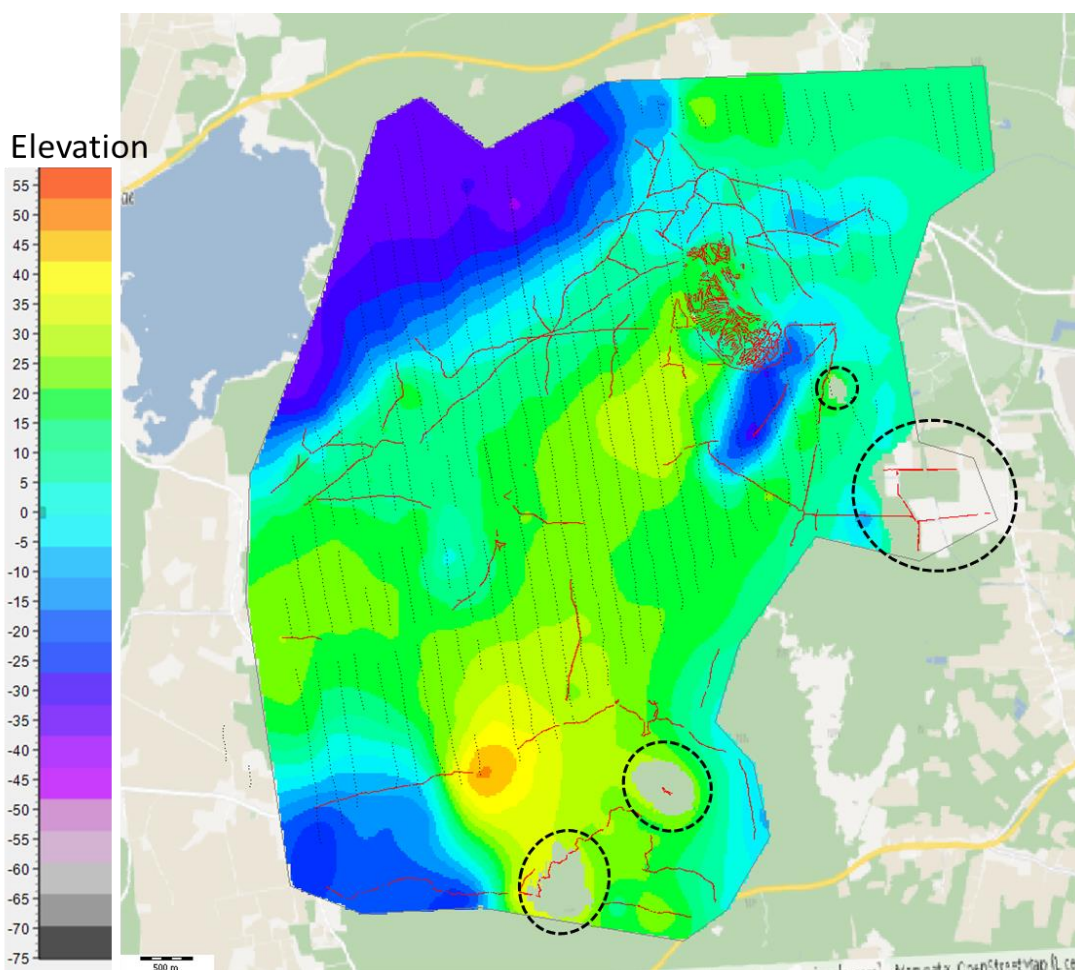
Den erhållna tTEM-datan har nyttjats för att tolka om och höja upplösningen på SGU:s rådata från tidigare SkyTEM-undersökningar på Gotland, för att därigenom få en både högupplöst och yttäckande modell. Den insamlade tTEM-datan har tolkats geologiskt genom korrelation mot annan tillgänglig data från området såsom prospekteringsborrningsdata (från 1993 och senare), transmissivitetsloggar i borrhål, Spinner-flödesloggar och SGU:s SkyTEM-data. All tillgänglig data tolkades i GeoScene 3D.

Utifrån samtolkningen av ovan presenterade data har en mer detaljerad modell över områdets geologi framställts, bland annat har lagergränser/gränsskikt och anomalier kunnat tolkas mer detaljerat i markens översta ca 60 till 80 m jämfört med SGU:s tidigare tolkning. Med tTEM-datan kan revkropparna eller den revartade kalkstenen särskiljas från (lagrad) kalksten vilken har ett något högre lerinnehåll. Även mägerstenen framträder tydligt. Det är däremot svårt att bara utifrån resistiviteten särskilja olika undergrupper av kalksten, vilken kan vara horisontellt

lagrad men också ha en mer oregelbunden struktur. Uppdelning mellan undergrupper, se Figur 53 i kapitel 5.1.1, får i stället göras baserat på borrhälor eller hydrauliskt beteende.

Högst upp i lagerföljden förekommer revkalkstenen. På vissa ställen har revkroppar tyngt ned och skapat fördjupningar i de underliggande lagren av mörkelsten och kalksten. Områden med dessa fördjupningar är hydrogeologiskt intressanta då genomsläpligheten, som en följd av den ojämna kompaktionen, kan vara relativt förhöjd. En av dessa strukturer har identifierats i det område som i äldre undersökningar, bl.a. Viak (1974), benämns "krosszonen" (Profil WE 2 i Bilaga 4). De lågresistiva anomalierna som identifierades i den östra profilen i resistivitetsundersökningen från 2021 (Geovista, 2021) återfanns även de inom den så kallade "krosszonen" och tros utgöras av sprickbildningar längst kanten av en sådan fördjupning i underliggande mörkelsten.

Vidare har genomförda undersökningar bidragit till att i 3D definiera gränsskiktet mellan mörkelstenen och den ovanliggande kalkstenen. Efter genomförandet av de geofysiska undersökningarna fördjupades två brunnar (BH1701 och BH1702) för att verifiera läget för detta gränsskikt som i området utgör revets underyta. Detta lager är hydrogeologiskt betydelsefullt då det utgör en zon med hög eller rent av högst genomsläplighet i den undersökta bergvolymen utifrån genomförda hydraultester. Det har även betydelse då det i anslutning till revformer avviker från den annars mycket regelbundna orienteringen som karakteriserar den lagrade kalk- och mörkelstenen. Överytan av mörkelstenen förekommer på nivån +50 m som högst (Hejnum hållar) och -35 m som lägst (öster om Tingstäde träsk), vilket illustreras i Figur 16.



Figur 16. Modellerad lageryta för överyta av övre mörkellager. tTEM-profiler visas med röda linjer och SkyTEM-sonderingar med svarta prickar. Inom områden med streckade cirkel förekommer inte det tolkade lagret.

Inga anomalier som skulle kunna tyda på större karstsystem har observerats i tTEM-datan. En utförligare metodbeskrivning och samtliga resultat från tTEM-undersökningen återfinns i sin helhet i Bilaga 4.

4.5.2 Kartläggning av geologiska lineament

Under juni 2020 utförde Golder översiktliga fältundersökningar för att bedöma strukturgeologin i området kring File hajdar, undersökningen kompletterades under 2022 med lineamentstolkningar på högupplösta flygfoton (Bilaga 6).

Fältundersökningen som genomfördes under juni 2020 syftade till att utreda förekomst av vertikala vattenförande strukturer inom dåvarande sökt brytområde vid File hajdar-täkten (nuvarande brytområde) samt om det finns en dominerande riktning på mindre sprickor och karststrukturer som skulle kunna leda till påverkan på nivåer i Tingstäde träsk eller Natura 2000-områdena i söder. Sammanfattningsvis visade fältundersökningarna från 2020 följande:

- I File hajdar-täkten och kring verksamhetsområdet på File hajdar påträffades två dominerande sprickriktningar; nord-nordvästliga (330°) och ost-nordostliga (70°) samt en nord-västlig (ca 280°) lineamentsriktning vilken överensstämmer med det större tektoniska mönstret på Gotland. I den västra delen av File hajdar-täkten är nord-nordvästliga sprickriktningar dominerande. Om man rör sig nordväst till norr om täkten dominerar istället ost-nordostliga sprickriktningar.
- Karstifieringen är mycket svag eller obefintlig inom verksamhetsområdet.
- Det finns inte några indikationer på tydlig hydraulisk koppling mellan det i File hajdar-täkten observerade spricksystemet och det lineament som går söder om täkten.
- De inläckage av grundvatten som observerats i File hajdar-täkten kan delvis knytas till enskilda kalkstenslager eller till några fåtal brantstående sprickor, då främst i nord-nordvästlig riktning.

Lineamentstolkningarna som genomfördes under 2022 syftade till att undersöka förekomsten av större sammanhängande spricksystem mellan File hajdar-täkten och Tingstäde träsk samt i vad mån det gick identifiera lineament inom Natura 2000-områdena i söder. Tolkningen visade att riktning och förekomst av observerade lineament överensstämmer väl med sprickorna som observerats i File hajdar-täkten under fältkarteringen 2020. Tolkningen ger i större skala (jämfört med fältkarteringen) dominerande sprickriktningar. Lineamentstolkningen visade sammanfattningsvis följande:

- Det förekommer tre primära sprickgrupper och en mindre sprickgrupp:
 - Sprickgrupper med strykning (orientering) *syd-sydost till nord-nordväst (330–150°)*; dessa sprickor uppvisar en högre sprickfrekvens än övriga grupper men har lägre (kortare) observerade spricklängder. Dessa sprickor påvisades även under fältkarteringen i File hajdar-täkten (i fältkarteringen anges riktningen som nord-nordvästlig), med en vertikal stupning nära 90°. Sprickor med denna strykning dominerar i den västra delen av File hajdar-täkten och har även observerats väster om File hajdar-täkten.
 - Sprickgrupper med orientering *ost-sydost till väst-nordväst (290–110°)*; riktningen är oftast förekommande bland sprickor med observerad längd på över 40 m. Fältkarteringen visade att sprickor med denna strykning även förekommer i File hajdar-täkten (i fältkarteringen anges riktningen som nordvästlig), med en vertikal stupning nära 90°.
 - Sprickgrupper med orientering *ost-nordost till väst-sydväst (250–070°)*; fältkarteringen påträffade inga sprickor med denna strykning i File hajdar-täkten,

men observationer av sprickor med denna riktning gjordes i området nordväst samt norr om tåkten (i fältkarteringen anges riktningen som ost-nordostlig).

- Sprickgrupper med orientering *nordost till sydväst*; mindre sprickgrupp som kan vara en del av den *ONO–VSV*-strykande gruppen.
- Inga sprickor inom Natura 2000-områden har observerats på grund av den låga blottningsgraden på hållar. De få linjära strukturer som förekommer bedöms korrelera till antropogen verksamhet eller strandvallar.
- Riktning och förekomst av de observerade lineamenten överensstämmer väl med sprickorna som observerats i File hajdar-tåkten. Inga tecken har observerats på större sammanhängande spricksystem mellan Tingstäde träsk och File hajdar-tåkten.

De tre (*SSO–NNV*, *OSO–VNV* och *ONO–VSV*) identifierade sprickriktningarna beaktas för anisotropier i den numeriska modellen. Metoden och resultatet för undersökningarna redovisas i sin helhet i Bilaga 6.

4.5.3 Spinner-flödesloggning

Spinner-flödesloggning är en borrhålsundersökning där man sänker ner en sond med en impeller som mäter vattnets rörelse i borrhålet. Med denna metod kan man identifiera den hydrauliska gradienten i borrhålet och identifiera vattenförande strukturer på en noggrann djupnivå och även kvantifiera transmissiviteten för identifierade strukturer. En mer noggrann beskrivning av metoden och resultat återfinns i Bilaga 2.

I undersökningsområdet har totalt 47 borrhål undersökts med spinner-flödesloggning. Syftet med dessa undersökningar har varit att hitta vattenförande strukturer, för att verifiera antaganden i den konceptuella modellen samt bekräfta eller dementera resultat av geofysiska undersökningar.

Genom en sammantagen bedömning av alla borrhålsmätningar av typen spinner-flödesloggning i borrhål väster om File hajdar-tåkten har antaganden i den konceptuella modellen verifierats (inkluderar även mätningar från Golder 2020c, WSP Golder 2022). Ett sådant antagande var att väster om File hajdar-tåkten, i revkalkstenen, upphör de tydliga kontinuerliga vattenförande lagren som kan observeras på stora avstånd inom andra delar av undersökningsområdet. I stället förekommer mer oregelbundna sprickor som är mindre genomsläppliga. Det har även gjorts en geometrisk korrelation av spinner-flödesloggningsdata mellan lutning av sub-horizontella lager mellan modellen och verkligheten samt uppmätta lägen för flödesanomalier (Bilaga 2).

Under 2023 har spinner-flödesloggning använts för att studera förutsättningar inför ridåinjekteringstestet vid File hajdar-tåkten. Resultatet av ridåinjekteringstestet beskrivs i större detalj i kapitel 4.9.1.

Vid ridåinjektering i södra delarna av File hajdar-tåkten (testområde 1), identifierades ett tydligt vattenförande lager på ca 50 m.u.my i samtliga sex injekteringsborrhål. Detta vattenförande lager sammanfaller väl med vad tolkningen av geofysikdata av tTEM identifierar som övergången mellan revkalksten och märkesten. I yttligare sektioner i borrhålen i område 1 var det mer heterogena strukturer i borrhålen. Även vid ridåinjektering i västra delen av File hajdar-tåkten (testområde 2), identifierades ett sammanhängande genomsläppligt lager på ca 60 m.u.my. I detta område var dock det genomsläppliga lagret inte lika distinkt som i testområde 1.

4.5.4 Hydrauliska tester i ytligt berg

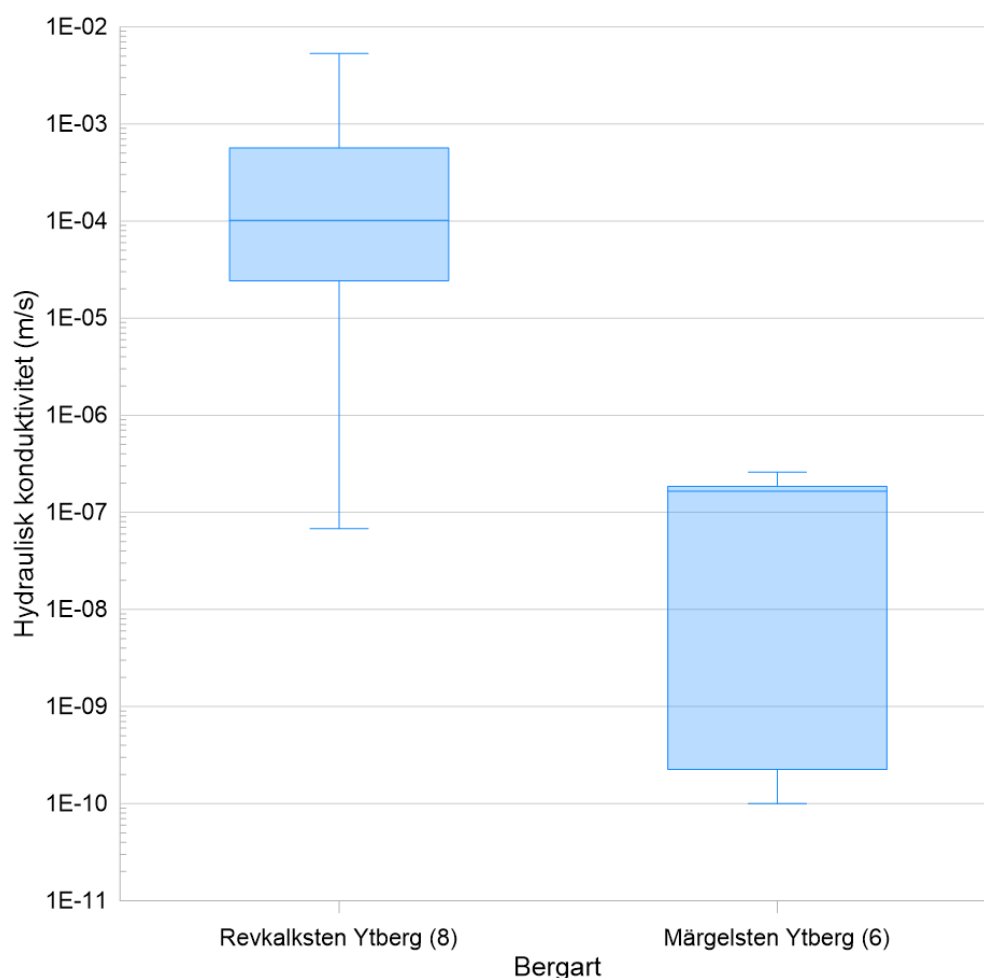
Efter egna observationer av ytliga flöden i epikarst samt SGU:s karakterisering av karst på Gotland (Erlström et al., 2022), följdes det ytliga flödet upp med att borra 14 stycken 2 m djupa

borrhål. Totalt åtta av dessa borrhål installerades i revkalkstenen väster om File hajdar-täkten och sex i mägerlstenen i de södra delarna av undersökningsområdet. I dessa borrhål skapades en hydraulisk puls genom att vatten fylldes på, varefter återhämtningen av grundvattennivån mättes (WSP Golder, 2022 och Bilaga 2). Testerna visar på en tydlig skillnad i hydraulisk konduktivitet mellan områden med mägerlsten jämfört med revkalkstensområden med riklig epikarst. Den lägsta utvärderade hydrauliska konduktiviteten påvisades i mägerlstenen medan den högre hydrauliska konduktiviteten påvisades i revkalkstenen med riklig epikarst, se Tabell 2.

Tabell 2. Utvärderad hydraulisk konduktivitet för utförda hydrauliska tester i borrhål borrade i ytligt berg.

Bergart	Hydraulisk konduktivitet (m/s)
Mägerlsten	$1,0 \cdot 10^{-10} - 1,7 \cdot 10^{-7}$
Revkalksten	$6,8 \cdot 10^{-8} - 4,4 \cdot 10^{-3}$

Resultatet visar att det är en tydlig skillnad i hydraulisk konduktivitet i revkalkstenen mot mägerlstenen, se Figur 17.



Figur 17. Spridning av hydraulisk konduktivitet i undersökta ytliga bergborrhål i revkalksten och mägerlsten. De blåa boxarna visar 25e–75e percentilen med högsta och lägsta observerad hydraulisk konduktivitet för respektive bergart (Bilaga 2).

Stora delar av File hajdar har mindre observerad epikarst än det område nordväst om File hajdar-täkten där flera av de hydrauliska testerna har genomförts. Även i de södra delarna av undersökningsområdet (se Figur 1) är förekomsten av epikarst mindre än nordväst om File hajdar-täkten. Den hydrauliska konduktiviteten i ytligt berg inom undersökningsområdet

förväntas därför ha konduktiviteter inom det uppmätta spannet från redovisade tester: 10^{-3} – 10^{-10} m/s.

I ytlig revkalksten är den hydrauliska konduktiviteten ställvis hög, i storleksordningen 10^{-3} till 10^{-4} m/s, men den kan även vara låg i storleksordningen 10^{-8} m/s. I den ytliga mägerstenen är den hydrauliska konduktiviteten generellt låg, i storleksordningen 10^{-7} till 10^{-10} m/s, som ett resultat av avsaknaden av epikarst och vertikalt kopplade sprickor till hydrauliskt konduktiva lagringsplan. Då borrhålen i fråga är anpassade för att undersöka ytligt berg och enbart är 2 m djupa når de inte ner till de hydrauliskt konduktiva lagren. Testerna visar därmed att den ytliga mägerstenen är väldigt tät och sprickfri.

Resultaten av de hydrauliska testerna i ytligt berg bekräftar även den av SGU (Erlström et al., 2022) redovisade bilden, att grundvattenströmningen från karstskrevorna i huvudsak går utmed lagringsplan i det ytliga berget och mot lågpunkter i terrängen. I mägerstenen förekommer inte dessa vertikala sprickor vilket kraftig minskar infiltrationskapaciteten i ytligt berg.

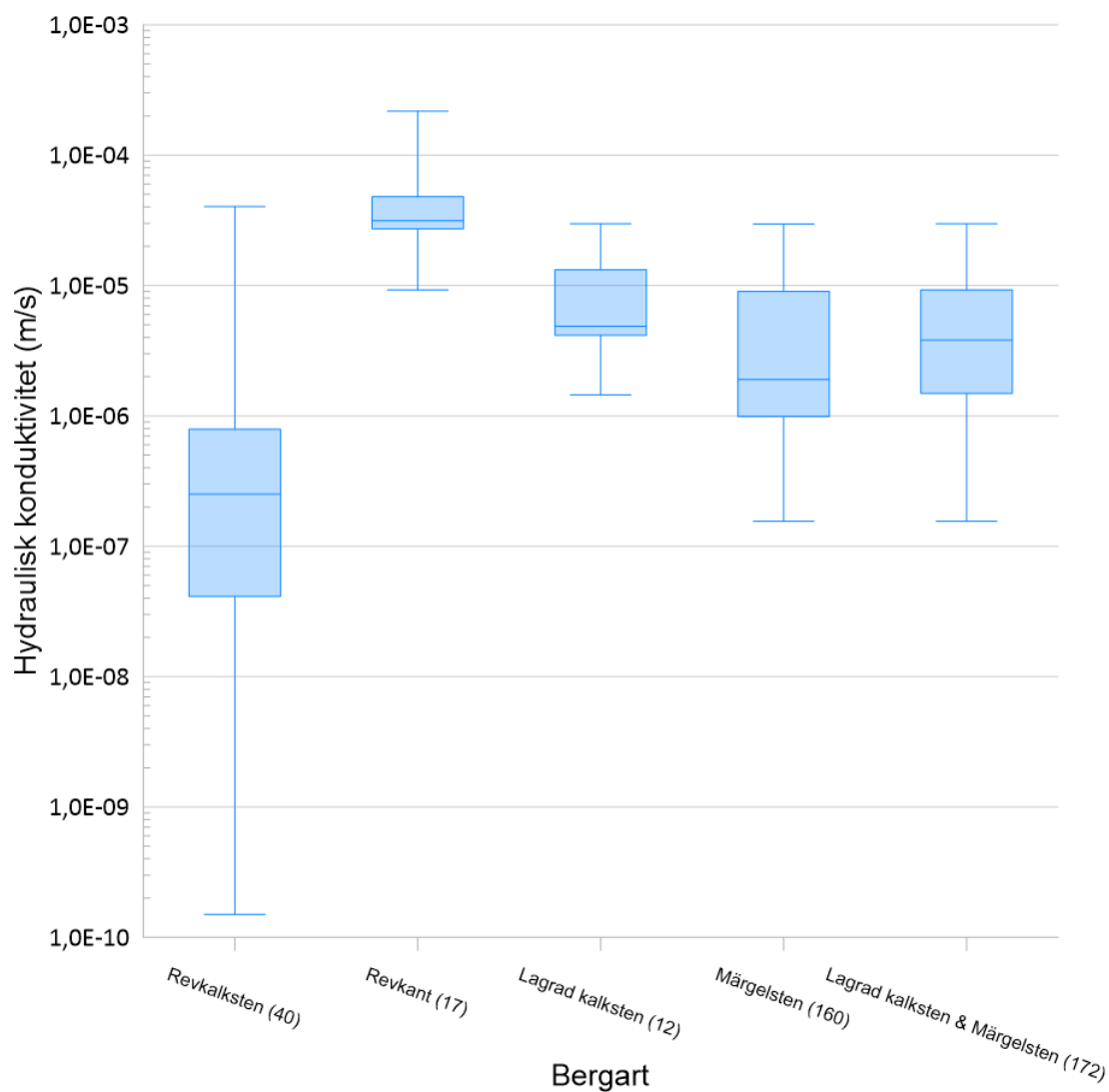
4.5.5 Hydrauliska tester i djupt berg

Under det gångna året har ett 30-tal enklare tester, så kallade "slug-tester", genomförts i borrhål inom det nu ansökta utökningsområdet vid File hajdar-täkten. Testerna går ut på att en hydraulisk puls skapas genom att vatten pumpas ur borrhålet, varefter återhämtningen av grundvattennivån mäts. Syftet med testerna var att få ett mått på fördelningen av den hydrauliska konduktiviteten i revkalkstenen i undersökningsområdet.

Testen av borrhålen nordväst om File hajdar-täkten visar på en stor variation av den hydrauliska konduktiviteten med vissa mer genomsläppliga borrhål. Borrhålen är borrade till ungefär samma bottennivå och är i samma geologiska enhet. Majoriteten av dessa borrhål påvisar täta till mycket täta förhållanden.

Utöver dessa slug-tester gjordes under vintern 2022–2023 fyra längre provpumpningar, dessa tester beskrivs i kapitel 4.9.2.

Då det har genomförts ett stort antal hydrauliska tester i bergborrhål i olika geologiska enheter inom undersökningsområdet, har den hydrauliska konduktiviteten för de geologiska enheterna kunnat jämföras, se Figur 18.



Figur 18. Spridningen av hydraulisk konduktivitet i undersökta borrhål i revkalksten, revkant, märgelsten och lagrad kalksten. Stapeln "lagrad kalksten & märgelsten" är en summering av de enskilda staplarna. De blåa boxarna visar 25e till 75e percentilen med högsta och lägsta observerad hydraulisk konduktivitet för respektive bergart (Bilaga 2).

Jämförelsen visar att de olika bergarterna har en tydlig skillnad i hydraulisk konduktivitet, där borrhål som är i revkanten har högst medianvärde, i storleksordningen 10^{-5} m/s, medan borrhålen som är i revkalkstenen har lägst medianvärde, i storleksordningen 10^{-7} m/s. Däremot kan revkalkstenen lokalt ha hög hydraulisk konduktivitet, vilket indikeras av den högsta uppmätta hydrauliska konduktiviteten i revkalkstenen, men är alltså i medel mindre genomsläpplig. Den lagrade kalkstenen och märgelstenen visar ett medianvärde på 10^{-6} m/s vilket är i linje med den normala hydrauliska konduktiviteten för kalksten på Gotland (Erlström et al., 2022).

Märgelstenen och den lagrade kalkstenen har, enligt utvärderade tester, en hydraulisk konduktivitet på 10^{-7} till 10^{-5} m/s och är i medel mer genomsläpplig än revkalkstenen vilket i del beror på de välkonnekterade vattenförande lagren i märgelstenen och den lagrade kalkstenen.

Att revkalkstenen har en så stor variation i hydraulisk konduktivitet förklaras genom de oregelbundna lagren som förekommer i revkalkstenen. Revkalkstenen är ställvis väldigt genomsläpplig, men på grund av den oregelbundenhet som förekommer är det likväl ställvis väldigt täta förhållanden på grund av avsaknad av välkonnekterade kontinuerliga vattenförande lager.

Att den hydrauliska konduktiviteten är mycket högre i ytlig revkalksten än djupt borrhål i revkalksten kan förklaras med hjälp av förekomsten av epikarst, som förekommer ner till 1 m djup och är kopplad till hydrauliskt konduktiva lagringsplan (Erlström et al., 2022). Till

skillnad från revkalkstenen är den hydrauliska konduktiviteten i djupa bergborrhål i mägersten och lagrad kalksten högre än i ytligt berg, vilket förklaras av att de djupa borrhålen når ner till de djupa vattenförande lagren.

4.5.6 Övriga observationer

Flera observationer har gjorts i samband med att borrhål har borrats, fördjupningsborrats eller när borrhålen har testats hydrauliskt. Dessa observationer kan vara att grundvattennivån plötsligt sjönk till nivåer som tidigare inte mätts, eller att den naturliga tillrinningen i borrhålen efter borring var väldigt låg på grund av täta förhållanden. Borrhålens läge redovisas i Bilaga 1.

Borrhålet BH2007 (1 km norr om File hajdar-täkten) hade sedan mätningarna började 2020 visat grundvattennivåer nära eller över markytans nivå. Borrhålet fördjupningsborrades i december 2021 för att nå underliggande mägerstenslager efter geofysisk undersökning, som indikerat ett djup på revkalkstenen ner till 40–50 m.u.my i läget för BH2007. Direkt efter borring sjönk grundvattenytan ner till 7 m.u.my. I februari 2022 gjöts en permanentmanschett på nivån 40 m.u.my. Efter att manschetten installerats sjönk grundvattenytan i undre sektion ner till 16 m.u.my och den övre sektionen ovan manschett visade grundvattennivåer över markytan. Resultatet stärker tolkningen att borrhållets övre del sitter i revkalksten vilken försörjs med vatten relativt lokalt från det uppströms belägna höjdområdet. Borrhållets undre del når mägerstenen med dess kontinuerliga lager, som har nivåer som sänks av stora vattenuttag på stora avstånd (WSP Golder, 2022). Vattennivåer redovisas i Bilaga 2.G.

Vid fördjupningsborring av BH1701 (460 m nordväst om File hajdar-täkten), i februari 2023, observerades ingen tryckförändring. I slutet av maj 2023 började trycknivån att sjunka kraftigt från 24 m.u.my ner till 40 m.u.my och troligen ännu djupare då tryckgivaren hängde i luften. Att grundvattennivån sjönk stärker tolkningen att den djupare mägerstenen i borrhålet påverkas av stora vattenuttag på stora avstånd som sänker trycket i observationsbrunnen. När grundvattenbildningen avtar sänker den underliggande mägerstenen av grundvattennivån i observationsbrunnen då de vattenförande sprickorna i revkalkstenen runt brunnen inte fylls på med nytt grundvatten när nettonederbörden avtar.

Vid fördjupning av BH1702 (780 m väster om File hajdar-täkten) med 15 meter, sjönk grundvattennivån i borrhålet med ca 20 m till en ny lägstanivå. Borrhålet testades hydrauliskt på nytt och utvärderades till en högre hydraulisk konduktivitet än i den tidigare hydrauliska utvärderingen (Golder, 2017), vilket betyder att borrhålet nu når till djupare liggande och mer genomsläppliga sektioner. Borrhålet har tidigare inte varit i kontakt med underliggande mägersten utan har haft bottennivån i revkalkstenen. Det karakteristiska variationsmönstret från den kommunala vattentäkten blev synligt i grundvattennivåobservationen i brunnen.

I borrhål BH2220, som installerades vid Tingstäde träsks östra strand under februari 2023, konstaterades det i början av mars 2023 att grundvattennivån inte hade stabiliserats efter borring. I stället för att skapa en hydraulisk puls nyttjades störningen från borring som ett hydraulisk test, där återhämtningen av grundvatten efter borring utvärderades. Den hydrauliska konduktiviteten för borrhålet visar på väldigt täta förhållanden.

Borrhål BH2302 borrades ner 40 m.u.my på Lännaberget, mellan Östra brottet och havet, i februari 2023. Borrhållets grundvattennivå låg en månad efter borring på 37 m.u.my (-21 m) och det konstaterades att grundvattennivån var stabil. Borrhålet instrumenterades med en tryckgivare för att mäta grundvattennivån och undersöka om grundvattennivån skulle återhämta sig efter borring genom att grundvattennivån skulle stiga. Nivådata från borrhålet sedan april 2023 visar dock att grundvattennivån ligger på en nivå runt 37 m.u.my (-21 m), vilket är ca 5 m över täktbotten i Östra brottet, och har inte visat på någon större grundvattennivåvariation. Då grundvattennivån styrs av Östra brottet tyder det på att kontakten till Östra brottet är bättre än kontakten ut mot havet, trots borrhållets läge vid kusten.

I samband med installationen av borrhål BH2233J (norr om undersökningsområdet, vid den s.k. halvvägseken i Tingstädeåsens förlängning åt öster) genomfördes en skruvborrning. I borrhålets botten förekommer grusig sand ner till 1,5 m.u.my. Den grusiga sanden underlagras sedan av finsand ner till 3 m.u.my, vilket är i linje med SGU:s jordartskartering. Både karteringen och sonderingen styrks av det hydrauliska enhålstestet, där den hydrauliska konduktiviteten motsvarar en sandig jordart.

4.6 UNDERSÖKNINGAR AV KARST

I områden med kalkstensberggrund förekommer karst, dvs. befintliga spricksystem som vidgats genom kemisk lösning av karbonatmineral av strömmande yt- och grundvatten. Ett område med mycket djupgående karst finns vid Lummelunda på västra sidan av ön.

I de sammanlagt nästan 10 kilometer bergskärning, som Östra brottet, Västra brottet och File hajdar-täkten tillsammans utgör, har inga tecken på djupgående karst observerats.

Betydande flödesvägar i berget i form av karstifierade sprickstrukturer skulle potentiellt kunna förändra den hydrogeologiska flödesbilden. Det har därför genomförts många undersökningar för att förstå karstens uppträdande och lokalisera eventuella större karstifierade strukturer.

Sommaren 2020 gjordes en strukturgeologisk studie av File hajdar-täkten. Studien inkluderade även upprättande av en fotogrametrimodell från drönarfoto av en betydande del av täktväggen i File hajdar-täkten (se Bilaga 6, Figur 9). Sammanfattningsvis visar resultaten på god överensstämmelse mellan egna observationer och observationer utförda av SGU m.fl.

Under 2021 gjordes geofysiska undersökningar med markradar och resistivitet (se kapitel 4.5.1). Berggrunden längs den norra och större delen av den västra profilen (norr och väster om File hajdar-täkten) är generellt sett mer högresistiv än den södra profilen (sydväst om File hajdar-täkten), vilket kan bero på att den norra och västra delen av File hajdar är torrare och/eller att berggrunden innehåller lägre halter av lermineral (revkalksten). Detta medförde att det i de södra sektionerna inte tolkades någon entydig gräns mellan kalksten och underliggande märgel och därmed inte heller någon tydlig korrelation mot närliggande borrhål. Den östliga profilen (sydöst om File hajdar-täkten) indikerar 3–4 lågresistiva, brant stupande strukturer. Två av anomalierna undersöktes genom riktad borrning. Efterföljande borrhålsloggning har bidragit till en bredare kunskap om de olika geologiska lagrens utbredning i plan och profil. Inga anomalier som kunde tolkas som karststrukturer påträffades (Geovista, 2021).

Under 2021 studerades efter en period med mycket kraftig nederbörd hur ytvattenflödena varierade inom olika delar av File hajdar. Vattendrag upphörde för att åter komma i dagen ca 50 meter nedströms. Den samlade tolkningen av dessa observationer är att det är mycket stora skillnader på hur mycket vatten som finns på markytan inom områden med eller utan epikarst, där områden med mycket ytlig epikarst noterades vara torra medan det i våtar och fukthedar stod vatten. Det påträffades inte några tecken på utströmning av vatten från betydande djupgående karst (WSP Golder, 2022). Inom delar av File hajdar kartlades förekomsten av ytlig karst som en del av ett examensarbete av Friberg (2022).

Vintern 2022 genomfördes även temperaturmätningar på, från jord och berg, utströmmande grundvatten. Mätningarna visade att alla vid undersökningen identifierade utströmningspunkter uppe på File hajdar hade vattentemperaturer vilka indikerade en mycket ytnära strömning, dvs. flödesvägar i epikarsten (WSP Golder, 2022). Mätningarna sammanfattas i kapitel 4.7.3. Dessa undersökningar visar att en betydande del av vattenavrinningen i epikarst-rika områden sker i karstifierade sprickor i bergets översta ca 1 meter. Endast i en av 15 mätpunkter (vid foten av Hejnum hållar) observerades utströmmande grundvatten med en temperatur som tydligt visade att vattnet härrör från djupare berggrundvatten. Temperaturmätningarna visar således att inga större djupa karststrukturer förekommer på File hajdar.

Det är rimligt att anta att epikarsten bidrar till en ökad grundvattenbildning genom en ökad hydraulisk kontakt till vertikala sprickor, vilket även visas om än något anekdotiskt i de provpumpningar som genomfördes 2022–2023, se kapitel 4.9.2. Området som påverkades hydrauliskt av kraftig grundvattenbildning vid nederbörd är samma område där vattenkemin visar på nybildat grundvatten, se kapitel 4.8.

Något utströmmande vatten där temperatur eller kemisk provtagning indikerar utströmning av djupt berggrundvatten har dock inte påträffats vare sig i fältinventeringar eller kartläggning med drönare, se kapitel 4.7.3, på eller runt File hajdar, vilket styrker övriga observationer om avsaknaden av djupare karstifierade strukturer.

Under 2022 släppte även SGU (Erlström et al., 2022) en rapport om karst på Gotland. Undersökningarna som rapporten bygger på utgjordes av pilotförsök där man med drönare kartlade fyra olika hållområden (pilotområden) på mellersta Gotland. Av ca 18 ha undersökt hållmark består mellan två och sex procent av öppna karstrevor. Medelbredden av karstrevorna är sju centimeter och 90 procent av sprickorna är kortare än fem centimeter. SGU fann att karstrevornas orientering mestadels är nordostlig och västnordvästlig, dock påvisades en stor variation mellan pilotområdena. Det genomfördes också vattennivåmätningar i karstrevor, vilka svarade tydligt mot nederbördsdata. Mätning med nivåloggrar visade att epikarsten både håller kvar vatten och leder vatten vidare till lägre liggande områden eller ner i berggrunden. SGU bedömde att det vatten som färdas i karsten länkas av relativt ytligt utmed lagringsplan. Epikarsten är vanligtvis en till två meter djupa och dess djuggående begränsas ofta av förekomst av tätare och lerigare kalkstenslager. Karsrevorna utgör ett så kallat hängande magasin.

Under 2022 genomfördes ett 12 timmar långt infiltrationsförsök i södra delen av File hajdar, vilket gav en mycket jämn radiell grundvattentryckpåverkan inom upp till 1,5 km avstånd (Bilaga 2). Ett sådant influensmönster är ett tydligt hydrauliskt bevis på avsaknaden av större karststrukturer inom testets influensområde. Hade större karststrukturer förekommit i området hade påverkansområdet inte haft en jämn och radiell form, allt infiltrerat vatten hade då "försvunnit" ned i karststrukturen och inga tydliga trycknivåförändringar hade då observerats i observationsbrunnarna.

Avsaknaden av utströmningsspunkter av berggrundvatten inom de stora ytor som kartlagts med drönarundersökningarna (redovisas närmare i en underbilaga till ansökans bilaga B7 samt sammanfattas nedan i kapitel 4.7.3) samt tydliga vattenkemiska profiler för berg- respektive ytligt grundvatten (se kapitel 4.8) är även de bevis för avsaknaden av karstifierade flödesvägar för grundvattnet inom södra delen av File hajdar, i och nära Natura 2000-områdena.

4.7 UNDERSÖKNINGAR FÖR NATURA 2000-OMRÅDENA

Under de senaste fem åren har ett stort antal borrhål till olika djup samt grundvattenrör i strandavlagringar och våtmarker installerats och undersökts i och omkring Natura 2000-områdena. För varje år har antalet borrhål och typer av undersökningar ökat. Därmed har även detaljeringsgraden i förståelsen för området ökat.

År 2018 inleddes studier av geologi, vattennivåer och vattenkemi i strandvallar, våtmarker, ytvatten och det underliggande berget på dessa platser. Syftet med dessa undersökningar var framför allt att verifiera den konceptuella modell som upprättats för att beskriva hur skyddade våtmarker i Natura 2000-områdena Hejnum Kallgate, Bojsvätar och Kallgatburg, söder om File hajdar, försörjs med vatten, inom det vetenskapliga fält som brukar beskrivas som *ekohydrologi*. De hydrogeologiska studierna gjordes nära integrerat med de biologiska studier som Heidelberg Materials låtit göra i området. Samtliga nya hål och rör samt ett antal äldre hål försågs med tryckgivare för att timme för timme kunna studera hur grundvattennivåerna fluktuerar i både berg och jord.

Studierna har under 2019–2023 utvecklats med följande:

- Jordprov har tagits på olika platser i strandvallarna vid Hejnum Kallgates norra kant samt öster om Grodvät för att undersöka kornstorleksfördelningen i ytan och på djupet (Golder, 2020a, Bilaga 2). Resultaten har visat på strandvallar med sorterade jordarter varierande inom fraktionerna sand-grus-sten. Strandvallarna täcks som regel av ett ytligt lager med högre innehåll av organiskt material och finmaterial. I några punkter har jordlagren strax utanför själva strandvallen undersökts och där återfanns siltig sand till finkornig sand. Jordmaterialet i strandvallarna har därmed flera storleksordningar högre genomsläpplighet än omgivande skal av organisk ytjord. Genomsläppligheten för jordlagren har även bekräftats med hydrauliska tester i de grundvattenrör som har installerats i strandvallar. Exempelvis pumptestades grundvattenrör (BH2231J) i strandvallen nedströms Orgvät med en utvärderad hydrauliska konduktivitet om $2 \cdot 10^{-4}$ m/s vilket motsvarar en grovkornig jordart, som grovsand eller fingrus. Utifrån kornstorlek och sorteringsgrad kan även porositeten uppskattas och det kan konstateras att strandvallarna har hög förmåga att magasinera vatten. Det tätande ytlagret bidrar även till att hålla kvar vattnet i de grova inre jordlagren
- Nyborrade borrhål (2018–2022) samt befintliga borrhål i närheten av Natura 2000-områdena loggades med avseende på flöden från specifika sprickor (spinner-flödesloggning) och elektrisk konduktivitet i borrhållsvattnet (Bilaga 2, även i Golder, 2020b; WSP Golder, 2022;). Syftet var att avgöra på vilka djup i berget det huvudsakliga vattenflödet sker från höjderna mot de låglänta våtmarkerna. Vattenflödena kunde kopplas till specifika lager på djupet i berget. Den topografiska nivån för de vattenförande lagren i olika borrhål har kunnat kopplas ihop och följer väl den konceptuella modellens resonemang om kontinuerliga subhorisontella vattenförande lager, se kapitel 5.1.2.
- Uppmätta grundvattennivåer analyseras och beskrivs mer ingående i kapitel 5.4.3, men ett tydligt exempel på skillnaden mellan jord- och berggrundvatten är grundvattenrören och bergborrhålet i anslutning till strandvallen i nordvästra kanten av Hejnum Kallgate. Här finns kalktuffkällor på strandvallens nedansida med utströmmande vatten under hela sommaren och grundvattenrör i strandvallen (BH1905J och BH1906J) visar på nivåfluktuationer på ca en meter. Samtidigt visar det intilliggande bergborrhålet (BH2001) en årlig variation på ca 30 m, artesiska nivåer vintertid och nivåer >25 m u.m.y. sommertid vilket visar att berg och jordgrundvattnet inte är hydrauliskt sammankopplade.
- Vattentemperaturer och dess fluktuationer har kartlagts i utströmmande grundvatten samt via loggrar i olika typer av vatten (WSP Golder, 2022). Ingen tydlig utströmningsspunkt inom eller i anslutning till Natura 2000-områdena kunde baserat på temperatur antas utgöras av berggrundvatten (Järnvägsställan i Bälsalvret och Prosthulet längst Hejnum hållars östra fot undantaget, se kapitel 4.8). För att undersöka om det kunde finnas andra utströmningsspunkter av berggrundvatten som missats under inventeringar och fältbesök, genomfördes vintern 2023 en kartläggning med drönare utrustad med IR-kamera. Dessa undersökningar beskrivs i kapitel 4.7.3 nedan.
- Provtagningen av vattenkemi utökades 2022 på prov till att även inkludera analys av syreisotoper. Resultaten föll väl ut, varför ett mycket omfattande provtagnings- och analysprogram genomförs under 2023 med syfte att erhålla omfattande bakgrundsdata av vattenkemin och dess fluktuationsmönster, se kapitel 4.8 samt Bilaga 2. Det går att tydligt kemiskt särskilja berggrundvatten och jordgrundvatten via t.ex. syreisotoper, bor och strontium.

- Våren 2022 karterade SGU om jordartskartan i området i skala 1:25 000. Detta gav en ökad detaljrikedom bland annat i området nedanför strandvallarna i Hejnum Kallgate Natura 2000-område. I den nya jordartskartan har områden som tidigare karterats som moränlera betecknats som vittringsjord. Dessa två jordarter har båda låg genomsläpplighet och denna förändring ändrar därför inte den konceptuella förståelsen för området.
- Under 2021 genomfördes försök med radarundersökningar av berget under våtmarkerna i Orghagar och Grodvät. Undersökningarna gav dock under rådande geologiska förhållanden data av dålig kvalitet. Vid kartläggningen av berget på File hajdar 2022 användes i stället den geofysiska metoden tTEM, se kapitel 4.5.1. För att undvika markskador i den känsliga naturmiljön begränsades mätningarna till väg/stignätet i området. Från resultaten av tTEM-mätningarna kunde en övergångszon, som på flera håll identifierats som den mest vattenförande zonen i berggrunden, identifieras inom det undersökta området. Zonen sträcker sig från djupet under Hejnum hållar och löper nära parallellt med markytan ut under Hejnum Kallgate. Samtliga markanta anomalier som identifierats i tolkningsarbetet korrelerar till elstängsel eller ledningar. Inget i resultaten indikerar större karststrukturer.
- Förekomsten av bleke inom Natura 2000-områdena har kartlagts med sticksondering (se underbilaga 3 till ansökans bilaga B7). Kartläggningen identifierade bleke i botten på våtmarker uppe på File hajdar där det inte finns någon grundvattenutströmning, under lagren med leriga sediment. Det visar att bleken avsatts i våtmarkens allra tidigaste utvecklingsstadium. I och kring kalktuffkällorna i västra Hejnum Kallgate och Kallgatburg identifierades ingen bleke, utan källorna rinner ut i marken ovanpå strandgrus och torviga jordlager. I de djupare delarna av våtmarken nedanför strandvallarna identifierades kalkgyttja och bleke med inslag av snäckskal och makrofossil. Den vertikala konduktiviteten (genomsläppligheten) i bleke och moränlera har under 2023 undersökts med ringinfiltrometer, vilket beskrivs i kapitel 4.7.2 nedan.

4.7.1 Undersökningar för Grodvät

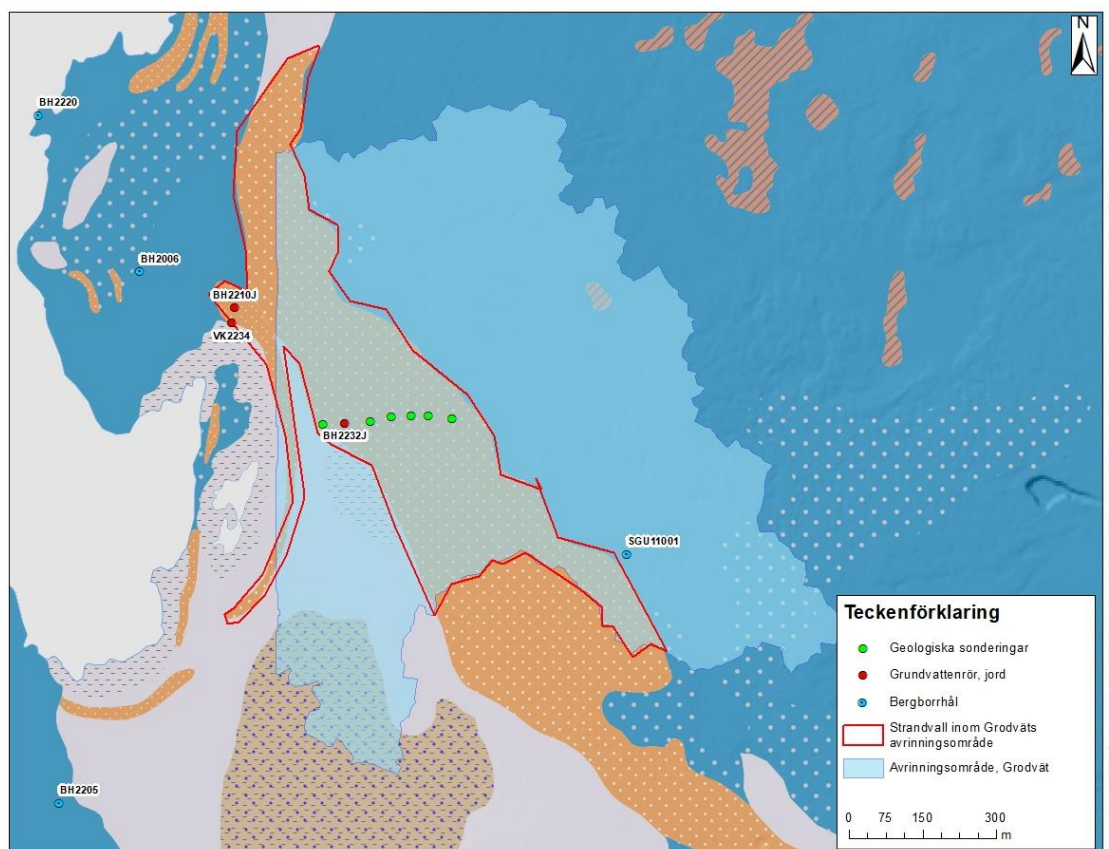
Merparten av de undersökningar som gjorts och de generella beskrivningar av förhållandena i Natura 2000-områden som presenteras i denna utredning rör områdena söder om File hajdar, dvs. Hejnum Kallgate, Bojsvätar och Kallgatburg. Men det finns även ett Natura 2000-område väster om File hajdar med terrestra grundvattenberoende ekosystem: Grodvät, beläget intill Tingstäde träsks östra kant. Med anledning av Grodväts höga skyddsvärde har diverse undersökningar genomförts med syfte att definiera vattentillförseln till området. Grodvät har en mycket begränsad hydraulisk koppling till övriga Natura 2000-områden, därför beskrivs det här i ett eget kapitel.

Grodvät försörjs av ytnära grundvatten från File hajdar och av vatten som lagras i uppströms jordlager bestående av svallsediment (strandvallen). För att få en bättre uppfattning om vattenvolymen som strandvallen kan lagra har det genomförts geotekniska sonderingar och installerats två grundvattenrör i strandvallen, ett grunt grundvattenrör har även installerats för hand i Grodvät (Figur 19). Vattennivåerna i rören har övervakats med tryckgivare.

Sonderingarna i strandvallarna visade på jorddjup mellan 1,2 och 1,7 m. Under ett ytligt humuslager utgjordes jordlagerföljden av i huvudsak grusig sand överlagrande finsand, i två sonderingspunkter med ett tunt lager sandig morän som understa lager. Sonderingsmetoden innebär att ytterligare jordlager inte kan uteslutas under sonderat djup. De relativt grova och väl sorterade jordarterna innebär en hög vattenförande förmåga och hög porositet.

Vattennivån i Grodvät (VK2234) ligger något högre än nivån i Tingstäde träsk, tydligt är dock att nivåerna följer varandra. Eftersom nivån ligger högre i Grodvät strömmar vattnet snarare ut ur

Grodvät till Tingstäde träsk är omvänt scenario. Däremot kan man sannolikt säga att nivån i Grodvät upprätthålls av att Tingstäde träsk ligger där det gör, det vill säga att vattenmassan i Tingstäde träsk minskar utströmningen från Grodvät.



Figur 19. Strandvall inom Grodväts avrinningsområde.

Vattennivåerna i den del av strandvallen som ligger uppströms Grodvät (BH2210J och BH2232J, se Figur 19) ligger ca 2–3 m över både vatten- och marknivån i Grodvät. Det indikerar att det sker ett utflöde av grundvatten från strandvallen mot Grodvät. Utflödet sker under hela året, men när vattentillförseln till strandvallen i form av nettonederbörd och ytvattenströmning upphör i månadsskiftet mars-april visar nivåerna tydligt sjunkande trend (undantaget små tillskott vid kraftiga nederbördstillfällen). BH2210J som kombinerat med 2022 års data har data för hela sommarperioden visar att strandvallen har tillräckligt med vatten för att upprätthålla ett flöde under hela sommaren tills att magasinet åter börjar fyllas under september. Vattenvolymen som dräneras under sommarmånaderna från den del av strandavlagringen som avrinner till Grodvät har beräknats till ca 43 000 m³.

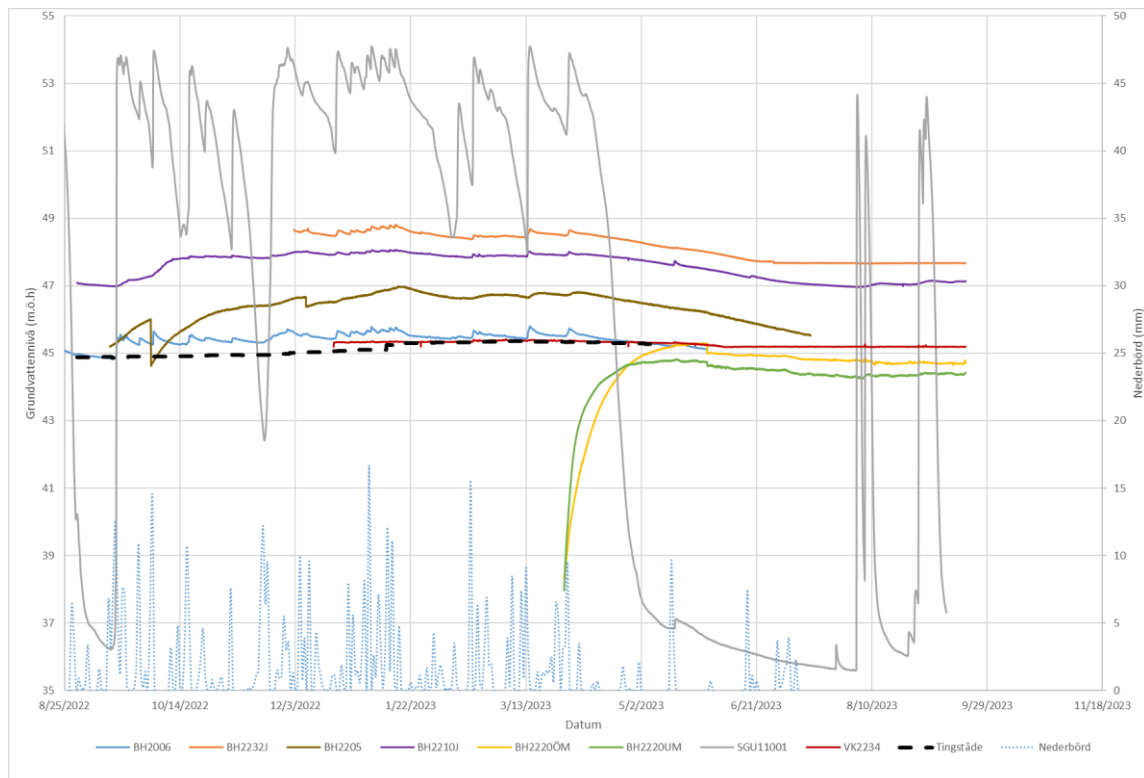
Strandvallen förses med vatten från nederbörd, ytavrinning och strömning i jordlager eller ytnära berg. Avrinningsområdet för den del av strandvallen som är belägen inom Grodvät har avgränsats topografiskt till ca 91,2 ha. Det går inte att göra en exakt distinktion av avrinningsområdet eftersom det både finns områden med avrinning i epikarsten (vilket gör att det finns områden som kan ha strömning som avviker från ytopografien), samt även att grundvattenströmningen i vissa delar av strandvallen inte är helt klarlagd. Men arean anses inte avvika betydligt från beräknad.

Nettonederbörden i avrinningsområdet uppgår på årsbasis till 249 mm (uppmätt 1991–2020, areaviktad S-HYPE, delavrinningsområde 3039 för att undvika avdunstningen från sjöytan i delavrinningsområde 3070, se Bilaga 8). Under perioden april–augusti uppgår nettonederbörden endast till 4 mm. Detta innebär att vattenflödet mot Grodvät (nettonederbörden) är >220 000 m³ sett över hela året, men nettonederbörden är endast ca 4 000 m³ under perioden april–augusti.

Som beräknat ovan utgör vattenvolymen som dräneras från strandvallen under sommaren ca 43 000 m³ medan nybildningen alltså bara är ca 4000 m³. Av ett totalt vattenflöde på ca 47 000 m³ till Grodvät under sommarmånaderna utgörs ca 90 % av vatten som magasineras i strandvallen sedan vinterhalvåret.

I bergborrhål BH2006 (norr om Grodvät) ses samma tydligt sjunkande nivåtrend från början på april som i jordrören. Grundvattennivån i borrhålet ligger alltid under jordrörens grundvattennivå, men över sjönivån och Grodvät under vintertid, och sjunker till nivåer nära sjönivåer och Grodvät under sommartid, se Figur 20. Detta indikerar att borrhålet försörjs med vatten från strandvallen, men att det inte står i direkt hydraulisk kontakt med Grodvät. Däremot finns strukturer i berget som leder vatten till sjön.

Även vattenkemin i BH2006 indikerar en sammansättning som sammanfaller med jordvatten under hela året, se vidare beskrivningen i kapitel 4.8.



Figur 20. Grundvattennivåer i grundvattenrör och bergborrade rör i närheten av Grodvät.

BH2220 (precis vid sjökanten på den östra sidan av sjön) är ett mycket tätt borrhål med en uppmätt hydraulisk konduktivitet på $1,5 \cdot 10^{-10}$ m/s, vilket gör att snabba fluktuationer inte kan studeras. Borrhålet, som är uppdelat i en övre och en undre sektion med gjuten permanent manschett på 25 meters djup, uppvisar dock i den övre sektionen nivåer som ligger i paritet med sjöytans nivå och i den undre sektionen nivåer som ligger ca 0,5 m under sjöytan (Figur 20). Borrhålets låga konduktivitet och nivåmönster visar på avsaknaden av kontinuerliga vattenförande lager i kalkstenen, vilket ligger i linje med de geofysiska undersökningarna, se kapitel 4.5.1. Även BH2205 (vid sjöns södra sida) visar på ett likartat mönster med vattennivåer någon meter över sjöns yta, utan stora fluktuationer (Figur 20).

Kontrasten är nivåerna i borrhål SGU11001 som representerar grundvatten i ett djupt borrhål uppe på File hajdar. I trycknivådatan ses stora nivåamplituder (Figur 20) där den lägsta trycknivån når långt under den lägsta vattennivån som ses i Grodvät (VK2234). Om vattentillförseln till Grodvät hade kommit från berget uppe på File hajdar hade den lägsta nivån i SGU11001 inte sjunkit till under vattennivån för Grodvät eller Tingstade träsk.

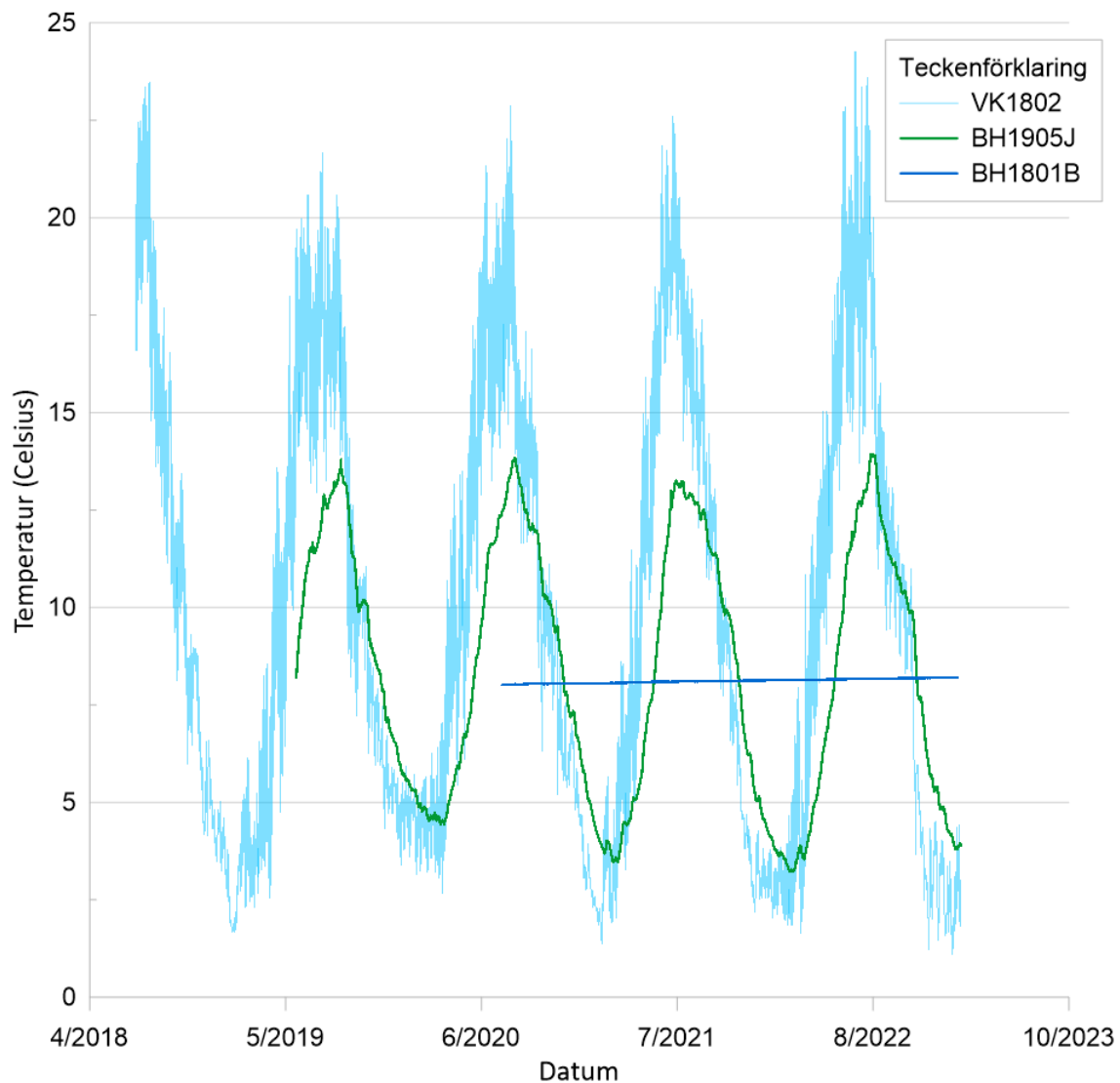
4.7.2 Ringinfiltrometer

För att få ett mått på den hydrauliska konduktiviteten på de jordarter som finns i våtmarkerna i Orghagar och Lillmyr har ringinfiltrometertester genomförts. Ringinfiltrometertester är en metod för att testa infiltrationsförmågan eller den vertikala konduktiviteten i jord. I detta fall användes en av WSP egenutvecklad utrustning baserad på en metodik från SGI för lågpermeabla jordar (Sjöholm et. al 1994) men modifierad för att inte skada naturvärdena på den undersökta platsen. Ringinfiltrometertesterna genomfördes i områden där jordarterna bleke har karterats, inom bl.a. Natura-2000 området Hejnum Kallgate, se Bilaga 1 till ansökans Bilaga B7 samt Bilaga 2 till denna rapport.

Ringinfiltrometertesterna i våtmarkerna Orghagar och Lillmyr visar att bleken har en vertikal hydraulisk konduktivitet på ca $9 \cdot 10^{-7}$ m/s, medan moränleran är testad till $7 \cdot 10^{-7}$ m/s. Resultatet visar att båda jordarter är täta, vilket innebär att jordarterna har en mycket begränsad genomsläpplighetsförmåga. Det underliggande ytliga berget visar, enligt utförda hydraultester i ytligt berg, på ytterligare lägre genomsläpplighet på grund av få vertikala sprickor. Där det förekommer enstaka vertikala sprickor i ytligt berg kan bleke och lermorän täta dessa sprickor, vilket i sin tur minskar den vertikala genomsläppligheten ytterligare.

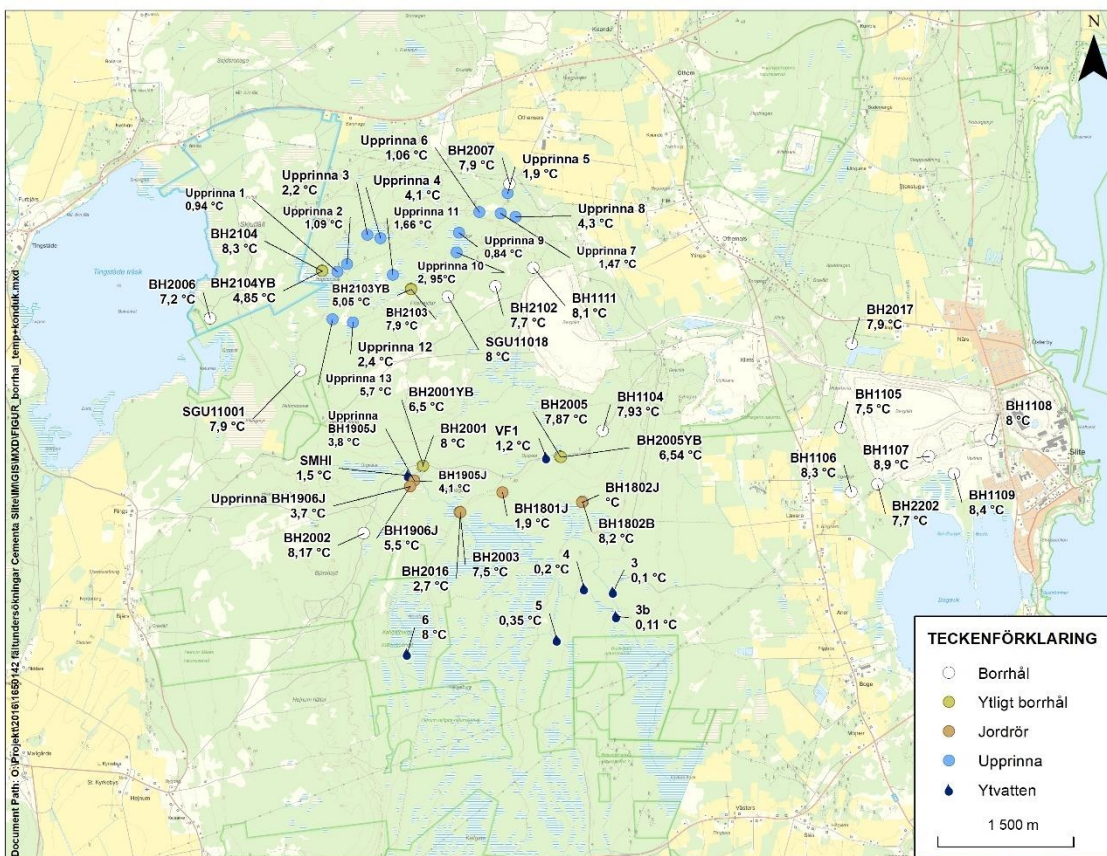
4.7.3 Vattentemperaturer - kartläggning med drönare

Tidigare studier (WSP Golder, 2022) har visat att det finns ett tydligt samband mellan vattentemperatur och var vattnet återfinns. I bergborrhål ligger temperaturen mycket konstant runt ca 8 °C. Temperaturerna i grundvattenrören i jord har en tydlig säsongsvariation. Temperaturen fluktuerar som mest i rören i de tunna jordlagren i våtmarkerna, med temperaturer som ligger nära dygnsmedeltemperaturen för perioden. Grundvattenrör i mäktigare jordavlagringar som strandvallar följer samma mönster som grundvattenrören i de tunna jordlagren i våtmarkerna, men med endast ca 10 °C amplitud i vattentemperatur mellan sommar och vinter, se Figur 21.



Figur 21. Temperatur för BH1801B (bergborrhål), BH1905J (grundvattenrör i jord) och VK1802 (grundvattenrör i tunna jordlager i våtmark).

Dessa skillnader i vattentemperatur har nyttjats för att ytterligare förstå ursprunget på det vatten som rinner fram på olika håll i källmiljöer och våtmarker. Under några kalla februaridagar 2022 (0 – -4 °C) mättes temperaturen på 15 platser där grundvatten kunde iakttas strömma fram, se Figur 22. Vidare mättes temperaturen på 7 platser i ytvattendrag, i de 4 relativt nya borrhålen i bergets översta två metrar samt i alla de instrumenterade borrhål där mätningar görs kontinuerligt.



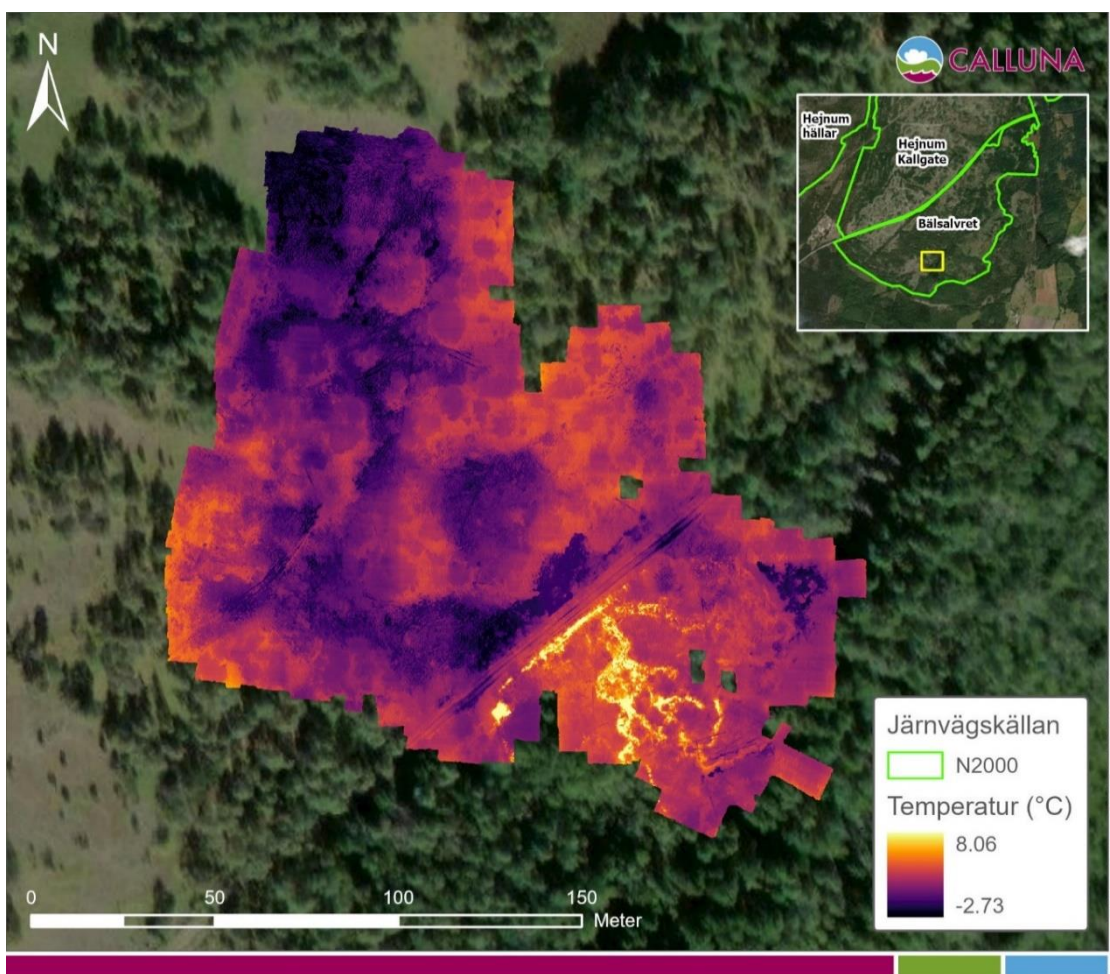
Figur 22. Uppmätta vattentemperaturer 1–3 februari 2022.

På File hajdar norra delar påträffades ett flertal punkter med utströmmande vatten, i huvudsak ur flacka strukturer i berget. Temperaturen i de ytliga berggrören (borrade 2 m ner i berg) uppe på File hajdar uppgick vid tillfället till ca 5 °C. Temperaturen i observerat utströmmande grundvatten är med ett undantag (Upprinna 13, 5,7 °C) lägre än så och i de flesta fall betydligt lägre. Det relativt rikliga antalet observerade punkter med grundvattenutströmning på många håll på norra File hajdar, främst i anslutning till de många små våtmarker som förekommer, utgörs därmed av vatten som strömmar nära markytan.

Det finns generellt sett få synliga utströmningspunkter av grundvatten i File hajdar-området södra delar relativt de norra. Den utströmning som återfinns i söder är vid nedansidan av strandvallar. Det finns osäkerheter i en jämförelse av denna typ (mellan norr och söder) med möjligt ojämnt spenderad tid inom olika delområden. Det finns något mer jordlager i söder än i norr och uppe på File hajdar, vilket kan dölja viss grundvattenutströmning från berget. Av de mätningar som gjordes var det en punkt som stack ut: Ytvattenpunkt 6 (nedströms Prosthulet), med en vattentemperatur på 8 °C, vilket visar att detta är ett vatten som strömmar upp från berget vid Hejnum hållars slutning.

Det har inte påträffats några distinkta punkter med utströmmande grundvatten inom Natura 2000-områdena Hejnum Kallgate, Bojsvåtar eller Kallgatburg söder om File hajdar-täkten trots att hydrogeologer och biologer har ägnat otaliga timmar i fält inom dessa områden inom ramen för Heidelberg Materials undersökningar. De enda undantagen är vid nedansidan av strandvallar inklusive ett antal platser längst Hejnum hållars östsida (Prosthulet och Oles källa) samt järnvägsställningen i Bälsalvret Natura 2000-område, söder om väg 147. För att följa upp ovan nämnda vattentemperaturundersökning och på ett systematiskt sätt undersöka förekomsten av utströmmande berggrundvatten inom framförallt Natura 2000-områdena, genomfördes vintern 2023 undersökningar med drönare utrustade med IR-kamera. Undersökningarna beskrivs i sin helhet i bilaga 1 till ansökans bilaga B7. Metoden identifierade tydligt de två på förhand kända källorna benämnda Oles källa på Hejnum hållars östslutning samt Järnvägsställningen (se Figur 23)

i Bälsalvret Natura 2000-område vilka användes som referenser. Undersökningarna identifierade inte några andra tydliga punkter med utströmmande vatten inom Natura 2000-områdena. Ett antal punkter där drönardata indikerade mindre distinkta temperaturanomalier verifierades i fält med manuell temperaturmätning och i vissa fall vattenprovtagning. Ingen av dem uppvisade temperaturer eller vattenkemi som tydligt indikerar bergvatten. Det är dock svårt att särskilja stående vatten med högre temperatur i en lite större vattenvolym med högre temperatur från t.ex. föregående lite varmare dag, utströmmande jordgrundvatten i små flöden eller mycket små flöden berggrundvatten vilket blandar sig med befintligt ytvatten på platsen. På samma sätt är det svårt att kemiskt avgöra om ett vatten är jordvatten eller en liten andel bergvatten uppblandat med nederbörd och ytvatten. Man kan dock konstatera att det med säkerhet inte finns några punkter med betydande utströmning av berggrundvatten inom de flacka Natura 2000-områdena, undantaget Hejnum hållars östra fot där det finns ett antal källmiljöer vid vilka temperaturer och vattenkemi pekar på att en kombination av vatten från berg och jordlager står för vattenförsörjningen.



Figur 23 Radiometrisk värmekarta av källmiljön Järnvägsällan med utströmmande berggrundvatten i Natura 2000-området Bälsalvret.

4.8 VATTENKEMIPROVTAGNING

För att få en kemisk signatur av olika typer av vatten och därigenom besvara frågan var olika vatten kommer ifrån har vattenprover tagit och analyserats. Provtagning har tidigare pågått i mindre skala för utvalda punkter och ett mindre antal parametrar. Under 2022 påbörjades provtagning av stabila väte- och syreisotoper experimentellt i liten skala. Under 2023 har ett omfattande provtagnings- och analysprogram genomförts. Provtagning har gjorts i en stor andel av de borrhål och grundvattentrör som finns inom undersökningsområdet, se Figur 1. Analys görs av metaller, fys/kemiska parametrar, näringsämnen samt stabila isotoper. Utöver detta mäts fem transportkänsliga parametrar direkt i fält (temp, pH, konduktivitet, redox och

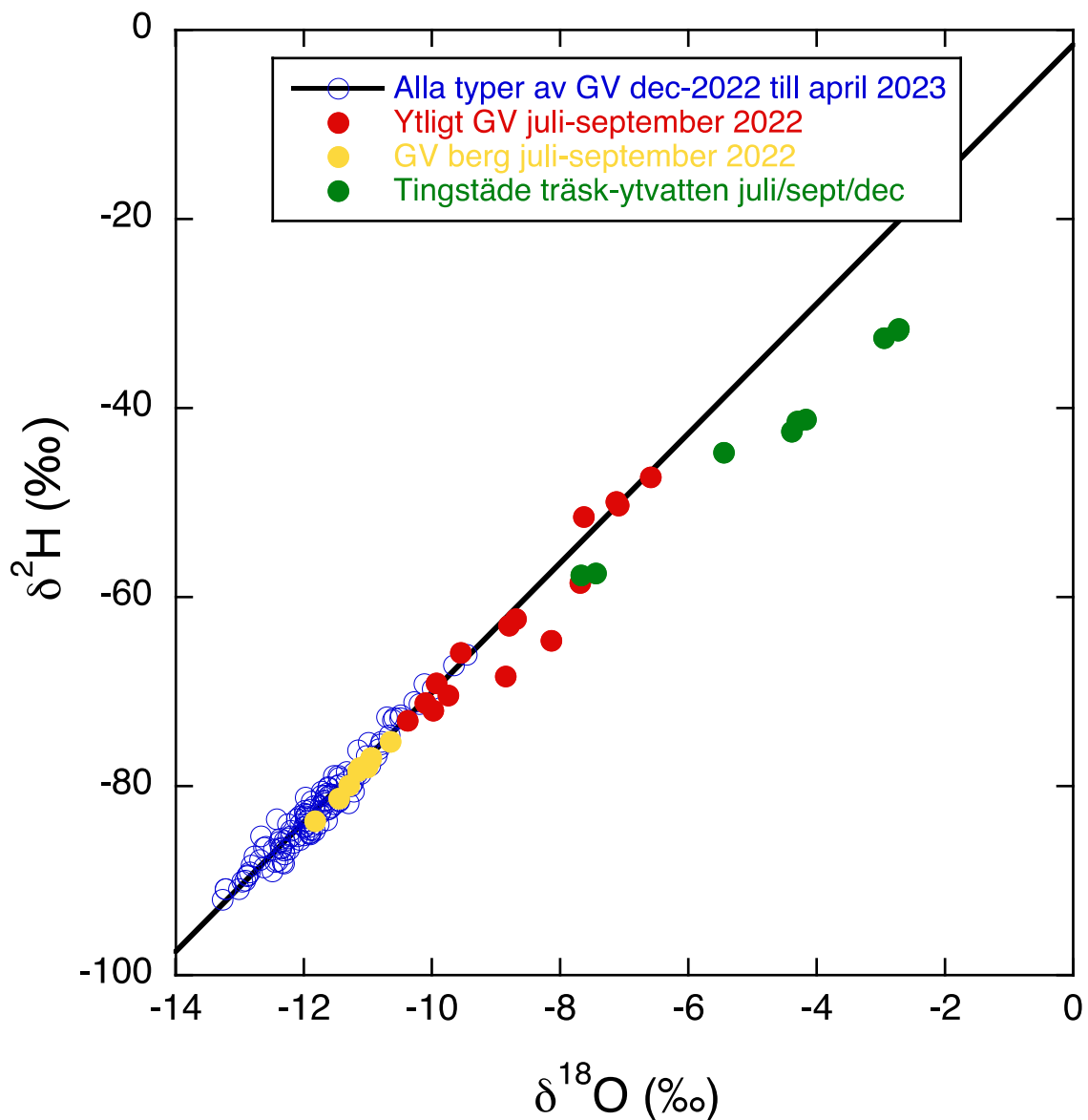
syremättnad). Det totala antalet provpunkter utgörs av 75 borrhål, grundvattenrör och ytvattenflöden. En fullständig lista över provtagna parametrar redovisas i Bilaga 2. Analyserna har avgränsats till provtagningspunkterna på och i nära anslutning till File hajdar, med särskilt fokus på Natura 2000-områden. Referensprover har dock tagits på längre avstånd så som i Lummelundagrottorna samt i Järnvägsällan i Bälsalvret Natura 2000-område.

4.8.1 Isotopanalyser

Isotopanalyserna resulterar i en kvot för syreisotoper ($\delta^{18}\text{O}$) och en kvot för väteisotoper ($\delta^2\text{H}$) där ett mer negativt värde kännetecknar en större andel av de tyngre isotoperna, vilket orsakas av vattnets skiftande av fas, i detta fall främst avdunstning.

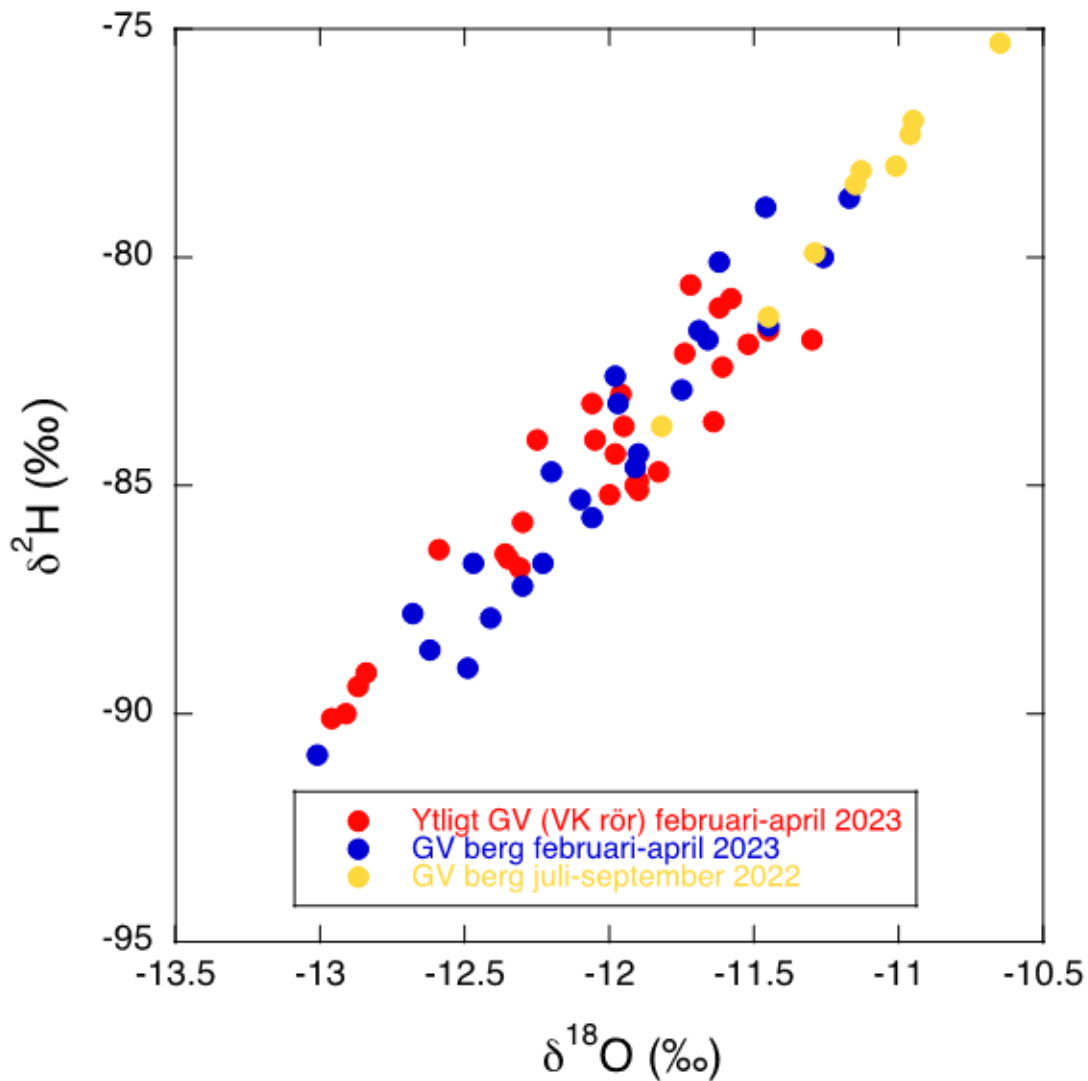
Isotopanalyserna från provtagningspunkter i Tingstäde träsk (grönmarkerade punkter i Figur 24) visar att detta ytvatten är påverkat av en betydande avdunstning jämfört med övriga prover. Resultaten från isotopanalyserna från ytligt grundvatten i jord, inklusive källvatten och proverna tagna vid SMHI:s mätstation, Orgvätar stationsnummer 2304 (rödmarkerade punkter i Figur 24), har en relativt stor spridning. Det beror delvis på att detta vatten inte utgörs av en homogen vattenmassa. Analyserna av berggrundvatten från större djup än 20 meter samt tydligt naturligt utströmmande berggrundvatten (gulmarkerade punkter i Figur 24) påvisar de mest negativa isotopresultaten ($\delta^{18}\text{O}$ ca -11 till -12‰ och $\delta^2\text{H}$ ca -80‰), med minst spridning. Isotopresultaten för berggrundvatten särskiljer sig tydligt från ytligt grundvatten uttaget från olika nivåer i jordprofilen i prover tagna juli–september 2022.

Den negativa kvoten från vattenprover uttagna under vintern (december–april) beror till stor del på den isotopfraktionering som sker vid fasförändring, t.ex. från vatten till snö. Dessa vinterresultat överlappar isotopresultaten från sommaren i djupare (>20 m) berggrundvatten (gulmarkerade punkter i Figur 24). Det visar att grundvattenbildningen i området sker på vintern och att isotopsammansättningen varierar lite över året i djupare liggande berggrundvatten



Figur 24. Resultaten av stabila isotopanalyser av väte och syre ($\delta^2\text{H}$ och $\delta^{18}\text{O}$) utförda på olika typer av vatten mellan juli 2022 och april 2023.

Vinterns samtliga analyser (blåmarkerade punkter i Figur 24) visar på negativa isotopresultat, i medeltal $\delta^2\text{H} = -82,2$ och $\delta^{18}\text{O} = -11,8$, som plottar med relativt liten spridning i grafens nedre vänstra hörn. Vid en jämförelse mellan ytligt grundvatten och grundvatten i berg mellan februari och april 2023 är isotopsammansättningen likartad oavsett typ av vatten, se Figur 25.

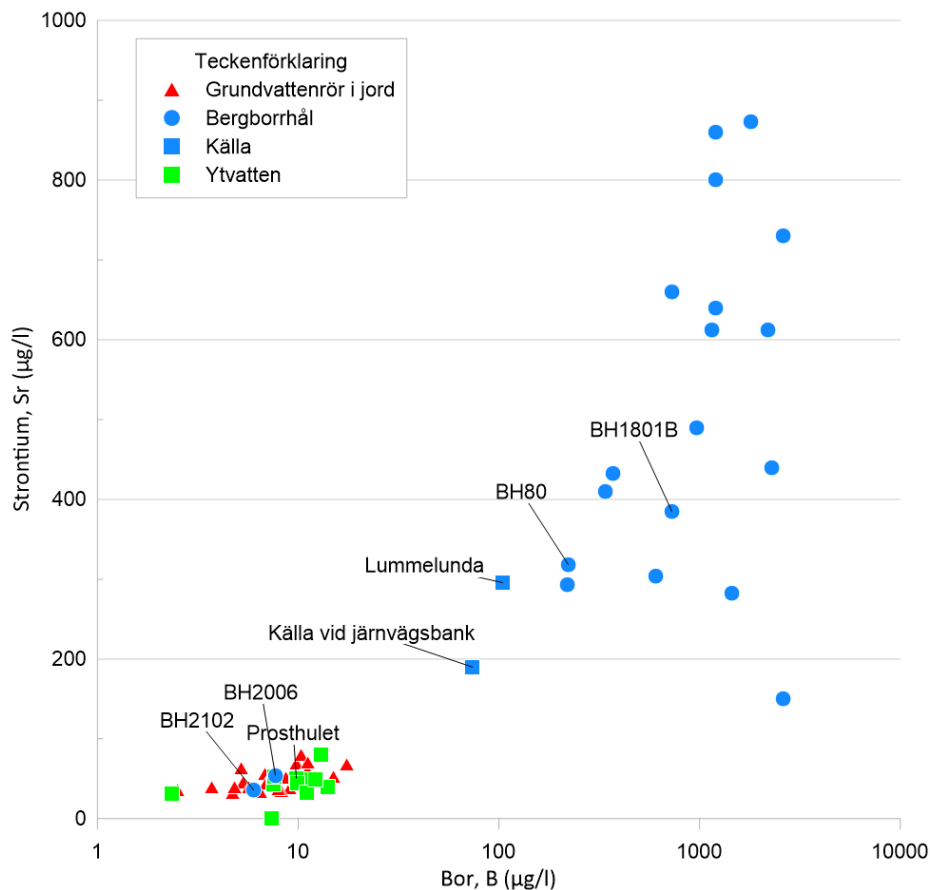


Figur 25. Isotopsammansättningen för ytligt grundvatten jämfört mot grundvatten i berg mellan februari–april 2023 går ej att särskilja.

4.8.2 Kemisk karaktäristik

För att särskilja och karakterisera olika typer av vatten finns hundratals ämnen och föreningar att analysera. SGU har i en studie av bergborrade dricksvattenbrunnar påvisat tydligt förhöjda halter av bor och strontium på Gotland (Ek, B.-M., Thunholm, B., Östergren, I. & Mjönes, L., 2007).

Analysen av prover från bergborrhålen i området visar tydligt att vattnet har förhöjda halter av bor och strontium, se Figur 26.

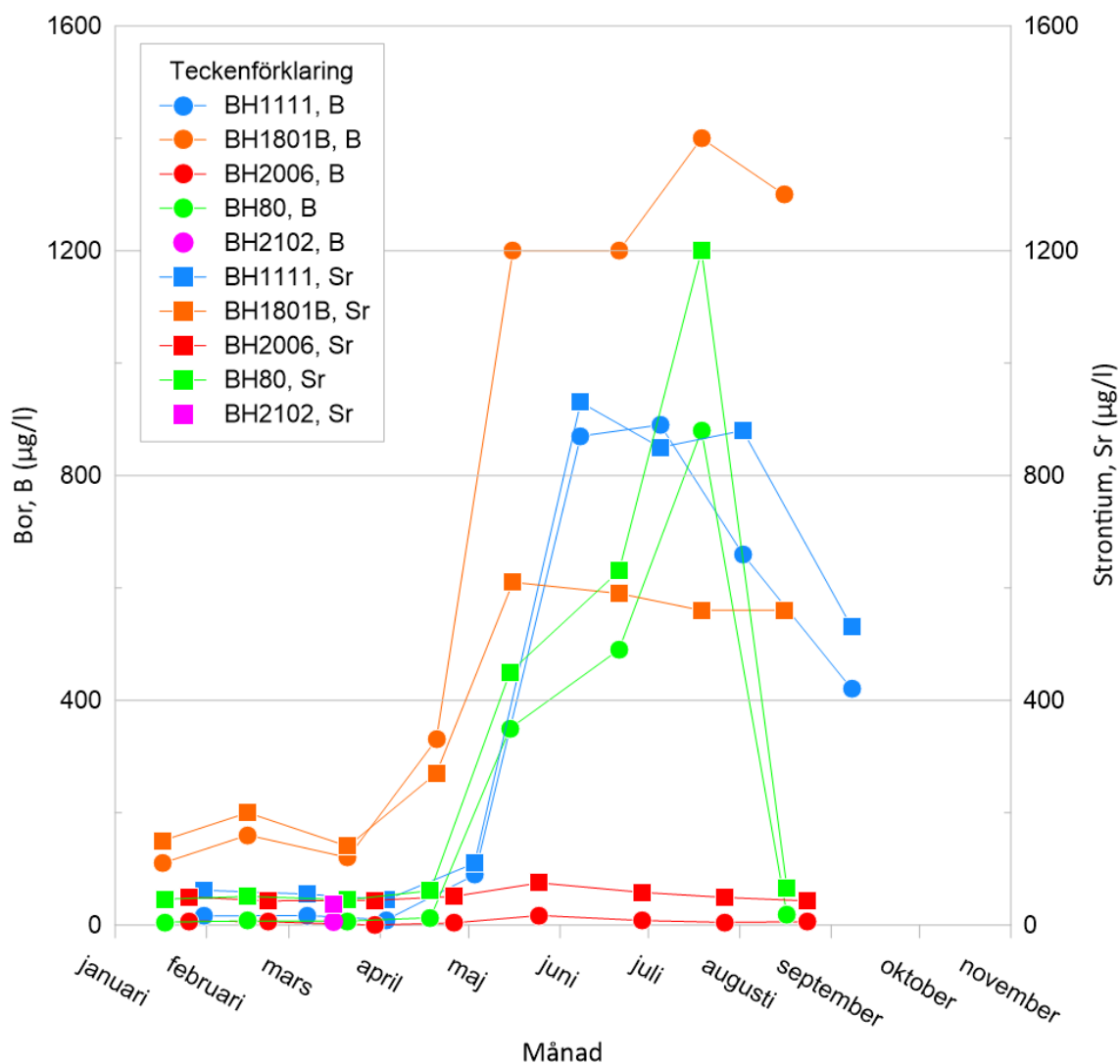


Figur 26. Medelhalten av bor och strontium för samtliga borrhål som provtagits under 2023 inom ramen för karakterisering av vatten.

För grundvattenrör i jord och ytvatten varierar medelhalten bor mellan 1 och 20 µg/l och medelhalten strontium varierar mellan 0 och 100 µg/l. För bergbrunnar och källvatten varierar däremot medelhalten bor mellan 100 och 3000 µg/l och medelhalten strontium varierar mellan 150 och 1000 µg/l. Bor återfinns som lösligt borat i de flesta bergsmineral och i marina avlagringar som oftast förekommer i berg. Strontium finns i de flesta bergsmineral och i marina avlagringar. Strontium är även lösligt i vatten. Vid en längre uppehållstid för vattnet i berget ansamlas högre halter av bor och strontium, vilket återspeglar ursprunget på vattnet och därmed kan vattnet karakteriseras.

Vidare kvalitativ analys av analyserade vattenkemiparametrar från bergborrhål, grundvattenrör i jord och ytvatten/källmiljöer visar att bergborrhålen har en markant högre medelhalt av ämnena bor, strontium, natrium, fluorid, magnesium och sulfat under perioden januari–september. Grundvattenrör i jord och ytvatten visar däremot högre organiska halter (COD-Mn) än bergborrhålen under samma period. Resultatet visar att man tydligt kan särskilja vattnets ursprung, om det är ett berggrundvatten eller grundvatten i jord, oavsett årstid.

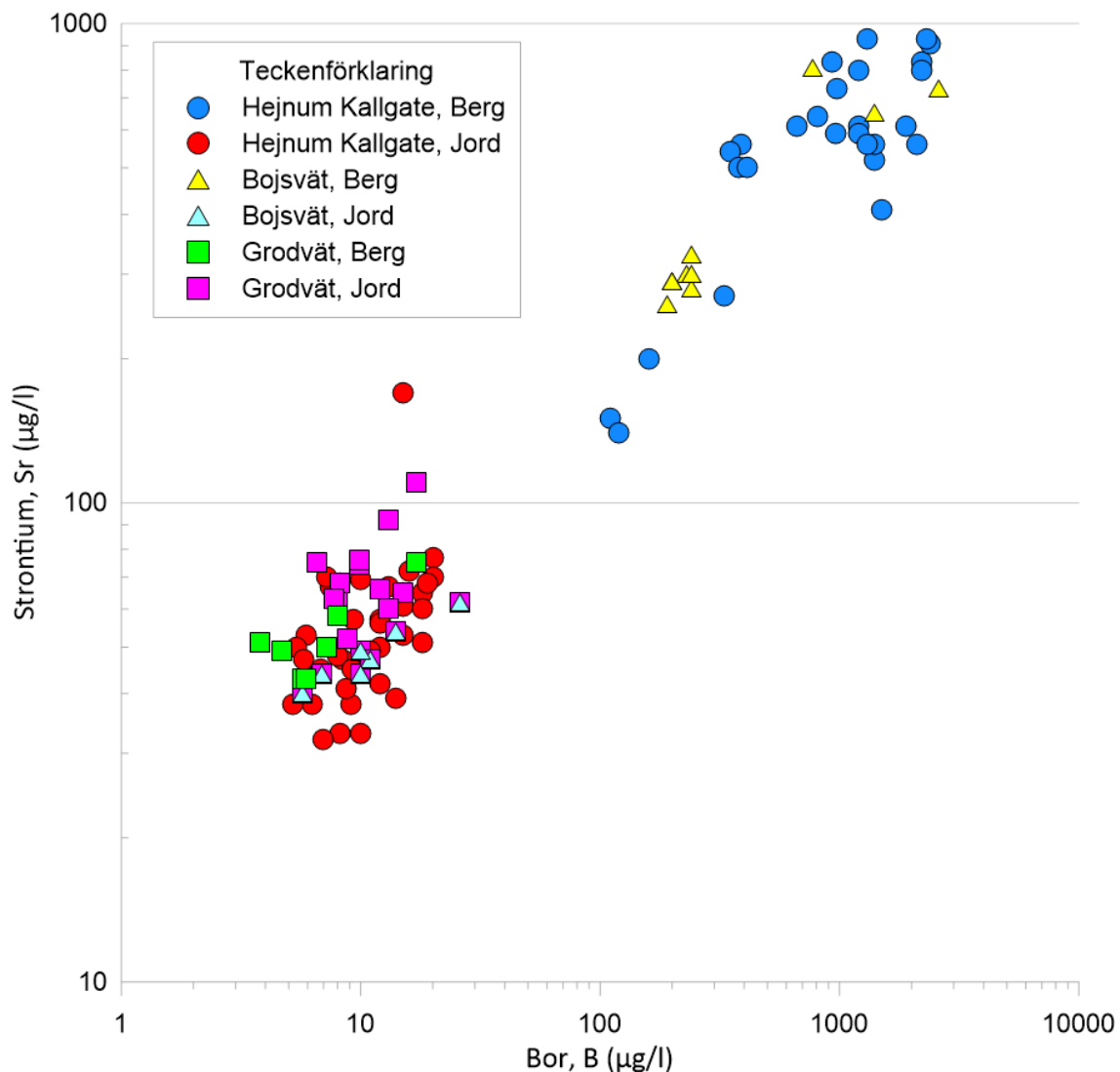
Av alla provtagna bergborrhål är det några borrhål som visar på en tydlig avvikande halt av bor och strontium under perioden januari–april, till skillnad från majoriteten av de bergborrhålen där bor- och strontiumhalten är högre oavsett årstid. De borrhål som har en signifikant lägre bor- och strontiumhalt under perioden januari–april, där den kemiska sammansättningen av vattnet visar att vattnet är mer av jordkaraktär vilket sannolikt är kopplat till snabb grundvattenbildning. Medan under perioden maj–augusti/september är vattnets kemiska sammansättning mer likt den kemiska sammansättningen av vattnet i resterande bergborrhålen på grund av en minskad grundvattenbildning, se Figur 27.



Figur 27. Variation av bor- och strontiumhalt från januari till september under 2023 i utvalda borrhål.

De bergborrhål som uppvisar avvikande låga bor- och strontiumhalter vintertid sitter i eller i kanten av revkalksten nordväst (BH1111, BH2102, BH2255) eller sydost (BH80) om File hajdar-täkten. I och med att halterna därmed kan kopplas till områden med förekomst av vertikala sprickor kan denna variation tydligt kopplas till grundvattenbildningen i området. Under januari–april sker en tydlig grundvattenbildning som fyller på akvifären med vatten vilket skapar en utspädning av bor- och strontiumhalterna. När nettonederbörden sedan avtar, vilket resulterar i en mycket lägre grundvattenbildning, ökar uppehållstiden för vattnet i berget. Detta gör att vattnet då ansamlar en mycket högre halt av bor och strontium från berget då inget nytt grundvatten bildas som späder ut halterna. Det är inte bara bor- och strontiumhalterna som uppvisar denna variation, utan samma trend kan observeras i halterna av andra intressanta kemiska parametrar, så som magnesium, natrium, sulfat och fluorid, se Bilaga 2.

Borrhål BH2006 är en bergborrad brunn på den östra sidan av Tingstäde träsk. BH2006 avviker tydligt från samtliga andra bergborrade brunnar i vattnets kemiska sammansättning, oavsett period på året. Den kemiska sammansättningen är mer lik vatten från grundvattenrör i jord och ytvatten. Då vattnet i BH2006 tydligt visar en liknande kemisk sammansättning som grundvattenrören i jord, stärker det tolkningen att BH2006 försörjs med vatten från jordlagren i området via vertikala sprickor. I Figur 28 nedan representerar BH2006 symbolen "Grodvät, Berg".



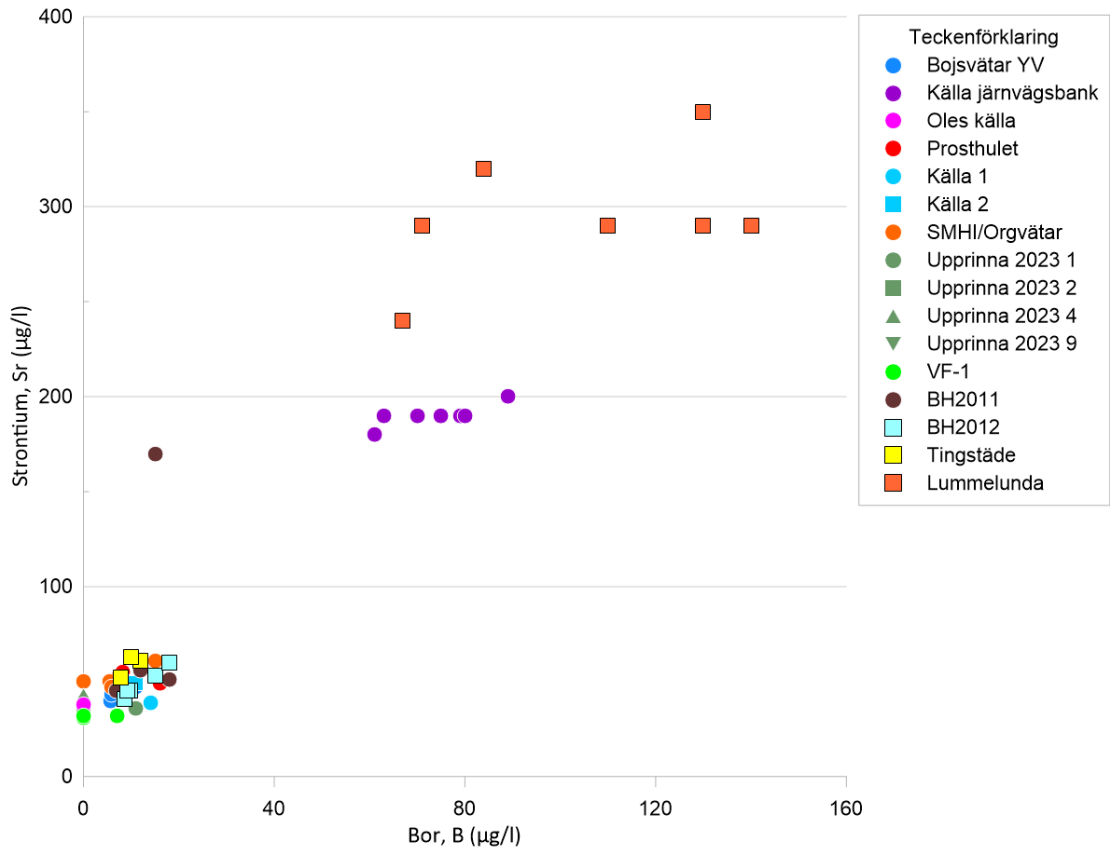
Figur 28. Jämförelse av jordvatten och bergvatten från borrhål i nära anslutning till Natura 2000-områdena Hejnum Kallgate, Bojsvätar och Grodvät.

Vid analys av kemiparametrar från bergsbrunnar och grundvattenrör från olika Natura 2000-områden förekommer en tydlig skillnad mellan bergsbrunnar och grundvattenrör i jord, se Figur 28.

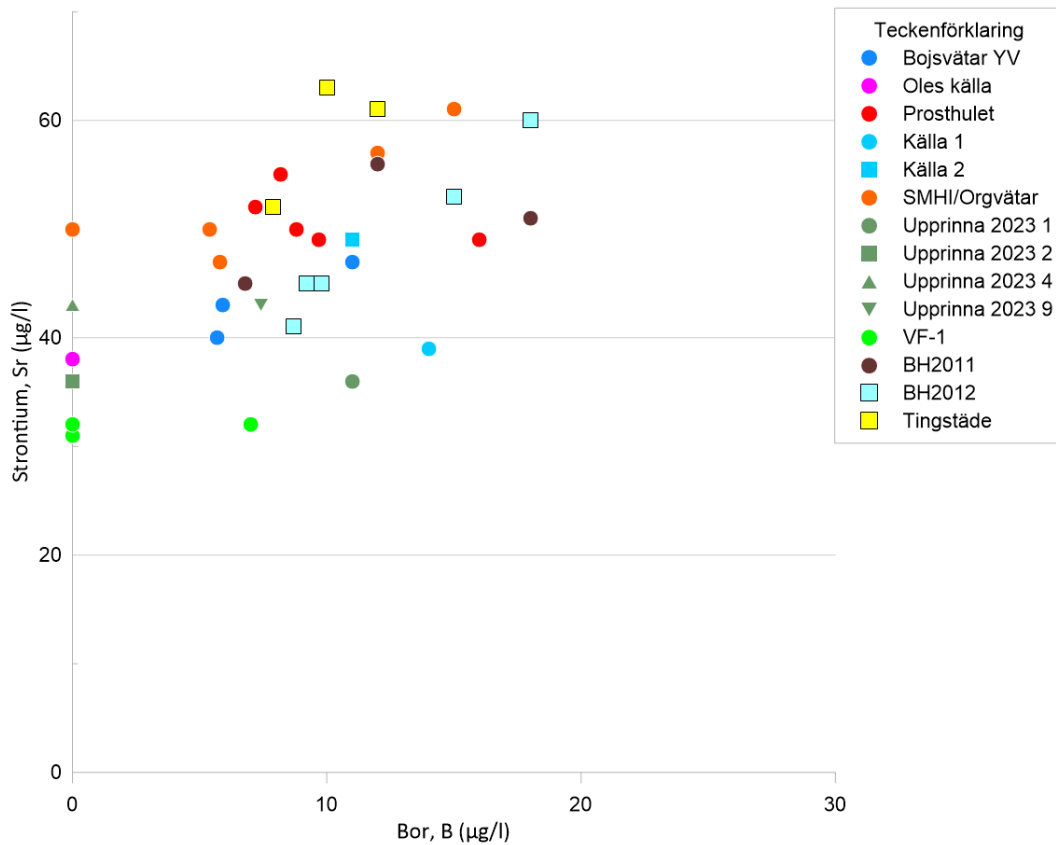
BH2006 (norr om Grodvät) utgör som nämnt ett undantag i vattenkemi för bergborrhål och uppvisar jordkaraktäristik. Det har inte påträffats något omvänt undantag, dvs. en punkt i jord som uppvisar berggrundvatten. I Bojsvätar och Hejnum Kallgate skiljer sig bergvatten och jordvatten tydligt åt i bor- och strontiumhalterna. Skillnaden i bor- och strontiumhalterna i kombination med de uppmätta halterna i våtmarkerna tyder på att vattnet i våtmarkerna inte är karakteriserat av berggrundvatten.

Vidare har ett antal enstaka punkter provtagits där det fanns ett intresse av att ta reda på den kemiska sammansättningen med enbart ett vattenprov, t.ex. proverna "Upprinna 2023 X" och "Källa 1 och 2". Dessa prover har jämförts med andra prover med kemisk sammansättning av både berg- och jordvatten. Analysresultatet för dessa enstaka provpunkter visar att allt provtaget vatten har en kemisk sammansättning likt resterande jordvatten, se Figur 29.

Ett prov från BH2011 visar på högre strontiumhalt, men fortsatt låg borhalt. Ingen av de andra kemiska parametrarna som kan användas för att karakterisera vatten visar på att den kemiska sammansättningen för vattnet är annat än jordvatten. Figur 29 kan förstöras för att säkerställa att de enstaka provpunkterna inte skiljer sig från resterande jämförda provpunkter. En sådan förstöring visar att vattnet från enskilda provpunkter är av jordkaraktär (Figur 30).



Figur 29. Bor- och strontiumhalt för enskilda prover uttagna under vintern 2023. (BH2011 har enbart högre halt strontium vid ett enda tillfälle. Ingen annan kemisk parameter visar på högre halt vid detta provtagningsstillfälle vilket gör detta enskilda mätvärde osäkert.)



Figur 30. Bor- och strontiumhalt för enskilda prover uttagna under vintern 2023, förstorat från Figur 29.

Sammanfattningsvis är det möjligt att karakterisera vattnets ursprung med de kemiska parametrarna bor, strontium, fluorid, magnesium, natrium, sulfat och organisk halt (COD-Mn). Vid höga halter av de nämnda kemiska parametrarna, förutom organisk halt, har vattnet haft en lång uppehållstid i berget vilket har resulterat i att mineralerna har löst ut i vattnet. Finns det däremot låga halter av mineralerna och en hög organisk halt har vattnet antingen haft en kort uppehållstid i berget eller aldrig varit i kontakt med berget.

Syreisotoperna $\delta^2\text{H}$ och $\delta^{18}\text{O}$ visar att det går att särskilja ursprunget av vattnet. Det förutsätter dock tydliga perioder av nederbörd och avdunstning. Förekommer inga långa perioder med lång avdunstning blir kvoten mellan $\delta^2\text{H}$ och $\delta^{18}\text{O}$ väldigt snarlik och det blir därmed svårt att karakterisera vattnets ursprung. Syreisotoper kan dock användas som ett komplement till andra analyserade parametrar för karakterisering av vatten.

4.8.3 Provtagning av klorid i den kommunala vattentäkten och kloridhalter i täkterna

I flertalet äldre borrhål runt Västra brottet har konduktivitet loggats för att undersöka saltpåverkan.

Vid Västra brottets sydöstra del (närmast havet) har konduktiviteter upp mot 500 mS/m uppmätts, vilket motsvarar som mest ca 1200 mg/l natriumklorid (i borrhål BH1107–BH1109). Uppmätta salthalter i dessa borrhål ligger dock i samma storleksordning som uppmätta salthalter i vatten som rann från täktväggen till pall 2 i Västra brottet, innan denna började vattenfyllas 2017. Den höga konduktiviteten är därmed mest sannolikt en effekt av relik saltvatten och/eller ett tecken på kontakt med havsvatten. Alla borrhål sydöst om Västra brottet har en ökande konduktivitet mot botten av borrhålet.

Vid Västra brottets sydvästra kant har konduktiviteter på mellan 125 mS/m till 225 mS/m uppmätts, vilket som mest motsvarar ungefär 520 mg/l natriumklorid (borrhål BH1105, BH1106 och BH2202). Den högsta konduktiviteten uppmättes i borrhål BH2202, som var borrarat till nivån -52 m. Konduktiviteten ökar tydligt vid ca -40 m och är som högst vid -48 m.

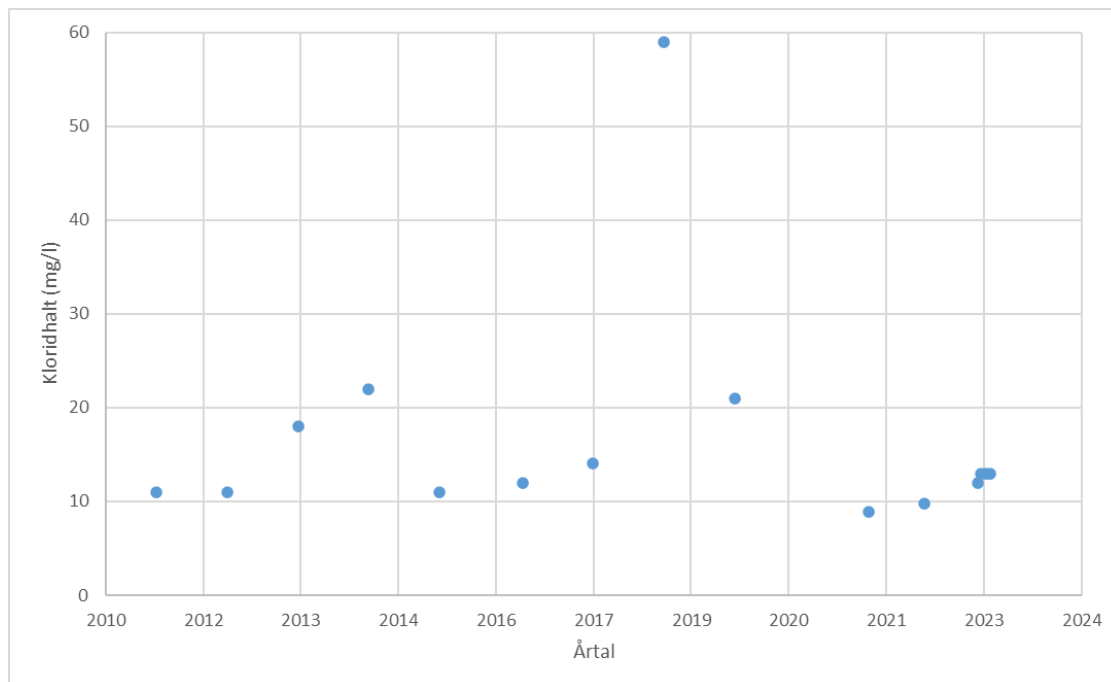
Norr om Västra brottet har konduktiviteter på upp till 70 mS/m uppmätts, vilket motsvarar ca 170 mg/l natriumklorid (BH2017). Konduktiviteten avtar mot botten av borrhålet (-11 m).

Mellan File hajdar-täkten och Västra brottet ligger den kommunala vattentäkten Dyhagen. Vattentäkten består av sju bergborrade produktionsbrunnar placerade i ungefärlig nord-sydlig linje med ett inbördes avstånd på mellan 150 och 500 m. Region Gotland genomför provtagning av klorid i de kommunala produktionsbrunnarna. Tidigare genomfördes provtagningar av klorid en gång per år, under sensommaren då grundvattennivån är som lägst och kloridhalten därmed är som högst. Från och med februari 2023 genomförs provtagning en gång i månaden. Proverna uttas som blandprover. Analysresultaten från provtagningar genomförda mellan 2011 och 2023 kan ses i Figur 31.

År 2018 uppmättes de lägsta uppmätta grundvattennivåerna på 2000-talet i flera brunnar inom undersökningsområdet, se Figur 1. Under samma år uppmättes den klart högsta kloridhalten i Dyhagens vattentäkt. Kloridhalten uppgick då till 59 mg/l. Som jämförelse kan nämnas att riktvärdet för god kemisk grundvattenstatus med avseende på klorid uppgår till 100 mg/l (O8FS 2016:15). Smakgränsen, dvs. den nivå då de flesta upplever att vattnet smakar salt, ligger dock på 300 mg/l.

Eftersom både tidpunkten för provtagning och tidpunkten för lägsta grundvattennivå varierar inom ett spann på en dryg månad, utan att vara synkroniserade med t.ex. nederbörd, finns det en viss osäkerhet vad gäller den verkligt högsta halten varje år. Man bör därmed inte lägga alltför stor vikt vid ett enstaka mätvärde, utan istället titta på trender och mönster. Om man exkluderar mätvärdet från den nederbördsfattiga sommaren 2018 uppmäts stabila värden inom spannet 8,9–22 mg/l, med ett medelvärde på 14,25 mg/l för perioden augusti 2011 till april 2023,

se Figur 31. Exkluderar man även mätvärdena för 2023, som uppmätts under vinterhalvåret, blir medelvärdet i stället 15 mg/l. Att just 2018 sticker ut med en lägre halt visar att om grundvattennivåerna i vattentäkten blir markant lägre än under en normalsommar ökar salthalterna i råvattnet.



Figur 31. Årligen uppmätta kloridhalter sommartid i Dyhagens vattentäkt under perioden 2011–2022. Från och med 2023 visas månadsvisa uppmätta kloridhalter.

Den månadsvisa provtagningen under 2023 visar att halterna ligger inom det spann som tidigare uppmätts, då mätning endast genomfördes under sensommaren, dvs. 8,9–22 mg/l. Uppmätta värden visar sammantaget på stabila och låga kloridhalter, både under sensommaren och under månaderna februari till mars.

4.9 UNDERSÖKNINGAR INFÖR SKYDDSÅTGÄRDER

Heidelberg Materials har utrett olika skyddsåtgärder för att minimera den ansökta verksamhetens påverkan på grundvattenförhållandena. Bolaget har låtit genomföra pilotförsök med ridåinjektering vid Västra brottet och File hajdar-täkten. Dessa pilotförsök beskrivs i avsnitt 4.9.1 nedan. Bolaget har även låtit genomföra infiltrationsförsök, spårämnesförsök och provpumpningar, för att utreda förutsättningarna att infiltrera länshållningsvatten och därigenom motverka en avsänkning av grundvattennivåerna söder om File hajdar-täkten. Dessa undersökningar beskrivs i avsnitt 4.9.2–4.9.3 nedan

4.9.1 Ridåinjektering – teknisk genomförbarhet och injekteringens tätande effekt

Ridåinjektering innebär att man tätar sprickor i berget genom att via en rad med borrhål injektera ett tätande medel. Tätningemedlet har i detta fall utgjorts av cement. Genom att pumpa ut tätningemedlet i sprickorna minskar man sprickornas förmåga att transportera vatten. Effekten när det fungerar väl blir att genomsläppligheten och vattenflödet tvärs ridån minskar.

Försöken med ridåinjektering har utförts genom borring, vattenförlustmätning och injektering och har haft fokus på teknisk genomförbarhet och injekteringens tätande effekt. I detta avsnitt ges en övergripande beskrivning av arbetet. Ytterligare detaljer redovisas i Bilaga 5.

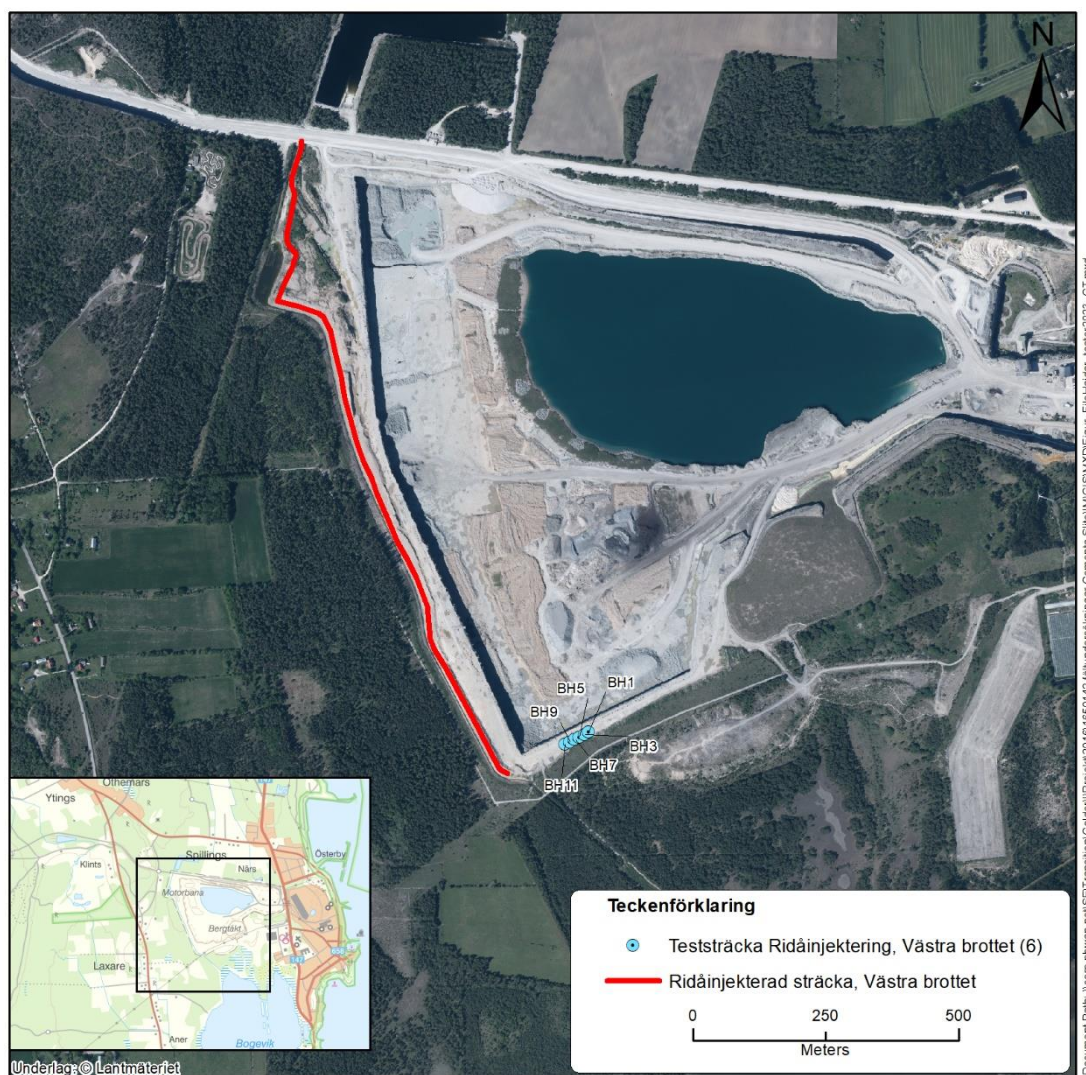
Vid en vattenförlustmätning pumpas vatten ut i sprickorna i berget via ett borrhål. Detta görs med ett förutbestämt tryck och under en förutbestämd tid. Detta speglar sprickornas förmåga att

transportera vatten. Ett högt värde innebär att mycket vatten kan pumpas ut vilket i sin tur indikerar att de sprickor som korsar borrhålet har god förmåga att transportera vatten.

Den tätande effekten för ridåinjekteringen utvärderades genom ett arbetssätt som kallas "split-spacing". "Split-spacing" innebär att man borrar en rad med borrhål med ett inbördes hålavstånd på exempelvis 10 m, se borrhål markerade med gröna symboler i Figur 34. Dessa vattenförlustmäts och injekteras. I nästa steg borrar mellanliggande hål, gula symboler i Figur 34, vilket resulterar i ett inbördes hålavstånd av 5 m. Även dessa vattenförlustmäts. Den tätande effekten utvärderas genom att jämföra resultat från vattenförlustmätning innan och efter utförd injektering.

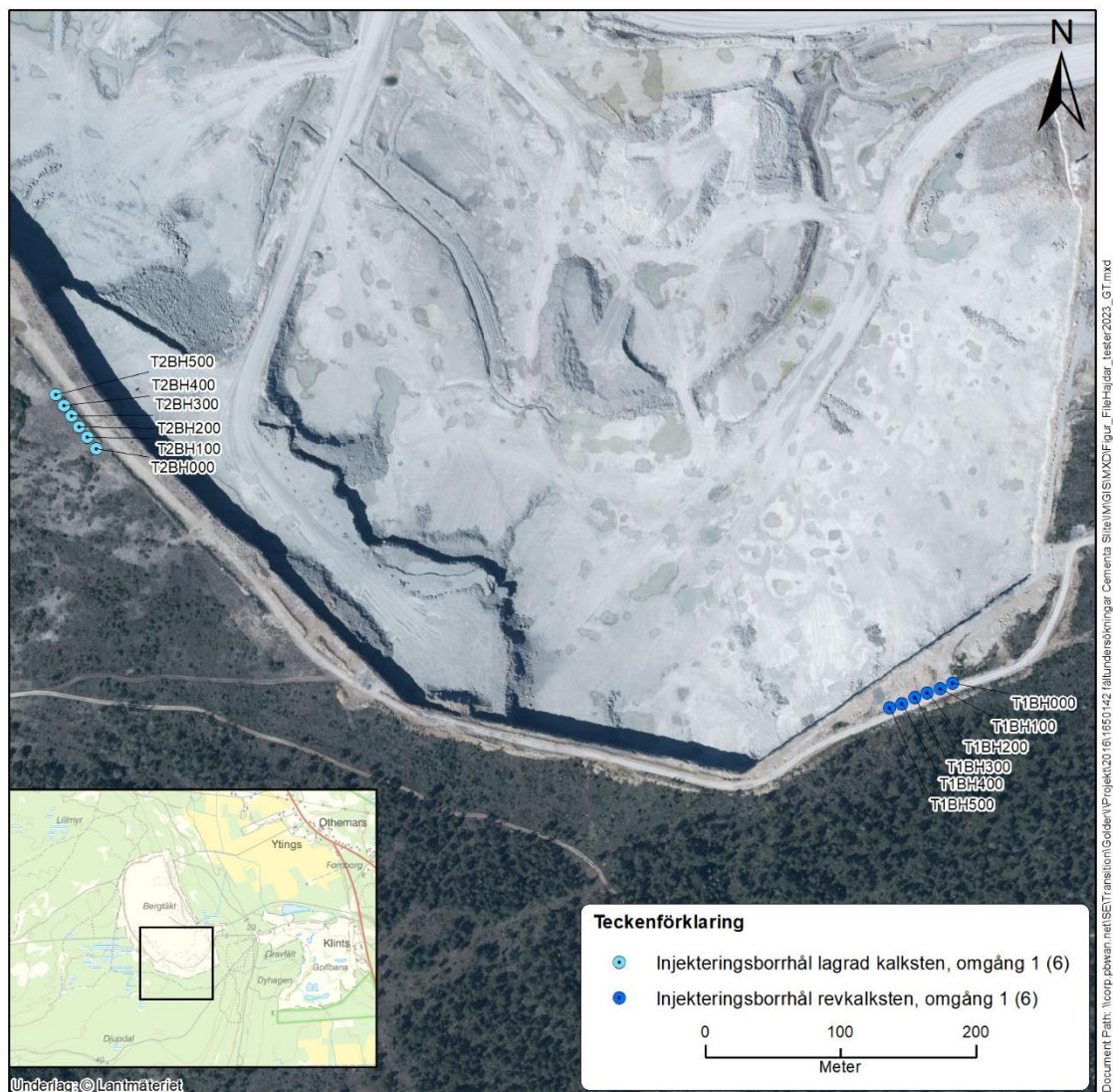
Ridåinjektering görs i ett stort antal infrastrukturprojekt årligen med syfte att minska grundvatteninflöde. Fram till 2022 har täktverksamheten vid Heidelbergs täkter i Sliteområdet, liksom till WSP:s kännedom, alla andra bergtäkter i Sverige utförts genom att en bergmassa bryts ut och inflödet av grundvatten blir vad det blir. Ridåinjekteringen längs västra kanten av Västra brottet som utfördes under 2022 var i så fall den första svenska bergtäkten där storskalig ridåinjektering använts för att begränsa inflöde och upprätthålla grundvattennivåer.

Under 2022 ridåinjekterades en sträcka vid Västra brottet, i syfte att begränsa inflödet av sötvatten till Västra brottet. Den ridåinjekterade sträckan uppgick efter avslutat arbete till ungefär 1340 m. Denna ridåinjektering inleddes med ett injekteringsförsök längs en sträcka på 50 m vid den södra kanten av Västra brottet. Därefter ridåinjekterades en längre sträcka längs täktens västra kant, se Figur 32. Sammanfattningsvis kan sägas att det tekniska genomförandet fungerade väl. Den tätande effekten, här beskriven med reduktion i vattenförlust vid en injektering med ett hålavstånd av 10 m, uppskattades till 30 %.



Figur 32. Ridåinjektering vid Västra brottet med injekteringsförsök i söder och ridåinjektering längs västra kanten.

Ridåinjekteringen vid File hajdar-täkten utfördes för två olika 50 meter långa sträckor, på i princip samma sätt som för injekteringsförsöket vid Västra brottet. Område 1 i södra (östra) delen av File hajdar-täkten förlades till ett område med revkalksten. Borrhålsdjupen valdes för att nå ner under revet till ett intressant bedömt vattenförande lager som identifierats med geofysik. Område 2 var förlagt till ett område i den sydvästra delen av File hajdar-täkten i lagrad kalksten ner i underliggande mägerlsten. Båda testområdenas läge redovisas i Figur 33.



Figur 33. Ridinjektering vid File hajdar-täkten. Område 1 i söder (öster) (revkalksten och underkant revkalksten) och Område 2 i sydväst (lagrad kalksten). Första omgångens borrhål med det inbördes hålavståndet 10 m.

Både för Västra brottet och File hajdar-täkten var borrhålen vertikala, generellt 60–70 m djupa. Injekteringen utfördes generellt i två omgångar och för olika antal nivåer.

Den principiella arbetsgången för de tre 50 meter långa injekteringsförsöken illustreras i Figur 34. Inledningsvis borrades 6 borrhål med ett inbördes hålavstånd på 10 m, Omgång 1, se gröna symboler i Figur 34. Spinner-flödesloggning utfördes för File hajdar-täkten, vattenförlustmätning och injektering utfördes både vid File hajdar-täkten och vid Västra brottet.

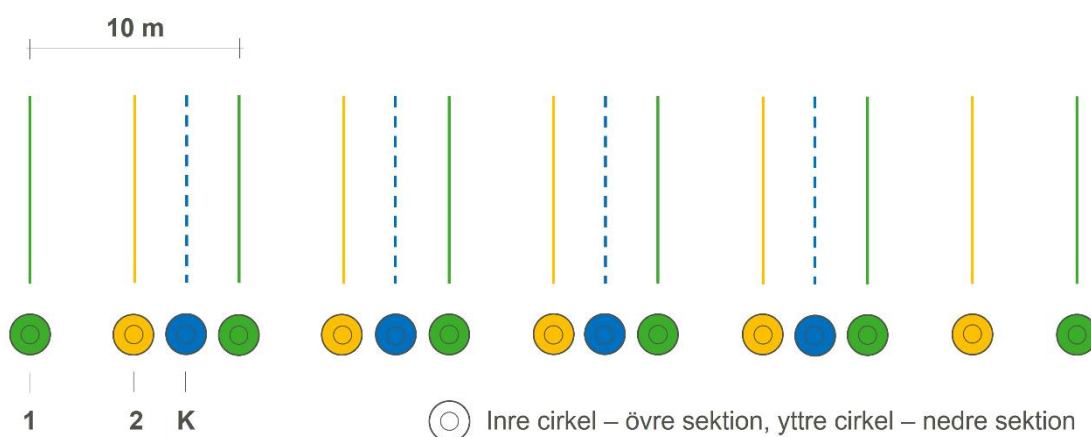
Detta följdes av borrning av fem mellanliggande borrhål, Omgång 2, gula symboler i Figur 34. För dessa utfördes vattenförlustmätning och injektering. Avslutningsvis borrades fyra kontrollhål för vattenförlustmätning och ytterligare kontroll av injekterings tätande effekt, blå symboler i Figur 34. Både vattenförlustmätning och injektering utfördes med enkelmanschett och för två till fem nivåer. När man använder en enkelmanschett innebär det att manchetten avgränsar borrhålet och att man enbart undersöker eller injekterar borrhålet under denna manchett. Flöde, Q, för sektioner skattades sedan baserat på flöde för de olika nivåerna. Nivåerna representeras principiellt med cirklar i Figur 34. Den större cirkeln representerar den nedre sektionen och den inre cirkeln den övre sektionen.

Rumslig fördelning av hydrauliska egenskaper pekade både för Västra brottet och File hajdar-täkten på en anisotrop bergmassa med hög horisontell hydraulisk konduktivitet, särskilt så för det mest genomsläppliga området, Område 1 vid File hajdar-täkten. Flödesloggning från ca

30 m djup och nedåt identifierade tre vattenförande strukturer och bland dessa återfanns en välkonnekterad struktur på ett djup från markytan (överkant foderrör) på ungefär 50–51 m.

Även injekteringsförsöken vid File hajdar-täkten visade att arbetet var tekniskt genomförbart och liksom för Västra brottet pekade resultaten på störst tätande effekt för Omgång 1, vilken hade ett inbördes hålavstånd på 10 m, gröna symboler i Figur 34. Den tätande effekten, beskriven som en reduktion i vattenförlust, uppskattades för detta hålavstånd till 88 %.

Baserat på resultaten från Område 1 var reduktionen i vattenförlust 88 % från oinjekterat berg till efter injektering med hålavståndet 10 m. Reduktionen från oinjekterat berg till efter injektering med hålavståndet 5 m uppskattades till 97 %. Borrning och injektering av dessa mellanliggande borrhål skulle i grova drag ge en fördubbling av resursåtgången och klimatpåverkan för injekteringen men enbart ge en ytterligare reduktion från 88 till 97 %, dvs. runt 10 procentenheter.



Figur 34. Principiell geometri injekteringsförsök. Omgång 1 (grön, 1), Omgång 2 (gul, 2) och borrhål för kontroll (blå, K). Inre cirkel – övre sektion, yttre cirkel – nedre sektion.

4.9.2 Provpumpningar

Under vintern 2023 genomfördes fyra längre provpumpningar med observation i ett stort antal omgivande brunnar för att kunna studera anisotropier i påverkan runt pumpbrunnarna. Pumptesterna genomfördes också för att studera om det är olika påverkan i respektive under revkalkstenen, anisotropier och skillnad i påverkansområde jämfört mot den lagrade kalkstenen. Provpumpningarna hade utöver detta även syftet att studera om brunnarna kan användas som extraktionsbrunnar i en eventuell vattenhantering som inkluderar extraktion och infiltration. Resultatet av pumptesterna går att utläsa i Bilaga 2.

Det första av de fyra större pumptesterna genomfördes under vintern 2022/2023 i den lagrade kalkstenen, ca 300 m sydväst om File hajdar-täkten. Resultaten visar på ett homogent, jämnt utbrett påverkansområde runt pumpbrunnen. Pumptestet i den lagrade kalkstenen visar att flödessystemet är välkonnekterat och utgörs av tydliga lager.

De resterande tre större pumptesterna genomfördes i revkalkstenen under vintern 2023, ca 600 m nordväst om File hajdar-täkten. Påverkansområdena från dessa pumptester förefaller sig ha en anisotropi i nordöstlig riktning. Påverkansområdena i revkalkstenen blir inte lika utbredda på grund av att det inte finns kontinuerliga välkonnekterade lager jämfört mot lagrad kalksten eller mägerlstenen. Under revkalkstenen observeras en påverkan på ett stort avstånd norrut, men ingen påverkan observeras i andra observationsbrunnar som når under revkalkstenen. Resultatet visar att under revkalkstenen återfinns de välkonnekterade lagren. Isotropin i de undre lagren kan dock inte fastställas, då observationsbrunnarna som når ner till de undre lagren inte är jämnt fördelade runt pumpbrunnarna.

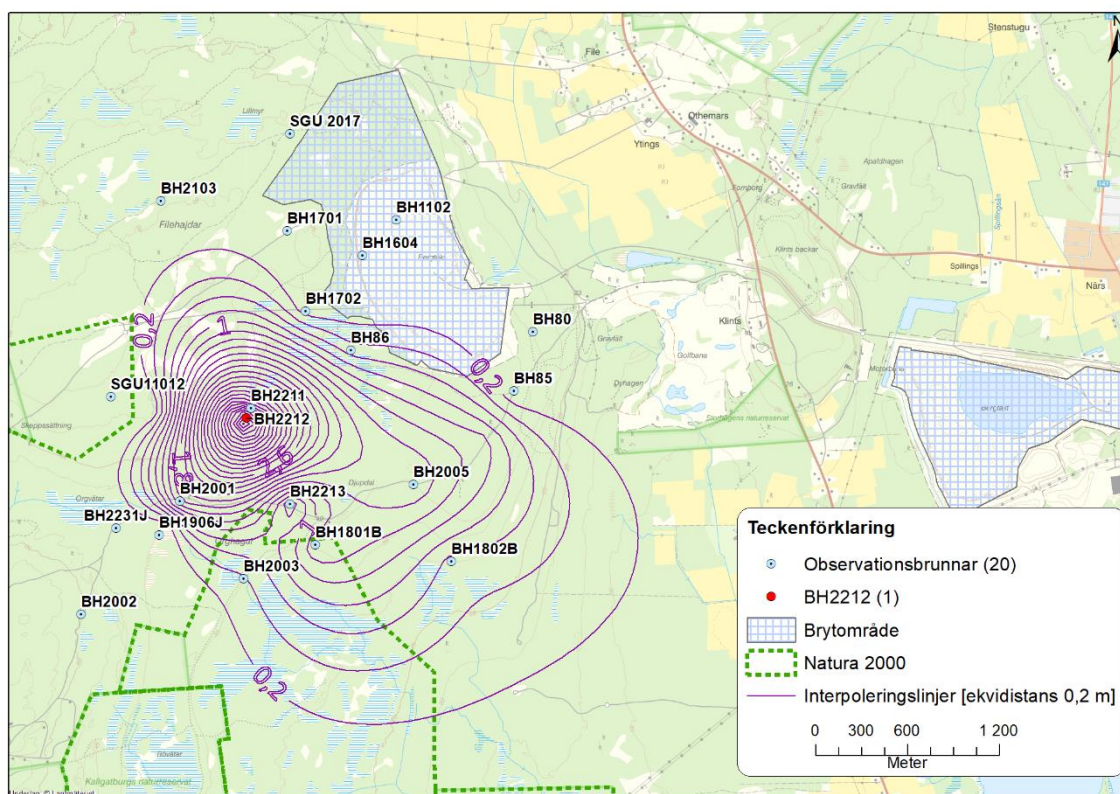
Inget i resultatet av något genomfört pumptest visar på omfattande djupt liggande karst.

4.9.3 Infiltrationsförsök

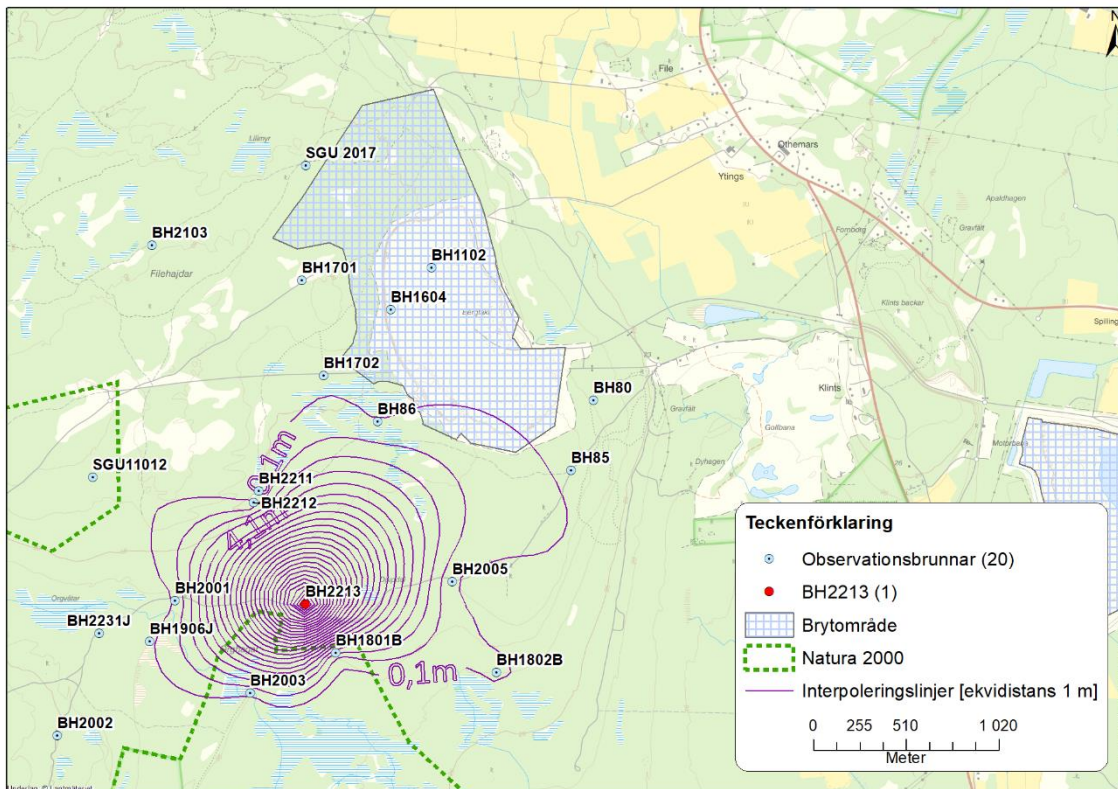
Infiltration med syfte att upprätthålla grundvattennivåer används i stor omfattning inom infrastrukturprojekt och byggnationer i sättning känsliga miljöer. Runt täkter i Sverige är det dock endast på ett fåtal platser det görs eller övervägs.

Flera infiltrationsförsök har genomförts i området kring File hajdar. Under 2022 genomfördes två kortare infiltrationstester för att undersöka möjligheten att använda infiltration som skyddsåtgärd. Under 2023 genomfördes två längre infiltrationsförsök för att identifiera anisotropier, hur påverkan sprider sig i revkalkstenen och under revkalkstenen samt vilken nivåhöjning en viss tillsatt vattenvolym skapar. Resultaten av dessa infiltrationsförsök sammanfattas här nedan. För en mer detaljerad beskrivning, se Bilaga 2.

Infiltrationsförsöken från juli 2022 i infiltrationsbrunnarna BH2212 och BH2213, som båda pågick i 12 timmar, visar på en utbredd påverkan av trycknivåhöjning främst i östlig riktning från infiltrationsbrunnarna. Infiltrationsförsöken visar också att det går att skapa trycknivåökningar söderut mot Natura 2000-områdena. I Figur 35 och Figur 36 illustreras påverkansområdet från de båda infiltrationsförsöken. Infiltrationsförsöken visar att det djupare grundvattensystemet på File hajdar är heterogent på så sätt att två brunnar som penetrerar samma lager har olika infiltrationskapacitet. Grundvattensystemet kännetecknas dock samtidigt av att det är ett väl konnekterat och stort flödessystem, som begränsas i väster av revkalkstenen. Den regelbundna påverkan i alla riktningar från infiltrationsbrunnarna och revet visar att det djupare flödessystemet inte karakteriseras av karststrukturer.

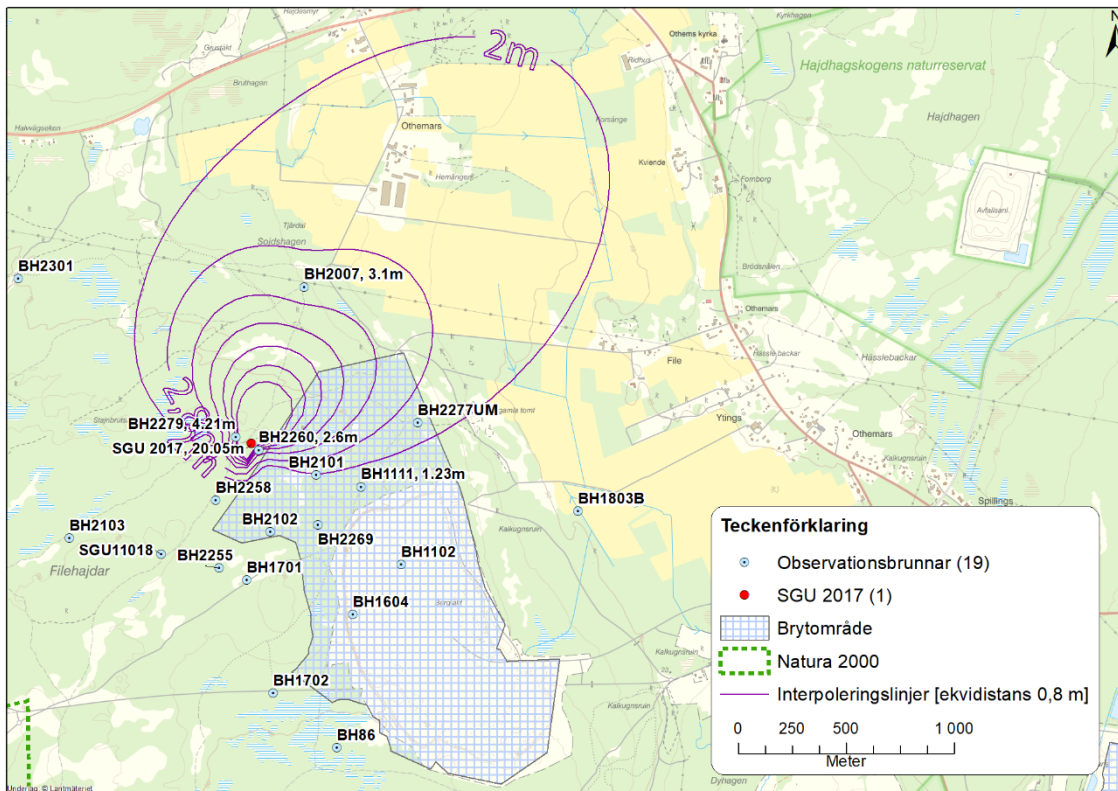


Figur 35. Interpolering av påverkansområde av infiltrationsförsöket i BH2212, sommaren 2022. Påverkansområde (lila linjer) beräknat med Kriging-metoden.



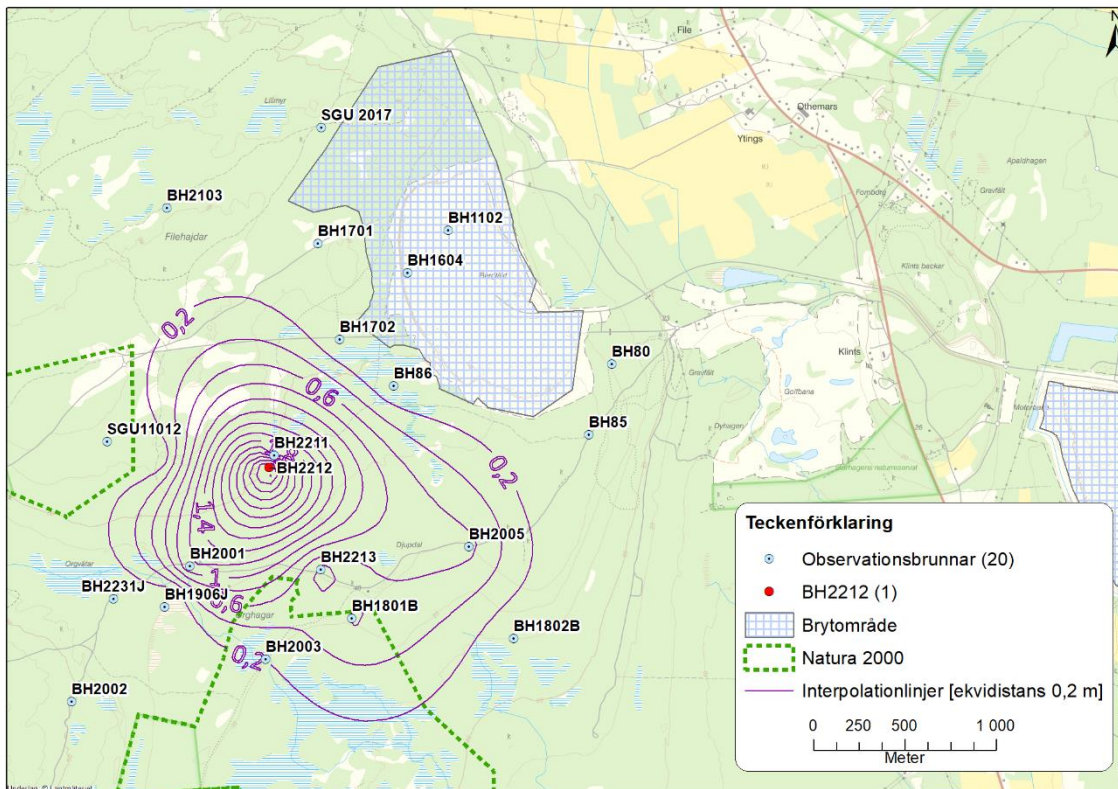
Figur 36. Interpolering av påverkansområde av infiltrationsförsök i BH2213, sommaren 2022. Påverkansområde (lila linjer) beräknat med Kriging-metoden.

Infiltrationsförsöken i juli 2023 genomfördes i brunnar SGU2017 och BH2212 under 48 timmar respektive 140 timmar. Brunn SGU2017 befinner sig nordväst om det befintliga brytområdet vid File hajdar-takten, infiltrationsförsöket visar tydligt ett dåligt konnekterat system i revkalkstenen med en begränsad påverkan och utbredning, se Figur 37. Påverkan i de undre lagren, gränssytan mellan revkalkstenen och mörkelstenen, blev dock tydligt större när vi ökade trycknivån i SGU2017. Detta kan ses i den snabba responsen och tydliga grundvattentrycknivåförändringen i BH2007UM, som är en avmanschetterad brunn cirka 800 m nordnordost om infiltrationsbrunnen. Ett liknande resultat skulle ha förväntats av BH1701, söder om SGU2017, om den också skulle ha varit avmanschetterad.



Figur 37. Interpolering av påverkansområde av infiltrationsförsöket i SGU2017, sommaren 2023. Påverkansområde (lila linjer) beräknat med Kriging-metoden.

Resultaten från infiltrationsförsöken i BH2212, sydväst om det befintliga brytområdet vid File hajdar-täkten, visar största påverkan i brunnar placerade i mägersten, se Figur 38. Trycknivåökningen är väldigt lokalt begränsad i revkalksten som utgör de översta lagren. Mägerstenen och speciellt gränsytan mellan mägersten och kalksten visar en god konnektivitet, särskilt mot Natura 2000-områdena i syd-sydöst. Påverkan mot väst är begränsad på grund av revkalkstenen. I mägerstenen under revkalkstenen finns inte tillräckligt många djupa borrhål för att kunna bedöma påverkansområdet på stort djup. Åt väster finns det dock några djupare observationsbrunnar vid Tingstäde träsk som inte visade någon påverkan. Mot norr begränsar revkalkstenen påverkan. Även detta infiltrationsförsök visar, liksom 2022 års infiltrationsförsök, att det djupare flödessystemet inte karakteriseras av karststrukturer utan påverkan är jämnt fördelad i alla riktningar bort från reven.



Figur 38. Interpolering av påverkansområde av infiltrationsförsöket i BH2212, sommaren 2023. Påverkansområde (lila linjer) beräknat med Kriging-metoden.

Sammanfattningsvis kan sägas att alla genomförda infiltrationsförsök visar att möjligheten att använda infiltration som skyddsåtgärd är god. En höjning av grundvattenyttrycknivån går att åstadkomma på stora avstånd (ca 1,5 km). Vid infiltration i BH2212, vilken är borrad för att utgöra en potentiellt lämplig infiltrationsbrunn, blir nivåhöjningen störst mot syd och sydöst. Brunnen är således lämplig att använda för att begränsa täktverksamhetens påverkan på grundvattennivåerna i Natura 2000-områdena. Infiltrationsförsöket i SGU2017 visar att trycknivåökningen i revkalkstenen är starkt lokalt begränsad och mer oregelbunden. Om infiltration görs i brunnar som når under revkalkstenen når tryckpåverkan större avstånd. Det är svårt att tydligt fastställa i vilken utsträckning denna påverkan på djupet är jämnt fördelad i alla riktningar (isotropisk) eller har ett riktningberoende mot nordnordost som observationer indikerar. Det finns bara ett fåtals brunnar som både når stora djup och är avmanschetterade, så att påverkan inte döljs av flöde från högre liggande opåverkade lager. Påverkan på stora djup under revkalkstenen anses dock vara av mindre betydelse då den hydrauliska kopplingen mellan en framtida fördjupad File hajdar-täkt till +5 m, djupt liggande lager och slutligen omgivande skyddsvärden så som Natura-2000 områden och Region Gotlands vattentäkt anses vara mycket begränsad.

4.10 SPÅRÄMNESFÖRSÖK

I samband med infiltrationsförsöken under sommaren 2023 genomfördes även två spårämnesförsök. Försöken hade flera syften:

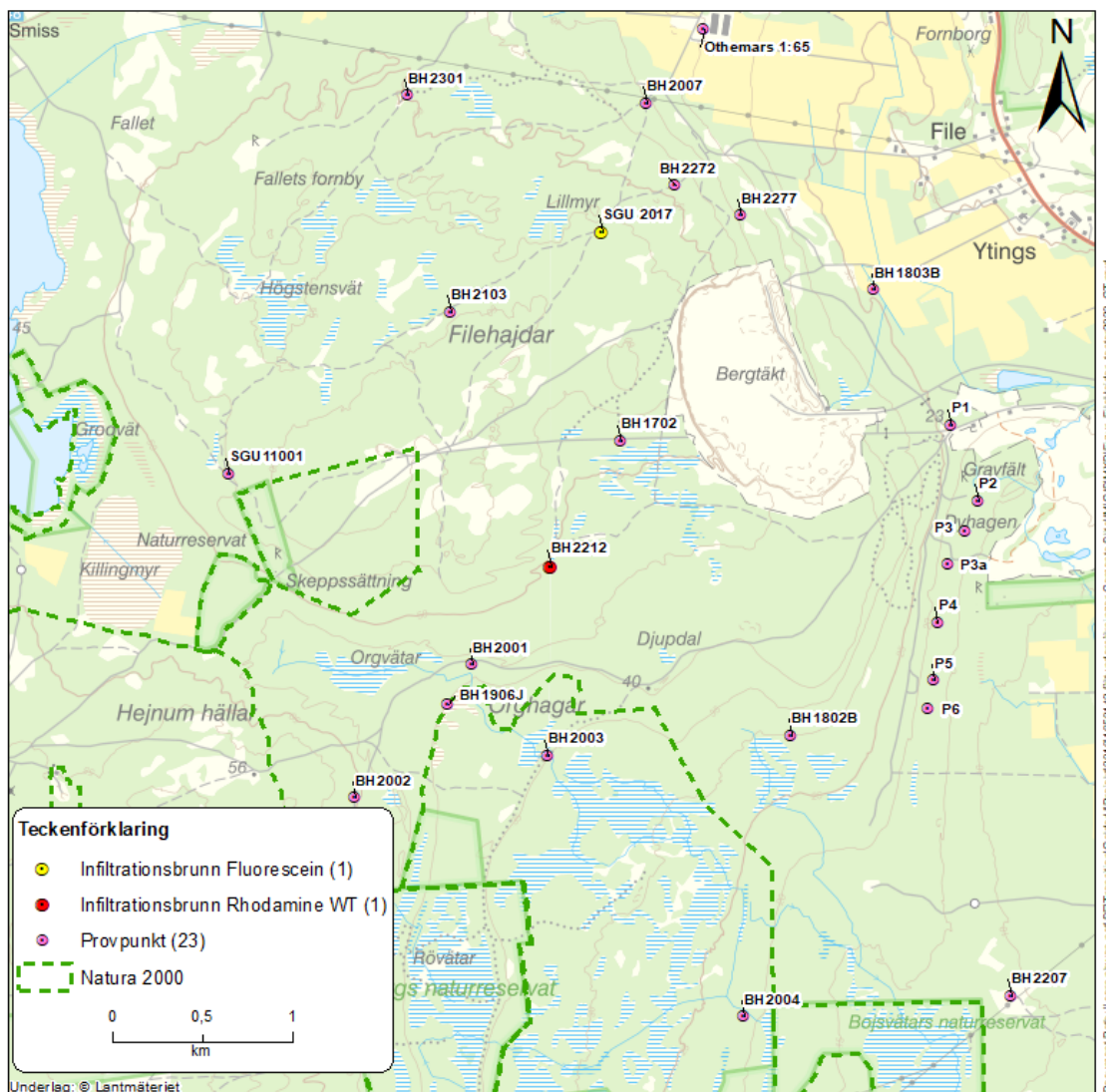
- Bestämma transportvägar för infiltrerat vatten
- Bestämma transporttid för infiltrerat vatten
- Bestämma effektiv porositet
- Validera den upprättade grundvattenmodellen inklusive den konceptuella modellen.

I brunnen BH2212 tillsattes spårämnet Rhodamine WT och i brunnen SGU2017 tillsattes Fluorescein. Spårämnesförsöken startade den 29 juni 2023 då 13,6 kg Rhodamine WT tillsattes i BH2212 ca 1 dygn in i infiltrationsförsöket, med ca 5 dygn av återstående infiltration. Samma

dag tillsattes 4,5 kg Fluorescein i SGU2017 tillsammans med drygt 1 m³ vatten, men utan efterföljande infiltrationsförsök.

Provtagning genomförs i 23 brunnar i alla riktningar runt injekteringsbrunnarna, se Figur 39. Förekomsten av spårämne i vatten analyseras både med påsar med aktiv kol som installerats i observationsbrunnar och genom uttag av vattenprover för analys. De bägge metoderna har olika fördelar och nackdelar resultaten kan ses som kompletterande till varandra. Kolpåsar har låg detektionsgräns och mäter den samlade halten under all tid de befinner sig i vattnet. Vattenproven ger en exakt halt i vattnet och ögonblicksbilder för de olika provtagningstidpunkterna. Provtagning gjordes utifrån ett upplagt program med gradvis sjunkande provtagningsfrekvens. De första två veckorna efter tillsats av spårämne genomfördes provtagning med några få dagars mellanrum. Efter två månader genomfördes provtagning av spårämne en gång varannan vecka. Efter ca 3 månader minskades frekvensen i ca hälften av brunnarna till att endast provtas månadsvis medan de brunnar med detekterat spårämne (eller bedömt störst sannolikhet för framtida upptäckt av spårämne) alltjämt provtas varannan vecka.

Nedan redovisade resultat bygger på tillgänglig data från provtagningar t.o.m. 12 november 2023. Logistik med transport av prover till laboratorium i USA samt analystider innebär en fördröjning från provtagning till erhållna resultat. Ytterligare provtagning har genomförts och provtagningen kommer att fortgå till 2024. Resultatet är därmed preliminärt och kommer att utvecklas, för mer detaljer se Bilaga 2.



Figur 39. Brunnar där provtagning för spårämne genomförs.

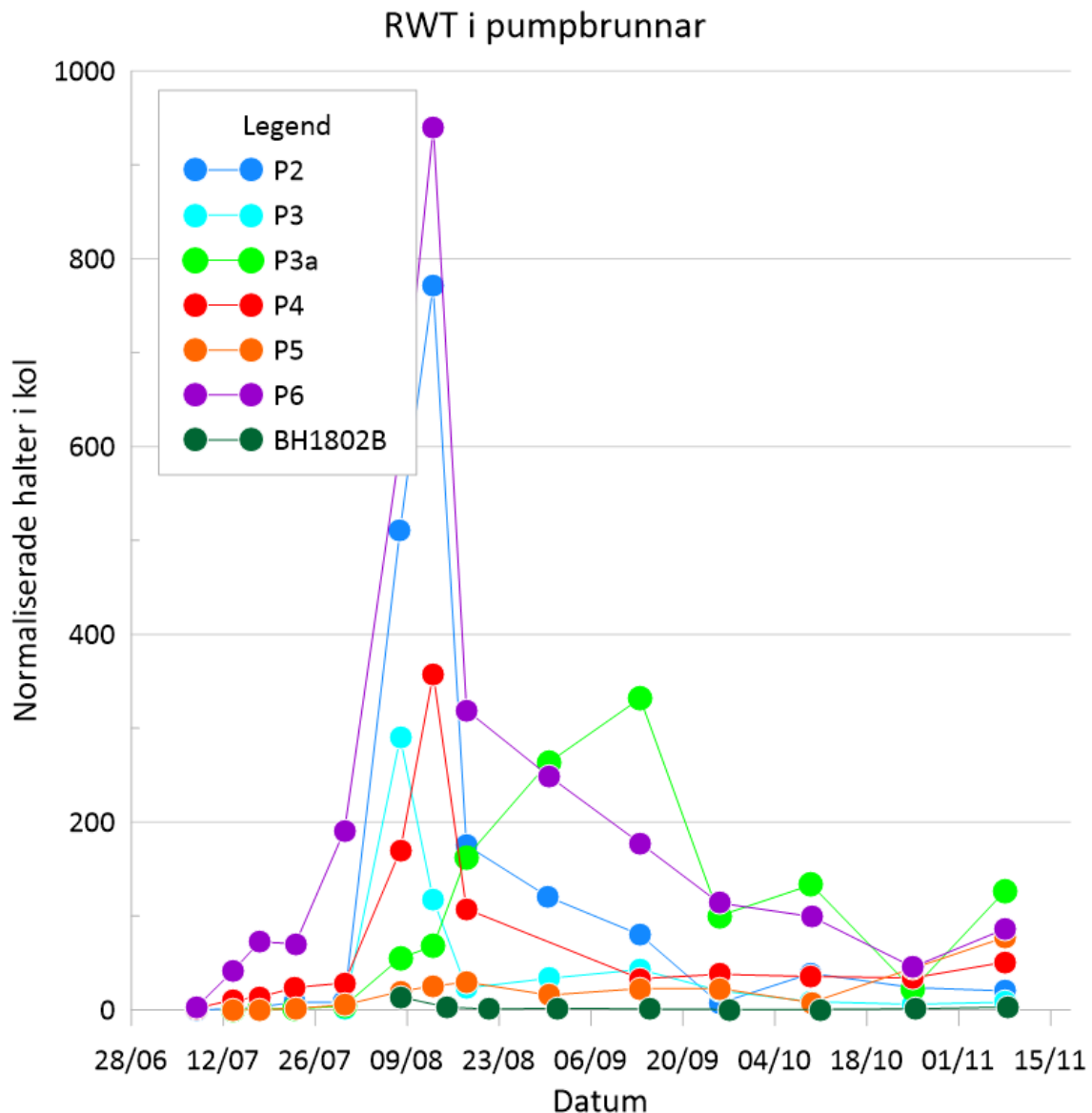
Rhodamine WT har observerats i de kommunala produktionsbrunnarna belägna ca 2 km öster om infiltrationsbrunnen. Rhodamine WT har även observerats i låga halter i BH1802B, belägen sydväst om vattentäkten. Utöver dessa punkter har Rhodamine WT inte återfunnits i någon provtagningspunkt. Avsaknaden av detektion är särskilt noterbart i observationsbrunnarna söder om BH2212, i vilka tryckresponser från infiltrationen var tydlig och mycket snabb, se kapitel 4.9.3 ovan. Det samlade resultatet från de båda metoderna med spårämne och tryckrespons visar därmed att infiltrationen kan höja nivån i de norra delarna av Natura 2000-områdena söder om File hajdar-täkten. Men inte i första hand genom en strömning av vatten mot söder, utan främst på grund av ett mothållande tryck för det vatten som naturligt strömmar från väster mot öster inom Natura-2000 området Hejnum Kallgate. Det är ännu för tidigt att säga att inget infiltrerat vatten rör sig söderut under några hydrologiska situationer, men det är tydligt bevisat att den absoluta majoriteten av det infiltrerade vattnet strömmar åt öster och en betydande andel av det kommer att nå vattentäkten. Flödesvägarna från infiltrationen har även simulerats i upprättad numerisk grundvattenmodell med god överensstämmelse, se Bilaga 3.

Rhodamine WT detekterades först i låga halter i pumpbrunnarna P4 och P6 i både kol och vatten vid provtagning den 12 juli 2023. En genombrotts tid på 14 dagar (eller 9 om man utgår från mittdagen då kolpåsarna suttit installerade), vilket låg väl i linje med vad som prognostiserats med simuleringar i den upprättade grundvattenmodellen.

Toppen för högsta halt är, om man utgår från kolprovtagningen (vilken ger ett slags kontinuerligt medelvärde), i mitten av augusti, se Figur 40. Transporttiden är med andra ord i genomsnitt ca 1,5 månad från BH2212 till den kommunala vattentäkten. Brunn P3a, ungefär i mitten av brunnsraden, bryter dock mönstret och visar längre transporttider med toppen efter ca 2,5 månad, se nästa kapitel 4.10.1.

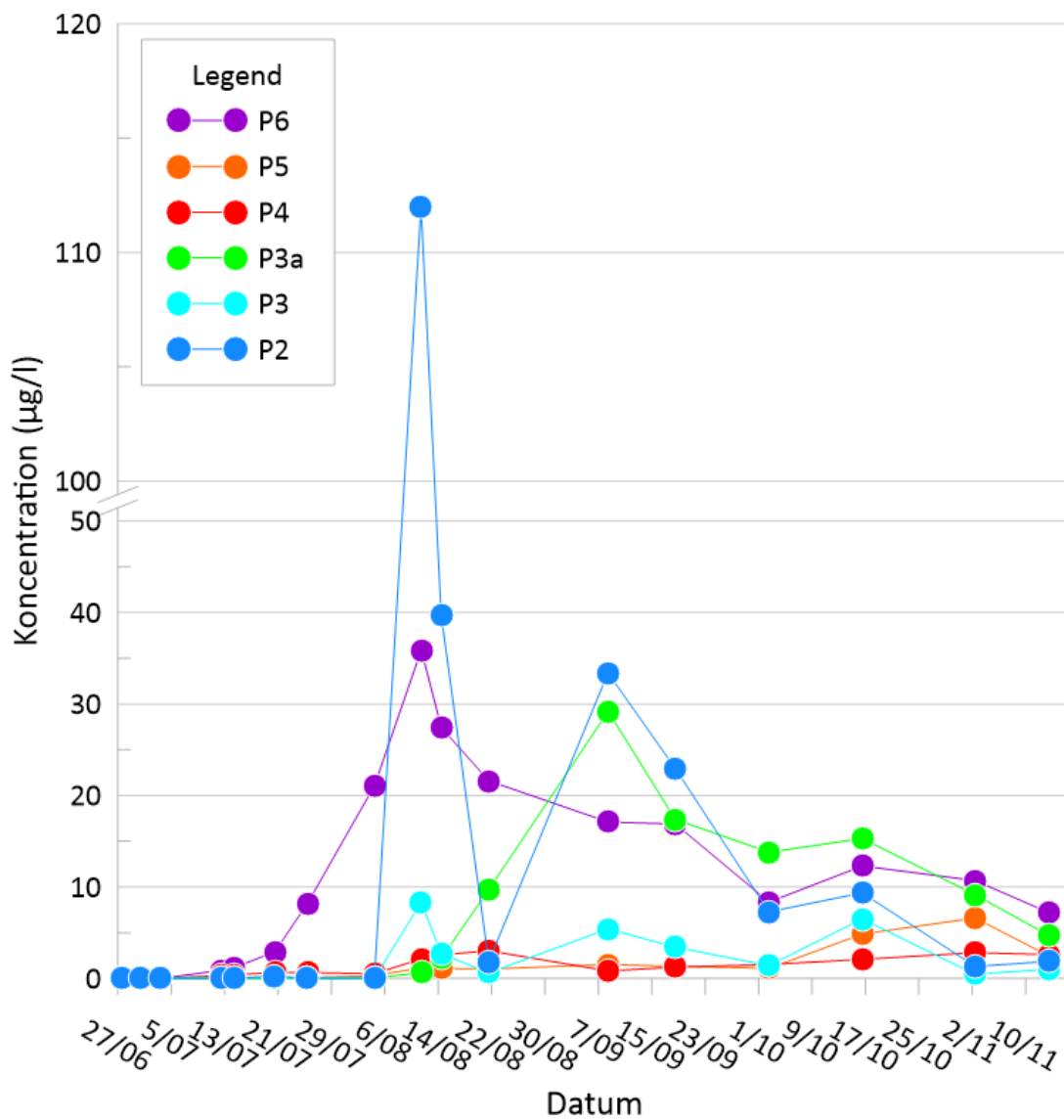
Efter att toppen har inträffat faller medelhalterna mycket snabbt (se Figur 40). Fallet i medelhalt efter att toppen har inträffat är faktiskt snabbare än tillväxten i halt före toppen. Detta är inte vad som normalt kan förväntas. Normalt följer efter en uppmätt topp långsamt sjunkande halter.

Förklaringen till det snabba fallet i medelhalt kan vara att grundvattnets flödesmönster förändras efter det att toppen har inträffat; vilket stämmer konceptuellt väl med den stora årliga amplituden i grundvattennivå, som har observerats vid och kring File hajdar, och även i observationsbrunnarna. När grundvattennivåerna stiger efter sommaren förändras grundvattnets flödesmönster och spårämnet strömmar inte längre mot produktionsbrunnarna på samma vis som tidigare under sommaren. Detta kan vara en orsak till att halterna sjunker snabbt i produktionsbrunnarna efter toppen. Att grundvattensituationen påverkades i slutet på augusti, ca 30 dagar efter injicering, är mycket troligt eftersom stora nederbördsmängder föll i det studerade området under några dagar kring den 29 augusti 2023.

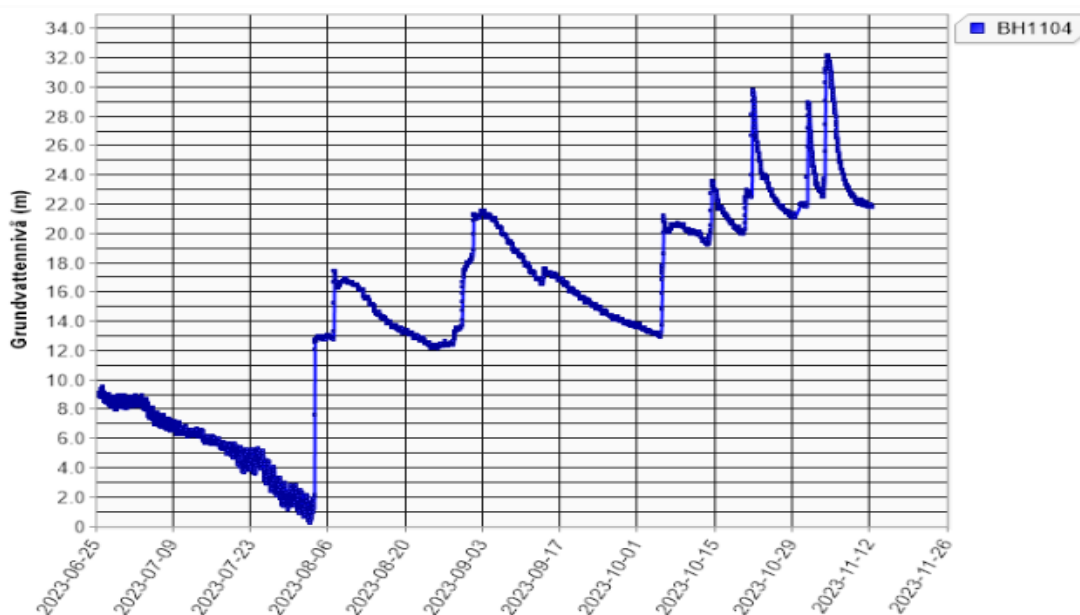


Figur 40. Halt Rhodamine WT i kolpåsar. Halten är normaliserad utifrån tiden provtagningspåsen suttit i brunnen och plottas på mittpunkten för respektive provtagningsperiod.

För provtagningen av vatten är resultatet något spretigare och uppvisar dubbla toppar i vissa punkter, se Figur 41, vilket belyser värdet av mätning med kolpåsar som ger ett resultat av allt vatten. Skillnaderna mellan kolpåsar och uttagna vattenprover visar att halterna fluktuerar i en kortare tidsskala då spårämnet kommer något stötvis i flera provpunkter. Man kan även se att det finns en skillnad mellan de olika pumpbrunnarna. P3a–P6 har halter som ökar succesivt under ca en månads tid vilket tyder på en spridning av spårämnet genom dispersion. I P2 och P3 kommer däremot de höga halterna mer plötsligt vilket tyder på ett mer advektikt flöde. P3a uppvisar en succesivt stigande halt, men med ca en månads längre transporttid med högsta uppmätta värde uppmätt i början av september. De olika mönstren kan även vara kopplade till grundvattennivåfluktuationer under augusti månad. Under perioden från början av augusti till början av september stiger grundvattennivåerna drastiskt i två omgångar till följd av mycket nederbörd. Det är lätt att inse att plötsliga nivåfluktuationer på i storleksordningen 20 m kan skapa andra flödesmönster och innebära att flödesvägar som tidigare var omättade plötsligt börjar transportera vatten.

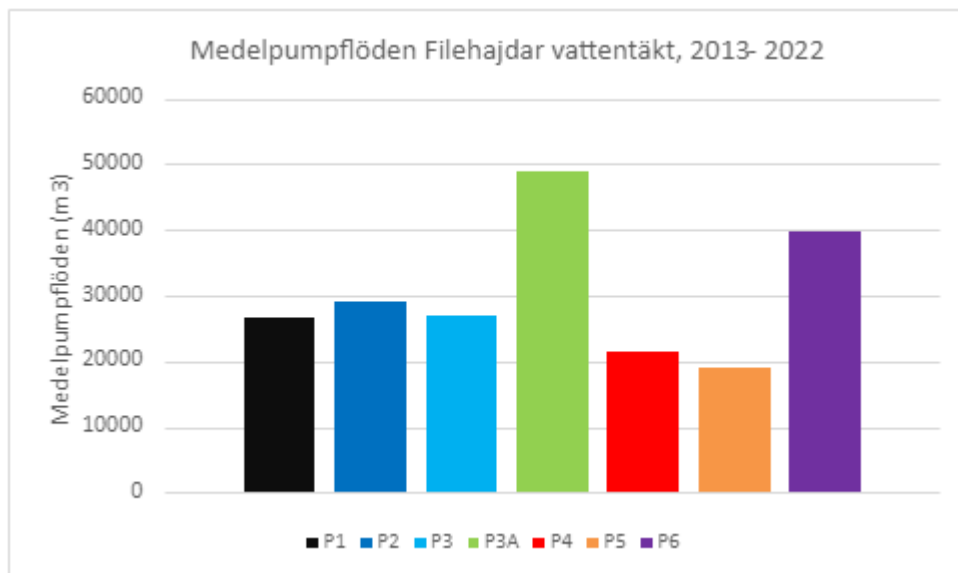


Figur 41. Halt Rhodamine WT i vattenprover mellan 27 juni fram till och med 12 november 2023.



Figur 42 Uppmätt grundvattennivå i BH1104 under spårämnesförsöket. Brunnen är belägen i spårämnets transportväg väster om vattentäkten.

Halter och genombrottskurvor har även jämförts med pumpvolymen från respektive pumpbrunn. Uttagsvolymen för den aktuella perioden har ej funnits tillgängliga, men enligt T. Gustafsson på Region Gotland (personlig kommunikation, 18 september 2023) har pumpningen varit normal varför medelvärden för de gångna 10 åren har använts i Figur 43. Det går inte att se något uppenbart samband mellan halter och pumpflöden. Noterbart är att inget Rhodamin WT har påträffats i P1, vilket indikerar att denna brunn inte är lika väl konnekterad till BH2212 som de andra pumpbrunnarna och/eller tar emot vatten från en mer nordlig flödesväg.



Figur 43. Medelpumpflöden 2013–2022 fördelat per brunn.

Undersökningarna ger även kunskap om bergets effektiva porositet vilket tidigare varit ett antaget värde. För framtagande av effektiv porositet krävs användande av en numerisk modell, se avsnitt 4.10.1.

I skrivande stund (den 21 november 2023) har spårämnet Fluorescein inte observerats i någon observationsbrunn vilket tyder på längre transporttid i flödessystemet. Att transporttiderna från brunnen SGU2017 skulle vara längre var inte oväntat med tanke på att flödet främst sker i ett djupt liggande lager under revstrukturen, med lägre genomsläpplighet än vad som mätts upp i t.ex. BH2212 och utan efterföljande infiltrationsförsök. Provtagning av spårämnet fortgår.

Inget i resultatet indikerar omfattande djupt liggande karst.

4.10.1 Simulering av spårämnestesten i BH2212 i grundvattenmodellen

4.10.1.1 Prognos och validering av modell

Under våren 2023, innan spårämnestesten utfördes i BH2212, användes grundvattenmodellen (beskrivs mer ingående i kapitel 6) för att simulera ett spårämnestest i BH2212 och för att prediktera genombrottstider (ankomsttider) för spårämnet i de kommunala produktionsbrunnarna.

Modellens effektiva porositet definierades i enlighet med de värden som normalt används för att representera ett sprickigt berg med mycket låg porositet, t.ex. en effektiv porositet mellan 0,0001 och 0,001 (0,01 % till 0,1 %). Baserat på modellens predikterade genombrottstider och vår hydrogeologiska kunskap om det studerade systemet upprättades ett mätprogram och det bestämdes när de verkliga provtagningarna skulle utföras i de kommunala produktionsbrunnarna och övriga observationspunkter. Modellen predikterad att ett första genombrott i produktionsbrunnarna kunde förväntas inom tidsperioden en till fyra veckor efter injicering av spårämnet i BH2212.

Provtagningarna i produktionsbrunnarna (verkliga mätningar) visade ett första mindre genombrott av spårämnet efter 14 dagar (9 dagar beroende på när man ansätter tid för

kolpåsar), och ett genombrott i nästan alla produktionsbrunnarna (P2, P3a, P4, P5 och P6) efter 23 dagar, se Figur 40 och Figur 41. Modellens prediktion av de första genombrottstiderna visade sig alltså stämma mycket väl. Modellens blinda prediktion av de första genombrottstiderna är en validering av den etablerade grundvattenmodellen.

4.10.1.2 Analys av porositet

Under november 2023 användes grundvattenmodellen för att simulera det utförda spårämnesförsöket i BH2212 (se även Bilaga 3 för mer detaljerad beskrivning av t.ex. metodik). Beräkningarna baseras på provtagningar fram till den 23 oktober 2023.

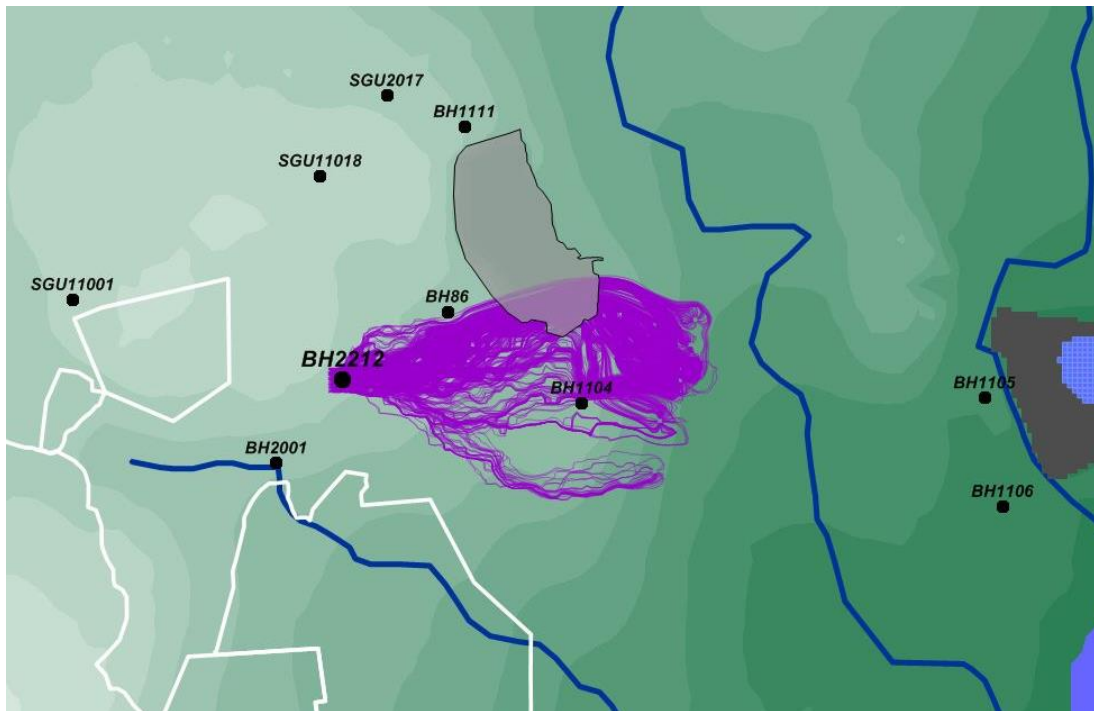
Den effektiva porositeten är svår att bestämma i fält. Ett av de bättre sätten att uppskatta den effektiva porositeten är att i fält utföra ett spårämnestest och att därefter i en mot flöden kalibrerad grundvattenmodell simulera spårämnestestet. I grundvattenmodellen korrigeras därefter värdet på den effektiva porositeten till dess att modellens simulerade genombrottskurva stämmer rimligt väl med den uppmätta genombrottskurvan. För ett stort spårämnesförsök i naturliga och komplexa förhållanden är det i praktiken omöjligt att helt perfekt matcha den uppmätta genombrottskurvan i en modell, därför har vi valt att främst matcha det första genombrottet och piken i genombrottstid.

Simuleringen av flödesvägar från BH2212 till produktionsbrunnarna utfördes med hjälp av teoretiska partiklar, som i modellen följer grundvattnets flödesmönster, s.k. partikelspårning. De teoretiska partiklarna bildar flödesvägar genom modellen. Ingen retardation, absorption, nedbrytning etc. inkluderades i analysen, partiklarna i modellen följer med grundvattnet som ett konservativt spårämne. Partiklarna injiceras i de vattenförande lagren i beräkningscellerna runt BH2212. Simuleringarna gjordes med både stationära och transienta flödesfält.

I verkligheten injicerades spårämnet den 29 juni 2023. I produktionsbrunnarna inträffade piken i uppmätt medelhalt den 14 augusti 2023, alltså 45 dagar efter injiceringen. Transporten av spårämnet från injiceringen fram till den uppmätta piken i medelhalt skedde således under sommaren 2023.

För att simulera de första genombrotten och piken i medelhalt kan den beräknade grundvattensituationen för sommaren användas som en representativ grundvattensituation. En sådan simulering kan göras baserat på den beräknade grundvattensituationen för juli månad och stationära flödesvägar. För att simulera transporten under en längre tidsperiod än de första 50 dagarna, måste också den representativa grundvattensituationen förändras med tiden, eftersom grundvattnets flödesmönster (tryck och flöden) förändras tydligt när grundvattennivåerna stiger efter sommaren. En sådan simulering kan göras baserat på den beräknade grundvattensituationen för juli månad och de beräknade grundvattensituationerna för de efterföljande månaderna under hösten och vintern, och med hjälp av transienta flödesvägar. Att simulera transienta flödesvägar är betydligt mer komplicerat än att simulera stationära flödesvägar. För den metod som datorkoden Geoan använder simuleras varje partikel separat i ett flödesfält som varierar linjärt mellan de beräknade grundvattensituationerna (månaderna). Eftersom varje partikel simuleras separat kan flödesfältets utveckling optimeras för varje partikelbana (flödesväg). Metoden har utvecklats tillsammans med den franska kärnavfallsmyndigheten (ANDRA).

De simulerade transienta flödesvägarnas visas i Figur 44. Längderna varierar mellan 2,5 km (percentil 10) och 3,0 km (percentil 90), medianen är 2,8 km. Att de simulerade flödesvägarnas medianlängd är nära 2,8 km visar på ett spårämnestest som täcker ett betydande område.



Figur 44 Spårämnesförsök. Simulerade transienta flödesvägar från BH2212, som når fram till produktionsbrunnarna. Flödesvägarna är markerade med lila färg. Täkten markerad med grå färg.

Den uppmätta genombrottskurvan i Figur 45 är densamma som i Figur 40 och baseras på en medelhalt av normaliserade halter i produktionsbrunnarna. Den simulerade genombrottskurvan i Figur 45 avser inte en medelhalt i produktionsbrunnarna, utan ett simulerat massflöde som når fram till produktionsbrunnarna inom tidssteg som är satta till 1 vecka för att matcha provtagningen. (Se Bilaga 3 för en mer ingående beskrivning av relationen halt-massflöde-volymlöde.)

Det vi är intresserade av för bestämning av porositet är tidpunkten för ett första tydligt genombrott och tidpunkten för när piken inträffar. Formen på genombrottskurvorna är också av intresse, men huvudsyftet är att matcha tidpunkten för det första tydliga genombrottet och tidpunkten för piken (högsta värdet). Den simulerade genombrottskurvan i Figur 45, och en statistisk analys av fördelningen av de teoretiska partiklarnas genombrottstider, indikerar ett första genombrott efter 23 dagar, vilket på dagen matchar det första uppmätta tydliga genombrottet i produktionsbrunnarna P2, P3a, P4, P5 och P6. Den simulerade genombrottskurvan uppvisar en pik (högst halt) efter 45 dagar, vilket också på dagen matchar tidpunkten för den uppmätta piken.

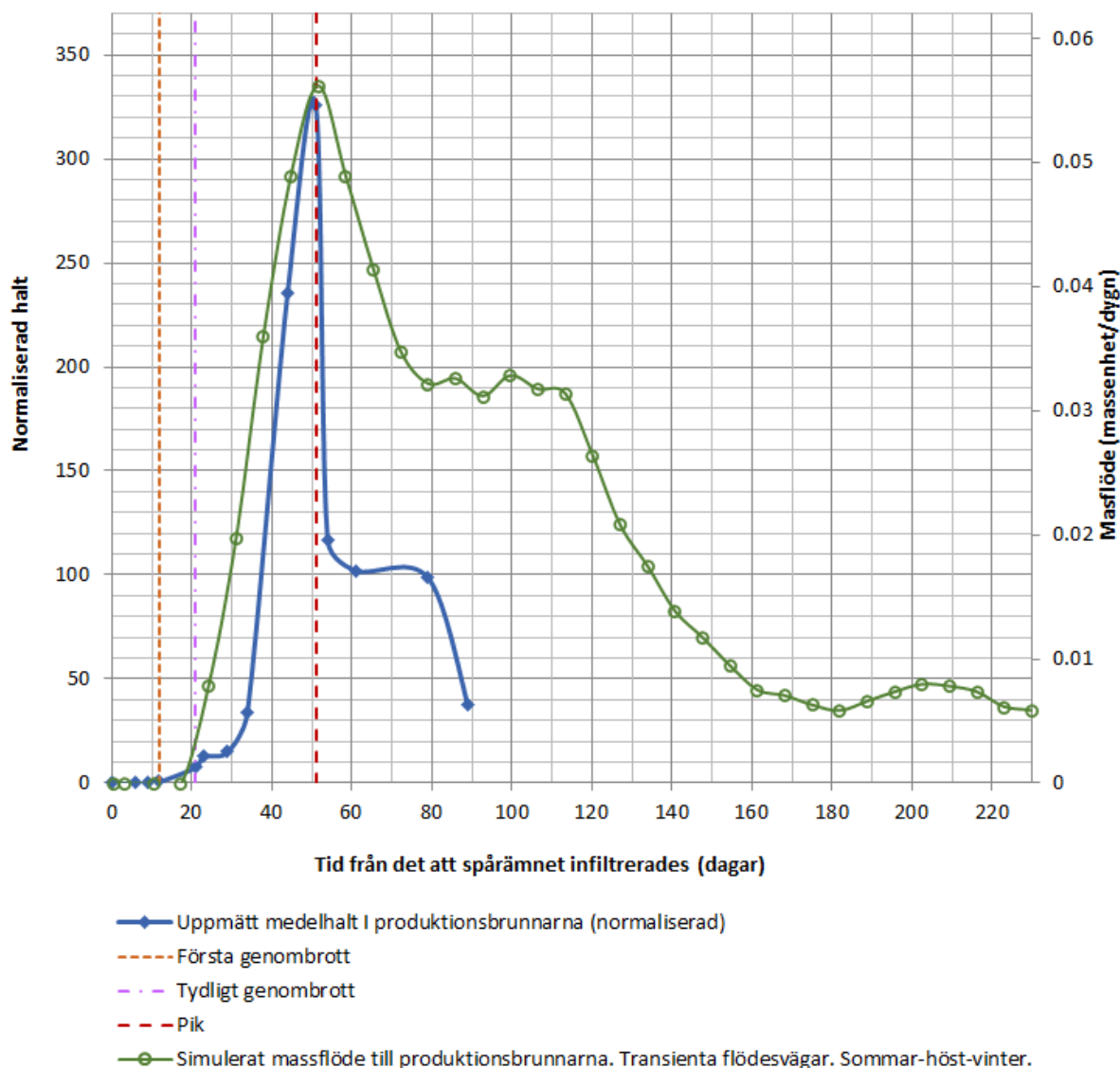
Från detta beräknas den effektiva porositeten för berget. Det beräknade värdet är lika med 0,12 % för alla beräkningsceller som representerar berg i modellen.

Att bergets beräknade porositet ligger nära 0,1 % är förväntat. Värdet på den effektiva porositeten som normalt används för att representera ett sprickigt berg med låg porositet, är värden mellan 0,01 % och 0,1 %. För berg med en tydlig sprickzon kan den effektiva porositeten variera mellan ca 0,1 % till 1 %

Spårämnestest. Infiltration av spårämne i BH2212.

Uppmätta normaliserade halter i produktionsbrunnarna (till vänster).

Simulerade flödesvägar (transienta), massflöde i produktionsbrunnarna (till höger).



Figur 45 Uppmätta och simulerade genombrottskurvor för en längre tidsperiod, sommar-höst-vinter. Den simulerade genombrottskurvan är beräknad med transienta flödesvägar och en tidsberoende flödessituation som representerar flödesfälten för månaderna juli till december.

4.10.1.1 Analys av transient förlopp

Den simulerade genombrottskurvan i Figur 45 är beräknad med transienta flödesvägar och en tidsberoende flödessituation. Den tidsberoende flödessituationen representeras av flödesfälten för juli månad och för varje efterföljande månad fram till december. Tidpunkterna för det första tydliga genombrottet och piken i massflöde är desamma som för beräkningarna med stationära flödesvägar eftersom under den första tidsperioden (sommaren) är flödesfältet detsamma i den stationära simuleringen (med stationära flödesvägar, redovisas i Bilaga 3) och i den tidsberoende simuleringen (med transienta flödesvägar). Det är efter ca 45 dagar som tydliga skillnader uppkommer. Skillnaderna uppkommer eftersom flödesfältet förändras i simuleringen med ett tidsberoende flödesfält.

Ett intressant resultat som visas i Figur 45 är platån med nästan konstanta halter som uppträder några veckor efter piken. Platån finns både i den uppmätta genombrottskurvan (som en effekt av den långsammare transporttiden till P3a) och i den simulerade genombrottskurvan. Dock ligger platån på en lägre nivå i förhållande till piken i den uppmätta genombrottskurvan, och den

är kortare i den uppmätta genombrottskurvan. Det intressanta är inte den exakta nivån på platån utan att platån finns både i den uppmätta genombrottskurvan och i den simulerade genombrottskurvan.

Simuleringarna i modellen visar på en trolig orsak till denna platå. Under sommaren är flödesvägarna till produktionsbrunnarna snabba, massflödet till produktionsbrunnarna domineras av transport längs dessa snabba flödesvägar. Det finns också andra långsammare flödesvägar, men transporten via de långsammare vägarna märks inte tydligt under sommaren. Efter sommaren stiger grundvattennivåerna, och flödesvägarna förändras. Detta ger generellt en något långsammare transport. Samtidigt som transporten via de snabba flödesvägarna avtar i betydelse, når mer och mer av transporten via de långsammare transportvägarna fram till produktionsbrunnarna. Detta leder till att en platå i massflöde skapas i produktionsbrunnarna. Platån varar så länge som transporten via de långsamma flödesvägarna är av betydelse. När också transporten via de långsammare flödesvägarna avtar i betydelse försvinner platån och massflödet faller ned mot ett sakta avtagande basflöde. Detta basflöde skapas av partiklar som rör sig längs riktigt långsamma flödesvägar och basflödet kan fortsätta under en lång period.

4.10.2 Simulering av spårämnestesten i SGU2017 i grundvattenmodellen

Även det andra spårämnesförsöket i SGU2017 har analyserats i den numeriska modellen, även om det fluorescein som injicerades i brunnen den 29 juni ännu inte har påträffats (5 december 2023). Provtagning av spårämnet fortgår ännu.

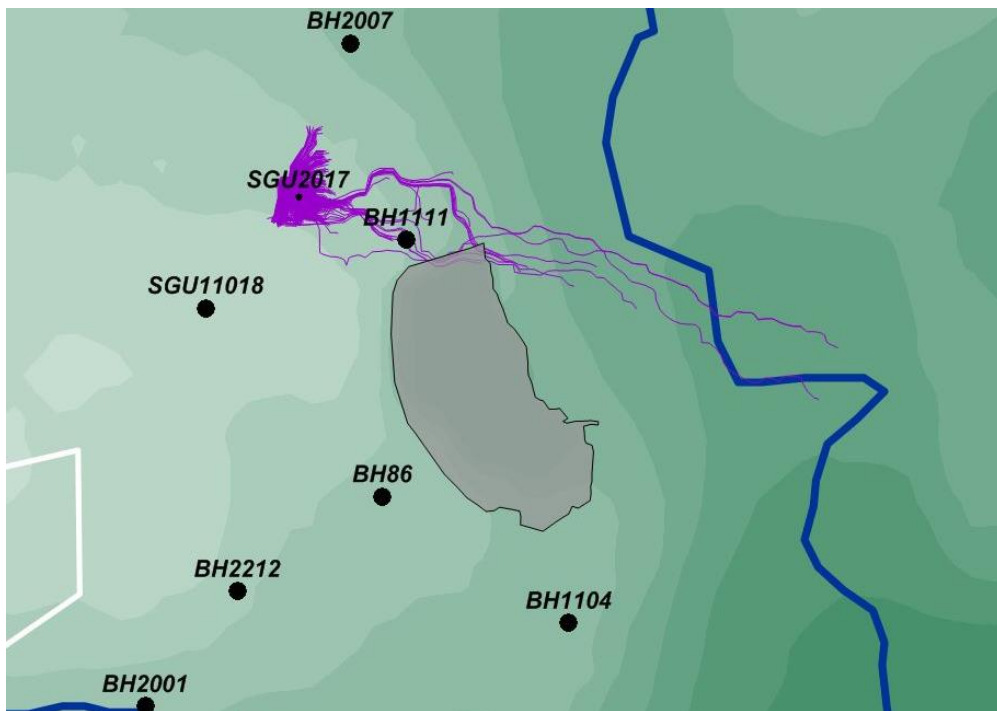
Att transporttiderna från SGU2017 är långa är ett förväntat resultat. Borrhålet är placerat i revkalksten, och enligt den konceptuella modellen så förekommer inte större kontinuerliga vattenförande lager i revkalkstenen. Vid SGU2017 förekommer kontinuerliga vattenförande lager endast under revkalkstenen på större djup. Dock uppvisar även dessa djupt liggande vattenförande lager lägre genomsläpplighet än vad som mätts i t.ex. BH2212. Borrhålet SGU2017 är så djupt att det går ner under revkalkstenen, så en viss transport från borrhålet är fullt möjlig i de djupare lagren.

Om spårämnet så småningom påträffas i någon mätpunkt så vore det naturligtvis av stort intresse, men syftet med spårämnestestet i SGU2017 är också att validera vår konceptuella modell av revkalkstenen; ett berg utan större kontinuerliga vattenförande lager, ett berg som inte effektivt leder grundvatten, även om mindre vattenförande strukturer kan förekomma. Det kan tyckas egendomligt att utföra ett experiment (ett spårämnestest) där det förväntade resultatet är att vi inte upptäcker spårämnet inom en kort tidsperiod. Ett negativt resultat, alltså att vi inte upptäcker något spårämne inom en rimlig tidsperiod, kan också vara av stort intresse, särskilt i detta fall, eftersom ett negativt resultat i detta fall bekräftar vår konceptuella modell.

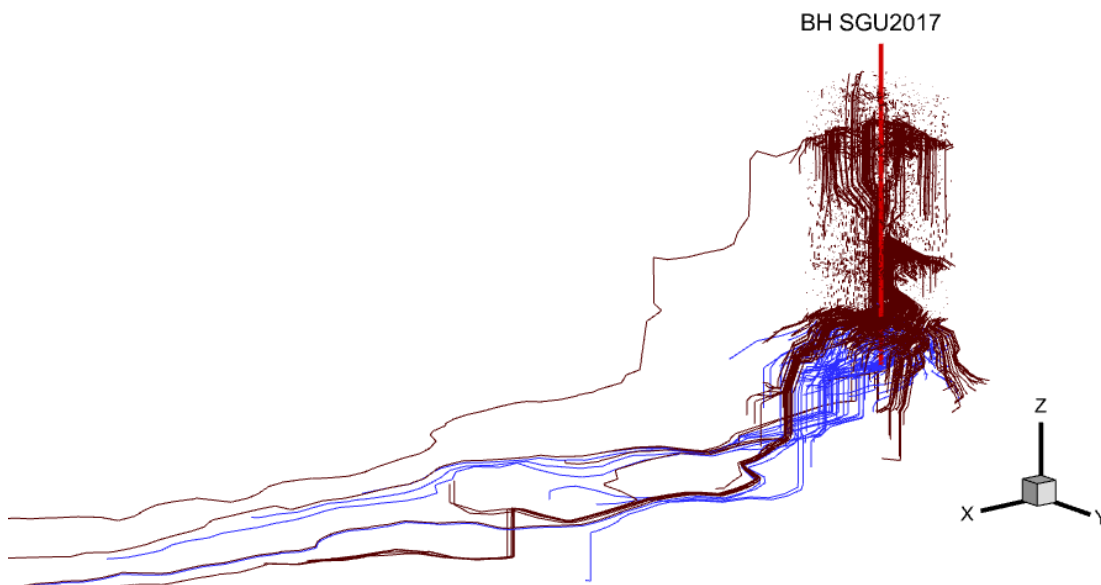
Simuleringarna är gjorda med samma metodik som för BH2212 (se Bilaga 3 för närmare beskrivning) med transienta flödesvägar baserat på de beräknade grundvattensituationerna för hela året, från juli månad (sommars) och de efterföljande 12 månaderna.

De simulerade transienta flödesvägarna efter ett år visas i Figur 46 och Figur 47.

Figur 46 visar att efter ett år av transport är 90 procent av flödesvägarna kortare än 70 m, men de längsta flödesvägarna är över 3 km långa. Figur 47 visar flödesvägarna från SGU2017 i ett tvärsnitt i perspektiv. Figuren visar med bruna linjer flödesvägar initierade i revkalk, och med blå linjer flödesvägar initierade i den vattenförande zonen under revkalken. Av figuren framgår att det i modellen (med stor sannolikhet) inte finns några effektiva flödesvägar i revkalken. De flödesvägar i revkalken som lyckas finna en väg ned till den vattenförande zonen, kan utvecklas till långa flödesvägar genom transport i den djupt liggande vattenförande zonen. Flödesvägar initierade i den djupa vattenförande zonen kan utvecklas till långa flödesvägar.



Figur 46 Spårämnestest. Simulerade flödesvägar från SGU2017. Lila linjer representerar de transienta flödesvägarna. Alla flödesvägar terminerades efter ett år av transport, 90 procent av flödesvägarna är kortare än 70 m, de längsta flödesvägarna är över 3 km långa. Täkten är markerad med grå färg.



Figur 47 Spårämnestest. Simulerade flödesvägar från SGU2017. Bruna linjer representerar de transienta flödesvägarna initierade i revkalk. Blå linjer representerar de transienta flödesvägarna initierade i det vattenförande lagret under revkalken. Alla flödesvägar terminerades efter ett år av transport. Perspektiv, den vertikala skalan är 10 gånger större än den horisontala skalan.

4.11 INFLÖDE AV VATTEN TILL TÄKTERNA

Inflödet till täkterna består av nettonederbörden och grundvatteninflöde. Inflödet av vatten pumpas antingen ut ur täkterna, eller ansamlas i täkterna (t.ex. i Pall 2 i Västra brottet). Den exakta andelen grundvatten i vattenbortledningen är svår att uppskatta och den varierar över året. Stora volymer bortlett vatten är normalt en följd av stora mängder nederbörd, inte stora mängder inströmmande grundvatten. När nederbörd faller över File hajdar-täkten pumpas den bort, vilket direkt återspeglas i storleken på vattenbortledningen. Man måste därför vara försiktig

med att direkt korrelera grundvatteninflödets storlek till vattenbortledningens storlek. Den totala volymen årlig vattenbortledning beror till stor del på hur mycket nederbörd som faller under höst och vinter. Nederbörden under denna period är stor och avdunstningen är liten.

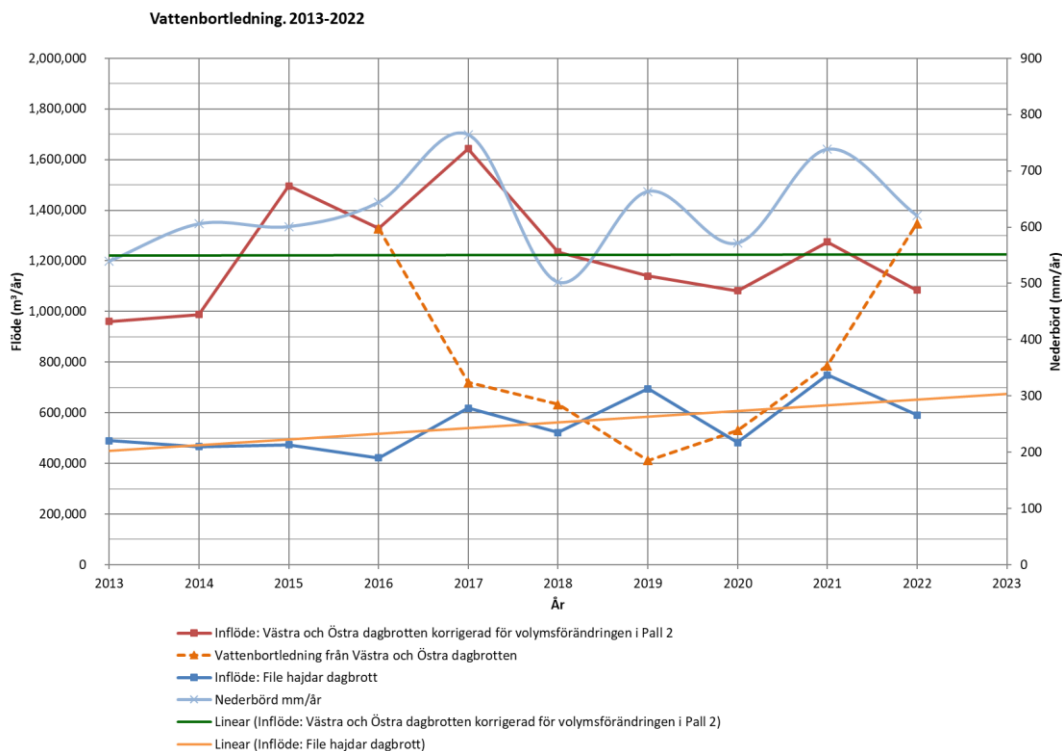
Att andelen grundvatten varierar över året är tydligt för File hajdar-täkten. Grundvattennivåerna kring täkten faller till nivåer under täktens botten på sommaren, vilket i sin tur betyder att grundvatteninflödet till File hajdar-täkten under sommaren är minimalt eller obefintligt. Det kan dock fortfarande regna kraftigt över täkten under sommaren, vilket producerar en vattenbortledning från täkten trots att grundvattenflöde i princip helt saknas.

Av resonemanget ovan följer att vattenbortledningen till stor del beror av nederbörden över File hajdar-täkten samt över Västra och Östra brotten, framför allt under sommaren. Eftersom nederbörden varierar mycket mellan olika år så kommer också vattenbortledningen att variera mycket mellan olika år. År med stora mängder nederbörd under höst och vinter kommer att producera stora volymer vattenbortledning.

Även andelen nederbörd som avdunstar utgör en osäkerhet. Andelen påverkas av hur nederbörden fördelas mellan tillfällen och tider på året. Andelen som avdunstar har även förändrats något i Västra brottet sedan 2017, då delar av det bortledda vattnet lagras i Pall 2 och delar av det avdunstar, i stället för att pumpas bort direkt efter nederbörd. I botten på File hajdar-täkten finns sedan hösten 2021 en vattenvolym i en damm, detta påverkar andelen som avdunstar något även i denna täkt.

Vattenbortledningens storlek har uppmätts. De tidiga mätningarna var behäftade med ett systematiskt mätfel som ledde till att vattenbortledningen överskattades, särskilt före år 2000. Mätningar med bättre kvalitet har utförts de senaste 20 åren, dock kvarstod delar av det systematiska mätfelet och de uppmätta flödena tenderar att vara överskattningar. Av dessa orsaker har fokus i denna studie legat på mätningar efter 2005, trendanalysen är utförd för värden efter 2012.

2017 slutade Heidelberg Materials pumpa vatten från Pall 2 i Västra brottet. I stället har man låtit vatten ansamlas i Pall 2, och därmed skapat en vattenyta i som sakta stigit fram till 2021. Av detta följer att volymen vatten som bortleds från Västra brottet har blivit mindre efter 2016, eftersom en betydande mängd vatten har lagrats i Pall 2. För att inte även Pall 1 ska hamna under vatten återupptogs pumpningen när nivån uppnådde ca -30 m. En uppskattning av hur mycket vatten som ansamlats i Pall 2 har gjorts och volymen har sedan adderats till de uppmätta flödena från Västra brottet, detta för att kunna erhålla jämförbara värden över en längre period. De uppmätta värdena på vattenbortledningen framgår av Figur 48. Figuren tydliggör också variationerna i vattenbortledningen mellan olika år, vilka alltså beror av variationer i nederbörden.



Figur 48. Uppmätt och beräknad vattenbortledning från File hajdar-täkten, Västra brottet och Östra brottet. Period 2013 till 2022, inklusive trendanalys.

Variationen i vattenbortledning mellan olika år gör det svårt att se hur trenden för vattenbortledning förändras i en längre tidsskala. Modellprediktioner av framtida vattenbortledning avser dessutom medelsituationer. För att ta fram en trolig representativ förändring av vattenbortledningen med tiden har en linjär trendanalys gjorts av den uppmätta vattenbortledningen från och med 2013 och framåt. Notera att för Västra brottet inkluderas volymen vatten som har lagrats i Pall 2. Trendanalysen visas i Figur 48 ovan.

Trendlinjerna visar på svagt ökande inflöden sedan 2013, särskilt för File hajdar-täkten. Trendlinjerna är i denna analys linjära. Från de linjära ekvationerna kan representativa värden för vattenbortledningen uppskattas för år 2023 baserat på uppmätta värden.

Uppmätta värden för år 2021 visas i Tabell 3. Representativa (beräknade) värden för år 2021 visas i Tabell 4. Anledningen till att vi har tagit fram värden för år 2021 är att detta år används för kalibrering av grundvattenmodellen, se kapitel 6.4.

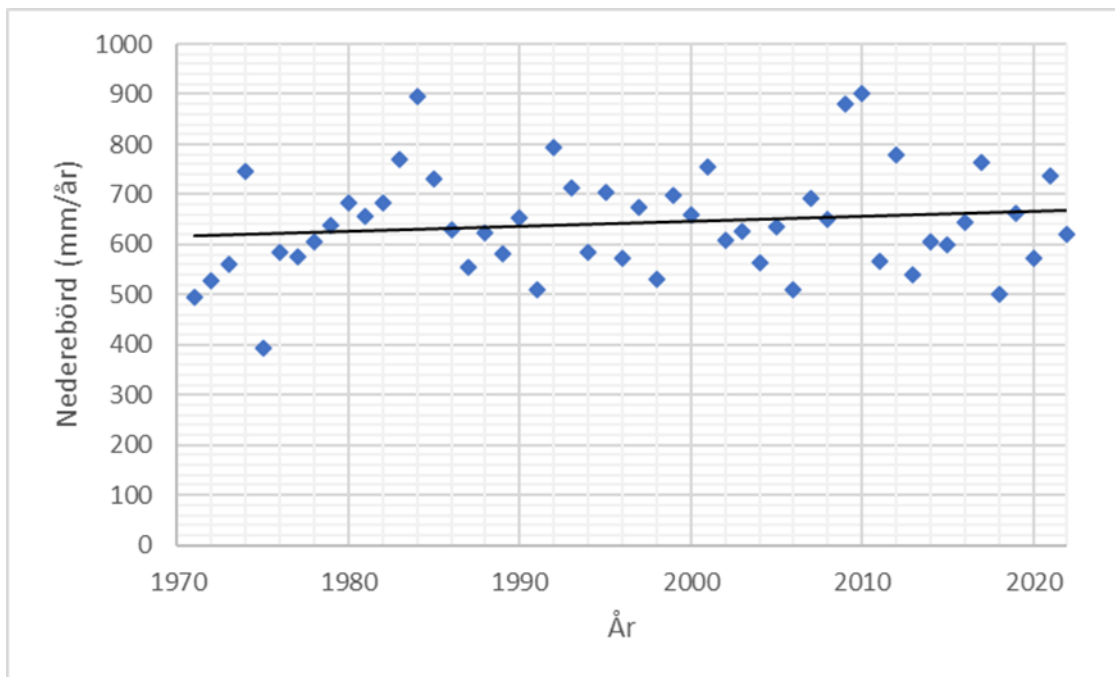
Tabell 3. Vattenbortledning. Uppmätta volymer för år 2021.

För år 2021 erhålls följande årliga uppmätta volymer:	
File hajdar:	756 000 m ³ /år
Västra brottet:	1 238 000 m ³ /år (inkluderande vattenbortledning från Pall 2 och Östra brottet)

Tabell 4. Vattenbortledning. Representativa volymer för år 2021, baserade på uppmätta volymer.

För år 2021 producerar trendanalysen följande representativa årliga volymer:	
File hajdar:	629 000 m ³ /år
Västra brottet:	1 210 000 m ³ /år (inkluderande vattenbortledning från Pall 2 och Östra brottet)

Som nämnts ovan beror vattenbortledningen till stor del på nederbörden över täktområdet. Den uppmätta mängden nederbörd vid SMHI:s station på Hejnum hållar visas i Figur 49.



Figur 49. Uppmätt mängd nederbörd vid SMHI:s station på Hejnum hällar illustreras med blått, period 1971 till 2022.

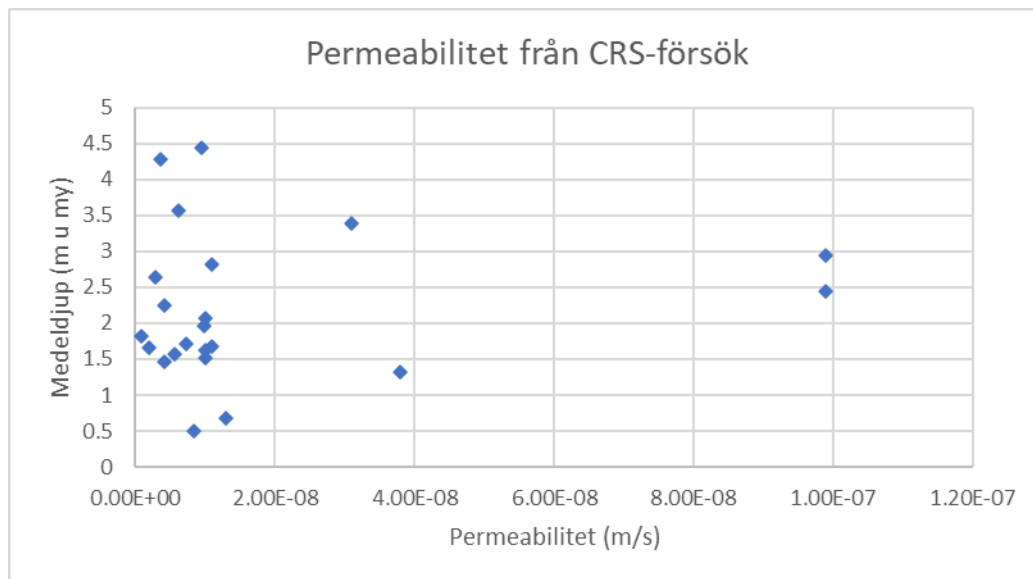
Det är rimligt att anta att ungefär samma nederbörd faller över File hajdar-täkten, Västra brottet och Östra brottet. Av Figur 49 framgår det tydligt att variationen i årsnederbörd är betydande: medelvärde 643 mm/år, minimivärde 394 mm/år och maximivärde 902 mm/år. Trenden för hur årsnederbörden varierar är också tydlig: årsnederbörden ökar, trendlinjen visar på en ökning av nästan 100 mm under perioden 1971 till 2022. Den ökande trenden som kan ses i nederbördsdata från SMHI:s station på Hejnum hällar är sannolikt en orsak till att volymen bortpumpat vatten från Östra brottet, Västra brottet och File hajdar-täkten också har ökat.

4.12 UNDERSÖKNINGAR FÖR TINGSTÄDE TRÄSK

Under 2016 gjordes en litteraturstudie med syftet att verifiera eller korrigera bottensedimentens hydrauliska konduktivitet (Golder, 2016). I litteraturstudien fastställdes att bottensedimentet utgörs av kalkrik findetritusgyttja (jordart bestående av huvudsakligen organiskt innehåll och hög halt av detritus, dvs. dött organiskt material från växter och djur) och bleke (kalkjordart utfälld på botten av bl.a. sjöar som huvudsakligen består av kalciumkarbonat i form av kalcit). Kornstorleken på sedimentet utgörs huvudsakligen av mellansilt (6–20 µm/ 6,3–20 µm) med små inslag av finsand (60–200 µm/ 63–200 µm). Den hydrauliska konduktiviteten för mellansilt uppges vara ca 10^{-8} m/s (tabellvärde). Ett lerinnehåll på ca 10 % eller innehåll av organiskt material kan ytterligare sänka den hydrauliska konduktiviteten. Exempelvis har lermorän en hydraulisk konduktivitet i spannet 10^{-8} – 10^{-10} . Utifrån detta har den hydrauliska konduktiviteten ansatts till 10^{-8} m/s i utförda beräkningar och modelleringar.

I linje med övriga undersökningar som syftar till att verifiera alla antaganden genomförde Calluna AB (Calluna) en sedimentprovtagning i 30 provpunkter längs den östra delen av Tingstäde träsk under maj och juni 2023. Provtagningen syftade bl.a. till att utreda sedimentets hydrauliska konduktivitet för att förbättra conceptualiseringen av grundvattenuutföde i sjöbotten. Den hydrauliska konduktiviteten testades i laboratorium med CRS-försök (Constant Rate of Strain). I ett CRS-försök belastas provet samtidigt som deformationen (sättningen) och deformationstiden mäts kontinuerligt. Sättningstiden för ett material avgörs av hur snabbt vattnet kan transporteras ut ur materialet. Den hydrauliska konduktiviteten kan därför beräknas utifrån hur snabbt sättningen sker. CRS-försöken har utförts på delprover som uttagits i rödmarkerade provpunkter i Figur 51, totalt testades 24 uttagna delprover. Samtliga testade delprover har utgjorts av kalkgyttja. Samtliga resultat och fältobservationer från Callunas sedimentprovtagning återfinns i sin helhet i ansökans bilaga B4.

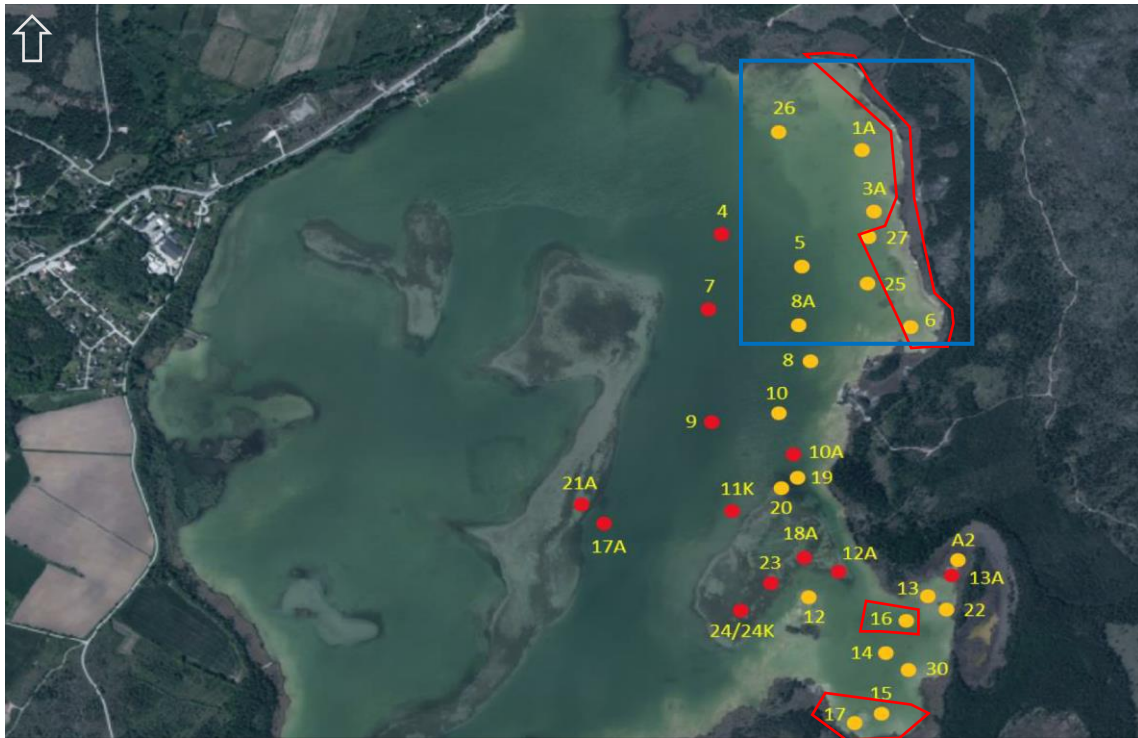
Resultaten från CRS-försöken visar på en låg permeabilitet med en median på $9,7 \cdot 10^{-9}$ vilket är väl överensstämmande med tidigare antagande. Figur 50 visar spridningen av permeabiliteten för uttagna sedimentprover. Spridningen är relativt låg, undantaget fyra prover som har något högre permeabilitet.



Figur 50. Permeabiliteten samt medeldjupet av prov som testats genom CRS-försök på laboratorium.

Sammanfattningsvis utgörs större delen av Tingstäde träskets botten av gyttja, kalkgyttja och bleke som överlagras morän, lera och/eller sand. Den östra delen av sjön, närmast strandkanten, utgörs av hårbotten, dvs. att berggrunden är frilagd. Mäktigheten av sedimenten uppgår oftast till tre till fyra meter, men kan på vissa ställen uppgå till sju meter. Undersökningar från idag jämfört med de ca hundra år gamla undersökningarna (G. Lundqvist, 1940) visar att sedimenten följer ungefär samma mönster idag, men att det har skett en pålagring med ett par decimeter, se kapitel 4.2.

I de områden som består av hårbotten, och som endast överlagras av ett tunt lager kalkslam/bleke, är det rimligt att anta att kontakt med underliggande berg förekommer. Kontakt med berg kan även förekomma i området i den norra och nordöstra delen av sjön där sedimenten utgörs av sand och finsand (blå markering i Figur 51). Ungefärlig utbredning och position av områden med hårbotten kan ses markerat inom röd linje i Figur 51.



Figur 51. Det undersökta området i Tingstäde träsk samt lokalisering av provpunkter. Röda punkter representerar sedimentprover uttagna med kolvprovtagare för laboratorieanalys och dokumentation. Gula punkter representerar sedimentprover uttagna för dokumentation och där kolvprovtagning ej var möjlig, dessa prover har ej skickats till laboratoriet för analys. I de provpunkter som ryms inom röd markering påvisades hårbotten med stora stenar och block som ställvis överlagrades med ett tunt lager av kalkslam/bleke. I området som ryms inom blå markering påvisades sediment utgörandes av sand eller finsand. Områden inom röd och blå markering antas ha kontakt med underliggande berg.

CRS-försöken visar att sedimenten har en låg konduktivitet vilket innebär att kontakten med underliggande berg är minimal i de områden där sedimentlager bestående av kalkslam/bleke (kalkgyttja) förekommer, detta är framför allt sant för de punkter där de mäktigaste sedimentlagren har påvisats. Faktumet att sedimentens mäktighet har ökat jämfört med studien 1923 innebär att den redan nu minimala kontakten till underliggande berg minskar med tiden. I den norra och nordöstra delen av sjön, där sedimentlagret utgörs av sand och finsand, förekommer sannolikt en kontakt med det underliggande berget, men även här minskar kontakten i takt med att sediment av kalkslam och bleke pålagras.

Vid ett fältbesök vintern 2022, då Tingstäde träsk täcktes av is, letades efter tecken på utströmmande grundvatten längs en ca 1 km lång sträcka av den strandnära isen, från de centrala delarna av Grodvät och norrut. Isen var något tunnare decimetern närmast strandkanten. Inga övriga observationer på utflöde av grundvatten gjordes. Tolkningen är att det inom denna del inte finns någon markant utströmning av grundvatten från berget utan endast en svag ytlig lateral utströmning. Sannolikt krävs ett större vattenflöde för att det ska vara synligt från ytan när det blandas i en större vattenvolym med större vattendjup, men fenomenet med tunn eller ingen is vid platser för grundvatteninströmning är tydligt i andra sjöar med kalkstensberggrund och grundvatteninflöde, så som t.ex. Råbelövssjön i Skåne.

4.13 HYDROGEOLOGISKA RISKER VID VATTENFYLLNAD AV VÄSTRA OCH ÖSTRA BROTTET

Grundvattennivåerna vid Slite och väster om Slite har varit avsänkta under drygt ett sekel i olika grad till följd av länshållningen i Östra och Västra brottet. Avsänkningen har ökat i takt med att täkterna har fördjupats och utökats.

Heidelberg Materials har låtit utreda risken för negativ påverkan på omgivningen vid en vattenfyllnad av Västra brottet och/eller både Västra och Östra brottet. Sammanfattningsvis kan

konstateras att risken för negativ påverkan generellt sett är mycket liten. En höjning av vattennivåerna utgör generellt sett inte en risk för negativ påverkan på omgivande enskilda brunnar, geotekniska förhållanden eller ytvattenförhållanden i omgivningen. Den enda risk som identifierats är eventuell fuktproblematik i källare som har anlagts efter täkternas tillkomst och eventuellt utformats utifrån avsänkta grundvattenförhållanden, se kapitel 8.4.

Under 2023 har Heidelberg Materials därför låtit genomföra en inventering av källare, utredningen presenteras i sin helhet i Bilaga 7. Inventeringen inleddes med en skrivbordsundersökning där byggnader som har angränsande källare kartlades. Studien avgränsades genom att byggnader med källare som är grundlagda på en markyta med en nivå på +4 m eller högre inte undersöktes närmare, då det inte bedöms finnas någon risk för fuktproblematik i sådana källare. Undersökningen kompletterades med ett fältbesök vid de byggnader där förekomsten av källare inte säkert kunnat fastställas. Resultaten redovisas i kapitel 8.4.

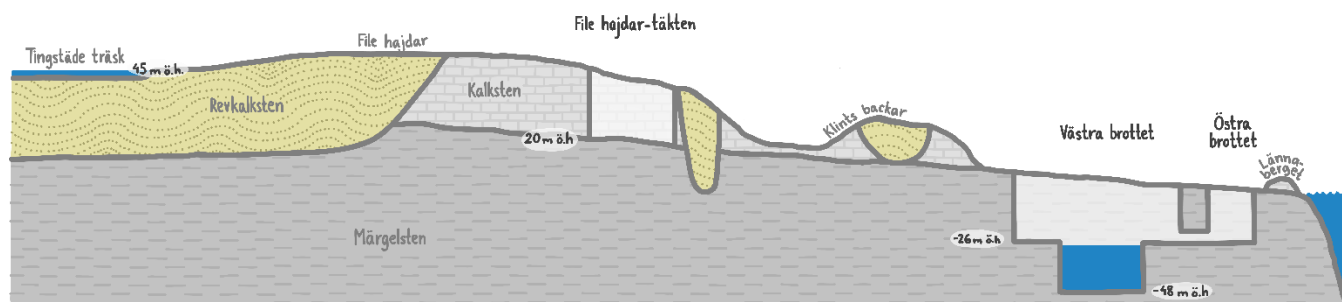
5 KONCEPTUELL HYDROGEOLOGISK MODELL

5.1 BERGGRUND

Berggrunden på Gotland utgörs av en 250–800 m mäktig sekvens med äldre paleozoiska sedimentära bergarter som överlagras det kristallina urberget. Den ytliga berggrunden kan grovt delas in i områden med kalksten respektive områden med mörkel/mörkelsten. Växellagring mellan kalksten och mörkel är vanligt förekommande. Bergarterna är generellt grövre och mer karbonatrika i nordost jämfört med i sydväst, där mörkel och mörkelsten är vanligare. I områden där kalksten är vanligt förekommer revkalksten som lokala höjdparter. Lagerföljden stupar svagt åt sydost och blir mäktigare i samma riktning.

Enligt SGU (Erström et al., 2009) består stratigrafien av den sedimentära berggrunden på norra Gotland av Visbyformationen (mörkelsten) som i sin tur överlagras av Hangvarformationen. Ovanpå Hangvarformationen förekommer Slitegruppen, som utgörs av mörkel/mörkelsten, stromatoporoidekalksten, kalkarenit och kalcidurit vari även revkalksten förekommer.

Av särskilt intresse för den industriella användningen av kalksten är Slitelagren, som i huvudsak består av lagrad kalksten och mörkelsten. Den lagrade kalkstenen är en relativt ren form av kalksten, medan mörkelsten har ett större lerinnehåll och består av karbonat- och silikatbergarter. Både lagrad kalksten och mörkelsten behövs för framställningen av cement. Västra brottet är brutet i mörkelsten. I File hajdar-täkten överlagras mörkelstenen, i de obrutna delarna, av lagrad kalksten med en mäktighet på mer än 30 m, se principskissen i Figur 52.



Figur 52. Principskiss geologi vid File hajdar-täkten och Västra brottet i utgångsläget (31 december 2026).

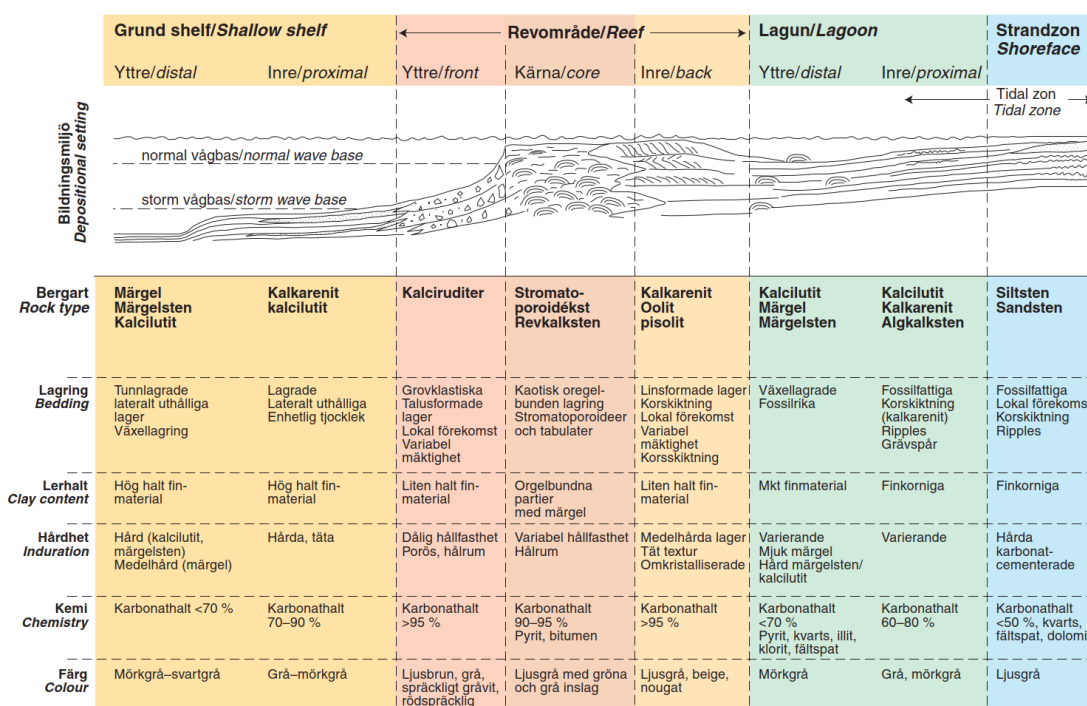
5.1.1 Bergarter

Övergången mellan kalksten och mörkelsten är i många delar successiv med ett gradvis ökande lerinnehåll. Klassifikation av karbonatbergarter kan göras på flera olika sätt. SGU har använt en

klassificering och terminologi som anses bäst lämpad utifrån hur bergarterna kan särskiljas i fält, vilken till stora delar är beroende av avsättningsmiljön för sedimenten. Se exempelfoto i Figur 54 nedan.

Heidelberg Materials utgår i sin klassificering, vid t.ex. prospektering, från ett kemiskt perspektiv; dvs. vilka egenskaper som stenen har i cementtillverkning. Därmed finns det en viss diskrepans mellan data och figurer som härrör från olika källor.

Figur 53 nedan kommer från Erlström et al. (2009) och visar avsättningsmiljöer för olika bergarter, där framför allt den vänstra halvan av figuren är de här diskuterade kalk- och mörkelstenstyperna. Av figuren framgår att gränsen mellan mörkelsten och den lagrade kalkstenen dras vid ett kalciumkarbonat innehåll (CaCO_3) på 70 %. Heidelberg Materials utgår vid sin klassificering av bergarter från kalciumoxid (CaO), vilket omräknat till kalciumkarbonat i grova drag ger en gräns mellan lagrad kalksten och mörkelsten på 80 %, se Tabell 5.



Figur 53. Från Erlström et al. (2009). Bildningsmiljö för de olika bergarterna.

Tabell 5. Heidelberg Materials utgår ifrån innehåll av kalciumoxid (CaO) vid klassificering av bergarterna i området. Klassificeringen och gränsen mellan de olika bergarterna visas omräknat till kalciumkarbonat (CaCO_3).

Benämning	Gräns efter mineralinnehåll	Kommentar
Högsten	>90 % CaCO_3	Kalksten med ett högt innehåll av CaO och ett lågt innehåll av kaliumoxid (K_2O)
Lågsten	80–85 % CaCO_3	Kalksten med ett lägre innehåll av CaO och ett högt innehåll av K_2O
Mörkel	<80 % CaCO_3	Karbonatbergart med ett lågt innehåll av CaO och ett högt innehåll av lermineral

5.1.1.1 Gränzon mellan lagrad kalksten och mörkel/mörkelsten

Mörkelstenen och den lagrade kalkstenen i området har gemensamt att bägge är hårda, täta och avsatta i lateralt uthålliga lager.

”Ursprungssedimenten avsattes på en grund shelf som täckte stora delar av centrala Östersjöbäckenet under silurisk tid. Uppemot 10 cykler med avsättning har dokumenterats. Mellan cyklerna förekom perioder med erosion då Gotland låg ovanför erosionsbas” (Erlström et al, 2009) Det är sannolikt att perioder av erosion skapat vissa av de vattenförande lager som påträffas (muntlig kommentar Erlström).

Ett sådant lager skulle kunna vara det SGU tidigare har skrivit om: ”i övergången mellan mörkel/mörkelsten och överlagrande eller intilliggande kalkstensenheter finns gynnsamma förutsättningar för grundvattentransport” (Dahlqvist et al., 2022). Detta lager har kartlagts med geofysiska undersökningar och beskrivs mer ingående i kapitel 4.5.1 och 4.5.2.



Figur 54. Uppe till vänster: lagrad kalksten i File hajdar-täkten. Uppe till höger: kaotisk växelagring mellan revstrukturer och lagrad kalksten i det gamla provbrottet centralt på File hajdar. Nedre bild: revstruktur i södra File hajdar-täkten.

5.1.1.2 Revkalksten och revartad kalksten

Revkalkstenen består av gamla revbildningar som har vuxit till sig under årtusenden på vilka sediment sedan har lagt sig på och runt. Detta innebär att revkalkstenen inte har sammanhängande lager på det sätt som kalkstenen och mörkelstenen har (se foto i Figur 54 ovan). Revkalkstenen har dock lokalt inslag av lagrade strukturer som ger oregelbundna hydrauliska förhållanden såväl horisontellt som vertikalt. Därmed finns det inte lika dominerande horisontella flöden i revkalkstenen som i de lagrade bergarterna.

I delar med mindre tydlig revformation används ibland begreppet *revartad kalksten* (Erlström et al., 2009). SGU:s geofysiska modell (Persson, 2021) särskiljer inte revkalksten från revartad kalksten, även om det finns litologiska skillnader mellan de två typerna av sten (tex. bildningsmiljö). WSP särskiljer inte heller på revkalksten och revartad kalksten i tolkningen av geofysikresultaten (se kapitel 4.5.1). Båda typerna är dock i huvudsak oregelbundna med lateralt och vertikalt varierande hydrauliska förhållanden, vilket skiljer sig markant från den horisontellt lagrade mörkelstenen med dess lateralt uthålliga lager. På grund av dess liknande hydrogeologiska egenskaper kommer dessa bergarter inte att särskiljas i vare sig den konceptuella eller numeriska modellen.

Allt berg är heterogent, men genomförda hydraultester visar på tydliga skillnader mellan den lagrade kalkstenen/mörkelstenen å ena sidan och revkalkstenen å andra sidan. I de lagrade bergarterna är spridningen i konduktivitet mellan borrhål betydligt mindre och vattenförande lager återfinns till största del på förväntade djup. I reven visar istället en stor del av testerna på ett tätt berg. 75e-percentilen för spridningen är mer än en tiopotens lägre för testresultat i borrhål utanför reven än inom reven (se Tabell 2 i kapitel 4.5.4 eller, för mer data, Bilaga 2). I de hål i revkalksten som har de högsta uppmätta konduktiviteterna har provpumpningar och/eller infiltrationstest genomförts, vilka generellt visar på mindre och mer oregelbundna påverkansområden än motsvarande tester utanför revkalkstenen. De borrhål med de högsta uppmätta hydrauliska konduktiviteterna ibland utförda tester är alla belägna i kantzonen av något rev (horisontellt eller vertikalt).

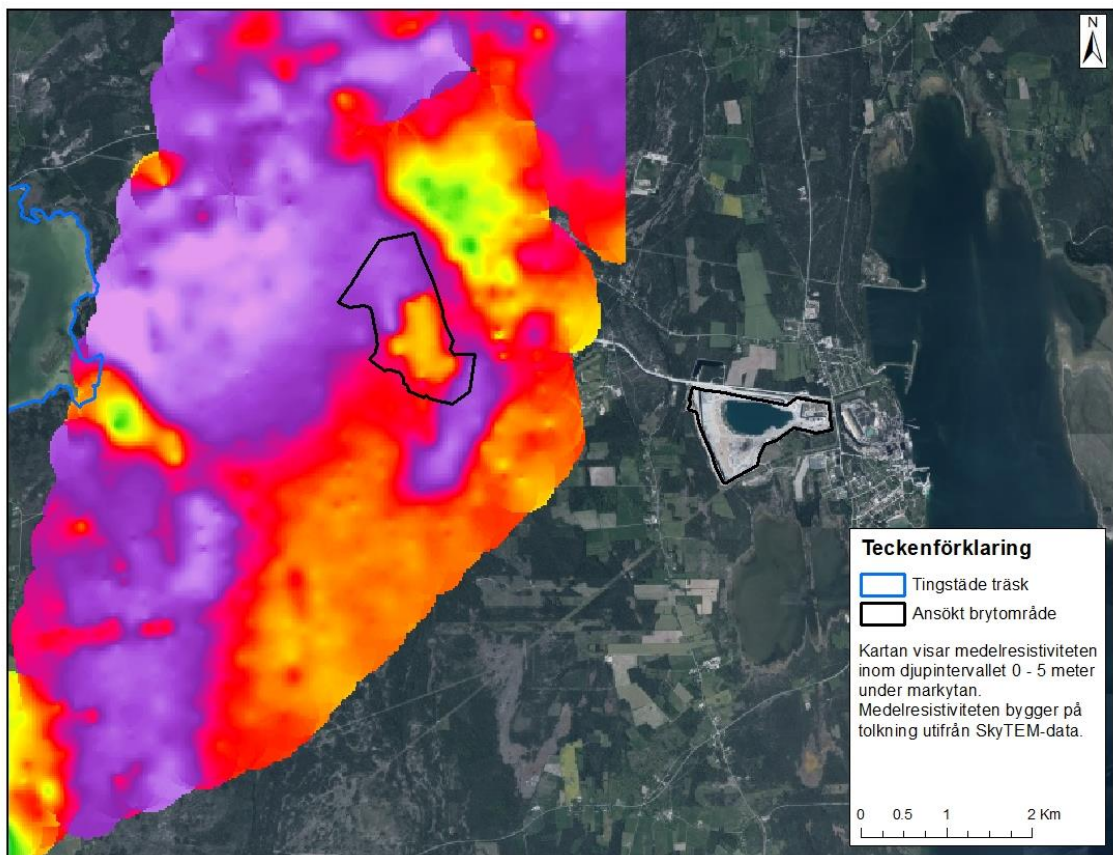
En annan tydlig skillnad mellan revkalkstenen och de lagrade bergarterna är den vertikala konduktiviteten, eller med andra ord förutsättningarna för grundvattenbildning. Resultaten av de provpumpningar som genomfördes vintern 2023 visar tydligt på denna skillnad. Pumpningen i lagrad kalksten (BH86) utfördes utan större störningar trots att en betydande del av marken runt brunnen var täckt av vatten från nederbörd och pågående snösmältning. Två av tre pumpningar i revkalk påverkades av nederbörd (BH2255 och BH2102) och fick förändrade grundvattennivåer till följd av nederbörd, se Tabell 6.

Tabell 6. Nederbördsmängd under pumpptester.

Pumpbrunn	Nederbördsmängd (mm)	Geologisk enhet	Kommentar
BH86	14,4	Lagrad kalksten	Ej påverkade nivåer
BH2102	2,8	Revkalksten	Påverkade nivåer
BH2255	15,9	Revkalksten	Påverkade nivåer

Revkalksten tenderar att ligga överst i stratigrafin vid Slite och normalt ovanpå den lagrade kalkstenen, men på vissa platser förekommer revkalksten direkt ovanpå mörkelstenen. Detta utvecklas i kapitel 5.1.2 nedan. Revkalkstenen förekommer öster om Tingstäde träsk och sträcker sig österut över File hajdar, avsmalnande som en kil norr om File hajdar-täkten. Ett mindre rev sträcker sig från File hajdar-täkten i sydöstlig riktning, se Figur 55. Öster om detta rev ligger den kommunala vattentäkten i en nordsydlig linje. Uttagsbrunnarna sitter i vad som i äldre undersökningar benämns "krosszonen" men oavsett bildningssätt skulle kunna betraktas som en kantzon till revet. I söder utgör Hejnum hållar ett annat större revområde. De mäktigaste

delarna av revkalkstenslagret återfinns öster om Tingstäde träsk där det förekommer ned till ca -20 m. Mäktigheten uppgår där till uppemot 80 meter. I Figur 55 illustreras revkalkens utbredning i lila.



Figur 55. Medelresistivitet inom djupintervallet 0–5 meter under markytan. Utbredning av revkalken representeras av lila färg, vilket representerar en hög resistivitet.

På de ställen där revkalkstenen (revkroppar) skapat fördjupningar i underliggande lager har den ojämna kompaktionen i underliggande lager gett upphov till uppspruckna zoner med lokalt högre genomsläpplighet. Dessa fördjupningar har observerats öster om File hajdar-täkten och uppe på File hajdar, öster om Tingstäde träsk.

5.1.2 Strukturgeologi

Bergarterna i Gotlands berggrund har inte utsatts för någon omfattande tektonisk påverkan. Varken i Västra brottet eller File hajdar-täkten har några förkastningar observerats. Avsaknaden av tektonisk påverkan innebär bland annat att många av de avsatta lagren är kontinuerliga och praktiskt taget horisontella med en svag lutning på cirka 0,3° åt O-SO. I Västra brottet kan de vattenförande horisontella lagren följas över en sträcka av över 1 kilometer i mägerlstenen. Med stöd av borrhålsundersökningar i området har dessa lager i Västra brottet extrapolerats (de 2–3 kilometrarna) in under File hajdar och Hejnum Kallgate. De extrapolerade lagrens inbördes avstånd och nivåer stämmer väl överens med resistivitetmätningar och hydrauliska tester i borrhål på File hajdar.

Det som bryter de regelbundna lagren i områdets mägerlsten och lagrade kalksten är förekomsten av revkroppar. Revkropparna tenderar att ligga överst i stratigrafien vid Slite och normalt ovanpå den lagrade kalkstenen, men på vissa platser förekommer revkalksten direkt ovanpå mägerlstenen. Revkropparnas tyngd har som regel skapat fördjupningar i underliggande lagrer. File hajdar-täktens södra kant utgörs av revkalksten. Revstrukturen är främst belägen i kalkstenen, men sträcker sig även ner i mägerlstenen. Revkalksten förekommer också i de höglänta områdena på File hajdar och Hejnum hållar, väster om täkten.

En hydrogeologiskt viktig och stratigrafiskt markant gräns är övergången mellan den lagrade kalkstenen och underliggande märgellager. Lagergränsen mellan märgelstenen och överliggande lagrad kalksten har kunnat urskiljas väl i tTEM-data (se Figur 16 i avsnitt 4.5.1). Lagergränsen är i stort sett horisontellt men fördjupningar i lagret förekommer på flera ställen, orsakade av ojämn kompaktion från ovanliggande revkroppar. Där revkroppar tyngt ned de underliggande lagerna av märgel och kalksten kan en ökad vattenföring förekomma, något som också överensstämmer med uppmätta transmissiviteter från borrhålsundersökningar (Bilaga 2) samt SGU:s studier (Dahlqvist et al., 2022).

Grundvattenflödet i berggrunden är till större delen koncentrerat till (nära) horisontella lager (subhorisontella), som förekommer både i kalkstenen och i den underliggande märgelstenen. Med undantag för lagren i revens närhet, ligger lagren praktiskt taget horisontellt. De horisontella vattenförande lagren åtskiljs av lager med tätare sten. Det vertikala flödet mellan dessa lager sker genom enstaka vertikala sprickor.

Grundvattenflödet i sprickiga material är både extrem heterogent, eftersom det i huvudsak förekommer i sprickorna, men samtidigt anisotropt, eftersom det är tydligt beroende av sprickornas orientering. På File hajdar har tre primära sprickgrupper identifierats, alla fördelade med olika riktningar, se kapitel 4.5.2. Sprickgruppernas orientering och utbredning är avgörande för den primära flödesriktningen och förekomsten av grundvattnet i berggrunden på File hajdar. Lokalt förekommer anisotropi, framför allt i revkalkstenen där flera mindre sprickgrupper och epikarst observerats samt på de ställen där revkroppar tyngt ned de underliggande lagren av märgelsten och lagrad kalksten och lokalt ökat sprickförekomsten. I större skala kan det däremot sägas att märgelstenen och den lagrade kalkstenen är mer isotropa jämfört med revkalkstenen, då föreliggande undersökningar visar att flöde sker i alla horisontella riktningar i de lagrade bergarterna, se t.ex. kapitel 4.9.3.

5.1.2.1 Karst

Med karst avses landskap och landformer som skapats genom korrosion av karbonathaltig berggrund. Karst kan vidga befintliga sprickor till mångdubbel storlek och därmed ha en betydande påverkan ett områdes hydrogeologi. SGU har tagit fram en rapport som bl.a. sammanställer kunskapsläget om karst på Gotland (Erlström et al., 2022). Nedanstående beskrivning är hämtad från denna rapport om inget annat anges.

I vissa områden förekommer karst i kalkstenen. Karstsystem bildas genom kemisk korrosion av karbonatmineral där strömmande yt- och grundvatten löser upp och vidgar befintliga spricksystem i kalkstenen till öppna sprickgångar (sprickkarren), kollapsstrukturer (doliner) och stora hålrum (grottor). Ett område med mycket karst finns vid Lummelunda. Vid SGU:s berggrundskartläggning av Gotland 2006–2008 (Erlström et al., 2009) (noteras karstskrevor främst inom hållområden med kalksten som ligger högre än cirka +25 m. Förekomsterna verkade, förutom topografi och närvaron av sprickor, även vara knutna till speciella typer av kalksten. Karbonatrika, kristallina, sprickiga och homogent lagrade kalkstenar är mer benägna att påverkas av karst i jämförelse med lerigare varianter. Som jämförelse finns i regel ingen karst inom områdena med märgel på Gotland.

Den vanligaste typen av karst på Gotland är ytnära karst (epikarst) som utvecklas i den omättade zonen. Typiska exempel är de karstskrevor som skapats genom att nederbörd perkolerat ned i sprickor och löst upp kalkstenen i anslutning till sprickorna. Förekomsten av epikarst är inte systematiskt dokumenterad på Gotland. Epikarst är vanligt förekommande i kalkstenslagren och revkalkstenen på västra och nordvästra Gotland och karstförekomsten avtar betydligt öster om Tingstäde träsk. Observationer av epikarst har dock gjorts öster om Tingstäde träsk och på Hejnum hållar, dvs. nordväst och väst om File hajdar-täkten.

Epikarst är som ovan nämnt strukturer som bildas i den omättade zonen med meteoriskt vatten, det vill säga nederbördsberoende karst. Det är också i den omättade zonen som merparten av

upplösningen sker eftersom det meteoriska vattnet ofta hinner nå jämvikt mellan koldioxiden i vattnet (kolsyra) och dess salt (bikarbonat) innan det når den mättade zonen (grundvattnet). Den lösta koldioxiden i det meteoriska vattnet förbrukas relativt snabbt med djupet, vilket gör att epikarst vanligtvis inte sträcker sig djupare än cirka 15 m (Williams, 2008; Jones, 2013).

SGU har observerat att karstskrevornas djupgående beror på kalkstenens lagring och bankning. Ofta bryts eller länkar sprickorna av vid lagergränser redan på 0,5–1 m djup vilket gör att det meteoriska vattnet omväxlande följer sprickor respektive utmed hydrauliskt konduktiva lagringsplan på underliggande lager med mindre karstbenägen kalksten eller märgelsten på sin väg neråt i berggrunden och i topografin. Detta laterala flöde kan resultera i utsipprande meteoriskt vatten i sänkor i intilliggande terräng där den tätare berggrunden bildar underlaget, vilket ger förutsättningar för bildandet av våtar. Riktningarna på de öppna karststrukturerna tycks också vara lokalt betingade även om man kan förmoda att det finns regionala trender.

Samtliga ovanstående beskrivningar stämmer väl överens med de observationer som gjorts av Heidelberg Materials. Nedan följer ett urval av observationer som bekräftar SGU:s bild:

- Ingen karst har observerats under de ytligaste metrarna längst de över 8 km av blottade täktväggar som finns i Västra brottet och File hajdar-täkten, vilket bekräftar att karst är mycket ovanligt i märgelsten och den lagrade kalkstenen samt att karst snabbt avtar med djupet.
- Observationer av ett landskap utan ytvatten nära efter ett extremt nederbördstillfälle i områden med mycket epikarst på norra File hajdar, samtidigt som det var mycket blött i Våtar och på områden med märgelsten eller kalksten utan karst visar att epikarsten kan ha en betydande hydraulisk konduktivitet och därmed stor påverkan på ythydrologin. En bild som förstärktes av hur vatten strömmande ut ur karstifierade sprickor och bankningsplan något lägre ner i topografin vid samma tillfälle (kapitel 4.6).
- Mätningar av vattentemperaturen under några vinterdagar har visat att det vatten som strömmar ut i våtar inom områden med ställvis rik karstförekomst inte har transporterats mer än någon meter under markytan (kapitel 4.7.3). Det enda källflöde som påträffats inom undersökningsområdet och uppmätts härröra från mer än några enstaka meter under markytan var referenspunkten vid Prosthulet på Hejnum hållars östra kant (ett område som dock ej berörs av denna ansökan).
- Utförda infiltrationsförsök, spårämnesförsök, geofysiska mätningar och provpumpningar bekräftar en avsaknad av större djupgående karststrukturer i berggrunden inom de områden där respektive undersökning har utförts (kapitel 4.5.1, 4.9.2, 4.9.3 och 4.10).
- Drönarflygning med IR-kamera vintertid har bekräftat avsaknaden av varmt utströmmande vatten inom stora våtmarksområden (kapitel 4.7.3).

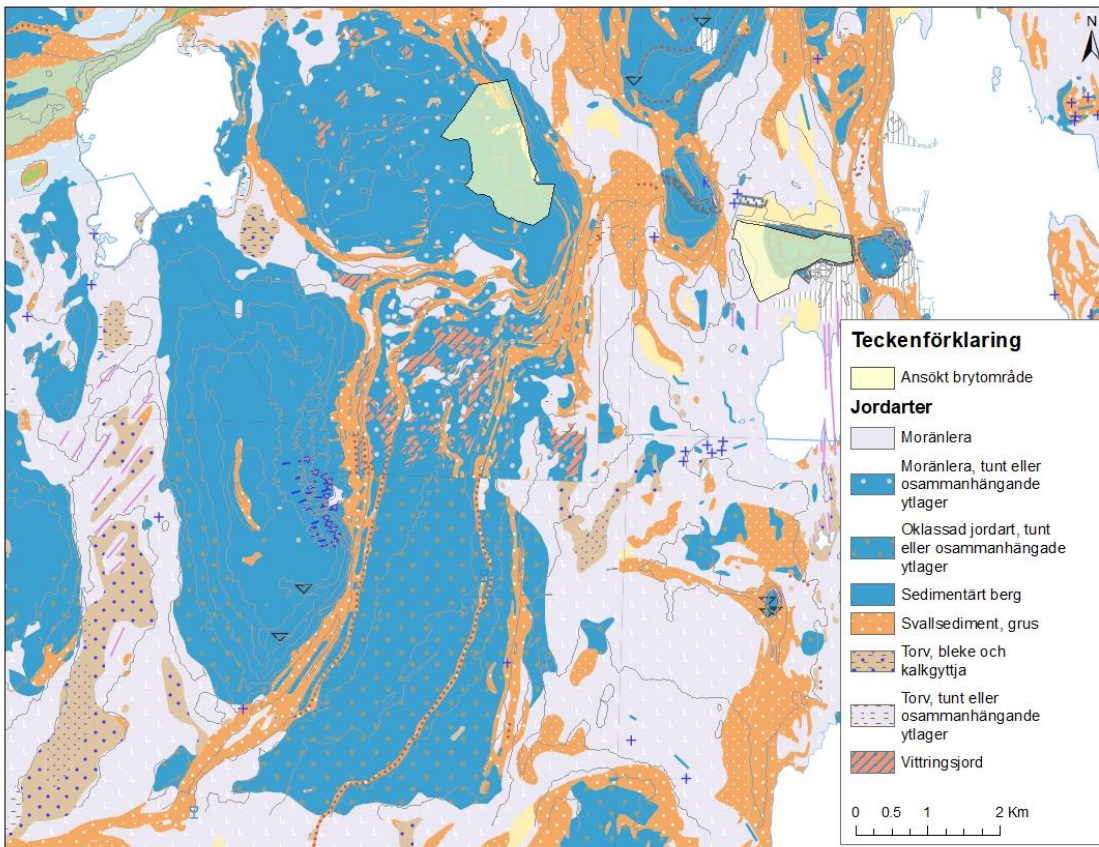
Det är tydligt i fält att det förekommer stora lokala variationer av mängden karst inom den del av kalkstenen som beskrivs som revkalksten i SGU:s förenklade litologiska beskrivning, se Figur 16. Man kan med andra ord säga att den litologiska beskrivningen är relevant för att avgränsa områden utan kontinuerliga vattenförande lager, men ej tillräcklig för att i detalj beskriva var epikarst är mest frekvent.

Det förefaller sannolikt att epikarst kan möjliggöra en ökad grundvattenbildning även till djupare strukturer i berget vilket SGU påpekar i sin rapport (Erlström et al., 2022). Detta stämmer överens med de observationer som har gjorts vid nederbörd i samband med provpumpningar (kapitel 4.9.2). Det är därmed sannolikt att det finns lokala variationer även på grundvattenbildningen inom området. Att genom mätningar fastställa skillnader i grundvattenbildningen mellan olika delområden som i olika grad är konnekterade är dock svårt

utan beroende av modellering. Även i grundvattenmodellen varierar grundvattenbildningen eftersom modellen beräknar grundvattenbildningen utgående från nettonederbörden och genomsläppligheten på jord och berg, se kapitel 6.2.9. Eftersom genomsläppligheten definieras som heterogen även i den lokala skalan så varierar grundvattenbildningen lokalt.

5.2 JORDLAGER

Jordlagren uppe på File hajdar utgörs huvudsakligen av ett tunt lager starkt lerhaltig och relativt tät vittringsjord i form av alvarmo. Vittringsjord utgörs av jordarter som avsatts på plats antingen genom mekanisk eller kemisk vittring. Vittringsjorden skiljer sig därmed från den leriga moränen som, pga. dess bildningssätt, har en större kornstorleksfördelning. Måktigheten av vittringsjorden överstiger sällan 0,2 m och på flera platser saknas vittringsjorden varvid underliggande kalksten går i dagen (blå färg på jordartskartan i Figur 56). I det lågt liggande området mellan File hajdar och Ytings i öster finns relativt mäktiga jordlager av moränlera (lila färg på jordartskartan i Figur 56). Enligt SGU:s jorddjupskarta uppgår jorddjupet i huvudsak till 5–10 m, men partier med 10–20 m kan förekomma. Runt File hajdar finns det på olika topografiska nivåer en rad strandavlagringar med sand och grus avsatta under Östersjöns olika transgressionsstadier (orange färg på jordartskartan i Figur 56).



Figur 56. Jordartskarta för området.

Strandvallarna har en högre genomsläpplighet och porositet än moränleran och vittringsjorden och har således en större förmåga att transportera och magasinera vatten. Framför allt på de platser där strandvallarna inte är genomgrävda kan de dämna ytvatten på uppströmssidan vilket möjliggör grundvattenbildning under längre tid. De större strandvallarna förser nedströms våtmarksområden med vatten under hela sommaren. Vid mindre strandvallar räcker vattnet till för att upprätthålla ett flöde i någon eller några veckor efter att tillförseln från ytvatten eller nederbörd upphört. Strandvallarna spelar därmed en stor roll för att behålla vatten i landskapet efter nederbörd. Som exempel kan nämnas att strandvallen öster om Tingstäde, vilken är en av de största i området, har konstaterats ha en mäktighet på över 3 m, en längd på flera km och en

bredd på ca 200 m. Den utgörs av olika fraktioner sandigt material och kan därmed rymma en betydande vattenvolym.

Både egna observationer i strandvallen på södra sidan av Tingstäde träsk och SGU:s observationer i Tingstädeåsen på sjöns norra sida (Svantesson, 2008 samt muntlig kommunikation Otto Pile, SGU) visar att dessa avlagringar till betydande del utgörs av lermorän och därmed sannolikt är bildade mer som israndlägen än som strandvallar. Dessa vallar/åsar med ca O-V riktning har därmed en tydligt dämmande funktion. Täta lager i åsen dämmer Tingstädeträsk, vars yta är belägen mer än 5 m högre än åsens fot på den norra sidan. Detta faktum har betydelse då det är Tingstädeåsens dämmande funktion som möjliggör Tingstäde träskens existens.

Inom de lågt liggande Natura 2000-skyddade våtmarksområdena söder om File hajdar utgörs de tunna jordlagren av en mosaik av vittringsjordar, bleke och moränlera med inslag av ytlig torv. Den ytliga vertikala hydrauliska konduktiviteten i bleke har testats i fält till ca $9 \cdot 10^{-7}$ m/s medan moränleran är testad till $7 \cdot 10^{-7}$ m/s, vilket innebär en mycket begränsad genomsläpplighet för båda jordarterna och motsvarande vad man kan förvänta sig i ytlagren i leriga jordar, enligt Grundvattenboken (Sparrenbom & Jeppson, 2022). Det bör dock påpekas att underliggande berg är ännu tätare så det är i första hand inte bleken eller övriga jordlager som kan skapa täta förhållanden och höga artesiska grundvattentryck inom området.

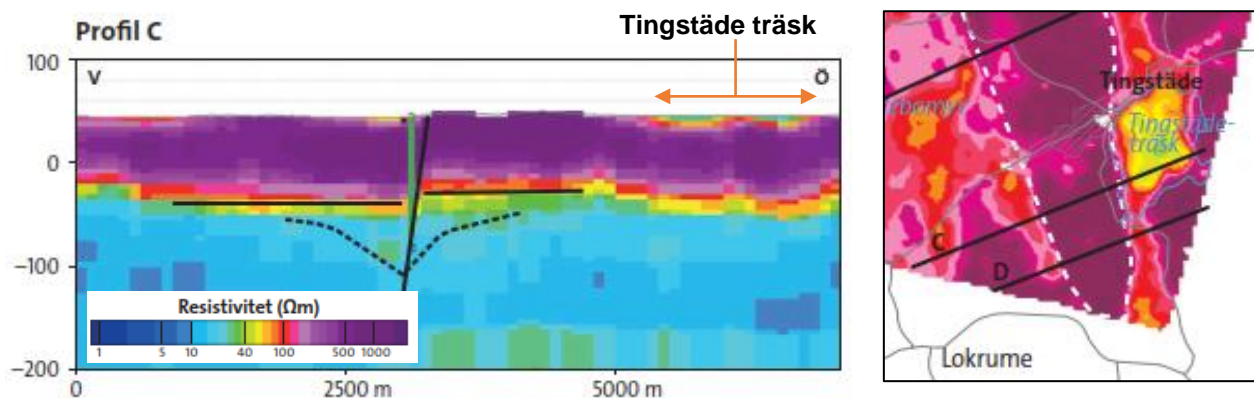
5.3 TINGSTÄDE TRÄSK

Bottensedimenten på Tingstäde träsk har kartlagts först år 1923 och sedan delvis på nytt år 2023, vilket beskrivs mer ingående i kapitel 4.12. Undersökningarna visar på sedimentmäktigheter som oftast uppgår till tre till fyra m i stora delar av sjön, men som ibland kan uppgå till sju m, med kalt berg i de östra delarna. Undersökningarna visar även att det skett en pålagring med ett par dm sedan 1923. Labbtester visar på en relativt enhetlig låg genomsläpplighet i bottensedimenten (10^{-8} m/s).

I de delar där sedimenttäckets är tunt eller berget är blottat kan även det underliggande berget förväntas vara minst lika tätt som bottensedimenten. Det borrhål som borrats till 53 m djup vid sjöns östra strand uppvisar en hydraulisk konduktivitet på 10^{-10} m/s, dvs. 100 gånger tätare än medianen för bottensedimenten. Den låga konduktiviteten visar på avsaknaden av de kontinuerliga vattenförande lager som är karaktäristiska för de lagrade bergarterna. Även SGU:s SkyTEM-undersökningar visar att sjön underlagras av ca 50 m revartad kalksten, se Figur 57 (benämns stromatoporoidkalksten med revkroppar i Dahlqvist m.fl., 2015).

Grundvattentrycknivåer visar på små fluktuationer och en liten gradient mot sjön i de ytligare berglagren. I djupt liggande berglager (mätt mellan 25–53 m under sjöytan) har en svagt nedåtriktad gradient uppmätts. Detta står i skarp kontrast till borrhålen på File hajdar, belägna mellan tälten och sjön, som står i kontakt med kontinuerliga vattenförande lager vilka flukturerar med en årlig amplitud på ca 30 meter. Hade dessa lager varit hydrauliskt konnekterade med sjön hade dessa amplituder inte förekommit. Sammantaget visar dessa undersökningar att vattenutbytet mellan sjön och berggrundvattnet är mycket litet. En eventuell trycknivåpåverkan i djupt liggande lager (>50 m) saknar därmed påverkan på sjöns vattenbalans.

Det vatten som tillförs sjön från File hajdar i öster kommer som ytvatten, grundvatten i jord eller grundvatten i mycket yt nära sprickor i berget. Vattenkemianalyser i bergborrhålet BH2006 (se kapitel 4.8), på sjöns östra sida, visar att detta försörjs med grundvatten från jordlagren i den intilliggande strandvallen, sannolikt via ytliga bankningsplan i berget i vilka vattnet även kan förväntas strömma vidare ut i sjön.



Figur 57. SkyTEM-profil under Tingstäde träsk, klippt och modifierad från Dahlqvist m.fl., 2015 (SGU rapport RM 136). Lila färg motsvarar rev- eller revartad kalksten.

5.4 GRUNDVATTEN

Grundvattenflödet i berggrunden är till större delen koncentrerat till (nära) horisontella lager, som förekommer både i kalkstenen och i den underliggande mägerstenen, men även i lagergränsen mellan dessa geologiska enheter. I övergången mellan mägersten och överlagrande eller intilliggande kalkstenenheter finns gynnsamma förutsättningar för grundvattentransport. Den primära anledningen är att mägersten har en mycket låg vertikal genomsläpplighet, vilket gör att det grundvatten som kommer från ovanliggande kalksten inte enkelt kan fortsätta nedåt i mägerstenen. Lagergränsen kan därför fungera som en hydraulisk konduktor, längs vilken grundvatten kan strömma.

I Västra brottet kan de vattenförande horisontella lagren följas över en sträcka av över 1 kilometer i mägerstenen. Lagren i Västra brottet kan extrapoleras parallellt med bergartsgränsen (de 2–3 kilometrarna) in under File hajdar.

Utöver i de subhorisontella lagren, förekommer vattenförande sprickor också i anslutning till revkroppar, vars massa pressat ner och skapat böjningarna av lagrade kalkstenenheter och mägersten, vilket i sin tur skapar sprickor och ökad porositet.

Från ett strukturgeologiskt och hydrogeologiskt perspektiv skiljer sig revkalkstenen från den lagrade kalkstenen och den lagrade mägerstenen genom avsaknaden av uthålliga subhorisontella lager eller strukturer. Revkalkstenen kan sägas vara delvis lagrad och innehålla lagrade strukturer och vattenförande sprickor, men den innehåller (normalt) inga uthålliga subhorisontella lager. Revkalkstenen kan därmed anses utgöra en gräns för stora kontinuerliga subhorisontella lager som identifierats i t.ex. Västra brottet.

Hydraultester, infiltrationstester och studier av nivådata (4.5.5, 4.9.3 och 4.9.3 samt Bilaga 2) har visat följande:

- Revkalkstenen väster om File hajdar-täkten är heterogen och har en låg vattenförande förmåga. Spridningen i hydraulisk konduktivitet är stor väster om File hajdar-täkten.
- Det djupare grundvattensystemet har lager som sträcker sig från sydost mot nordväst in under botten på File hajdar-täkten.
- Uppe på File hajdar, i närheten av områden där det observerats epikarst, förekommer det lokalt vertikala kopplingar mellan revkalkstenen och underliggande lager. Grundvattenmagasinet har här en tydlig koppling med ytsprickor.
- Det har inte observerats någon tydlig koppling mellan vattenförande zoner uppe på File hajdar och skyddsvärda områden såsom Tingstäde träsk och Natura 2000-områdena

sydväst om File hajdar-täkten. De vattenförande lagren som finns ebbar ut väster om File hajdar-täkten där revkalkstenen blir mer framträdande.

- Syd och sydväst om File hajdar-täkten har grundvattensystemet kontakt med vattentäkten som ligger öster om täkten.
- Det djupare grundvattensystemet, i den lagrade kalkstenen och märgelstenen eller däremellan, på File hajdar är heterogent men väl konnekterat på ett stort avstånd, och karaktäriseras inte av några stora tydliga karststrukturer.

5.4.1 Grundvattenbildning

Grundvattenbildning syftar normalt på den mängd vatten som passerar nedåt genom en teoretisk yta, t.ex. markytan, bergöverytan e.dyl. Grundvattenbildning anges ofta i enheten mm/år. I en komplex geologi som här är det dock mer komplicerat än ett enskilt värde. Ett djupare resonemang om detta förs i Bilaga 3. Om inget annat anges, diskuteras i denna rapport grundvattenbildning till djupt liggande lager i berget, då det är dessa som påverkas av en utökad täkt. Man kan konceptuellt konstatera att grundvattenbildningen är låg på grund av följande faktorer:

- Märgelstenen och den lagrade kalkstenen, med dess dominerande horisontella strukturer, har låg genomsläpplighet i vertikalled.
- De jordlager som dominerar i området har en låg genomsläpplighet och begränsad kinematisk porositet (den del av porutrymmet som håller rörligt vatten). Jordlagren begränsar därmed nederbörd från att infiltrera och innebär att grundvattenbildning i huvudsak endast kan ske efter nederbörd.
- Nettonederbörden är relativt liten.

Grundvattenbildningen varierar inom området, men är större inom höjdområdena med revkalksten där det finns en större förekomst av vertikala strukturer. Detta har konstaterats genom nivåpåverkan från nederbörd i samband med provpumpningar (kapitel 4.9.2), genom olika variationsmönster i grundvattentryck för borrhål inom olika delar av undersökningsområdet (kapitel 5.4.3) samt genom olika kemisk vattenkaraktäristik i olika borrhål vilket visar på olika lång tid för vattnet i berget (kapitel 4.8).

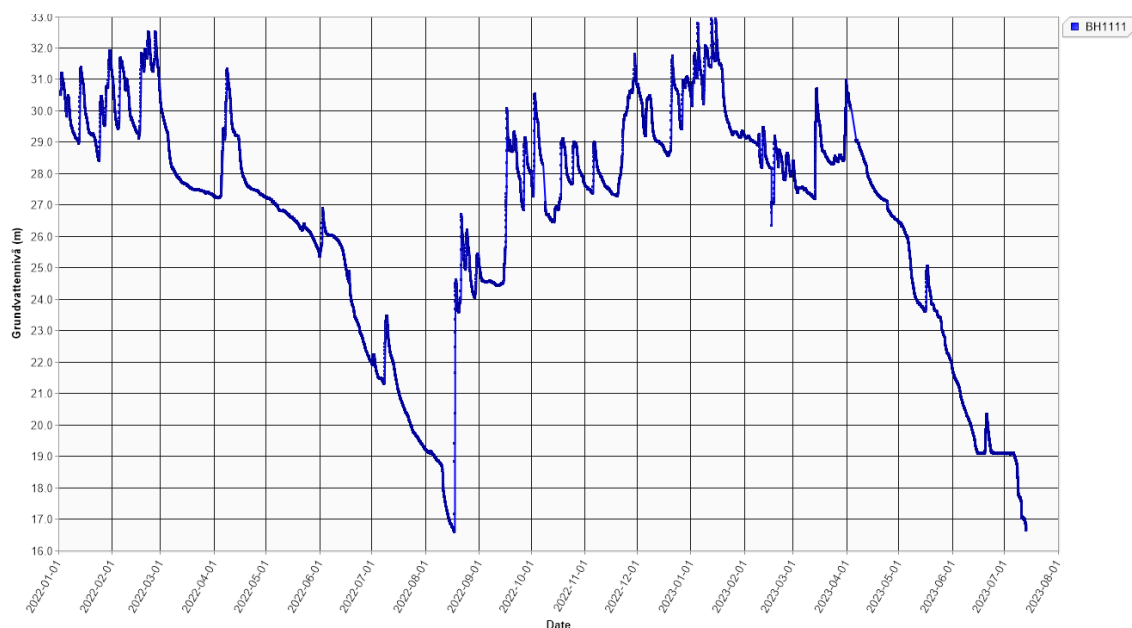
Grundvattenbildningen sker inte jämnt utan är koncentrerad till korta perioder efter nederbörd eller snösmältning med mycket vatten på markytan. Frekvensen av dessa tillfällen är mycket högre under vinterhalvåret, se exempelgraf i Figur 58.

Under sommarmånaderna maj–juli är nettonederbörden 0 sett som månadsvärde. Som en effekt av att grundvattenbildningen sker under korta tillfällen, förekommer som regel något eller några tillfällen per sommar med kraftig nederbörd, där nettonederbörden är positiv och en viss grundvattenbildning sker. Som ett konservativt förhållningssätt, för att inte riskera att underskatta påverkan från den ansökta verksamheten, har nettonederbörden 0 under sommarmånaderna använts i beräkningar.

Inom områden med revkalk och mycket epikarst infiltrerar huvuddelen av nettonederbörden ner i den ytliga delen av berget. Huvuddelen av vattnet avrinner till lågpunkter i ytliga sprickor, men epikarsten kan antas bidra till en ökad grundvattenbildning även till djupare liggande strukturer.

Grundvattenbildningen till de grövre jordlager som finns i området, främst strandvallar, är betydligt större än till berg; generellt nära nettonederbörden. Lokalt kan det rent av förekomma en grundvattenbildning som är betydligt större än nettonederbörden då uppströms avrinnande ytvatten däms av strandvallar och infiltrerar i jordlagren. I dessa områden, som styrs av

ytvattnet, kan grundvattenbildningen dessutom ske under en mycket längre tid efter nederbörd än vad som sker till berg.



Figur 58. Grundvattennivå i borrhål BH1111 vilket är ett exempel på borrhål som reagerar väldigt snabbt på nederbörd. Vintertid sker grundvattenbildning ofta, sommartid vid ett fåtal tillfällen.

5.4.2 Jordvatten och berggrundvatten

För att förstå grundvattenpåverkan av den ansökta verksamheten är det viktigt att förstå skillnaden mellan grundvatten i jord och grundvatten i berg. Det är i huvudsak grundvatten i jord som försörjer växtligheten med vatten under vegetationsperioden; dels genom jordlagrens goda vattenhållande förmåga, dels genom stor magasineringsförmåga i strandvallar och jordlager. Det illustreras av att nivåerna i berggrundvattnet varierar kraftigt med årstid och regn, medan grundvatten i jord varierar mycket mindre, se exempel i Figur 61 nedan. Det innebär att magasineringskapaciteten är liten i berg och stor i jord och det förklarar exempelvis varför det förekommer kalktuffkällor med flödande källvatten mitt i sommaren när berggrundvattnet samtidigt kan befinna sig 10–20 meter under markytan.

De två grundvattensystemen är inte helt separerade från varandra, men kommunikationen dem emellan är liten. Det visar mätningar i grundvattenrör där det under vintern kan råda ett tryck på fem meter över markytan i berggrundrör vid högvatten (se Figur 61, Figur 69 eller Bilaga 2.G för alla nivågrafer). Det är ett så kallat artesiskt grundvatten. Ett sådant tryck hade inte uppstått om grundvattensystemen kommunicerat väl med varandra. Istället hade berggrundvattnet sipprat ut i jordlager och tryckskillnaden hade jämnats ut.

Grundvattensystemet i jordlagren är ett öppet system med mycket större porositet, nederbörden faller direkt på jordlagren, och vattnet i jordlagren står i kontakt med ytvattensystemet (vattendragen). Grundvattnet i jordlagren står inte i direkt kontakt med den kommunala vattentäkten, och endast i mycket begränsad utsträckning i kontakt med Heidelberg Materials täkter. Detta innebär att den årstidsbundna variationen i vattennivå i jordlagren blir mycket mindre än i berg. Om växterna i det studerade området direkt försörjdes av grundvattnet i berg skulle de flesta växterna vissna under sommaren, eftersom grundvattennivån i berget kan sjunka så mycket som 30 meter under sommaren.

Grundvatten som lagrats i jordlagren under nederbördsrika perioder utströmmar i källmiljöer och sådan utströmning sker även under nederbördsfattiga perioder. I såväl Hejnum Kallgate som Grodvät finns källmiljöer nedströms strandvallar där grundvattennivåmätningar visar att jordlagren har tillräcklig magasineringsförmåga för att upprätthålla ett flöde genom hela sommaren. För Grodväts avrinningsområde beräknas den stora strandavlagringen tillföra ca

dubbelt så stor vattenvolym under perioden april–augusti som nettonederbörden under samma period (se kapitel 4.7.1). Även vid den studerade strandvallen vid Hejnum Kallgates norra gräns är magasineringens volymen betydande. I detta exempel finns dessutom ett vattendrag på uppströmssidan av jordavlagringen, vilket på ett effektivt sätt kan bidra till att fylla på jordmagasinet vid t.ex. ett kraftigt nederbördstillfälle.

Som nämnts ovan har jordlagren en mycket större porositet och förmåga att lagra vatten än bergets spricksystem. Utförda spårämnesförsök indikerar en effektiv porositet i berget på ca 0,12 % (se kapitel 4.10.1.2). Siktanalyser på jordprov tagna i strandvallarna visar på ett sorterat material i huvudsak inom grusfraktionen, men med inslag av sand och sten (Bilaga 2 samt Golder 2020a). Grundvatten som lagrats i jordlagren under nederbördsrika perioder utströmmar i vattendragen, och sådan utströmning sker även under nederbördsfattiga perioder. Ett sorterat grusmaterial kan ha en porositet på 25–40 % enligt Freeze et al. (1979) där i stort sett all porositet utgör effektiv porositet. Effektiv porositet för morän brukar anses ligga inom spannet 1–10 % (Naturvårdsverket, 2007). Porositeten i ytliga jordlager är normalt betydligt större än i djupare jordlager, på grund av biologisk aktivitet och tjälfrysning. Enligt Lundin (1977) kan porositeten i markens översta 0,3 m vara så hög som 60 %.

Växterna kan även nyttja vatten som inte ryms inom den effektiva porositeten utan binds av kapillärkrafterna mellan jordkornen. Inom rotzonen kan växterna suga upp vatten ner till ett vatteninnehåll benämnd vissningsgräns. Föreningen Skogen beskriver begreppet vissningsgräns som "...den vattenhalt, då det kvarvarande vattnet är så hårt bundet att växterna inte längre tar upp det. pF-värdet anges vanligen till 4,2 vilket motsvarar ett undertryck av 150 m vattenpelare (1,5 MPa). Vissningsgränsen kan således sägas motsvara växtrötternas maximala sugkraft. Gränsen inträffar normalt vid vattenhalter från ca 25 volymprocent för styva leror och vid 12 volymprocent för sandjordar" (Föreningen Skogen, 2020).

Lokalt inom kalkstensområden med ett sprickrikt ytberg (Erlström et al., 2022) kan porositeten antas vara betydligt förhöjd den översta ca metern. Några tillförlitliga litteraturvärden på porositet i denna typ av geologi har ej hittats men fenomenet kan förväntas bidra till att bibehålla vatten längre, t.ex. för nedströms liggande våtmarker.

Det finns inte något område med riklig epikarst inom Natura 2000-områden eller i nära anslutning uppströms, men väl områden med revkalk på File hajdar. Inom epikarstområdena sker en betydande del av ytvattenavrinningen i bergets översta meter. Efter extremnederbördstillfällen har det observerats hur mindre tillfälliga vattendrag strömmade ut ur framförallt flacka sprickstrukturer nedströms våtar och andra vattendrag som upphörde, för att åter komma i dagen ca 50 meter nedströms. Hydrauliskt sett skulle områden med mycket epikarst princip kunna jämföras med att berget varit täckt av en meter grovkorniga jordlager.

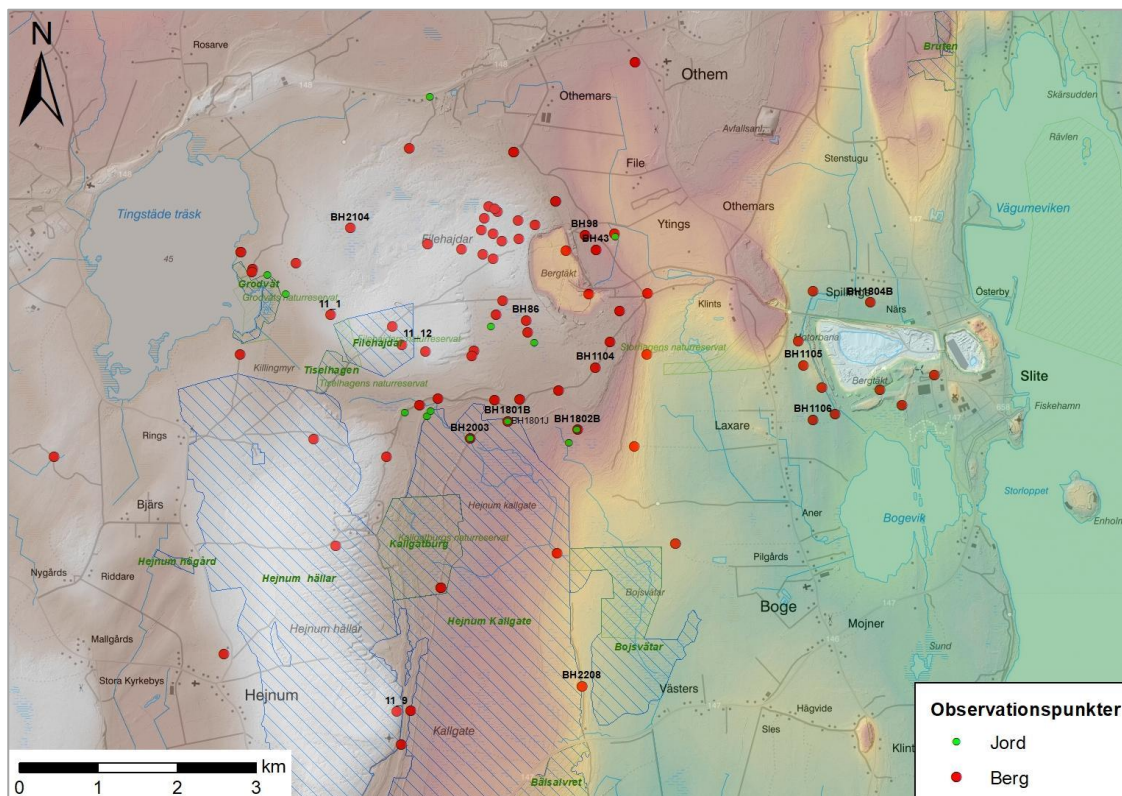
5.4.3 Grundvattennivåer och fluktuationsmönster

Inom aktuellt område finns ett stort antal observationspunkter för grundvattennivåer (Figur 59). Merparten av observationspunkterna avser grundvatten i berg och det är även för denna observationstyp som längst tidsserier finns att tillgå. För de äldsta observationspunkterna startade mätningarna i slutet av 1960-talet. Observation av ytligt grundvatten i jord har främst gjorts i området söder om File hajdar-täkten. För dessa observationspunkter finns tidsserier med start 2018.

Grundvattennivåer varierar över tid som följd av variation i grundvattenbildning och grundvattenavrinning. Inom aktuellt område förekommer generellt en mycket stor inomårsvariation för grundvattennivå i berg (upp till >30 m), dels som följd av naturgivna förhållanden, dels på grund av bergtäkterna (främst Västra och Östra brottet) och den kommunala grundvattentäkten som inverkar på grundvattenavrinningen. Detta gäller huvudsakligen för berggrundvatten i kontakt med de subhorizontella genomsläppliga zonerna i Slitelagren, medan berggrundvatten i ytligare liggande revkalksten, samt jordgrundvatten,

uppvisar en betydligt mindre inomårsvariation, ofta kring 5–10 m för revkalksten och <1 m för jord. Generellt gäller även att nivåfluktuationerna i ytligt berg, särskilt där epikarst förekommer, har förhållandevis liten inomårsvariation.

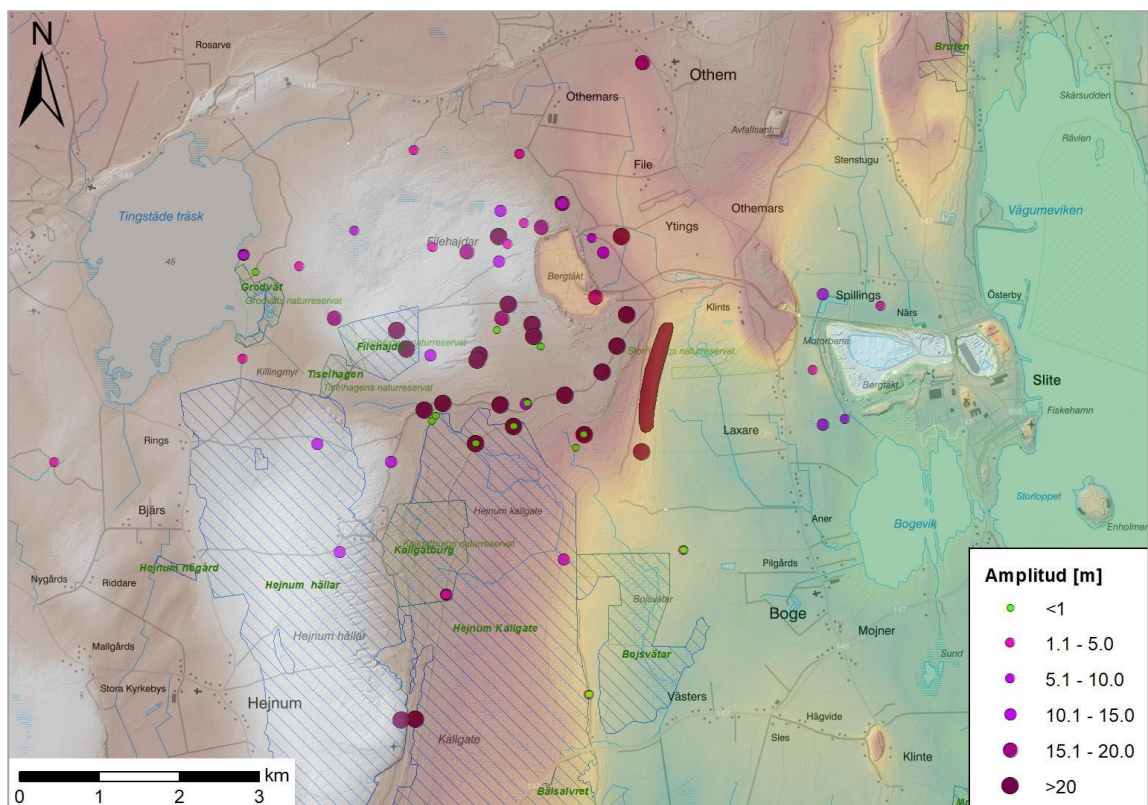
Grundvattnets fluktuationsmönster beskriver således vilket system som observationspunkten tillhör och bidrar till förståelsen av det grundvattenhydrauliska systemet. Studier av fluktuationsmönster kan, tillsammans med trender i absolutnivåer, visa hur grundvattennivåer påverkats historiskt av olika verksamheter (exempelvis bergtäkter och vattentäckter), men även stödda bedömning av hur grundvattennivåer kan påverkas av framtida verksamheter.



Figur 59. Observationspunkter för grundvattennivåer i jord och berg. Observationspunkter med namnbeteckning redovisas i grafer i detta kapitel.

En representation av den rumsliga fördelningen i variationsvidd kan ses i Figur 60, där liten amplitud (<1 m) kan ses för mätpunkter i jord och successivt större amplituder kan ses för olika mätpunkter i berg. Den kommunala berggrundvattentäkten representeras här med ett område inom vilket nivåvariationen anges som ett medelvärde för de i vattentäkten ingående brunnarna.

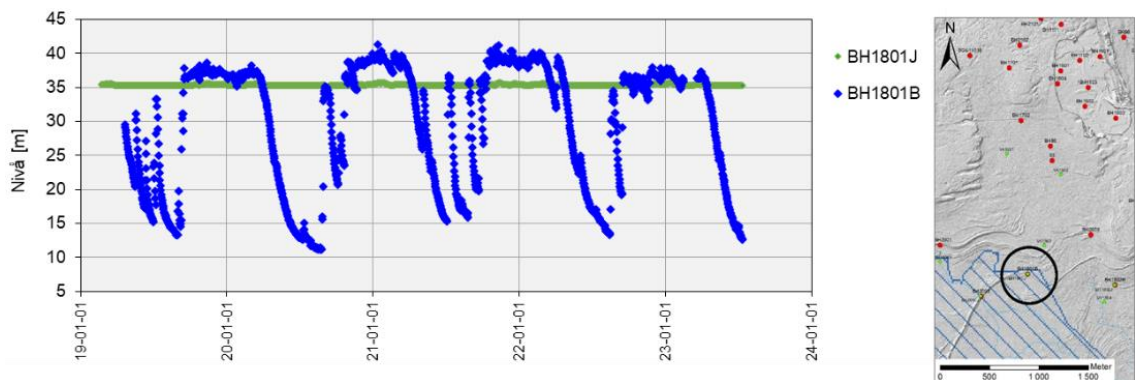
I öster kan det noteras att mätpunkterna i nära anslutning till Västra brottet har en förhållandevis liten amplitud, vilket beror på att nivåerna här är avsänkta som följd av bergtäkten. Detsamma kan ses i vissa mätpunkter nära (öster om) File hajdar-täkten. Väster om File hajdar-täkten beror den mindre amplituden på att mätningarna görs i borrhål i revkalkstenen.



Figur 60. Observerad variationsvid i vattennivåer i observationspunkter, statistik från 2015–2023.

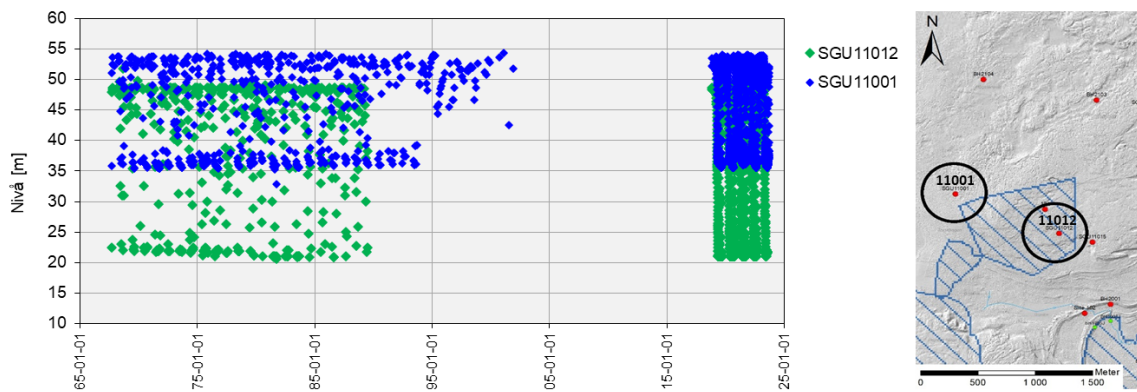
Nedan redovisas några exempel på tidsserier för att visualisera det dataunderlag som finns att tillgå samt peka på vissa slutsatser som kan göras utifrån underlaget. En mer detaljerad sammanställning av mätdata redovisas i Bilaga 2.G.

Som framgår av Figur 60, förekommer stora nivåfluktuationer för grundvatten i Slitelagren, framför allt vid grundvattentäkten och inom höjdområdet väster om vattentäkten. Detta gäller dock inte för nivåfluktuationer i jord, vilket illustreras i exemplet i Figur 61.



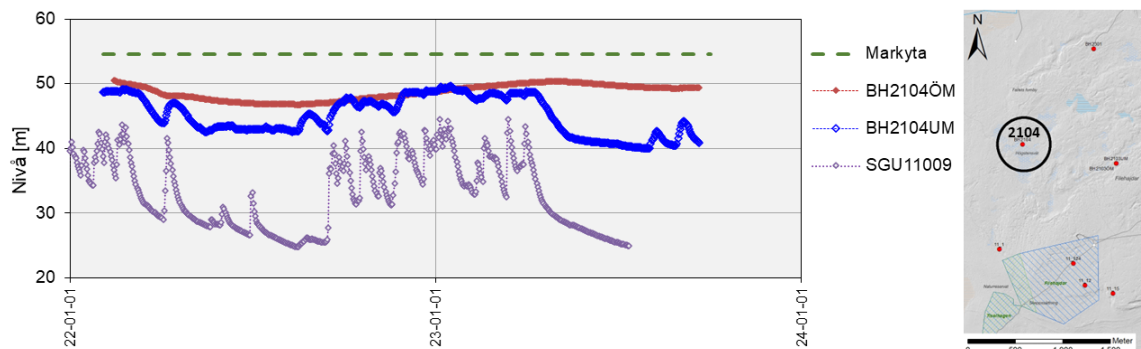
Figur 61. Exempel på typisk nivåfluktuation i berg (blå) och jord (grön), visualiserat för observationspunkt BH1801J (jord) och BH1801B (berg) söder om File hajdar-täkten. Observera att trycknivån i bergborrhålet mäts med tryckgivare i rör med tätt lock som medger mätning av trycknivåer över överkant rör, vilket här förekommer vid högvattennivå.

De stora nivåfluktuationerna i Slitelagren har förekommit under lång tid innan File hajdar-täktens tillkomst, vilket illustreras av observationspunkterna SGU11001 och SGU11012 i Figur 62 nedan. Av nivåerna framgår även att det inte kan spåras någon påverkan på grundvattennivåerna här som följd av File hajdar-täkten. Att den stora nivåfluktuationen är naturligt knuten till de särskilda hydrogeologiska förhållandena inom området visas av att samma stora amplitud kan ses i borrhål mer än 5 km söder om File hajdar-täkten (observationspunkt SGU11009 som beskrivs närmare under kapitel 5.4.4).



Figur 62. Exempel som visar att den stora fluktuationen i berggrundvattennivåer inom området har förevarit under lång tid innan File hajdar-täktens tillkomst 1983, här illustrerat av nivåer i observationspunkterna SGU1101 och SGU11012, sydväst om File hajdar-täkten.

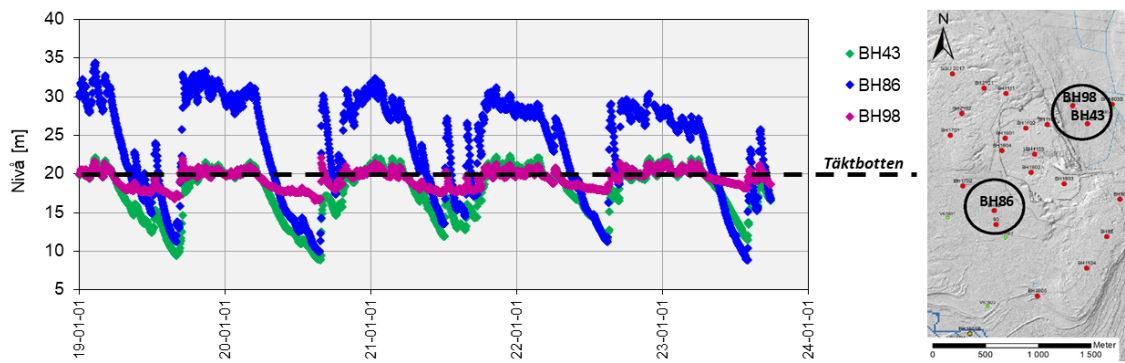
I den ytligare revkalkstenen ses samma mönster i nivåfluktuation som i Slitelagren, men amplituden är mindre än i den lagrade mörkelstenen. I exemplet i Figur 63 ses ett typiskt mönster för grundvattennivåfluktuation i revkalksten, representerad av observationspunkt BH2104 som försetts med tätningsmanschett så att ytligt och djupare berggrundvatten kan mätas separat.



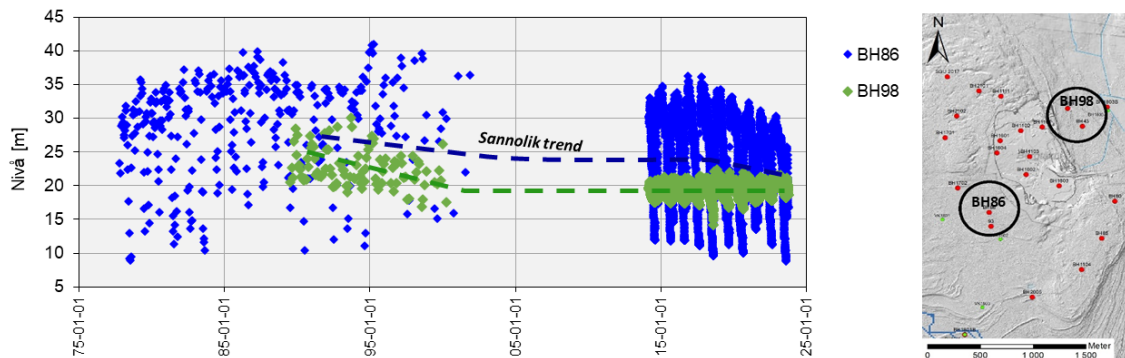
Figur 63. Exempel på grundvattennivåfluktuation i revkalksten, BH2104, där ÖM=ytligt berg och UM=djupare berg. Som jämförelse ses samtida nivåfluktuation i Slitelagren vid SGU11009, 5,4 km söder om File hajdar-täkten.

I närmare anslutning till File hajdar-täkten kan det noteras att grundvattentrycknivåerna i berg under betydande delar av året ligger lägre än täktbotten (Figur 64). Under sådana förhållanden kan det förstås att inläckaget av grundvatten till täkten är försumbart. Vid studier av absolutnivåer för längre tidsserier kan det ses att File hajdar-täkten sannolikt medfört en viss avsänkning av grundvattennivåerna i sitt närområde (Figur 65.).

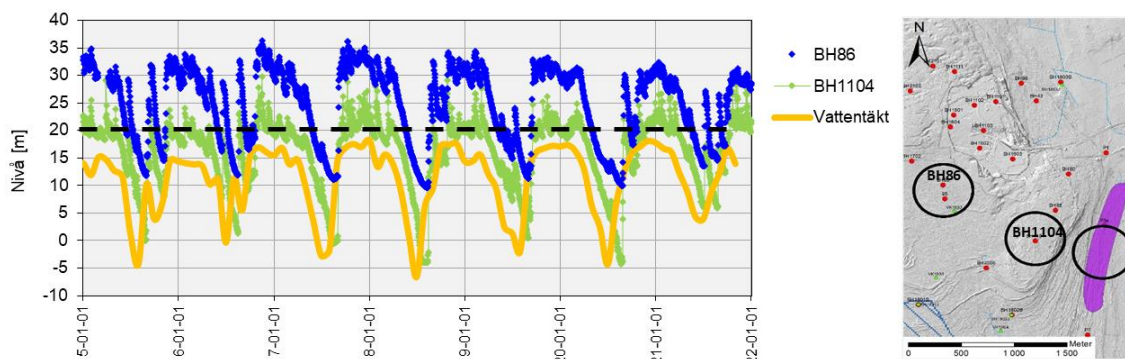
De nutida låga nivåerna kring File hajdar-täkten under sommarhalvåret bedöms till stor del bero på uttag vid den kommunala vattentäkten, vars nivåer samvarierar väl med grundvattennivåer i berg väster om vattentäkten. I Figur 66 kan ses hur nivåfluktuationerna vid vattentäkten kan följas västerut till BH1104 och vidare mot BH86. Det kan även noteras att BH1104, närmast grundvattentäkten, har ett påfallande likt fluktuationsmönster som vattentäkten men även likartade absolutnivåer. Samma koppling kan göras mellan vattentäktens nivåer och nivåfluktuationer i VSV riktning (Figur 67).



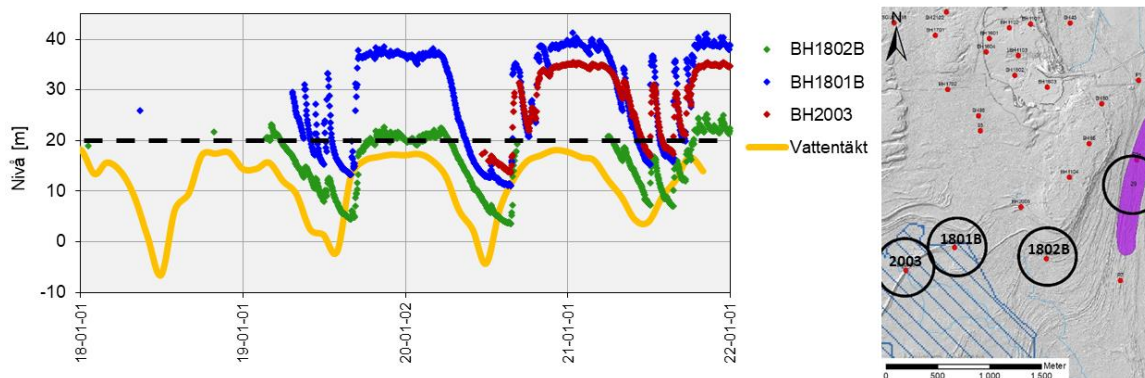
Figur 64. Exempel som visar att grundvattentrycknivåer i berg, i anslutning till File hajdar-täkten, under stora delar av året ligger lägre än täktbotten.



Figur 65. Exempel som visar att historiska grundvattentrycknivåer i berg i nära anslutning till File hajdar-täkten varit högre före täktens tillkomst.



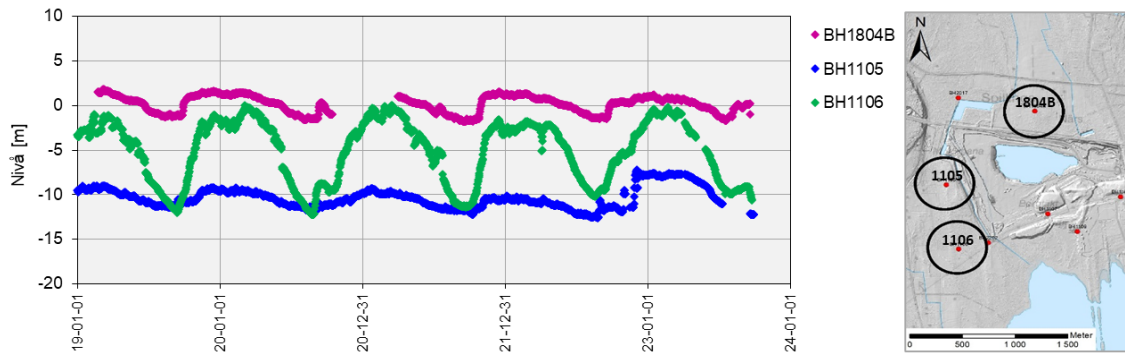
Figur 66. Exempel som visar att grundvattentrycknivåer vid den kommunala berggrundvattentäkten, sydost om File hajdar-täkten, samvarierar med grundvattentrycknivåer i berg väster om vattentäkten, samt att absolutnivåerna vid vattentäkten ligger lägre än nivåerna vid File hajdar-täkten. Grundvattentrycknivåer vid vattentäkten illustreras med en medelvattennivå för brunnar inom vattentäkten.



Figur 67. Exempel som visar att ett likartat fluktuationmönster som redovisas i Figur 66 även förekommer i riktning VSV om berggrundvattentäkten.

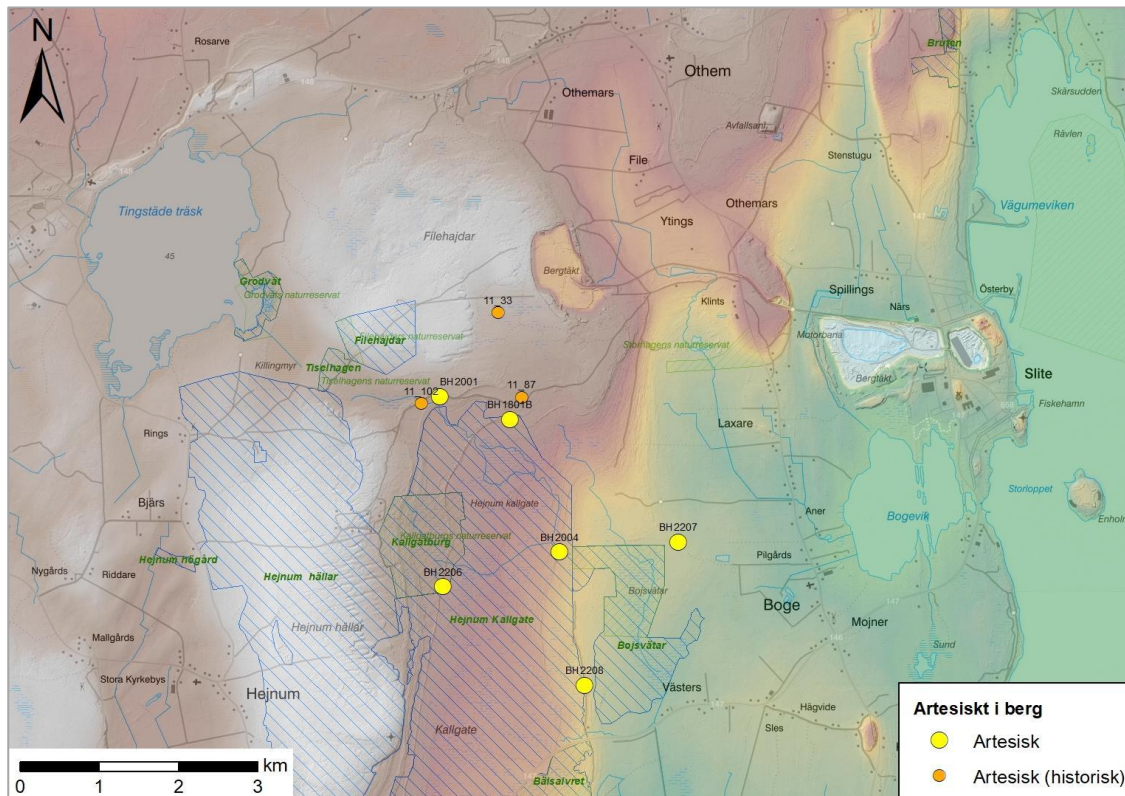
Grundvattentrycknivåerna i berg kring Västra brottet är tydligt påverkade av bergtäkten, vilket framgår av de låga absolutnivåerna samt att variationsvidden i årstidsfluktuationerna är betydligt mindre än vad som annars hade varit att förvänta (Figur 68). Nivåpåverkan tycks vara stabil

under senare tid, fram till hösten 2022, då en viss effekt av injekteringen av den västra bergväggen i Västra brottet kan ses i bland annat BH1105.



Figur 68. Exempel som visar de avsänkta grundvattennivåerna kring Västra brottet.

Inom delar av aktuellt område förekommer grundvattentryck i de djupare berglagren som tidvis når över markytan (Figur 69). Detta benämns ofta som *artesiska* förhållanden. De höga grundvattentrycknivåerna bestäms av grundvattennivån inom höjdområdena File hajdar och Hejnum hållar. Att artesiska förhållanden råder i de djupare Slitelagren, inom det nedströms liggande lågområdet, tyder på att ovanliggande ytligare berglager har låg vattengenomsläpplighet.



Figur 69. Observationspunkter med grundvattentrycknivåer i Slitelagen som tidvis når över markytan (artesiska).

Sammanfattande slutsatser om grundvattennivåer

Baserat på de uppmätta grundvattennivåerna i borrhålen som redovisats ovan kan vi dra följande slutsatser. Diskussionen nedan gäller *berggrundvatten* om inte annat sägs.

En mycket stor inomårsvariation i grundvattennivåer har observerats för observationspunkter i berg som står i kontakt med subhorizontella vattenförande zoner i Slitelagen. En amplitud på över 30 meter förekommer inom området. Nivåfluktuationerna för observationspunkter i ytligare liggande revkalksten är i betydligt mindre (5–10 m) och för grundvatten i jord mycket små (<1 m).

De stora inomårsvariationerna i grundvattennivåer i Slitelagren har funnits sedan lång tid tillbaka; dessa förhållanden var rådande redan då nivåmätningar påbörjades 1967. Dessa förhållanden förkommer även på mycket stort avstånd från File hajdar-täkten, tillika den kommunala grundvattentäkten (>5 km).

File hajdar-täkten påverkar grundvattennivåer i berg nära täkten, vilket huvudsakligen kan ses i historiska data för exempelvis observationspunkt BH86 (väster om täkten) och BH43 och BH98 (öster om täkten). Dessa borrhål ligger inom ett avstånd av några hundra meter från bergtäkten. Under stora delar av året (sommaren) ligger grundvattennivåerna i nära anslutning till täkten lägre än täktbotten, vilket betyder att grundvatteninflödet till täkten under sommarhalvåret är försumbart.

På större avstånd från File hajdar-täkten går det inte att spåra någon påverkan på grundvattennivåer som kan knytas till bergtäkten.

Den kommunala berggrundvattentäkten påverkar grundvattennivåer inom ett betydande område, vilket särskilt tydligt kan spåras väster om vattentäkten (exempelvis i BH1104 och BH86), men även VSV om vattentäkten (exempelvis i BH1802B, 1801B och BH2003).

Grundvattennivåerna kring Västra brottet är tydligt avsänkta, men uppvisar ingen tydlig trend till att sänkas ytterligare. Det går snarare att se en minskad avsänkning väster om den västra bergväggen sedan hösten 2022.

Artesiska tryckförhållanden råder i de djupare Slitelagren inom lågområdet nedströms Hejnum hållar/File hajdar.

5.4.4 Analys av historisk påverkan

Vanligen analyseras nivåpåverkan genom att jämföra olika tidsserier mot varandra. Då jämförs mätningar där en eventuell påverkan ska spåras (prognosrör) mot en representativ tidsserie som är opåverkad (referensrör). Avvikelsen mellan prognosrör och referensrör kan då tolkas som en nivåpåverkan. Metoden finns beskriven av exempelvis (Svensson & Sällfors, 1985).

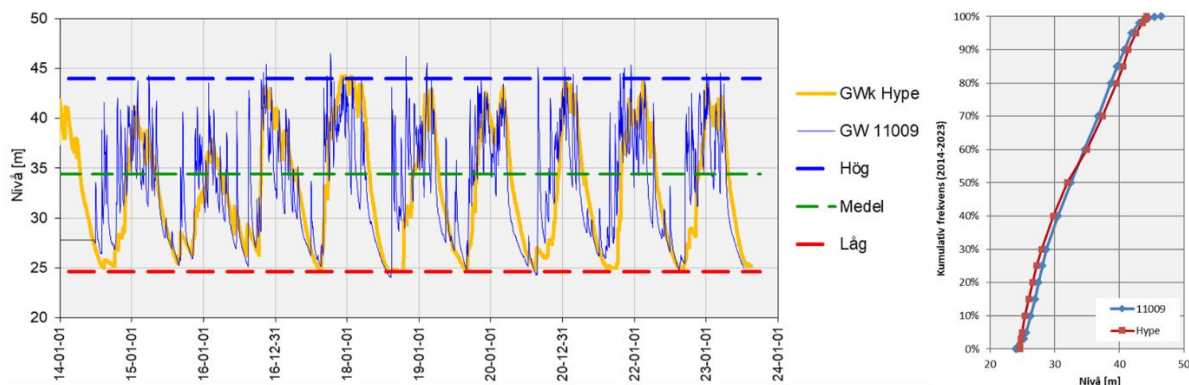
Att spåra historisk påverkan inom aktuellt område medför stora utmaningar då bergtäktsverksamhet (Östra och Västra brottet) och den kommunala grundvattentäkten påverkat grundvattennivåer inom området före nivåmätningar påbörjades. För att finna opåverkade förhållanden behöver därför referensrör sökas på stort avstånd från ovan nämnda verksamheter. Samtidigt är de hydrogeologiska förhållandena vid Slite, vad avser de mycket stora inomårsvariationerna i grundvattentrycknivåer i Slitelagren, tämligen unika, vilket gör det svårt att finna lämpliga referensserier för dessa nivåfluktuationer.

Det finns dock en mätserie för observationspunkt Slite 9 (GW 11009) på södra Hejnum Hällar, vilken bedöms dels vara opåverkad av verksamheter vid Slite, dels kunna spegla den stora inomårsvariationen i grundvattentryck i Slitelagren.

Därtill finns ytterligare en möjlig referensserie i av SGU beräknad grundvattennivå med Hypemodellen (SGU-HYPE¹). Dessa beräknade data finns i högupplösta dataserier från 1965 (dygnsvärden) i ett rikstäckande rutnät om 4x4 km. Nivåfluktuationen i beräknade nivåer drivs av lokal nederbörd och temperatur. En fördel med den beräknade dataserien är att den inte är behäftad med vare sig mätfel, varierande och/eller gles mätfrekvens och/eller antropogen påverkan, vilket tidsserier från fysiska mätstationer oftast är i större eller mindre omfattning.

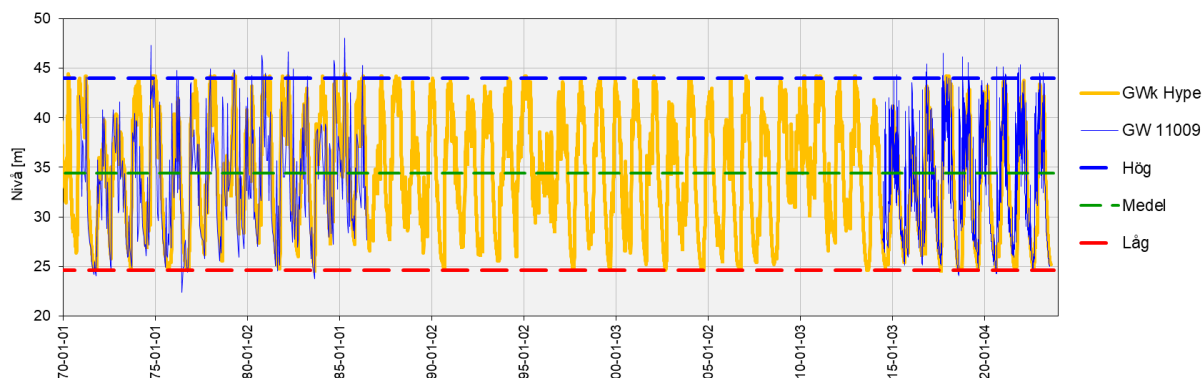
Som framgår av passning av referensserien SGU-Hype mot mätstation Slite 9, kan den beräknade nivån inte fånga detaljer i enstaka mer intensiva regn i den snabbreagerande observationspunkten Slite 9 (Figur 70). Dock kan det övergripande fluktuationsmönstret beskrivas väl och referensserien kan exempelvis användas för att, om än med viss försiktighet, jämföra tidsperioder när mätdata för Slite 9 saknas (Figur 71).

¹ <https://www.sgu.se/grundvatten/grundvattennivaer/berakningsmodell/>.



Figur 70. Exempel på passning av referensserie SGU-Hype mot observationsrör Slite 9. Hög, medel och låg avser här 1:e percentilen, 50:e percentilen och 99:e percentilen av den anpassade Hype-serien för perioden 2014–2023.

A



Figur 71. Exempel på jämförelse mellan anpassad serie SGU-Hype mot Slite 9 för perioden 1970–2023, där mätdata för Slite 9 saknas mellan 1989–2014. Passningen av SGU-Hype för perioden 2014–2023 (Figur 70) beskriver även historiska data för perioden 1977–1989 väl, även om mätfrekvensen i Slite 9 för denna period var gles.

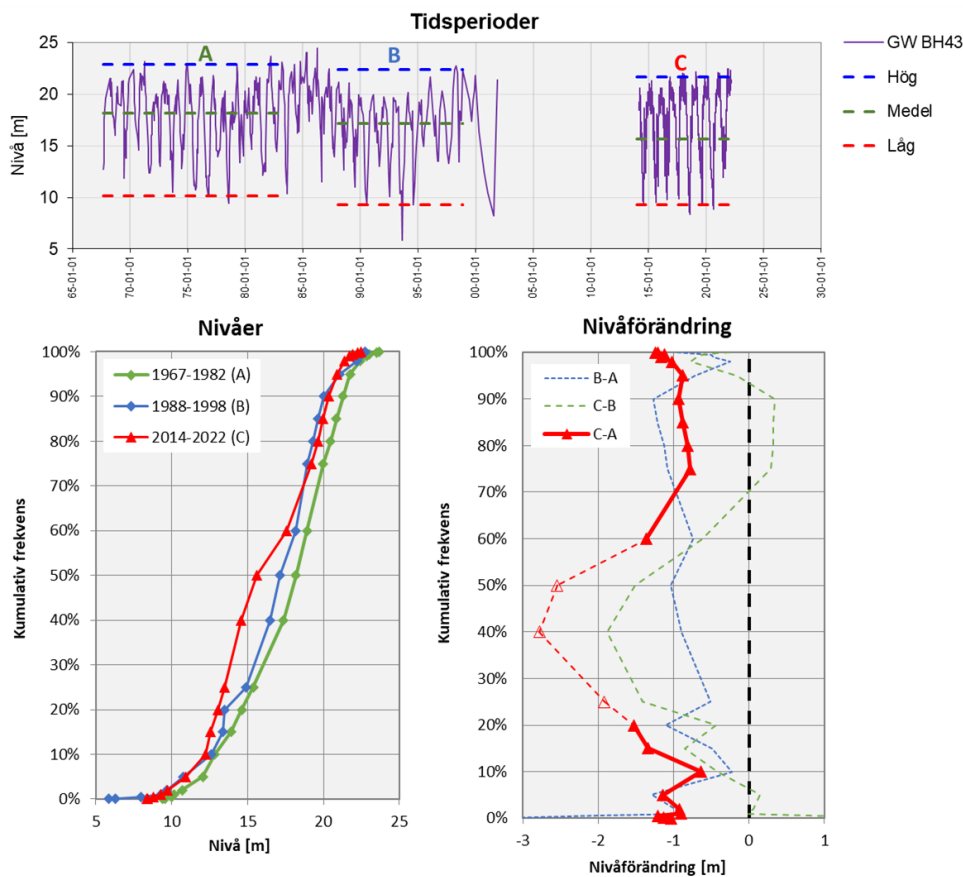
För snabbreagerande observationspunkter med stor inomårsvariation kan studier av kumulativ frekvens i mätserier vara ett sätt att identifiera, kvantifiera och beskriva nivåpåverkan.

En första jämförelse kan då göras med data från observationspunkten i sig, utan jämförelse mot referensserier. En avvikelse i kumulativ frekvens mellan olika tidsperioder i tidsserien kan visa den nivåförändring som skett mellan studerade perioder, även där denna kan vara svår att utläsa ur en tidsseriegraf.

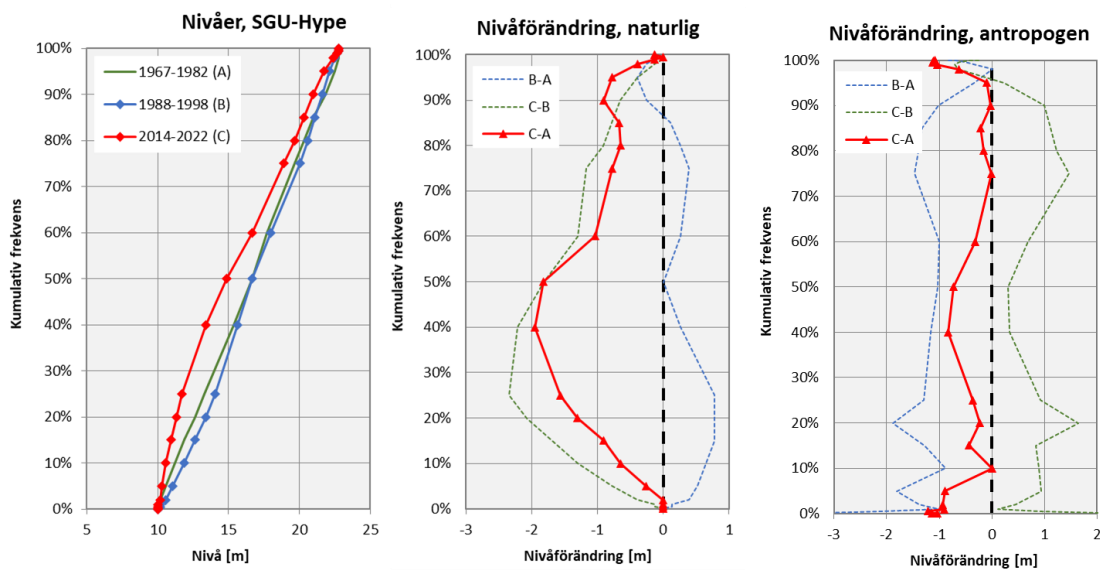
I Figur 71 exemplifieras detta med tidsserien för observationspunkt BH43, belägen ca 300 m öster om File hajdar-täkten. Differensen mellan de kumulativa fördelningarna pekar på att det skett en generell sänkning av vattennivån i BH43.

För att undersöka hur stor förändring som kan förutses ha skett naturligt, studeras den till BH43 anpassade referensserien SGU-Hype (Figur 73). Härav framgår att det finns en nivåförändring, framför allt under senare tid (C-B och C-A i den högra grafen i Figur 73).

När denna naturliga nivåförändring subtraheras från den totala nivåförändringen erhålls en bild över (sannolik) antropogen nivåförändring (Figur 73). I detta exempel kan denna beskrivas som att det skett en sänkning av nivåerna vid BH43 med 1–1,5 m från den tidigaste studerade tidsperioden (A) till den mellersta (B). Därefter har det skett en nivåhöjning fram till den senast studerade perioden (C). Den kvarstående nivåpåverkan under den senaste tidsperioden (C) yttrar sig i huvudsak i lägre lägstanivåer (<10:e percentilen) och även lägre högstanivåer (>95:e percentilen). Förändringen kan uppskattas till ca 1 m mellan de olika delarna av tidsserien.

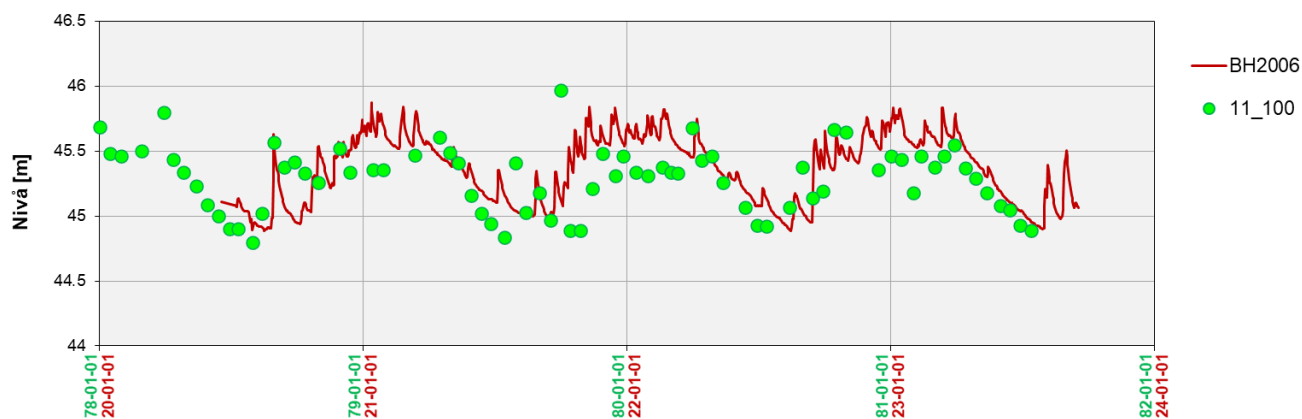


Figur 72. Exempel på hur olika referensperioder för observationspunkt BH43, öster om File hajdar-täkten, kan analyseras för att spåra och kvantifiera nivåförändring genom differens i kumulativa fördelningar för olika tidsperioder.



Figur 73. Naturlig nivåförändring för studerade tidsperioder markerande i Figur 70 jämte utvärderad antropogen nivåförändring.

Vid mätpunkter där inomårsvariationen är liten kan en enklare analys med direkt jämförelse av nivådata för olika tidsperioder användas för att undersöka om det skett någon nivåförändring. I Figur 74 jämförs tidsserie från 1978–1982 för SGU:s mätpunkt 11_100 vid Tingstäde träsk med den i modern tid renoverade mätpunkten (nu benämnd BH2006) med mätdata 2020–2024. Av jämförelsen framgår att någon nivåförändring mellan de två tidsperioderna inte förekommer.



Figur 74. Exempel på direkt jämförelse av nivåer från olika tidsperioder. Den gröna serien avser den ursprungliga mätpunkten 11_100 med dataserie 1978–1982. Den röda serien avser den renoverade mätpunkten (nu betecknad BH2006) med högupplöst mätdata 2020–2024.

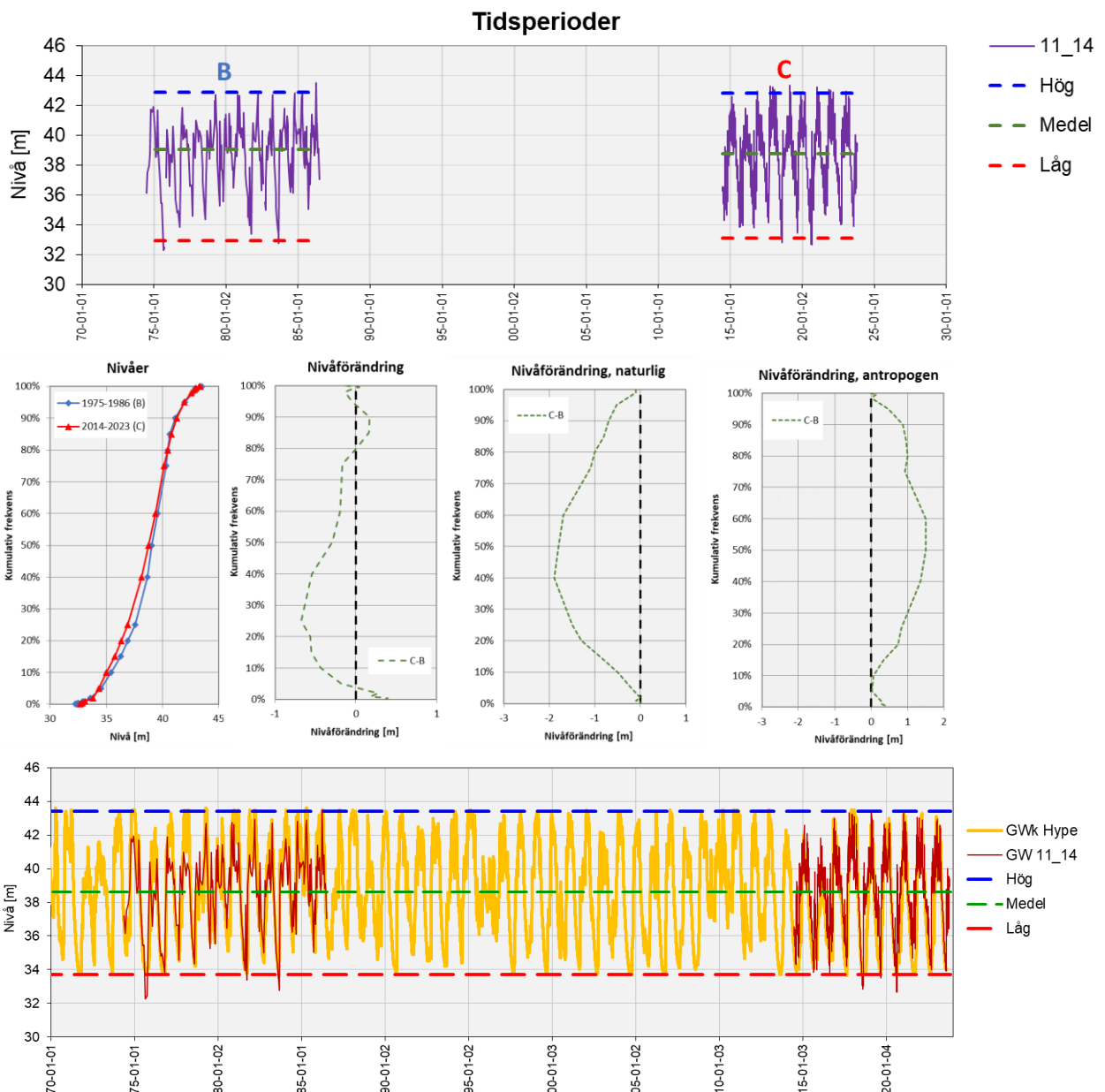
Exemplen ovan visar att det finns möjlighet att identifiera, kvantifiera och beskriva historisk nivåpåverkan, där mätdata finns att tillgå. Det kommer dock alltid finnas en osäkerhet i bestämningarna, särskilt där historisk mätdata utgörs av tidsserier med gles mätfrekvens i observationspunkter med stor inomårsvariation.

Analysen kan inte beskriva *vad* som orsakat nivåförändringen, annat än särskilja naturlig nivåförändring från den totala. Den kvarstående förändringen kan bero på olika verksamheter, exempelvis bergtäkterna och den kommunala grundvattentäkten, men även enskilda grundvattenuttag kan påverka och för ytligt grundvatten kan markarbeten (diken, vägar etc.) ha stor inverkan.

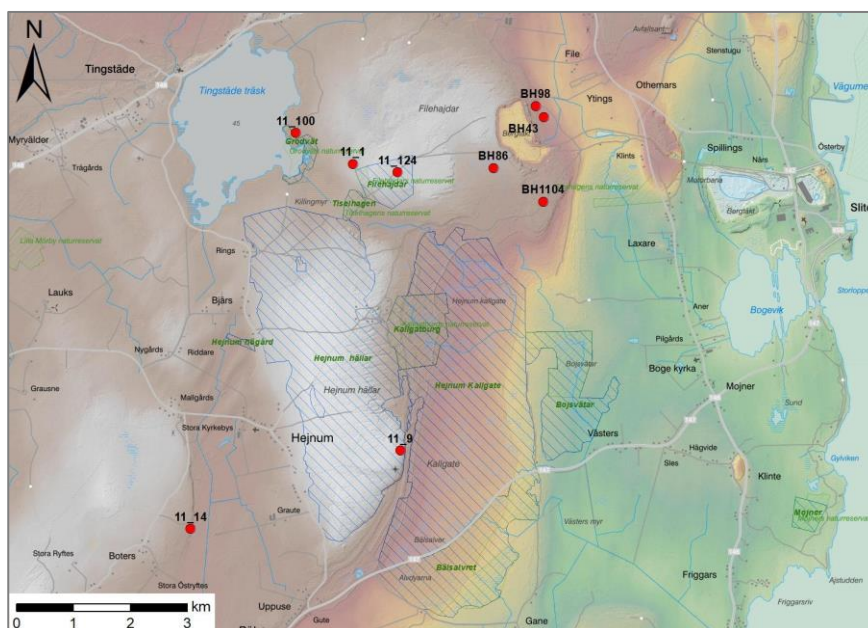
För exemplet med BH43 kan mätpunktens lokalisering och det tidsmässiga orsakssambandet mellan nivåsjänkning och öppnandet av File hajdar-täkten, peka på att det är bergtäkten som orsakat nivåsjänkning. Även den mer sentida avtagande nivåpåverkan kan vara knuten till bergtäkten, enär en frambruten täktvägg blir naturligt tätare med tiden.

Mätpunkter med längre dataserier där motsvarande analys som exemplifierats ovan, förekommer relativt sparsamt inom området (Figur 76). Vid mätpunkt BH86 kan en tydlig antropogen nivåpåverkan spåras, liksom vid BH1104. På större avstånd kan ingen antropogen påverkan ses som kan knytas till bergtäkten eller till grundvattentäkten.

Däremot kan annan antropogen påverkan ses i exempelvis mätpunkt 11_14, 8,6 km sydost om File hajdar-täkten. Här visar analys av nivåer att det skett en nivåhöjning med 1–1,5 m mellan de två studerade tidsperioderna enligt Figur 75. Analysen pekar på att de nivåer som mättes under 1970- och 1980-talen var påverkade (avsänkta) nivåer, en påverkan som inte kan ses i data efter 2015. Det går även att se den nivåhöjning som analyserats i passningen mot SGU-Hype i grafen längst ner i Figur 75, men det kan vara svårt att ur denna graf bestämma storleken på nivåförändringen. Däremot kan man se trenden med störst nivåpåverkan i tidiga mätdata under 1970-talets andra hälft och en successivt minskande påverkan fram till 1986. Detta exemplifierar att referensserier måste väljas med stor omsorg och att det förekommer många olika faktorer som kan påverka grundvattennivåer.



Figur 75. Överst: Nivåmätning vid mätpunkt 11_14. Mitten: Analys av nivåförändring. Nederst: Passning av SGU-Hype mot mätdata.



Figur 76. Mätpunkter med längre historiska dataserier vilket möjliggör analys av historisk nivåpåverkan.

5.4.5 Salt grundvatten

Salt grundvatten förekommer på Gotland på olika djup beroende på de hydrogeologiska förutsättningarna. Det salta grundvattnet har olika ursprung. Vanligtvis kan man identifiera tre olika typer av saltvatten, och naturligtvis blandningar av dessa typer:

- Vatten som har sitt ursprung i den nuvarande Östersjön (dvs. havsvatten)
- Gammalt havsvatten som har sitt ursprung i Östersjöns tidigare faser, normalt avses härmed det salta Littorinahavet (s.k. relikthavsvatten), samt slutligen
- Ett mycket gammalt och mycket salt grundvatten, som delvis har sitt ursprung i kemiska processer under mycket lång tid mellan grundvattnet och omgivande berggrund.

Efter den senaste istiden har Östersjön haft en varierande utveckling med ömsom sötvatten och ömsom saltvatten. Östersjöns olika stadier brukar av geologer beskrivas som:

Baltiska issjön 11 500 – 8 300 f.Kr. (sötvatten)

Yoldiahavet 8 300 – 7 500 f.Kr. (bräckt sötvatten/saltvatten)

Ancylussjön 7 500 – 6 000 f.Kr. (sötvatten)

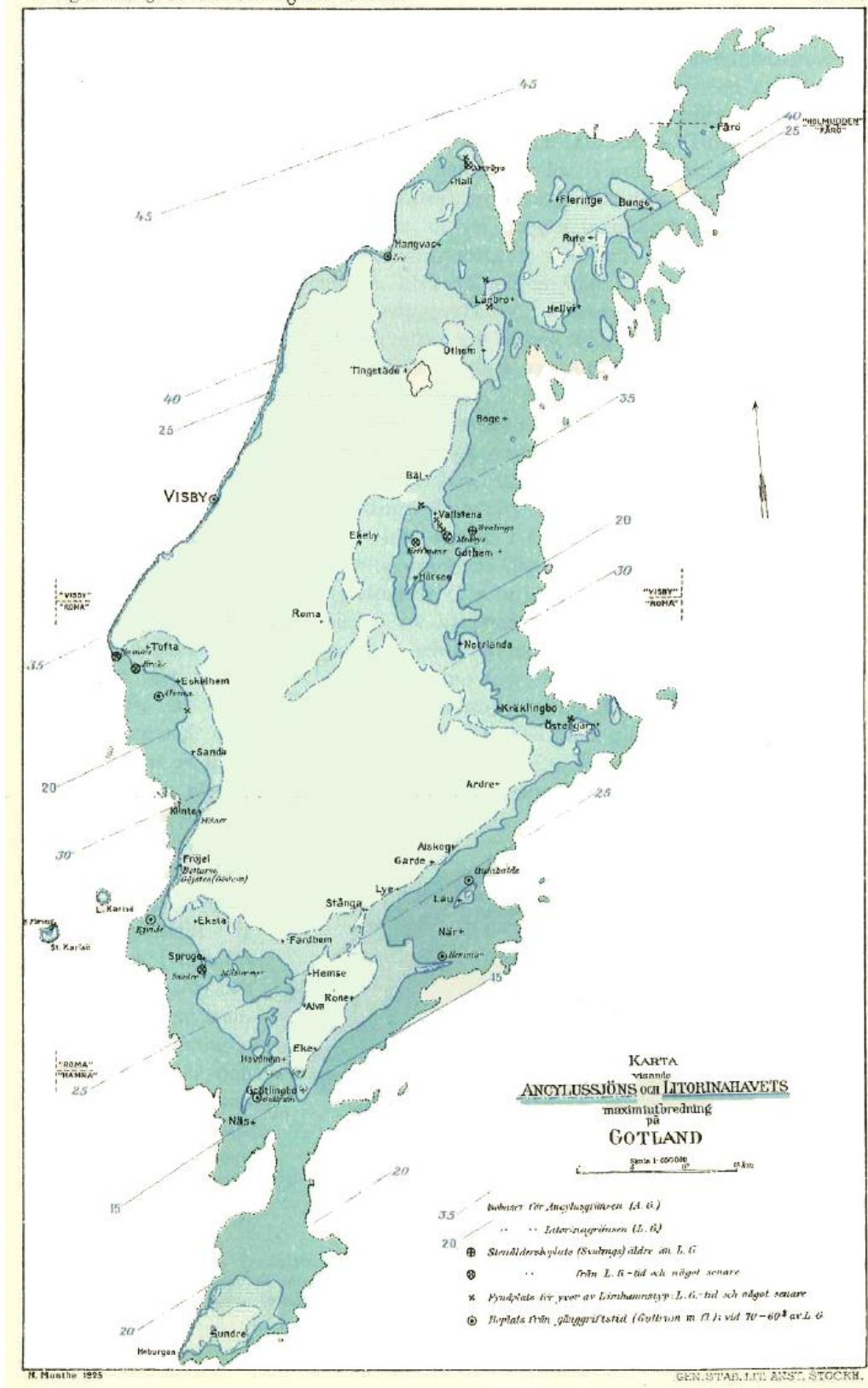
Littorinahavet 6 000 – 1 000 f.Kr. (saltvatten)

Limneahavet 1 000 f.Kr. – nutid (bräckt sötvatten/saltvatten)

Det som nu är Östersjön var under perioden ca 6000 år f.kr. till 1000 år f.kr. ett salt innanhav. Detta hav brukar benämnas som Littorinahavet. Saltvattnet i Littorinahavet var inte så salt som vattnet i världshaven, men det uppvisade de högsta salthalterna under Östersjöns utvecklingshistoria efter den senaste istiden. De högsta salthalterna i Littorinahavet (vid Gotland) kan antas ha varit ungefär 14 kg/m³.

Figur 77 är en kopia på ett kartblad som visar Ancylussjön och Littorinahavets maximala utbredning på Gotland. Av kartan framgår att den s.k. Littorinavallen löper i nord-sydlig riktning mellan Tingstäde träsk och Slite på en bedömd nivå kring +25 möh (Karta enligt Munthe *et al.* 1933).

Som ett minne av Littorinahavet förekommer ett saltare grundvatten än dagens Östersjövatten på lite större djup längs med Gotlands kuster. Detta saltvatten kan antas ha sitt ursprung i Littorinahavet, och förekommer företrädesvis nära/mellan Littorinavallen och dagens Östersjö.



Figur 77 Karta visande Ancylussjön och Littorinahavets maximala utbredning på Gotland. Av kartan framgår att den s.k. Littorinavallen löper i nord-sydlig riktning mellan Tingstade träsk och Slite på en bedömd nivå kring +25 möh. Karta från SGU, Munthe et al. (1933)

5.4.5.1 Västra brottet

Höga salthalter i brunnar i Slite uppmättes redan på 1950-talet, alltså före Västra brottets tillkomst. Exempelvis uppgick medelhalten klorid vid årliga provtagningar under 50-talet i den kommunala vattentäkten Klint 1 (belägen strax norr om Spillingsmagasinet, vid Västra brottet) till över 0,4 kg/m³, vilket är högre än smakgränsen.

Loggning av elektrisk konduktivitet i borrhål runt Västra brottet, se 4.8.3, visar att förväntad nivå för salthalten 0,3 kg/m³ (smakgränsen), är ca -30 m med mindre djup i sydost och högre i nordväst. Borrhålen vid sydöstra delen av Västra brottet uppvisar värden på elektriska konduktiviteter upp mot 500 mS/m, vilket omräknat till en koncentration av NaCl motsvarar ca 1,2 kg/m³ (som mest). Uppmätta salthalter i dessa hål ligger i samma storleksordning som uppmätta salthalter i inströmmande vatten i Västra brottet, på väggen till pall 2, innan pall 2 började vattenfyllas 2017. Alla borrhål sydöst om Västra brottet uppvisar en ökande elektrisk konduktivitet mot botten av borrhålet, och därmed ökande koncentrationer av salt. Borrhål norr om Västra brottet har endast ett djup på ca 20 m och därmed är salthalterna betydligt lägre.

5.4.5.2 Dyhagens dricksvattentäkt

Dyhagens dricksvattentäkt producerar ett råvatten av god kvalitet. Regelbundna mätningar i råvattnet visar, se 4.8.3, att om man exkluderar mätvärdet från den nederbördsfattiga sommaren 2018 uppmäts stabila värden inom spannet 8,9–22 mg/l, med ett medelvärde på ca 15 mg/l för perioden augusti 2011 till april 2023. Att just 2018 sticker ut med en lägre halt visar att om grundvattennivåerna i vattentäkten blir markant lägre än under en normalsommar ökar salthalterna i råvattnet. Uppmätt kloridhalt 2018 uppgick till 0,059 kg/m³ (59 mg/l). Det var dock fortfarande med marginal under riktvärdena för grundvatten, vilka är satta till 0,1 kg/m³ (100 mg/l) som teknisk anmärkning och smakgränsen till 0,3 kg/m³ (300 mg/l).

6 NUMERISK MODELL

6.1.1 Syfte och metod

För att göra en beskrivning av de framtida förhållandena, en prediktion, behövs en modell som beskriver och som representerar det studerade området och det studerade hydrogeologiska systemet. Den studerade delen av verkligheten kallar vi ett system, t.ex. grundvattensystemet. Den upprättade modellen är en förenklad beskrivning av det studerade systemet. Den hydrogeologiska modellen, som vi kallar för grundvattenmodellen, är en matematisk beskrivning av grundvattentryck (grundvattennivåer) och grundvattenflöden inom det studerade området, även nettonederbörden och ytvattenflöden ingår i modellen.

En modellstudie bygger på en systemanalytisk metod för att lösa komplicerade problem genom att: (i) Upprätta en modell av det studerade systemet (en modell av verkligheten), (ii) Använda modellen för simuleringar som imiterar det verkliga systemets beteende, och (iii) Baserat på resultat som beräknats av modellen (genom de utförda simuleringarna) uppnå förståelse av det verkliga systemets beteende. Baserat på den konceptuella modellen (kapitel 5) upprättas den matematiska modellen (nedan kallad "modellen"), vilken sedan används för simuleringar. Syftet med modellsimuleringarna är att beskriva de framtida förhållandena och den framtida påverkan av den nu ansökta tillkommande brytningen.

Den upprättade modellen *Modell 2023* beskrivs i större detalj i Bilaga 3. I detta kapitel presenteras endast en sammanfattning.

6.2 MODELLENS UPPBYGGNAD

Grundvattenmodeller har också används vid Heidelberg Materials tidigare ansökningar om tillstånd till täktverksamhet i Slite. Olika generationer av modeller har uppdaterats och använts.

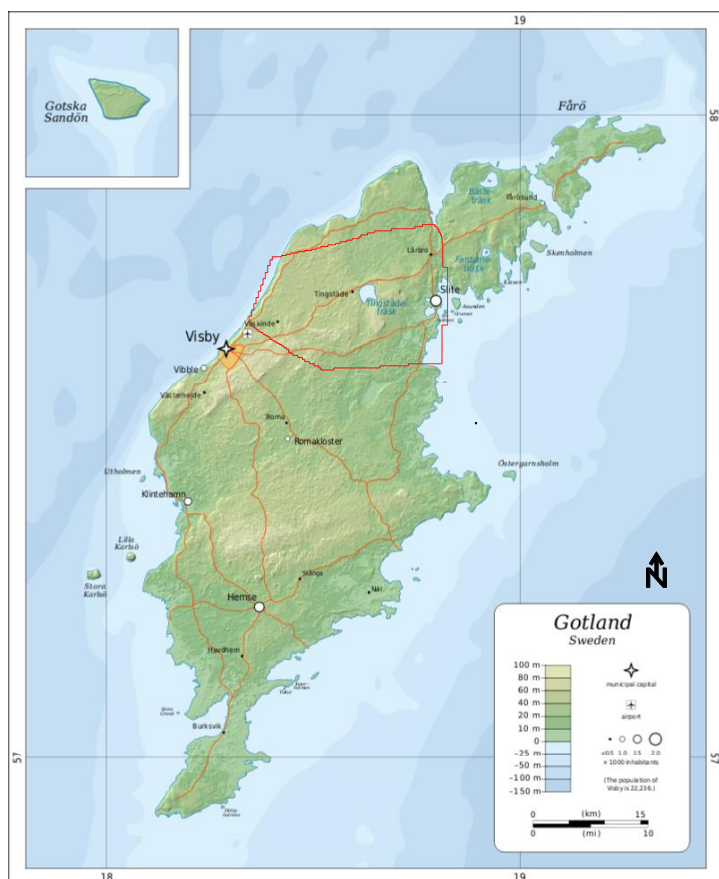
Den första modellen upprättades i början av 1990-talet, och den andra modellen upprättades i slutet av 1990-talet och början på 2000-talet. En ny modell upprättades 2007 (*Modell 2007*), varefter en förstorad och uppdaterad modell upprättades 2017 (*Modell 2017*). Ytterligare en uppdaterad modell togs fram 2021 (*Modell 2021*), och även för förevarande ansökan har en uppdaterad modell tagits fram (*Modell 2023*). Från början av 2000-talet har alla modeller upprättats i datorprogrammet Geoan. Det är Modell 2023 som vi diskuterar i detta dokument.

Alla de upprättade modellerna bygger på samma grundläggande hydrogeologiska beskrivning. För varje generation av modeller har dock beskrivningen förfinats och mer information lagts till, baserat på utförda fältundersökningar och observerade grundvattennivåer och flöden. Modell 2023 baseras på den konceptuella modell som har presenterats i kapitel 5.

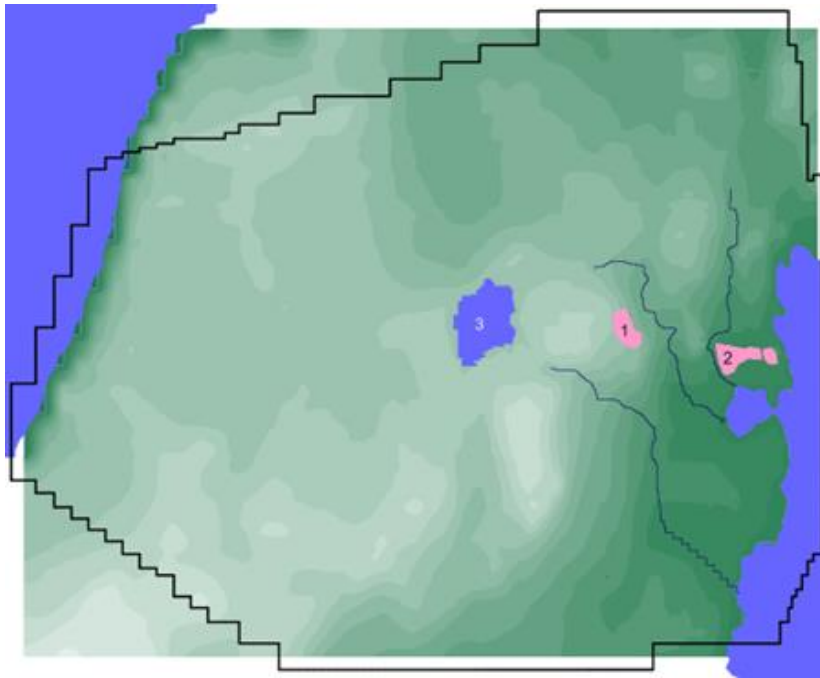
Vad som är av störst betydelse för den etablerade modellen är den grundläggande hydrogeologiska beskrivningen av grundvattensystemet på File hajdar och dess omgivning, det vill säga den konceptuella modellen. Modellen är uppbyggd utifrån geometri, typ av bergart, lagerföljder, spricksystem samt det studerade grundvattensystemets dynamiska beteende som det har observerats i borrhål etc.

6.2.1 Modellens storlek

Modellens storlek, läge och topografi framgår av Figur 78 och Figur 79.



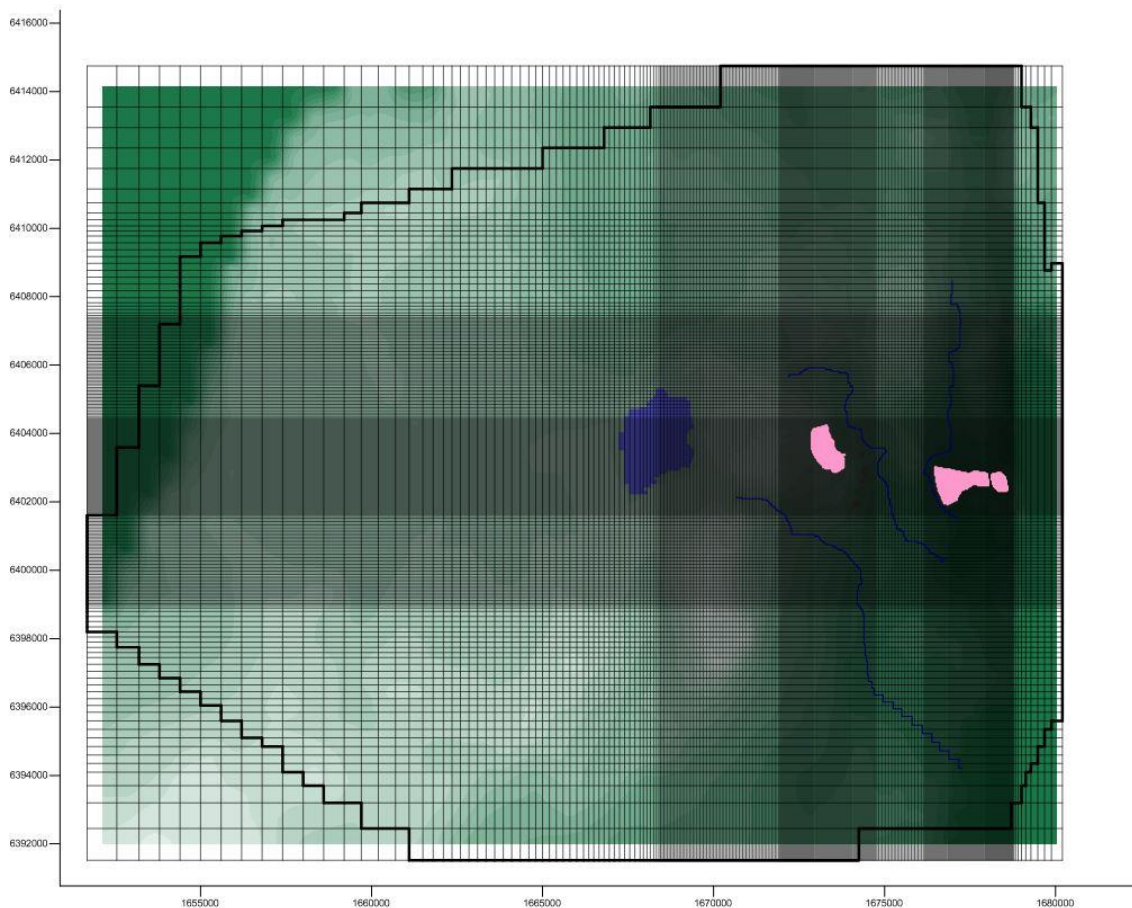
Figur 78. Karta över Gotland. Den röda linjen markerar modellens yttre begränsning. Karta från Wikipedia.



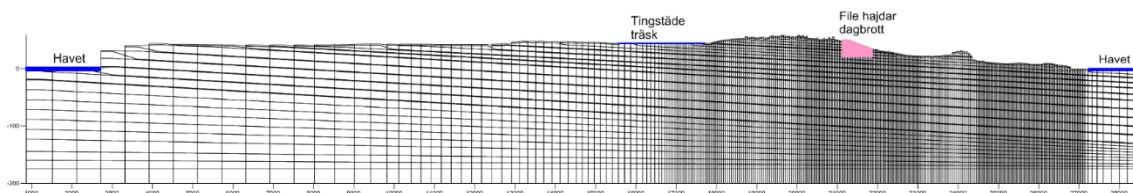
Figur 79. Modellens storlek och topografi. 1 = File hajdar-täkten. 2 = Västra brottet. 3 = Tingstäde träsk. Fet svart linje markerar modellens yttre begränsning.

6.2.2 Numeriskt beräkningsnät

Kring täkterna och i det studerade områdets östra del, har modellens beräkningsceller definierats med en horisontal storlek av 33 m x 33 m. Utanför detta område ökar cellstorleken mot modellens yttre sidor. Den upprättade modellen består av 40 numeriska lager, vilka representerar det sedimentära bergets geologiska lager (över nivån -200 m) samt de kvartära avlagringarna. Cellernas vertikala storlek varierar med de geologiska lagrens mäktighet etc. Totalt inkluderar modellen drygt 2,7 miljoner aktiva beräkningsceller. Se Figur 80 och Figur 81.



Figur 80. Modellens beräkningsnät från ovan.



Figur 81. Modellens beräkningsnät från sidan. Figuren visar en tvärsektion genom modellen, från väst till öst, genom File hajdar-täkten. Den horisontella skalan är inte identisk med den vertikala skalan.

6.2.3 Randvillkor - hydrauliska gränser

För att erhålla en korrekt beskrivning av det studerade flödessystemet är det nödvändigt att modellen täcker ett stort område kring Tingstäde träsk, File hajdar och Slite. De tydligaste naturliga hydrauliska gränserna (randvillkoren) på Gotland är strandlinjerna i väst och öst, vilket betyder att en modell som korrekt ska avbilda grundvattnets regionala flödesmönster (på Gotland) bör vara stor nog för att inkludera strandlinjerna. Det regionala flödesmönstret är av stor betydelse för det lokala flödesmönstret kring t.ex. Heidelberg Materials täkter.

Längs med strandlinjerna är modellen definierad med en konstant grundvattennivå lika med havets (Östersjön) vattennivå, som sätts till +0 m. De översta cellerna som befinner sig under havet definieras också med en trycknivå för grundvattnet lika med +0 m. Modellens övriga yttre gränser har definierats som täta. Eftersom de täta gränserna i norr och söder inte är naturliga gränser är det viktigt att modellen är så stor att dessa gränser befinner sig ett gott stycke från modellens centrala delar.

Inget grundvatten eller ytvatten kan strömma lateralt in eller ut ur modellen förutom vid strandlinjerna. Däremot kan nederbörden infiltrera utmed modellens hela oavsida och

grundvatten kan utströmma och bilda ytvatten, men bara om systemets hydrauliska tillstånd tillåter det. Geoan-modellen inkluderar både grundvattenflöde och ytvattenflöde. Nivån på grundvattenytan och storleken på inströmningsområden och utströmningsområden, samt storleken på den lokala grundvattenbildningen, beräknas av modellen. Även storleken på utflödet av grundvatten vid utströmningsområden beräknas av modellen. Randvillkoret på modellens övre yta kan därför sägas vara en varierande grundvattenbildning som beror av grundvattennivån, nettonederbörden, topografin och ytvattenflödena.

Modellens topografi har kontrollerats och justerats så att större vattendrag är korrekt representerade i modellen. Modellens botten är definierad som tät. Tingstäde träsk är också inkluderad i modellen som ett område med en specificerad vattennivå lika med +44,92 m.

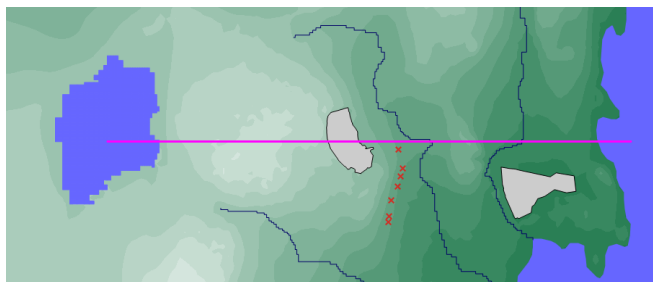
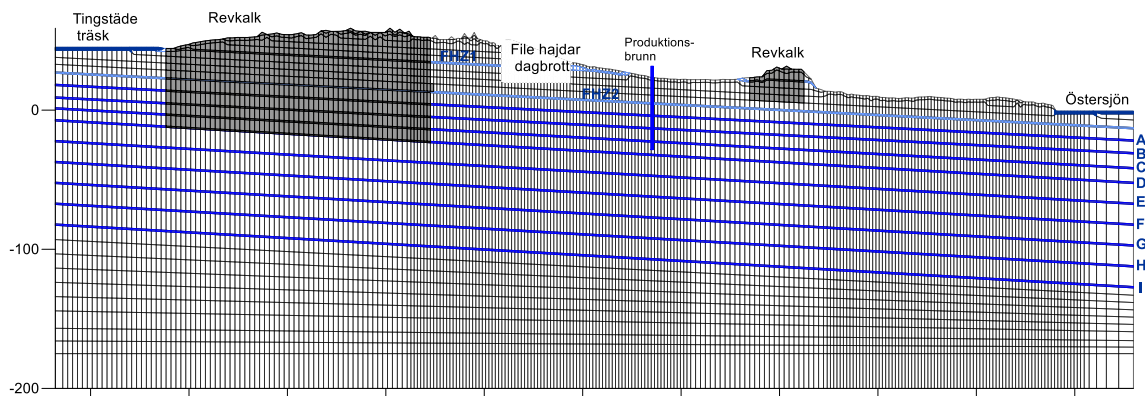
6.2.4 Vertikal indelning i geologiska och numeriska lager

Som tidigare nämnts inkluderar den upprättade modellen 40 numeriska lager vilka representerar de observerade och antagna vattenförande zonerna och de tätare bergmassorna mellan dessa zoner. I modellen ingår dessutom ett antal lager nedanför de observerade och antagna vattenförande zonerna.

Modellens bas ligger på nivån -200 m. De geologiska lagren (de sedimentära bergarterna) anses kunna väl beskrivas av tre dimensionella plan i rummet, med en viss lutning (strykning och stupning). Nivån på de olika geologiska lagren har i modellen definieras med hjälp av hur dessa lager har observerats i verkligheten.

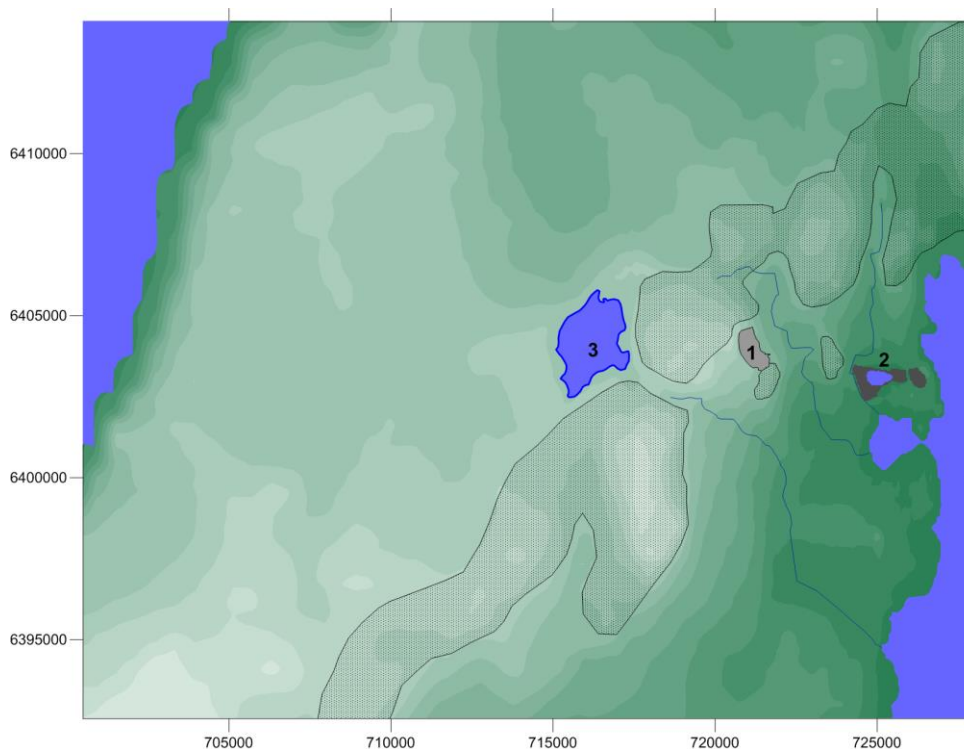
Hur de numeriska lagren beskriver de geologiska lagren framgår av Figur 82. De vattenförande lagren benämns FHZ1 och FHZ2 samt lager A till I. Lager FHZ1 och FHZ2, samt lager A till D, utgör vattenförande lager som är tolkade från fälldata.

Kvartära avlagringar, dvs. jordarter, definieras i modellens översta lager. Notera att det översta lagret följer topografin. Jordarter är definierade i de centrala delarna av modellen och österut mot Slite, i enlighet med jordartskartan. Jordarter har inte inkluderats i detalj i övriga delar av modellen.



Figur 82. Ett tvärsnitt i väst-östlig riktning genom File hajdar-täkten. Figuren visar den konceptuella indelningen i olika lager och strukturer, som dessa är definierade i modellen, samt beräkningsnätets celler. Notera att figuren endast avbildar modellens östra del (File hajdar och Slite). Den vertikala skalan är ca 15 gånger större än den horisontella skalan. Bokstäverna vid figurens högra sida markerar stora vattenförande zoner, numrerade A till I.

Revkalksten har inkluderats i modellen. Utbredningen av revkalken i modellen framgår av Figur 83. Vår tolkning av revkalkstens utbredning baseras på SGU:s karteringar och våra fältobservationer. Djupet på revkalken varierar men är ofta kring 40 m till 50 m; dessa uppskattningar av revkalkens djup baseras på SGU:s tolkning och utförda hydraultester i borrhål inom det studerade området samt omfattande geofysiska undersökningar. Revkalken definieras i modellen som mycket heterogen och med låga värden på genomsläpplighet i en större skala. I en lokal skala kan revkalken vara genomsläpplig där det förekommer lokala genomsläppliga strukturer (t.ex. sprickor), men dessa lokala genomsläppliga strukturer är inte kontinuerliga över större avstånd. Revkalkens heterogenitet och att det inte förekommer stora kontinuerliga vattenförande strukturer i revkalken är den stora konceptuella skillnaden mot den lagrade kalkstenen och mägerstenen, eftersom dessa bergarter uppvisar subhorisontella vattenförande lager som är kontinuerliga över stora avstånd.



Figur 83. Tolkade områden med revkalk i modellen markerade som rasterade områden. Siffran 1 = File hajdar-täkten. Siffran 2 = Västra brottet. Siffran 3 = Tingstäde träsk.

6.2.5 Övergångszoner

Under kalkstenen förekommer en mägersten. I mägerstenen förekommer stora subhorisontella vattenförande lager med betydande genomsläpplighet, men den vertikala genomsläppligheten i mägerstenen är liten. Ovanför mägerstenen ligger kalksten, i kalkstenen kan den vertikala genomsläppligheten vara större än vad den är i mägerstenen. En övergångszon finns mellan kalkstenen och mägerstenen. Övergångszonen (kallad ÖZ1) tenderar att ha en ökad horisontell hydraulisk genomsläpplighet. Delvis beroende på den ursprungliga sedimentära processen vid vilken de olika lagren bildades, men också beroende på skillnaden i vertikal genomsläpplighet mellan kalksten och mägersten vilket skapar förutsättningar för horisontala vattenförande lager ovanpå mägerstenen.

Övergångszonen (ÖZ1) har identifierats med hjälp av geofysiska undersökningar.

Övergångszonen, som den har identifierats i de geofysiska undersökningarna, har inkluderats i modellen som en stor mjukt buktande tre-dimensionell yta med olika nivåer på olika platser.

Övergångszonen har i modellen inkluderats som en kontinuerlig struktur med ökad horisontal genomsläpplighet.

Det finns ytterligare en övergångszon på större djup, en övergångszon mellan en övre mägerstenen och en undre mägersten, som också identifierats med geofysik, den zonen kallas ÖZ2. Zonen ÖZ2 är också inkluderad i modellen på ett större djup och med samma horisontala utbredning som ÖZ1.

6.2.6 Definition av de kommunala produktionsbrunnarna i den upprättade modellen

Modellen inkluderar de sju kommunala produktionsbrunnarna öster om File hajdar. I alla simuleringar är produktionsbrunnarna inkluderade med en total produktion som är lika med 220 000 m³/år. I modellen är de sju produktionsbrunnar definierade. Produktionen i de enskilda brunnarna kan variera, det är den totala produktionen som i modellen (och i verkligheten) är lika med 220 000 m³/år. Vattennivåerna i de enskilda brunnarna varierar under året. När vi med avseende på den upprättade modellen redovisar och diskuterar vattennivån i de kommunala produktionsbrunnarna så är det medelnivån i brunnarna som avses.

Brunnarna skär igenom flera av de vattenförande lagren. Därför definieras brunnarna i flera olika lager i modellen. Grundvattennivån (trycknivån) i en brunn definieras så att den är densamma i alla lager som genomskärs av brunnen. Randvillkoret för brunnen är en specificerad grundvattennivå (trycknivån). Brunnens produktion (uttaget i brunnen) är också specificerad i modellen. Under modellsimuleringen justerar en algoritm i modellen (automatiskt) vattennivån i varje brunn så att uttaget i brunnarna stämmer överens med uttaget (produktionen).

6.2.7 Krosszonen öster om File hajdar

Produktionsbrunnarna är placerade i en zon med förhöjd genomsläpplighet, som brukar kallas för krosszonen öster om File hajdar. I modellen har krosszonen inkluderats. Krosszonen öster om File hajdar är inkluderad i modellen som en ökning av den vertikala genomsläppligheten i de lågpermeabla lagren (mellan de vattenförande lagren) med en faktor lika med 6.

6.2.8 Berggrundvattennivå och representativ grundvattennivå i berg och brunnar

Den upprättade modellen är tredimensionell och inkluderar 40 olika lager. Grundvattennivåerna är normalt olika i alla 40 lager, även om skillnaderna kan vara små. Ett av syftena med modellstudien är att beräkna grundvattennivåerna i berg och grundvattennivåerna i bergborrade brunnar. Ett representativt värde för de varierande grundvattennivåerna i berget längs en vertikal sektion (borrhål) kan beräknas som ett viktat medelvärde, där grundvattennivån i varje lager längs sektionen (längs borrhålet) viktas mot lagrets transmissivitet. Därmed kommer de mest genomsläppliga lagren att ha störst betydelse för den representativa grundvattennivån. Vi kan kalla denna beräknade grundvattennivå för representativ berggrundvattennivå eller representativ grundvattennivå i en brunn.

Grundvattennivån i ett borrhål bestäms till stor del av grundvattennivåerna i de mest genomsläppliga lagren. Mediandjupet för bergborrade brunnar inom det studerade området är nära 47 m. När vi i denna studie har beräknat en representativ berggrundvattennivå eller representativ grundvattennivå i en brunn har vi analyserat brunnar med djupet 47 m. Vi antar också att de översta 5 m i brunnen är tätade mot omgivningen. Detta antagande görs för att inte grundvattennivån i de översta lagren, t.ex. lösa jordarter, ska påverka den beräknade representativa berggrundvattennivån (eller brunns vattennivå).

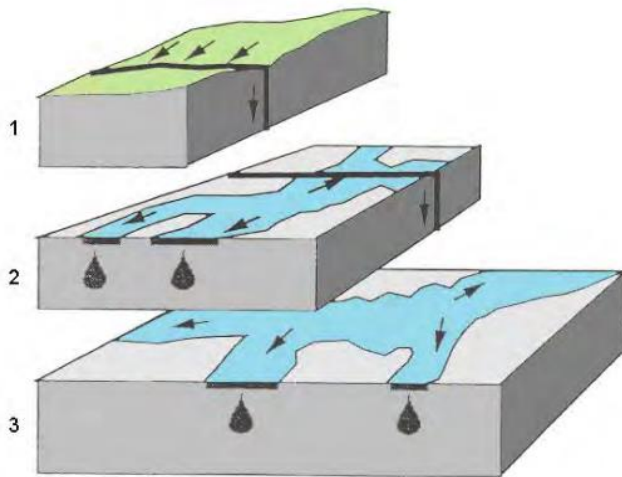
6.2.9 Genomsläpplighet (K-värden) etc.

Genomsläppligheten på de olika lagren i den upprättade modellen baseras på de utförda fältundersökningarna (t.ex. hydraultester) och kalibreringen av den hydrogeologiska grundvattenmodellen. Bergmassans genomsläpplighet är mycket heterogen. I verkligheten förekommer en betydande variation av genomsläppligheten (K-värdena) inom de vattenförande lagren, t.ex. förekommer ofta hög-genomsläppliga kanaler i det vattenförande lagrets subhorisontella plan, se Figur 84. Även mellan de vattenförande lagren varierar genomsläppligheten kraftigt pga. förekomsten av vertikala sprickor i det i övrigt lågpermeabla berget.

Denna heterogenitet är inkluderad i den upprättade modellen, genom att K-värdena har specificerats som heterogena. Alltså varierar K-värdena från beräkningscell till beräkningscell. Varje cell har ett individuellt K-värde. Heterogeniteten baseras på en beskrivning av ett

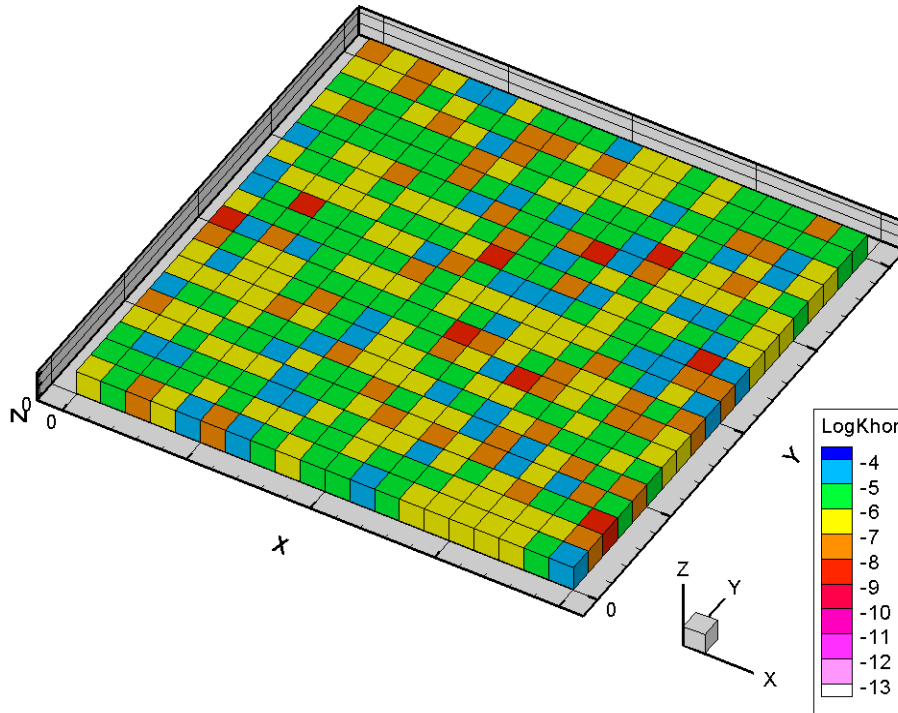
stokastiskt kontinuum, se Figur 85. Den heterogena beskrivningen av bergets genomsläpplighet gör att grundvattenflödet delvis kanaliseras till stråk med hög genomsläpplighet, se Figur 86.

Beräkningscellernas K-värden varierar baserat på korrigerade (kalibrerade) log-normalfördelningar. Variationens storlek baseras på erfarenheter från sprickigt berg. Bergets heterogenitet är av betydelse och påverkar storleken på inflödet till täkterna och även täkternas influensområde.



Figur 84. Konceptuell beskrivning av heterogen genomsläpplighet längs med vattenförande lager (principskiss).

De uppmätta K-värdena från de utförda hydraultesterna har definierats i modellen på de platser (borrhål) där hydraultesterna utfördes. Detta kallas för konditionering. För de konditionerade borrhålen har de uppmätta K-värdena direkt inkluderats i modellen inom en viss radie från borrhålen.

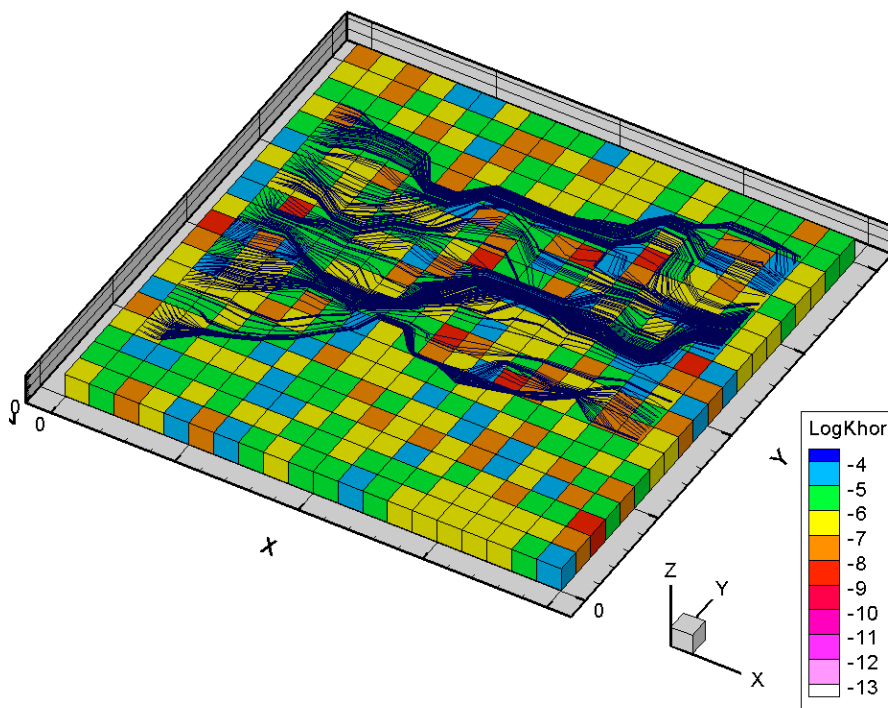


Vattenförande lager.

Heterogena egenskaper via ett stokastiskt kontinuum.

(Principskiss)

Figur 85. Numerisk (matematisk) beskrivning av heterogen genomsläpplighet längs med vattenförande lager (principskiss). Genomsläppligheten representeras av celler med olika K-värden.



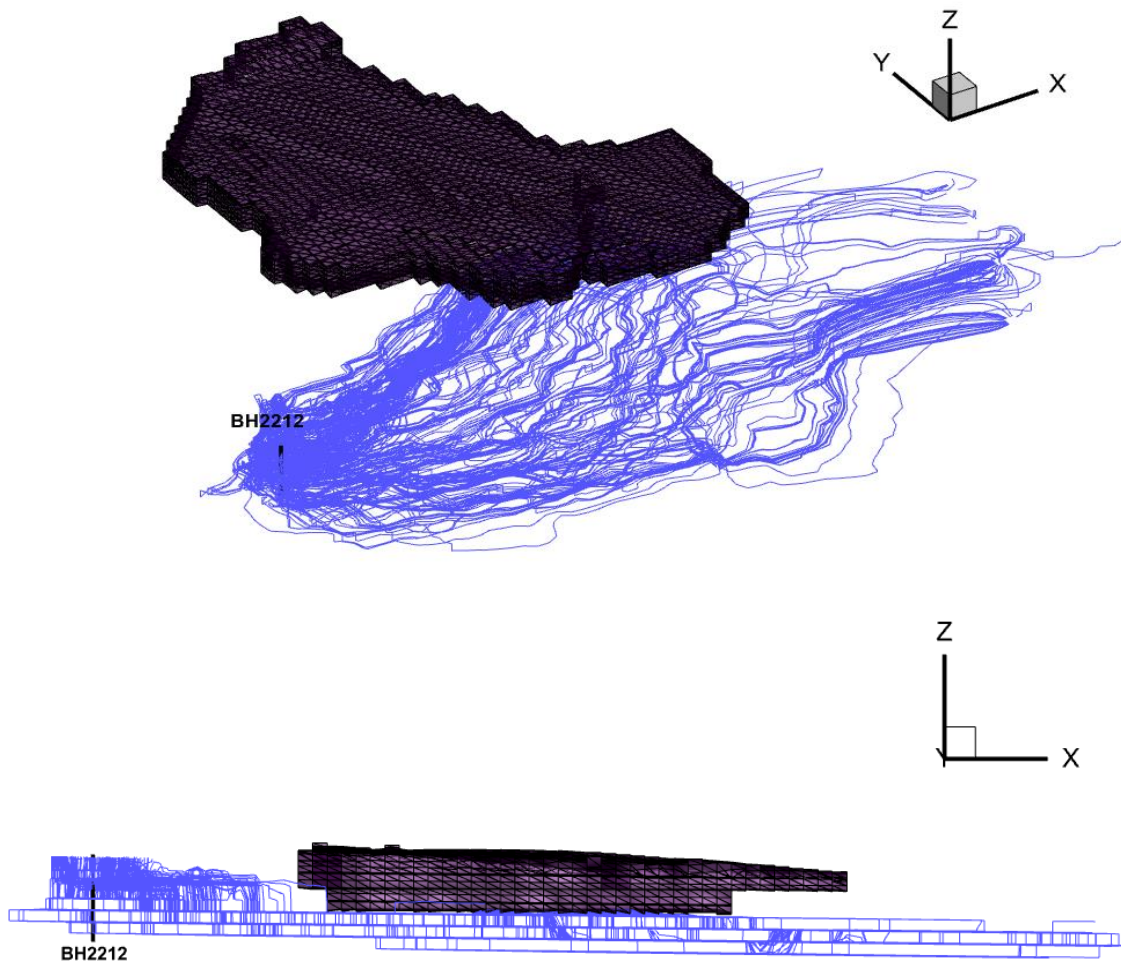
Vattenförande lager.

Flödesvägar längs med lagrets heterogena egenskaper

(Principskiss)

Figur 86. Numerisk (matematisk) beskrivning av heterogen genomsläpplighet längs med vattenförande lager, tillsammans med flödesvägar som illustrerar grundvattenflödet i det vattenförande lagret (principskiss). Genomsläppligheten representeras av celler med olika K-värden.

Hur grundvattenflödet fördelar sig i de olika vattenförande lagren i modellen illustreras väl av Figur 87. Figuren visar grundvattnets simulerade flödesvägar från infiltrationsbrunn BH2212. Flödesvägarna visas i figuren som blå linjer. Notera i den nedre av de två figurerna hur flödesvägarna tenderar att förekomma i subhorisontella vattenförande lager. Bergets lagrade struktur, med olika subhorisontella vattenförande lager på olika djup, illustreras tydligt i den nedre figuren av de horisontella blå linjerna. Även de slumpmässigt (stokastiskt) förekommande vertikala strukturerna framgår i figuren, som de vertikala blå linjerna mellan de subhorisontella vattenförande lagren.



Figur 87. Simulerade flödesvägar från infiltrationsbrunn BH2212. Notera i den nedre figuren hur flödesvägarna tenderar att förekomma i de vattenförande lagren. Bergets lagrade struktur, med olika vattenförande lager på olika djup, illustreras tydligt av den nedre figuren. Den vertikala skalan i figuren är 3 gånger större än den horisontella skalan.

6.3 NETTONEDERBÖRD

6.3.1.1 Allmänt

Nettonederbörden är av stor betydelse för de resultat som presenteras i denna studie, eftersom nettonederbörden är direkt indata till den matematiska modellen. Notera att nettonederbörden är indata till modellen, och att grundvattenbildningen och ytvattenflöden beräknas av modellen. Nederbörden och avdunstningen är inte direkta indata till modellen.

På uppdrag av Heidelberg Materials har SMHI beräknat nederbörd, avdunstning och nettonederbörd för olika lokala avrinningsområden kring Slite och File hajdar. Beräkningarna avser både dagens situation samt framtida klimat, se Bilaga 8. Nettonederbörden i den upprättade modellen, för den nuvarande situationen, följer de av SMHI beräknade värdena för den nuvarande situationen – observerade data. I den upprättade modellen definieras olika värden för nettonederbörden för varje lokalt område som har inkluderats i SMHI:s studie. Magasinering av nettonederbörden som snö har inte inkluderats i denna studie.

6.3.1.2 Nuvarande situation: observerade data

I den upprättade modellen har olika värden för nettonederbörden definierats för varje lokalt avrinningsområde, i enlighet med SMHI:s beräknade värden för de lokala avrinningsområdena. Som en sammanfattning av de beräknade värdena för nettonederbörden för de olika lokala avrinningsområdena har vi tagit fram areaviktade medelvärden. Dessa värden används i modellen för områden bortanför de lokala områdena. Areaviktade medelvärden för nettonederbörden, avseende de lokala områdena, framgår av Figur 88. Fördelningen av nettonederbörden över året har balanserats så att inga negativa värden förekommer under året (sommaren).

I linje med de av SMHI beräknade värdena förekommer i modellen ingen nettonederbörd under sommarmånaderna juni, juli och augusti (förutom i de dränerade täkterna). Det är under vintern som den huvudsakliga nettonederbörden och grundvattenbildningen äger rum. Nettonederbörden uppvisar en mycket sned fördelning under året, värdena i Figur 88 visar att under vinterhalvåret produceras mer än 90 % av nettonederbörden.

I verkligheten är det troligt att det under korta perioder förekommer en ringa nettonederbörd även under sommaren, men i modellen är ändå nettonederbörden alltid noll under sommaren. Antagandet om noll nettonederbörd under sommaren är ett konservativt antagande, med avseende på den påverkan som erhålls från den utökade File hajdar-täkten.

Nettonederbörden över fria vattenytor har inte beräknats av SMHI. Istället har en vattenbalans för fria vattenytor beräknats baserat på SMHI:s data från Visby flygplats. Vattenbalans för en fri vattenyta demonstrerar en stor avdunstning, en avdunstning som är så stor att den är större än nederbörden under sommarmånaderna, vilket producerar en betydande negativ nettonederbörd under sommaren. För en fri vattenyta är den negativa nettonederbörden under sommaren ett koncept som inkluderats i modellen. Det är nettonederbörden för en fri vattenyta som har använts för t.ex. Tingstäde träsk. För ett medelår beräknas den totala nettonederbörden för fria vattenytor till ca 50 mm/år.

Vi har också tagit fram en uppskattning av nettonederbörden över täkterna. En indikation av storleken på nettonederbörden över täkterna kan uppskattas, med en betydande osäkerhet, som en andel av den bortledda vattenvolymen via en korrelationsanalys. Korrelationsanalysen består av en jämförelse av bortledda vattenvolymer för olika år och den uppmätta nederbörden för motsvarande år. En sådan analys indikerar följande:

- Som ett medelvärde för hela året är ungefär 60 % grundvatten och 40 % nettonederbörd av den bortledda vattenvolymen i Västra och Östra brotten.
- Som ett medelvärde för hela året är ungefär 40 % grundvatten och 60 % nettonederbörd av den bortledda vattenvolymen i File hajdar-täkten.

Täkterna är inget naturligt system med nederbörd och avdunstning från växter eller en fri vattenyta. Stora delar av nederbörden pumpas relativt snabbt bort från täkterna. De pumpade flödena är också stora, särskilt under höst och vinter vid stora nederbördstillfällena. Den totala nettonederbörden har uppskattats till 457 mm/år. Det är denna nettonederbörd som har använts för täkterna i modellen fördelat på olika månader.

6.3.1.3 Framtida förhållanden: klimatscenarier

De tidigare nämnda vattenbalansberäkningarna, som har utförts av SMHI, inkluderar:

- Nettonederbörd för normalperioden 1991–2020
- Nettonederbörd för framtida perioden 2021–2050, med scenario RCP4.5 och RCP8.5
- Nettonederbörd för framtida perioden 2071–2100, med scenario RCP4.5 och RCP8.5.

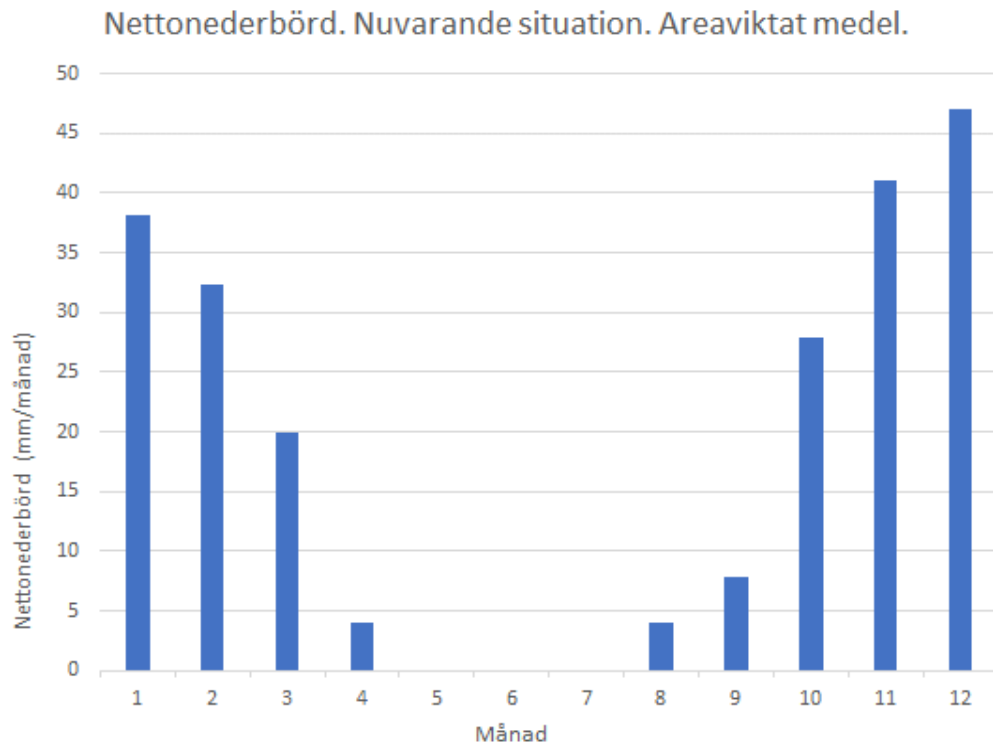
I den upprättade modellen har scenario RCP4.5 använts. Klimateffekten av de framtida perioderna och scenario RCP4.5 inkluderas i modellen på följande vis:

- För situationen år 8 gäller den nuvarande situationen, observerade data
- För situationen år 20 gäller den framtida perioden 2021–2050, med scenario RCP4.5
- För situationen år 30 eller senare situationer gäller den framtida perioden 2071–2100, med scenario RCP4.5

Nettonederbörden för den nuvarande situationen, observerade data, är inte identisk med nettonederbörden för normalperioden 1991–2020. De av SMHI beräknade framtida värdena för nettonederbörden är beräknade i förhållande till normalperioden. I modellen beskrivs den nuvarande situationen av observerade data och inte av normalperioden. I modellen inkluderas därför de av SMHI beräknade förändringarna i nettonederbörd, och inte de absoluta värdena på nettonederbörd för de framtida situationerna. Förändringen i nettonederbörd kvantifieras som faktorer.

För att i modellen erhålla nettonederbörden för en framtida situation multipliceras den observerade nettonederbörden för den nuvarande situationen med de beräknade faktorerna, för varje månad för det studerade medelåret. De beräknade faktorerna visas i Tabell 7. Faktorerna uppvisar värden som ligger nära ett, förutom för april och i viss mån för augusti och september. För april är faktorerna nära 0.75. Faktorernas storlek indikerar att förändringarna i nettonederbörd är relativt små för alla månader utom för april. Faktorerna indikerar att med avseende på nettonederbörden yttrar sig det framtida förändrade klimatet främst som en tydligt reducerad nettonederbörd i april.

De beräknade faktorerna i Tabell 7 visar att om man betraktar nettonederbörden för hela året blir skillnaden små mellan nettonederbörden för den nuvarande situationen och nettonederbörden för de framtida situationerna.



Figur 88. Av SMHI beräknad nettonederbörd för ett medelår, nuvarande situation. Areaviktat medelvärde för olika lokala avrinningsområden vid File hajdar och Slite.

Tabell 7. Faktorer för beräkning av nettonederbörden för framtida tidsperioder. Faktorena baseras på beräkningar av SMHI med utsläppsscenarioet RCP4.5.

Månad	Faktorer för nettonederbörd	
	Framtida period	
	2021-2050	2071-2100
1	1.058	1.067
2	1.005	1.042
3	1.043	0.951
4	0.747	0.783
5	1.000	1.000
6	1.000	1.000
7	1.000	1.000
8	0.901	1.001
9	1.063	0.913
10	0.994	1.045
11	1.075	1.006
12	1.051	0.977
	medel	medel
	0.99	0.98

6.4 KALIBRERING

Med kalibrering menas att data och resultat som produceras av modellens simuleringar stämmer överens med kända uppmätta data. Kalibreringen har utförts för en situation som huvudsakligen motsvarar förhållanden under 2021 (Scenario LT1). Det är inte en exakt representation av år 2021, eftersom en del av indata – t.ex. nettonederbörden (medelvärden) – representerar en längre tidsperiod. Inflödena till täkterna är också representativa värden för en längre period och inte exakt de uppmätta värdena för år 2021. Anledningen till att vi väljer medelvärden och representativa värden på indata beror på att förhållanden kan skilja sig mycket åt mellan olika år, och vi vill att modellen så långt som möjligt ska representera en medelsituation, dock huvudsakligen baserat på år 2021.

Modellen är kalibrerad mot följande uppmätta data, se Tabell 8. Det är kalibreringens syfte att reproducera dessa uppmätta data. Kalibreringen inkluderar dessa kalibreringsmål samtidigt och tillsammans.

Tabell 8. Kalibreringsmål, modellen är kalibrerad mot följande uppmätta data.

-
- Transient inflöde till File hajdar-täkten. Representativt värde för år 2021.
 - Transient inflöde till Västra och Östra brotten. Representativt värde för år 2021.
 - Uppmätta volymer som pumpats från produktionsbrunnarna (enligt vattendom).
 - Observerade transienta grundvattennivåer i produktionsbrunnarna (medel).
 - Transienta grundvattennivåer i ett flertal utvalda borrhål. Med avseende på grundvattennivåer fokuseras kalibreringen på medelvärden av de uppmätta miniminivåerna i borrhål från de senaste två till tre åren beroende på tillgänglig data.
-

Om man ändrar på någon betydelsefull egenskap i den kalibrerade modellen så kommer modellens egenskaper att förändras och modellen kommer inte längre vara kalibrerad; de simulerade flödena till täkterna kommer inte längre stämma med uppmätta flöden, vattennivåerna i observationsbrunnar och i produktionsbrunnarna kommer inte längre att stämma med uppmätta nivåer, osv.

Det studerade systemet är mycket komplext och bergmassans egenskaper är heterogena, och det finns därför ingen helt unik lösning för kalibreringen. Den kalibrerade modellen är det alternativ som bedöms vara det mest sannolika. Alla beskrivningar som ligger nära den grundläggande geologiska tolkningen och som kan kalibreras ligger mycket nära den kalibrerade modellens beskrivning. Beskrivningar som tydligt avviker från den kalibrerade beskrivningen kan inte kalibreras mot uppmätta data.

Kalibreringen är tidsberoende (transient) och redovisar det studerade systemets variation under ett medelår/normalår. Syftet med att utföra en transient kalibrering, som är komplicerad och tidsödande, är att upprätta en modell som kan simulera hur de framtida grundvattennivåerna kommer att variera under ett teoretiskt medelår/normalår. Detta möjliggör en analys av både högvattensituationen (vinter) och lågvattensituationen (sommar). De simulerade regionala grundvattennivåerna på långt avstånd från Slite är inte kalibrerade i detalj.

Kalibreringsmetodikens syfte är att nå fram till de kalibreringsmål som anges i Tabell 8. Metoden för att nå kalibreringens mål var att korrigera egenskaperna för de statistiska fördelningar som definierar de olika lagrens heterogena K-värden och magasinsegenskaper, både lokalt och regionalt.

Den transienta simuleringen använder de ovan presenterade värden på nettonederbörden för varje månad. För kalibreringen upprepades det studerade normalåret så att magasinseffekter i början och slutet av året utjämnas.

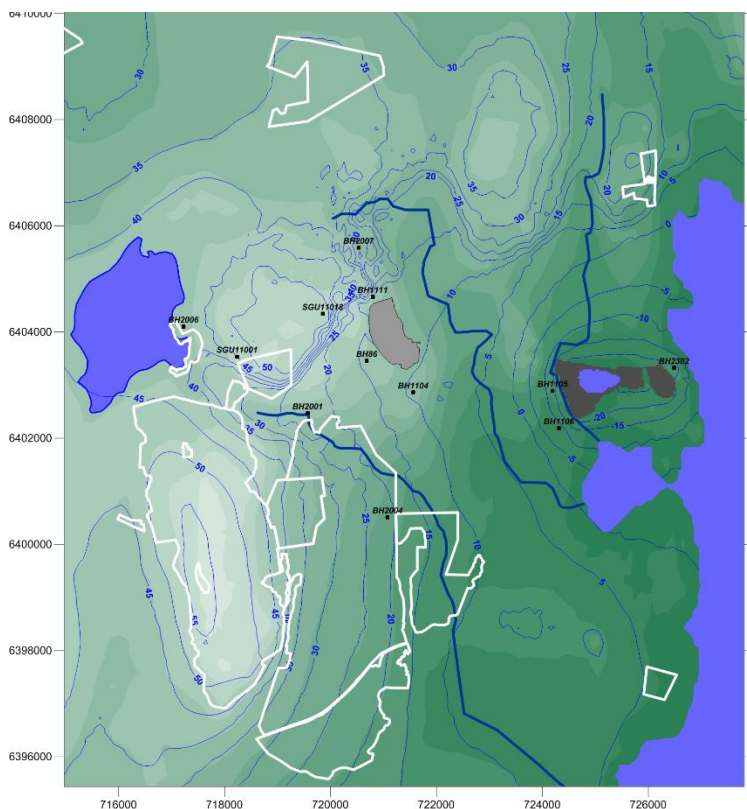
6.4.1 Sensitivitetsanalys

Kalibreringen analyseras och diskuteras i en sensitivitetsanalys, se bilaga 3.

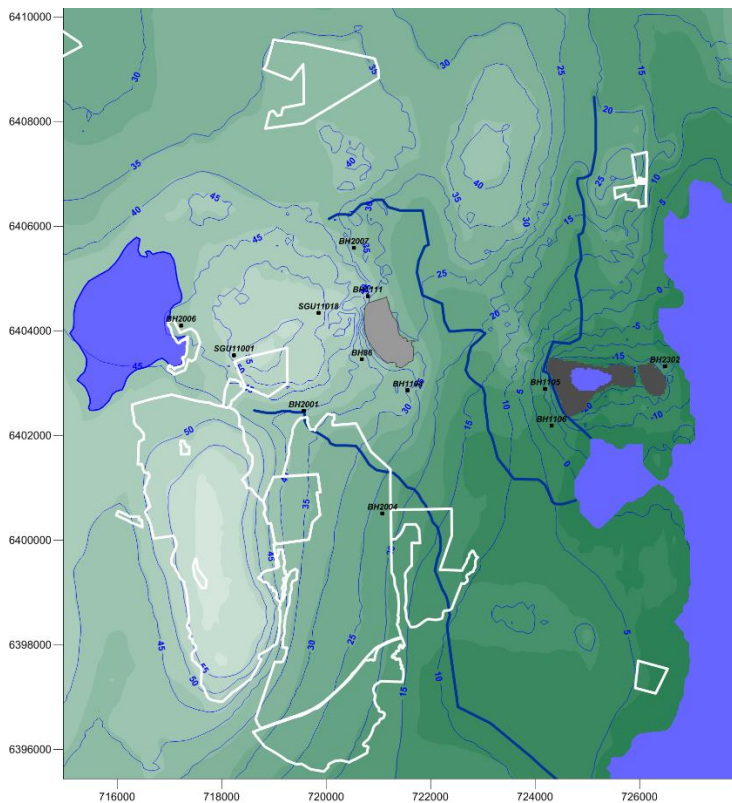
Sensitivitetsanalysen visar att kalibreringen får en god bestämmande kraft när alla de olika kalibreringsmålen utvärderas tillsammans och samtidigt. Det är viktigt att modellen kalibreras tidsberoende mot både vattennivå och vattenflöde samtidigt. Detta är en svårare och mer bestämmande kalibrering än att bara kalibrera mot vattennivåer i borrhål, som bara avser vattennivå och inte grundvattenflöde; det är också en mer bestämmande kalibrering än att bara kalibrera mot inflöde av grundvatten till täkterna, som bara avser flöde och inte vattennivå.

6.4.2 Kalibrerade grundvattennivåer

För den kalibrerade modellen, som representerar grundvattensituationen 2021, visas beräknade grundvattennivåer för lågvattensituationen i Figur 89, och för högvattensituationen i Figur 90.



Figur 89. Kalibrerad modell (LT1). Grundvattennivåer kring bergtäkterna för juli månad (lågvattnesituationen). Figuren visar representativa berggrundvattennivåer, vilket motsvarar grundvattennivå i en bergborrad brunn med djupet 47 m.



Figur 90. Kalibrerad modell (LT1). Grundvattennivåer kring bergtäkterna för december månad (högvattensituationen). Figuren visar representativa berggrundvattennivåer, vilket motsvarar grundvattennivå i en bergborrad brunn med djupet 47 m.

6.5 GRÄNSVÄRDE FÖR PÅVERKANSOMRÅDE

Påverkan av det utökade täktområdet beräknas normalt genom att grundvattennivåerna för olika situationer subtraheras från varandra och skillnaderna analyseras. Skillnaderna kan sedan plottas på en karta och isolinjen för en viss förändring kan markeras.

Påverkansområdet består dels av ett *tillströmningsområde*, inom vilket grundvattnet kan strömma mot bergtäkten, dels av ett *indirekt* påverkansområde, inom vilket grundvattennivåerna sänks men grundvattnet inte nödvändigtvis strömmar mot bergtäkten. Det indirekta påverkansområdet är större än det tillströmningsområde.

Påverkansområdet är inte samma sak som en avsänkningstratt runt bergtäkten.

Storleken på påverkansområdet varierar med storleken på gränsvärdet: Ju mindre gränsvärde, desto större påverkansområde. Även analysens osäkerhet beror av gränsvärdets storlek: Ju mindre gränsvärde, desto större är osäkerheten i storleken på det beräknade påverkansområdet. Det är därför orimligt att välja ett gränsvärde som är mycket mindre än naturliga variationer i grundvattennivå och mycket mindre än osäkerheten i topografi och uppmätta grundvattennivåer.

Gränsvärdet bör väljas så att den förändring i grundvattennivå som gränsvärdet representerar tydligt kan särskiljas från naturliga variationer i grundvattennivåerna. Därför bör gränsvärdet sättas i relation till de naturliga årliga variationerna.

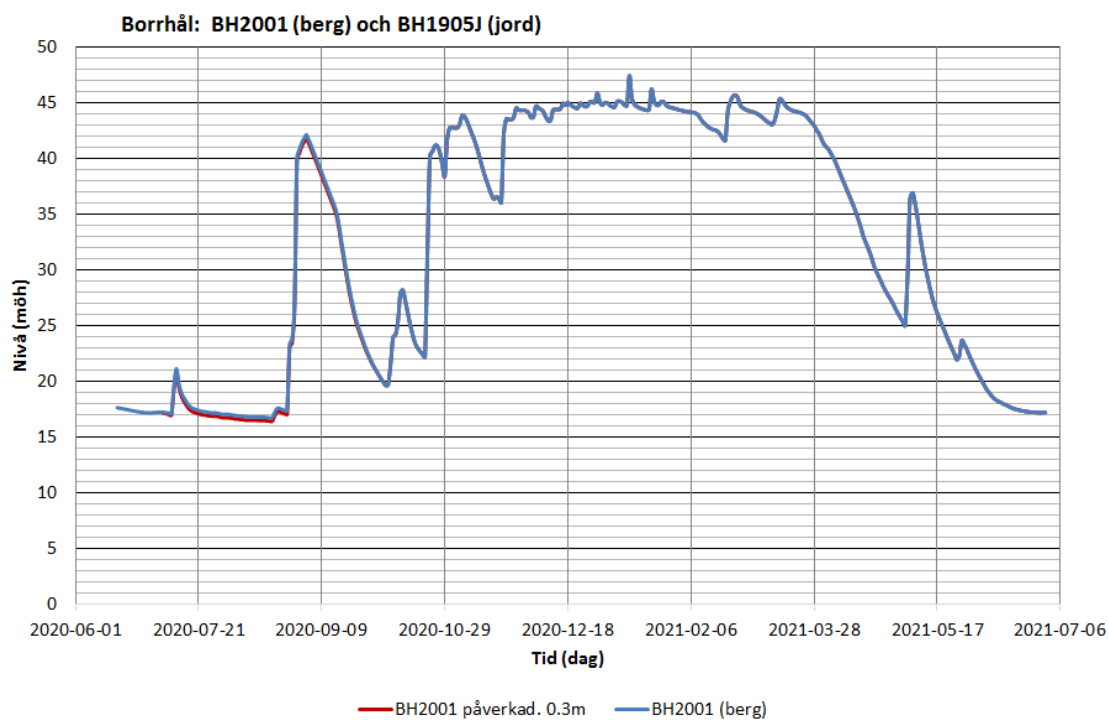
Ett vanligt gränsvärde för svenska förhållanden är 0,3 m. Den naturliga årliga variationen är då ofta 1–2 meter, och gränsvärdet motsvarar då 15–30 % av den årliga variationen i vattennivå, och kan troligen urskiljas från den naturliga variationen. Det studerade grundvattensystemet vid File hajdar är dock ett ovanligt grundvattensystem med extremt stora årliga variationer i grundvattennivåer i berg – ofta i storleksordningen 20 meter, en amplitud på 35 m är uppmätt i borrhål BH1104. Om den naturliga årliga variationen är 20 m, då motsvarar ett gränsvärde på

0,3 meter 1,5 % av den årliga variationen, och kommer därför i verkligheten att inte kunna urskiljas från naturliga förändringar.

Teoretiskt kan man med hjälp av en matematisk modell räkna ut en påverkan lika med -0,3 m, men en sådan ringa förändring går inte att i verkligheten särskilja från den naturliga variationen när den årliga variationen är så stor som t.ex. 20 m (eller större).

Ett bättre sätt vore att definiera gränsvärdet i relation till den årliga amplituden, t.ex. att definiera gränsvärdet till 10 % av amplituden, vilket för till exempel BH2001 (se Figur 91) skulle betyda ett gränsvärde lika med ca 3 m.

Detta handlar inte bara om huruvida en förändring är uppföljningsbar utan också om vilken påverkan på andra värden en avsänkning kan få. De årliga variationerna är stora på grund av en liten andel hårum (porositet) i form av sprickor, vilket gör att en liten skillnad i mängden vatten ger stor skillnad i vattennivå, men alltså en liten förändring i vattentillgången.



Figur 91. Jämförelse av opåverkade och påverkade vattennivåer. De påverkade nivåerna är konstruerade.

6.6 BERÄKNING AV SALTHALTER

6.6.1 Saltvattenmodellen 2023

Saltvattenmodellen som har använts för simuleringar av salthalter är samma modell som har presenterats och diskuterats ovan. Det är samma upplösning och samma egenskaper. Skillnaden mellan sötvattenmodellen och saltvattenmodellen består endast i att klorid (saltvatten) har inkluderats i beräkningarna, och att de definitioner som behövs för att beräkna saltvatten har adderats till den redan etablerade sötvattenmodellen. Beräkningarna är därför utförda med en modell som inkluderar transport av salt.

Saltvattensimuleringarna har två syften:

- Att simulera salthalterna i kommunens produktionsbrunnar, för utgångsläget (den tillståndsgivna situationen) och för de framtida situationerna med utökade dagbrott och skyddsåtgärder enligt ansökan. Alltså en analys av hur utökningen av täkterna påverkar salthalterna i kommunens produktionsbrunnar. De framtida salthalterna beräknas även för Nollalternativet och för den framtida situationen efter avslutad brytning, med File hajdar och Västra brotten vattenfyllda.
- Att simulera hur salthalterna kring Västra och Östra brotten kommer att förändras när Västra brottet successivt vattenfylls. Alltså en analys av hur en vattenfyllning av Västra brottet påverkar salthalterna i grundvattnet kring Västra och Östra brotten. Den egenskap hos saltvattensystemet som är av störst praktisk betydelse för lokal användning av grundvatten är djupet till grundvatten med en salthalt så hög att grundvattnet inte är lämpligt som dricksvatten. Med andra ord, djupet till en viss given salthalt. Det är för denna egenskap som analysen av grundvattensystemet kring Västra och Östra brotten har fokuserats.

6.6.2 Gränsvärden

När vi talar om salthalten i grundvatten så menar vi i denna studie kloridhalten. När salthalterna blir för höga blir grundvattnet olämpligt som dricksvatten, vattnet blir korroderande och det smakar bräckt och salt. Vid 100 mg/l klorid (0,1 kg/m³ eller 0,1 gram/liter) anses dricksvatten som anmärkningsvärt ur teknisk synpunkt p.g.a. saltets korroderande egenskaper. Överstiger kloridhalten 300 mg/l (0,3 kg/m³ eller 0,3 gram/liter) anses vattnet med tvekan tjänligt (främst ur teknisk synpunkt) och vattnet börjar även smaka salt (se 08FS 2016:15).

6.6.3 Kalibrering,

Saltvattenmodellen är kalibrerad mot mätdata redovisad under 4.8.3 vilket omfattar:

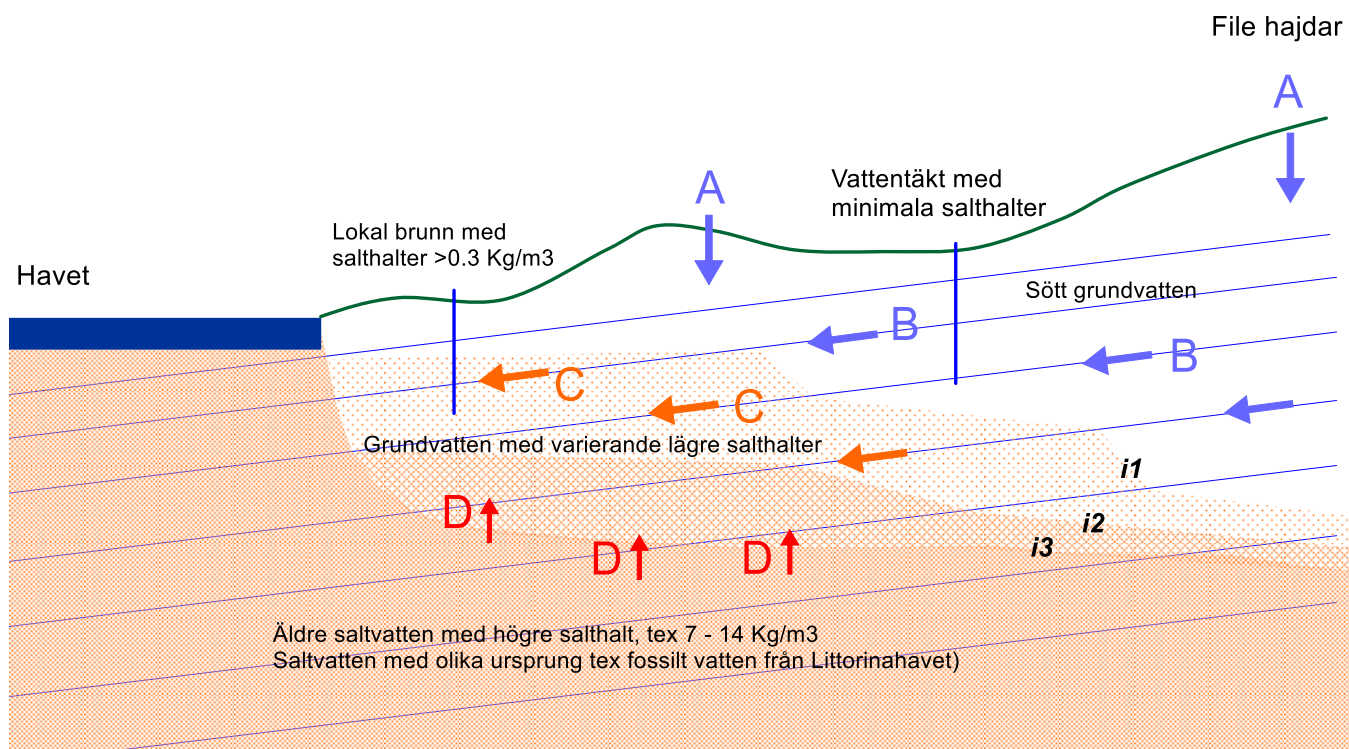
- Uppmätta salthalterna i de kommunala produktionsbrunnarna.
- Mediandjup till salthalten 0,3 kg/m³ (smakgränsen) i området kring Västra och Östra brotten.

Kalibreringen utfördes för Situationen år 2021. Med avseende på salthalter är skillnaden mellan Situationen år 2021 och utgångsläget (den tillståndsgivna situationen) obetydlig.

6.6.4 Visualisering och diskussion av salthalter för referenssituationen

En principskiss som visar den konceptuella beskrivningen av hur det salta grundvattnet har implementerats i modellen visas i Figur 96. I figuren finns tre markeringar i svart: **i1**, **i2** och **i3**. Dessa markeringar visar på isolinjer som representerar ett värde på salthalten, markering **i1** kan tex representera koncentrationen 0,3 kg/m³, som motsvarar smakgränsen. Markeringen **i2** kan tex representera koncentrationen 5 kg/m³, och markeringen **i3** representerar då högre koncentrationer. Figur 96 är ett vertikalt tvådimensionellt snitt, isolinjerna i Figur 96 motsvaras i en tredimensionell beskrivning av isoytor. En isoyta representerar alltså en viss koncentration, under isoytan är koncentrationerna högre (i det studerade fallet) och ovanför isoytan är

koncentrationerna lägre. Den upprättade modellen är tredimensionell, diskussionen nedan fokuseras därför på isoytor.

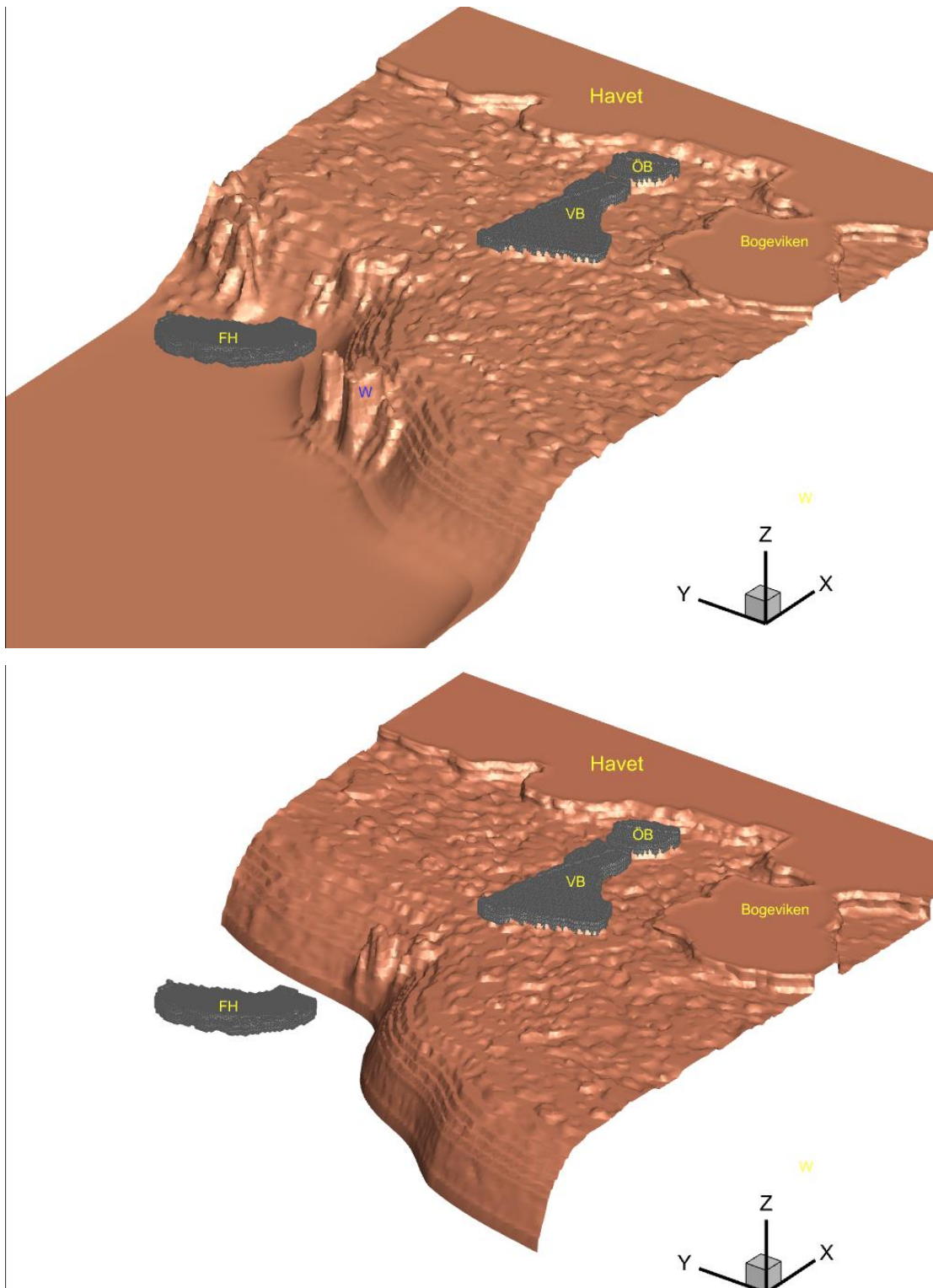


Figur 92 Principskiss som visar den konceptuella beskrivningen av hur det salta grundvattnet har implementerats i modellen.

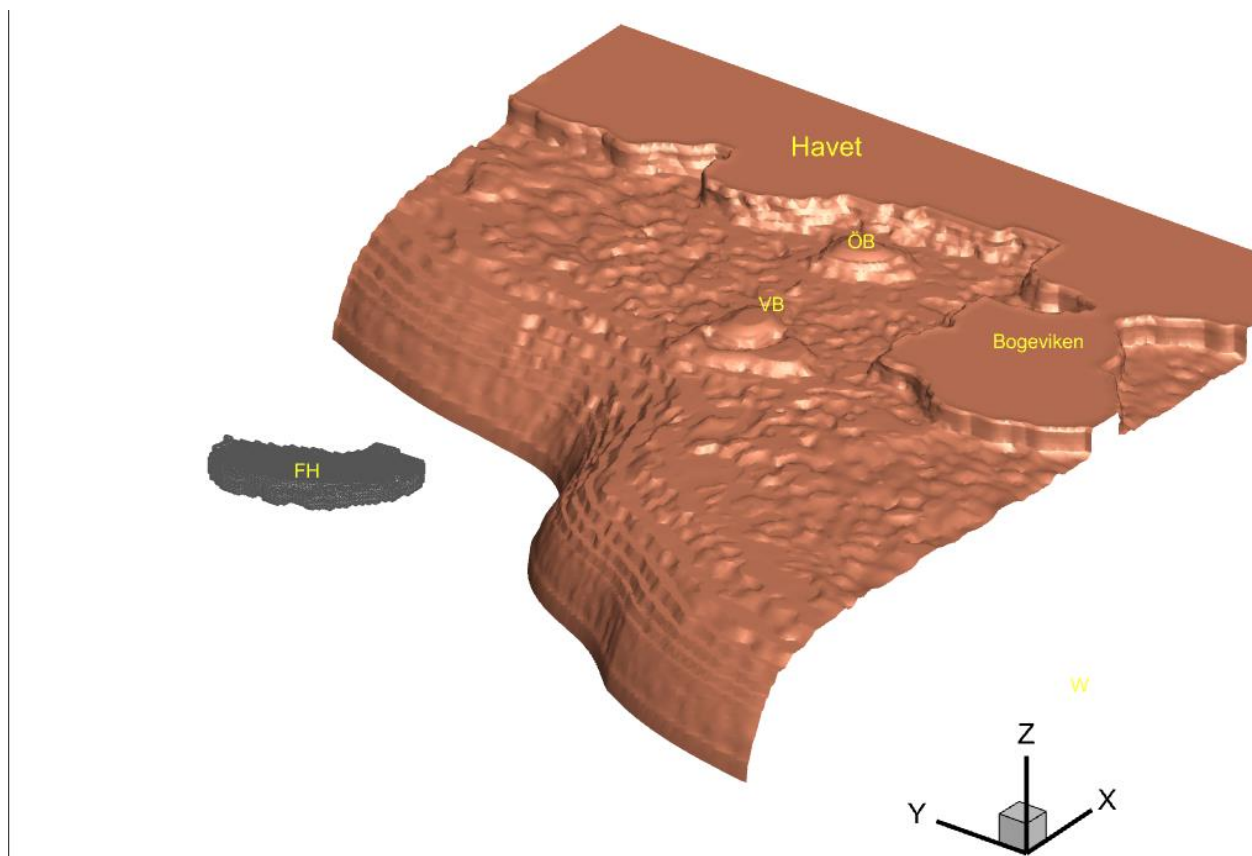
Resultaten av saltvattenmodelleringen är fokuserade på ett rektangulärt område kring täkterna. Saltvattenmodellen är lika stor som den tidigare presenterade sötvattenmodellen, men simulerade salthalter långt bortom File hajdar och Slite är inte av intresse i denna studie.

En visualisering i perspektiv av det simulerade saltvattnet visas i Figur 93. Figuren representerar utgångsläget (tillståndsgiven situation) för lågvattensituationen (juli). Den brun-röda ytan i figuren är en isoyta som i den övre figuren representerar en salthalt lika med 0.1 kg/m³ (tekniskt gränsvärde), och i den undre figuren representerar en salthalt lika med 0.3 kg/m³ (smakgränsen). Under isoytan är koncentrationerna högre och ovanför isoytan är koncentrationerna lägre. Bokstaven W (i figuren) indikerar ett område där vatten med låga salthalter stiger uppåt (uppkoning), i anslutning till produktionsbrunnarna. Produktionsbrunnarna får dock huvudsakligen sitt vatten från väster, där grundvattnet, även på stora djup tenderar att ha låga salthalter, och är därför mindre påverkade av de högra salthalterna öster och om och under produktionsbrunnarna, vilket också har indikerats av spårämnesförsök. De små lokala variationerna i isoyternas nivåer väster om havet följer av modellens heterogena egenskaper, och representerar en naturlig variation i koncentration. Densitetseffekterna är mycket små och obetydliga för salthalterna som i figurerna representeras av isoytor, och därför inte av avgörande betydelse, och utjämnar därför inte lokalt de olika salthalterna.

Figur 94 representerar också Utgångsläget för lågvattensituationen (juli). Den brun-röda ytan är en isoyta som representerar en salthalt lika med 1,0 kg/m³ (långt över smakgränsen). Figuren visar hur salt grundvatten med lite högre salthalter (tex 1,0 kg/m³) stiger uppåt (uppkoning) under Västra (VB) och Östra brotten (ÖB).



Figur 93 Saltvattensimulering. Utgångsläget (tillståndsgiven situation). Lågvattensituationen (juli). Den brun-röda ytan är en isoyta som i den övre figuren representerar en salthalt lika med $0,1 \text{ kg/m}^3$ (tekniskt gränsvärde), och i den undre figuren representerar en salthalt lika med $0,3 \text{ kg/m}^3$ (smakgränsen). Under isoytan är koncentrationerna högre och ovanför isoytan är koncentrationerna lägre. De små variationerna i isoytans nivå väster om havet följer av modellens heterogena egenskaper, och representerar en naturlig variation i koncentration. Den vertikala skalan är 5 gånger större än den horisontala skalan. Figurens Y-axel pekar mot norr, X-axeln pekar mot öster.



Figur 94 Saltvattensimulering. Utgångsläget (tillståndsgiven situation). Lågvattensituationen (juli). Den brun-röda ytan är en isoyta som representerar en salthalt lika med $1,0 \text{ kg/m}^3$ (långt över smakgränsen). Under isoytan är koncentrationerna högre och ovanför isoytan är koncentrationerna lägre. Figuren visar hur salt grundvatten med lite högre salthalter ($1,0 \text{ kg/m}^3$) stiger uppåt (uppkoning) under Västra (VB) och Östra brotten (ÖB). De små variationerna i isoytans nivå väster om havet följer av modellens heterogena egenskaper, och representerar en naturlig variation i koncentration. Den vertikala skalan är 5 gånger större än den horisontala skalan. Figurens Y-axel pekar mot norr, X-axeln pekar mot öster.

7 SKYDDSÅTGÄRDER

I nästföljande kapitel 8 presenteras den påverkan som beräknas uppkomma på grundvattennivåer och vattenflöden till följd av en utökad och fördjupad täkt.

För att studera möjligheterna att minska påverkan på omgivande grundvattensystem har föreliggande utredning även studerat vilka möjliga skyddsåtgärder som skulle kunna vidtas samt effekten av dessa. Följande åtgärder har bedömts vara teoretiskt möjliga och analyseras därför närmare i denna rapport:

- Ridåinjektering
- Infiltration av länshållningsvatten

För att möjliggöra infiltration med hänsyn tagen till områdets hydrologiska förutsättningar, med mycket vatten under vinterhalvåret men lite tillgängligt vatten sommartid, krävs lagring av vatten mellan årstiderna. Det kommer eventuellt också krävas rening av länshållningsvattnet. Magasineringen och reningen av länshållningsvatten redovisas också i ansökansbilaga B6.

Storskalig ridåinjektering har genomförts vid Västra brottet som ett villkor i det sk regeringstillståndet 2021 där en sträcka på ca 1,5 km injekterades med konstaterat höjda grundvattennivåer som effekt. En ytterligare åtgärd som lyfts som möjlig åtgärd i samband med ansökan om befintligt tillstånd är avveckling av verksamhet och vattenfyllnad av Västra brottet. Det är dock fråga om mycket omfattande infrastrukturprojekt – samtliga anläggningar i Västra brottet behöver omlokaliseras, och öppningarna mellan Östra och Västra brottet hade behövt tätas, ny transportväg över eller under väg 147 anläggas – och det bedömdes inte vara varken

praktiskt genomförbart eller ekonomiskt försvarbart att genomföra en sådan omfattande förändring inom ramen för en ansökt fyraårsperiod. I ansökan där föreliggande utredning ingår är vattenfyllnad av Västra brottet inkluderat i ansökt alternativ. Det är därmed ej att betrakta som en skyddsåtgärd och därmed ej vidare beskriven i detta kapitel. Effekten av vattenfyllnaden är inkluderad i den beräknade successiva utvecklingen av vattennivåer och vattenbalanser för området.

Syftet med skyddsåtgärderna är inte att kompensera för naturliga variationer i t.ex. temperatur, nederbörd och nettonederbörd. Den inverkan som torra år och blöta år har på grundvattensystemet skall inte förändras eller förhindras av skyddsåtgärderna. Det är heller inte syftet med skyddsåtgärderna att förhindra klimatförändringarna från att påverka grundvattensystemet. Syftet med skyddsåtgärderna är att till stor del kompensera för den påverkan som utvidgningen av tåkten på Filehajdar kan ha på det omgivande grundvattensystemet, särskilt med avseende på Natura 2000-områdena söder om tåkten. Nedan presenteras därför en konceptuell utformning som kan justeras och förfinas utifrån de exakta förutsättningarna.

7.1 RIDÅINJEKTERING

Som framgår av kapitel 4.9.1 är syftet med injektering att minska bergets vattenförande förmåga genom att via ett stort antal borrhål pumpa in cementbruk i bergssprickor. Därmed minskas grundvattenflödet mot den dränerade tåkten, vilket är positivt för det omgivande grundvattensystemet. De utförda försöken med ridåinjektering har visat att åtgärden är tekniskt genomförbar och leder till en god tätande effekt.

Det mest genomsläppliga området var Område 1 i söder. Här kan man baserat på resultaten förvänta sig den största nyttan med en injektering. Störst tätande effekt erhöles i den kontinuerliga vattenförande struktur som identifierades på ca 50 m djup.

Baserat på Bilaga 5 var reduktionen i genomsläpplighet, $1 - (Q/dh_{cc5m}/Q/dh_{cc10m})$, ungefär 88% från Omgång 1 till Omgång 2 och ungefär 97% från Omgång 1 till kontrollhålen.

Värden för $Q/dh/L$ för testlängden 6 till 70 m skulle då motsvara ungefär $8 \cdot 10^{-6}$ m/s, $8 \cdot 10^{-7}$ m/s respektive $2 \cdot 10^{-7}$ m/s. Att genomföra Omgång 2 skulle innebära dubbla arbetet (tid, resurser, energi), jämfört med Omgång 1, men ge en betydligt mindre ytterligare reduktion. Centralt blir därför att utvärdera påverkan på omgivningen för att göra rimliga avväganden.

Om man önskar en fortsatt minskning av genomsläppligheten bör en avvägning göras mellan reduktion, omgivningspåverkan och hållbarhet. Minskad påverkan på vatten behöver vägas mot ökad användning av ekonomiska resurser, naturresurser och energi samt resulterande koldioxidavtryck.

Arbetet kommer att göras stegvis och möjliggör såväl uppföljning som underhåll.

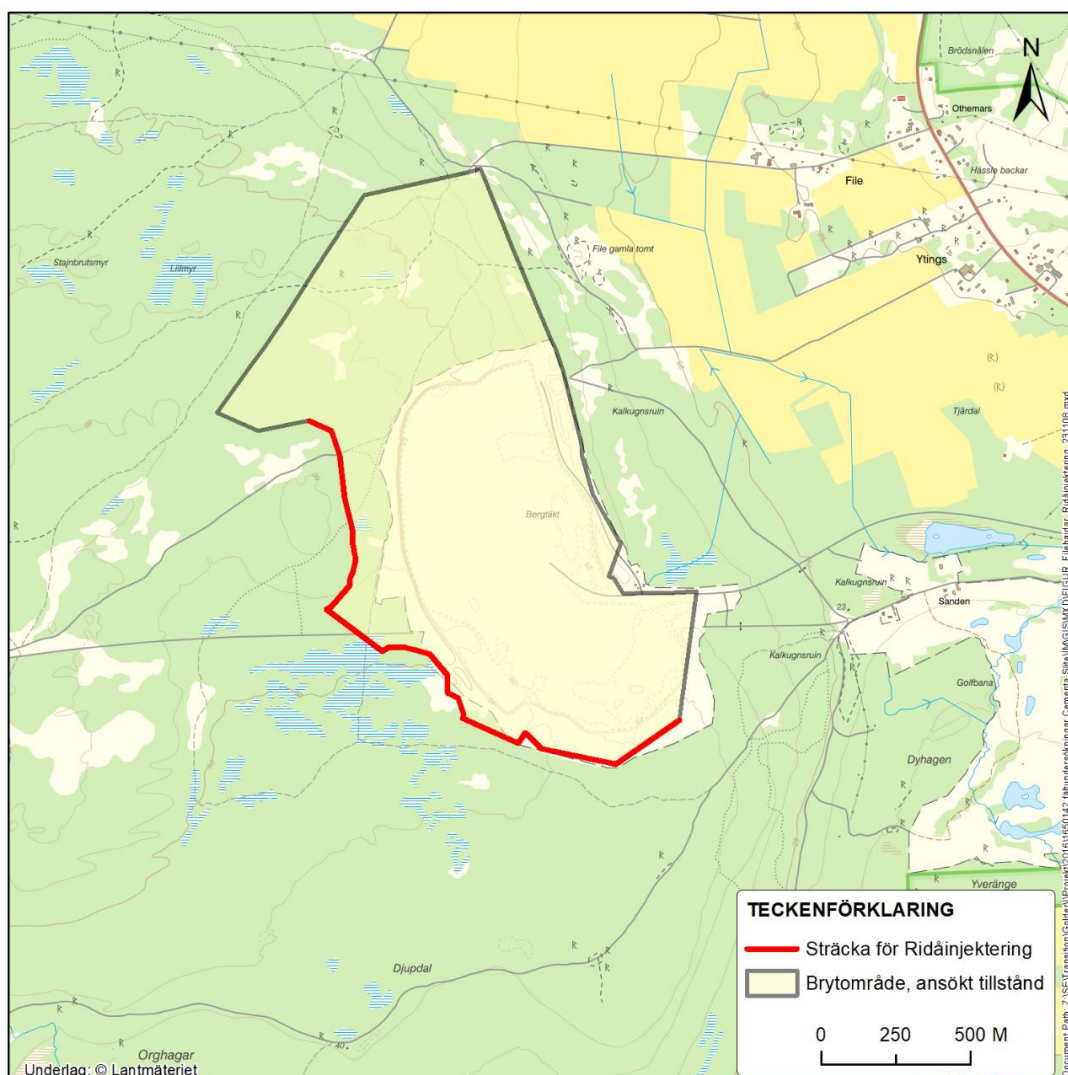
7.1.1 Injekteringssträcka

Konceptuellt ska ridåinjekteringen geografiskt begränsas till de riktningar varifrån vattnet kommer och det finns kontinuerliga vattenförande lager vilka leder fram vatten till tåkten. Inom revkalkstenen saknas de kontinuerliga lagren vilket innebär att effekten av att injektera minskar avsevärt.

Ridåinjektering föreslås därför genomföras från det sydöstra hörnet av File hajdar-tåkten upp längs västra sidan fram till revkalkens södra del, se i Figur 95 nedan. Den injekterade sträckan uppgår till ca 2,2 km. Norr om denna sträcka, inom revkalken, förväntas inga kontinuerliga vattenförande lager med lång utbredning

För att undvika negativ påverkan och rundpumpning av infiltrerat vatten (se avsnitt 7.2 nedan) bör injekteringen färdigställas inom tillståndstidens första tre år. Ridåinjekteringen bör påbörjas i

de södra delarna, då det är den sydliga riktningen som bedöms vara viktigast initialt med tanke på påverkan för Natura 2000 områdena i söder.



Figur 95 Föreslagen sträcka för ridåinjektering längst den sydvästra kanten av verksamhetsområdet för File hajdar-täkten.

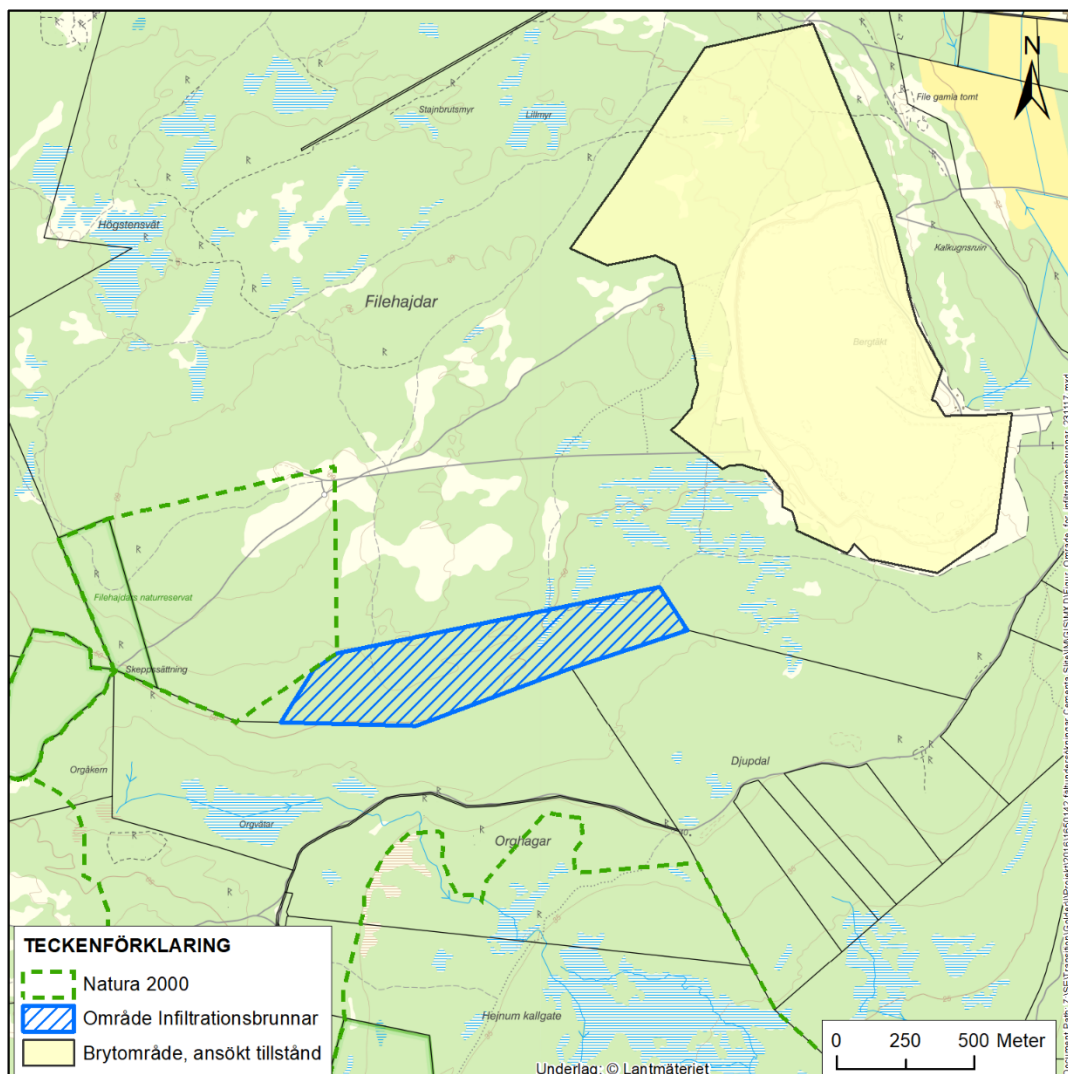
7.2 INFILTRATION

Infiltration med syfte att upprätthålla grundvattennivåer används i stor omfattning inom infrastrukturprojekt och byggnationer i sättning känsliga miljöer. I detta fall är syftet med infiltrationen att motverka en avsänkning av grundvattennivåerna i Natura 2000-områdena, söder om File hajdar-täkten, under vegetationsperioden.

7.2.1 Infiltrationsområde

Skyddsåtgärden innebär att länshållningsvatten från File hajdar-täkten infiltreras i en eller flera bergborrade brunnar söder om File hajdar-täkten, se Figur 96. Borrhål BH2212, som användes vid infiltrationstesterna som redovisas i kapitel 4.9.3 ovan, ligger inom det område som redovisas i Figur 96. Testerna i detta hål har visat att en veckas infiltration kan höja grundvattennivåerna på över 1,5 km avstånd från borrhålet. Testerna visade även att fast nivåerna höjdes i alla riktningar bort från revkalken (störst utbredning åt söder och öster) rörde sig det infiltrerade vattnet helt åt öster.

Brunnarnas exakta position är inte av avgörande betydelse. Det område som markeras i Figur 96 och de valda positionerna i modelleringen (Figur 99) kan dock ses som exempel på lämpliga positioner.



Figur 96 Område för infiltrationsbrunnar BH2212 är belägen inom området.

Bergets heterogenitet innebär att inte varje enskild punkt är lämplig för infiltration. Det område som redovisas i Figur 96, är dock generellt lämpligt vilket har visats med försök och simuleringar. Berget i de använda brunnarna bör uppvisa en betydande genomsläpplighet och vara hydrauliskt konnekterade med de Natura 2000-områden inom vilka Heidelberg Materials önskar höja grundvattennivåerna. I vissa punkter är den penetrerade strukturen mer genomsläpplig än i andra. I en lite tätare brunn blir strömningsförlusterna ut ur brunnen större och därmed blir effekten av åtgärden mindre. Ett exempel på detta är de två infiltrationsförsök som gjordes sommaren 2022 i BH2212 och BH2213 (kapitel 4.9.3 ovan). Borrhålen penetrerar ungefär samma geologiska lager, uppläggen var desamma och mönstret för påverkan var likartade. Men då BH2213 var mindre genomsläpplig blev också effekten mindre. Slitemärgelns långa sub-horisontella lager har visats vara gynnsamma för att höja nivåerna på stort avstånd.

Norr/nordväst om tåkten i revkalken förväntas inga kontinuerliga vattenförande lager med lång utbredning. Effekten av en infiltrationsbrunn i detta område skulle därmed bli endast lokal, vilket bekräftades av försöket som utfördes i brunnen SGU2017 under sommaren 2023, se kapitel 4.9.3. Det föreslås därför inte någon infiltration i dessa riktningar.

7.2.2 Infiltrationsvolym

När infiltration görs med syfte att undvika sättningar (t.ex. vid byggnation) regleras infiltrationen mot en jämn lägsta nivå genom att tillräckligt med vatten infiltreras för att upprätthålla nivån, men samtidigt försöker man undvika för höga nivåer för att t.ex. undvika att källare översvämmas. I denna miljö, där stora grundvattennivåfluktuationer är det naturliga mönstret utifrån vilken naturen är anpassad, är detta inte ett lämpligt tillvägagångssätt. Fluktuationerna bör bibehållas på ett sätt som liknar dagens situation. Här anses det istället mer ändamålsenligt att styra ett infiltrationssystem så att volymen berggrundvatten i Natura 2000-områdena kompenseras under de för växtligheten kritiska perioderna vår och höst. Sommartid är grundvattennivån i berget långt under markytan i hela Natura 2000-området norr om Bojsvätar och det kan därmed inte råda något tvivel om att berggrundvattnet då saknar betydelse för växtligheten i området. En viss, jämfört med våren lite mindre, infiltration föreslås trots detta även under sommarmånaderna. Denna infiltration bidrar till att hålla nere det totala påverkansområdet och är dessutom gynnsam för den kommunala vattentäkten i Dyhagen. Under hösten krävs det är en likartad volym vatten som under våren för att höja nivåerna

Volymen som behöver infiltreras i berget, för att kompensera för en minskad mängd ytligt berggrundvatten i Natura 2000-områdena Hejnum kallgate, Bojsvätar och Kallgatburg, kan uppskattas via den beräknade förlusten av ytligt berggrundvatten i samma områden med simuleringar i den etablerade numeriska grundvattenmodellen, se Bilaga 3. Förlusten av ytligt berggrundvatten har beräknats för olika lokala avrinningsområden. Det avrinningsområde som främst använts för att beräkna flödesförlusterna och därmed infiltrationsbehovet är det lokala området No.3 (se Figur 97).

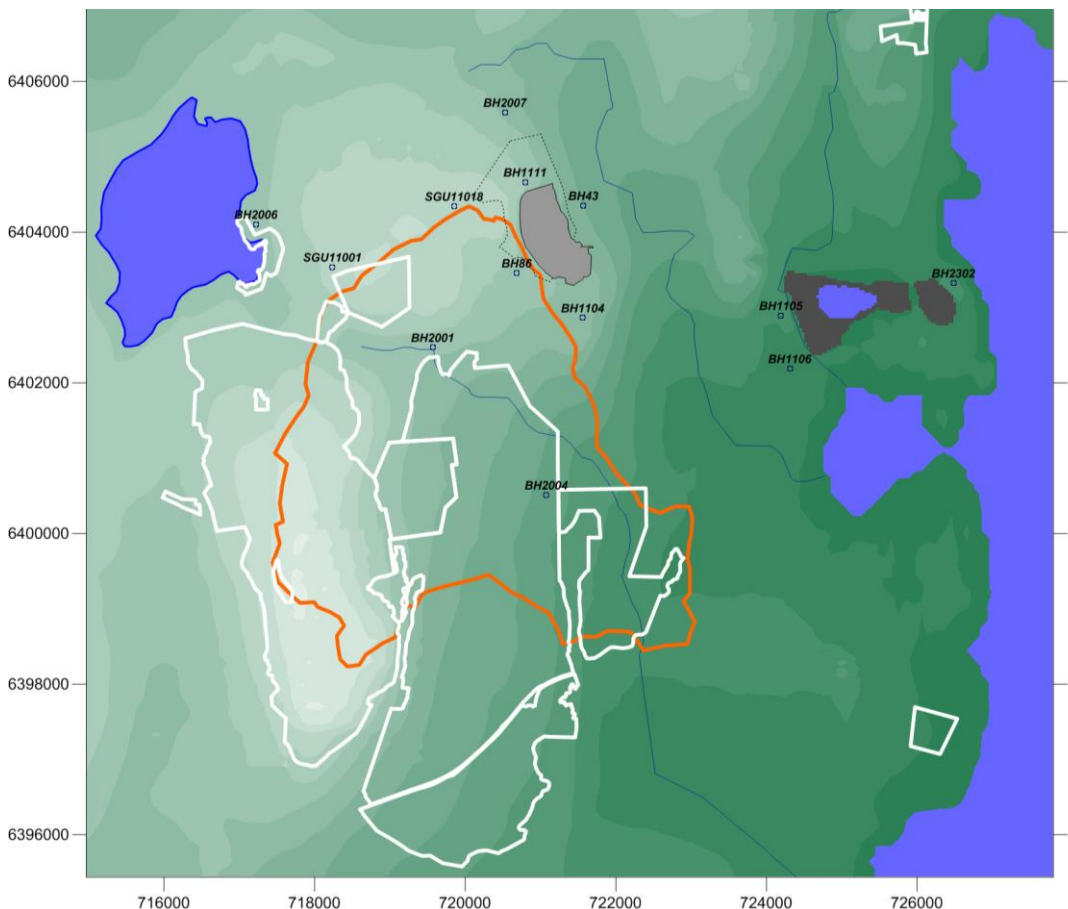
Infiltrationsbehovet föreslås som sagt uppgå till förlusten under växtperioden, vår-sommar-höst, beskrivs i kap 8.5.1) för att skydda Natura 2000-områdena samt ge en marginal som täcker osäkerheten i beräkningarna. Förlusten beräknas i kap 8.5.1 till 40 000 m³/år. Infiltrationen föreslås därmed uppgå till 100 000 m³/år när tåkten är fullt utbruten eller har uppnått en betydande yta.

Modelleringar har gjorts över hur inflödet till tåkten samt påverkan på berggrundvatten inom Natura 2000-områdena ökar i förhållande till utbredningen av pall 2 i File hajdar-tåkten. Modelleringarna har gjorts utan hänsyn till skyddsåtgärder och beskrivs i detalj i Bilaga 3. Baserat på dessa beräkningar föreslås den årliga infiltrationsvolymen öka succesivt enligt följande:

- **25 000 m³/år** från det att systemet kan driftsättas till och med den tidpunkt då ytan av pall 2 i File hajdar-tåkten uppgår till 10 ha. Driftsättning förutsätter anläggande av vattenmagasin, ledningsdragningar, reningsanläggning samt en vintersäsong för vattenfyllnad. Systemet förväntas kunna driftsättas inom 3 år från det att tillståndet har tagits i anspråk.
- **40 000 m³/år** från det att ytan av pall 2 i File hajdar-tåkten uppgår till 10 ha till och med den tidpunkt då ytan av pall 2 uppgår till 30 ha. Pall 2 beräknas uppgå till 30 ha efter ca 8 års brytning, men det kan även ske något tidigare eller senare beroende på hur brytningen fortskrider.
- **100 000 m³/år** från det att ytan av pall 2 i File hajdar-tåkten uppgår till 30 ha till och med den tidpunkt då File hajdar-tåkten börjar vattenfyllas.
- När tåkten vattenfylls minskar påverkan på omgivande grundvattensystem. Infiltrationsflödet föreslås därmed minska linjärt till noll under 8 års tid efter det att vattenfyllnaden av tåkten har påbörjats.

Samtliga beräknade årliga volymer förutsätts fördelas över växtsäsongen, dvs. från mitten av mars till mitten av oktober. Störst infiltrationsflöden används under vår och höst. Detta utvecklas i kapitel 7.3 nedan.

Under vintern är grundvattennivåerna naturligt höga och vintern är inte heller en växtsäsong. Därför kommer det inte ske någon infiltration av vatten under vintern.



Figur 97. Lokala avrinningsområdet No.3.

Med avseende på täktens utökning och vattenbortledningen, så kommer vattenbortledningen främst att öka under vintern. Det betyder att förlusterna av yt- och grundvatten kommer att vara störst under vinterhalvåret. Detta är en följd av att nettonederbörden är stor under vintern. För det studerade området produceras drygt 90 % av nettonederbörden under vinterhalvåret (se kapitel 6.3). Grundvattenflödena är också störst under vintern och mindre under sommaren. Skyddsåtgärden infiltration bygger på konceptet att en andel av nettonederbörden som produceras under vintern sparas i stora vattenmagasin i File hajdar-täkten. Under växtperioden (vår-sommar-tidig höst) används vattnet i magasinerna för infiltration. Förlusten av yt- och grundvatten under vintern kompenseras ej med infiltration, däremot fungerar skyddsåtgärden injektering under hela året.

Det ska påpekas att infiltrationen aldrig kan producera en kompensation som exakt stämmer med förlusten, eftersom vattnet infiltreras i utvalda brunnar, vilket inte är samma sak som hur förlusten skapas via den utökade täkten. Grundvattennivåerna kan dock höjas och den annars förlorade volymen ytligt berggrundvatten kan återföras.

7.2.3 Kvalité på infiltrerat vatten

Med tanke på att det infiltrerade vattnet i huvudsak förväntas hamna i Dyhagens vattentäkt, efter ca 1,5 månads transport i berget (om infiltrerat i BH2212 eller nyetablerade brunnar i närområdet), bör kvaliteten på det infiltrerade vattnet anpassas därefter. Det gäller även om det

vatten som tas ut i vattentäkten inte omedelbart används som dricksvatten, utan först passerar befintligt vattenverk och därmed ytterligare säkerhetsbarriärer.

Vattnet som lånshålls ur täkten utgörs i grunden av en kombination av nederbörd och grundvatten. Täckverkssamheten innebär dock en ökad kontaktyta för vattnet och innebär t.ex. en belastning i form av näringsämnen från odetonerat sprängämne.

Provtagning av lånshållningsvattnet i File hajdar-täkten efter anläggandet av sedimentationsdammen 2022 visar att flertalet kemiska parametrar redan i dagsläget uppfyller Livsmedelsverket föreskrifter om dricksvatten (2022). För vissa parametrar, som i nuläget inte alltid uppnår Livsmedelsverkets haltgränser (t.ex. turbiditet och metaller knutna till partikelinnehåll), kan man förvänta sig att halterna kommer att förbättras avsevärt redan genom den sedimentation som erhålls när vattnet lagras under längre tid i de planerade stora vattenmagasinen. Vatten som ska användas för infiltration ska genomgå kontroll i enlighet med branschpraxis för råvattenkontroll.

Den kemiska kvalitén på infiltrerat vatten i berg bör underskrida halter enligt Livsmedelsverket föreskrifter om dricksvatten (2022) med undantagen kalcium och sulfat vilka är en effekt av den aktuella berggrunden. Undantag kan även göras för mikrobiologiska parametrar.

Vattenprovtagningen i lånshållningsvattnet visar, i likhet med många andra ytvatten, ställvis förhöjda halter av mikrobiologiska parametrar. Konstgjord grundvattenbildning räknas som en mikrobiologisk barriär, men för att vattnet ska betraktas som grundvatten krävs en uppehållstid i marken som är längre än 14 dygn (Svenskt vatten, 2008). Transporttiden från de planerade infiltrationsbrunnarna, belägna i det område som redovisas i Figur 96 ovan, till Dyhagen vattentäkt förväntas överstiga 2 veckor. Det infiltrerade vattnet förväntas således inte medföra några risker vad gäller mikrobiologiska parametrar.

Vattnet som ska användas för infiltration kommer genomgå kontroll i enlighet med branschpraxis för råvattenkontroll. De närmare detaljerna vad gäller provtagningsfrekvens och parametrar avses hanteras i bolagets kontrollprogram.

Mängden vatten som strömmar från infiltrationsbrunnarna till Natura 2000-områdena har genom spårämnesförsök i BH2212 (4.10) och modelleringar (7.3.1) visats vara liten och utströmningen av berggrundvatten till marklagren kan antas vara ytterligare mindre. Vattenkvaliteten behöver därmed inte anpassas utifrån naturvärdena i dessa områden. Detta resonemang förutsätter dock att infiltrationen sker med anpassade tryck och anpassad utformning av brunnar, annars kan utströmning ske i brunnens närhet. Om ytterligare infiltrationsbrunnar etableras bör brunnarna testas hydraulisk innan långsiktig infiltration påbörjas och vid behov anpassas utifrån resultatet. Exempel på anpassning av brunnsutformningar som kan användas är:

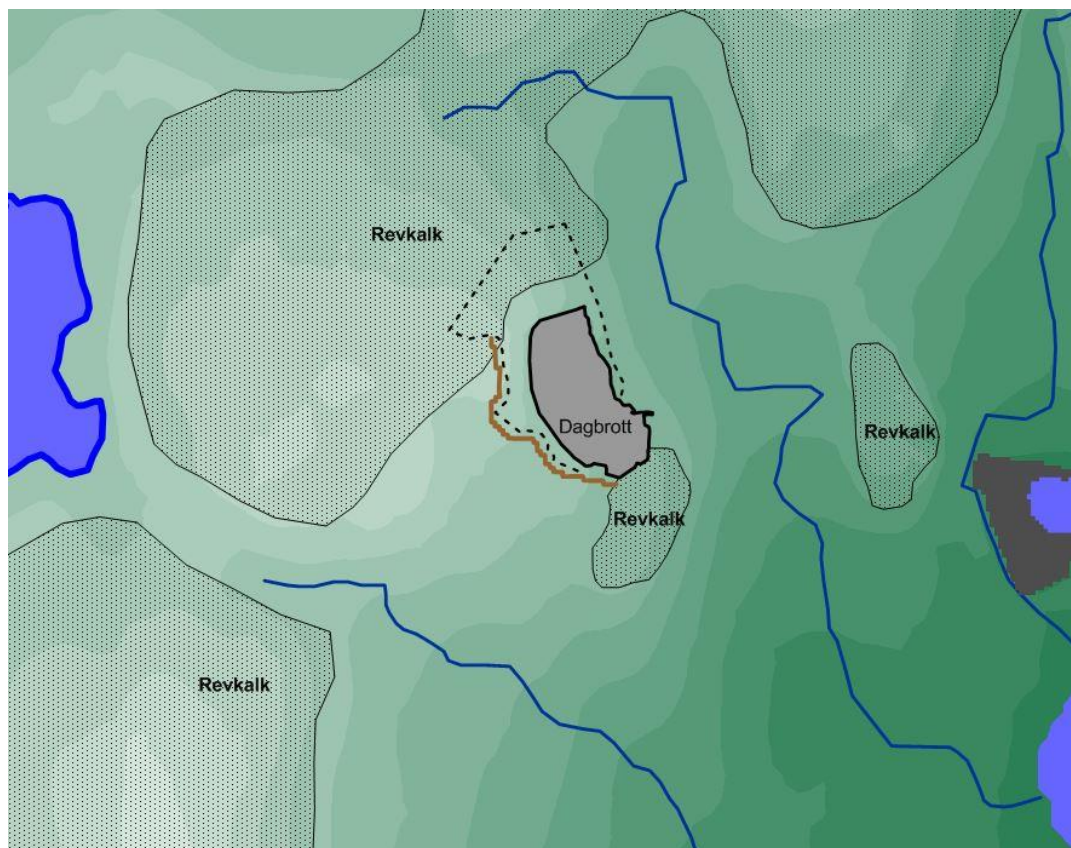
- Infiltration görs under manschett för att säkerställa att det infiltrerade vattnet endast infiltreras i djupt liggande vattenförande lager
- Mer än en brunn etableras för att fördela flödet i mer än en punkt och därmed kan kraftiga övertryck undvikas vid begränsad brunnskapacitet.

7.3 MODELLERING AV SKYDDSÅTGÄRDER

I modellen har olika utformningar av ridåinjektering, infiltrationsbrunnar och flöden studerats. Ovanstående beskrivning under hela kapitel 7 är ett resultat av detta arbete. Vidare är även alla beskrivningar under kapitel 8 som inkluderar ”med skyddsåtgärder, gjorda med nedan beskrivna utformning av skyddsåtgärderna. I Modellrapporten, se bilaga 3, redovisas även ytterligare alternativ med andra infiltrationsvolymerna utöver den i föreliggande rapport redovisade slutliga förslaget.

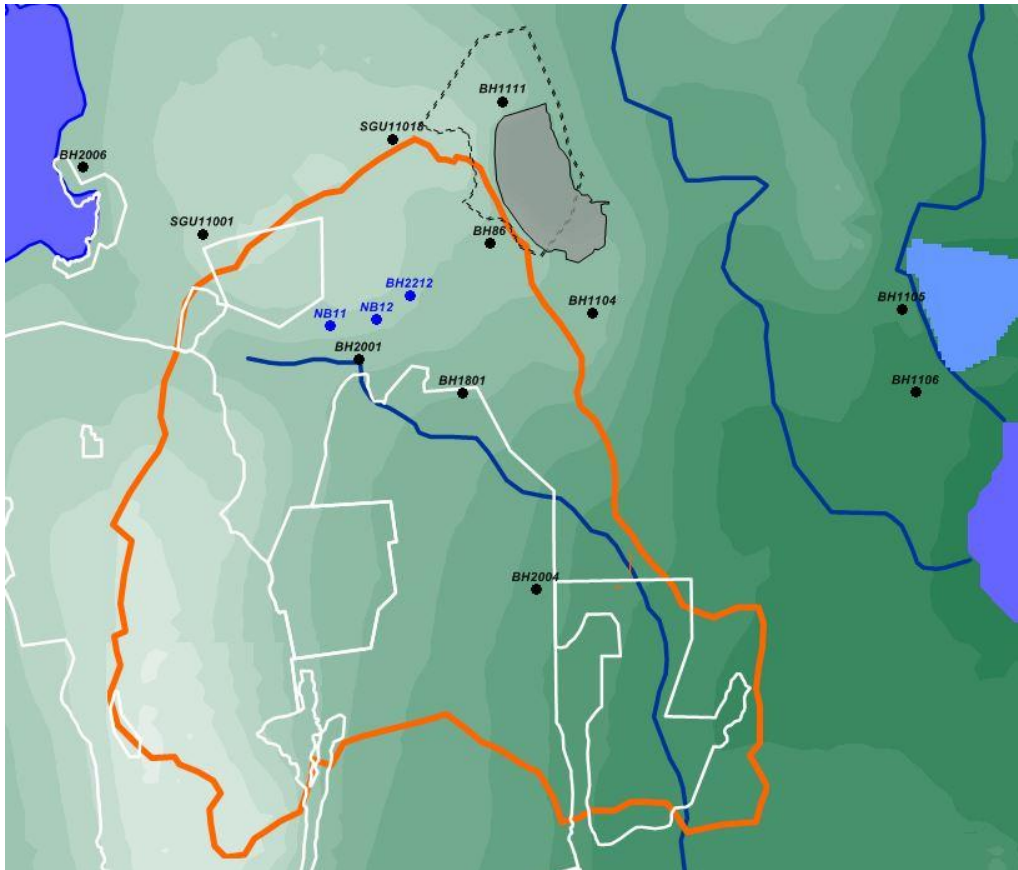
- Ridåinjekteringens utformning som simulerad i modellen redovisas i Figur 98 nedan. Utifrån fälttesterna föreslås den verkliga ridån följa tätkanten ytterligare åt öster, till täktens sydöstra hörn, för att även täta struktur vid revkroppens underkant. Använd

beskrivning av ridåinjektering är med andra ord konservativ för att inte överskatta effekten av åtgärden.



Figur 98. File hajdar-täkten med nuvarande storlek. Brun linje indikerar föreslagen linje för injektering. I modellen har injektering inkluderats längs denna linje. Injekteringslinjen sträcker sig mellan två revkalkskroppar, norr och söder om täkten. Punktstreckad linje markerar täktens storlek vid ansökt situation år 30.

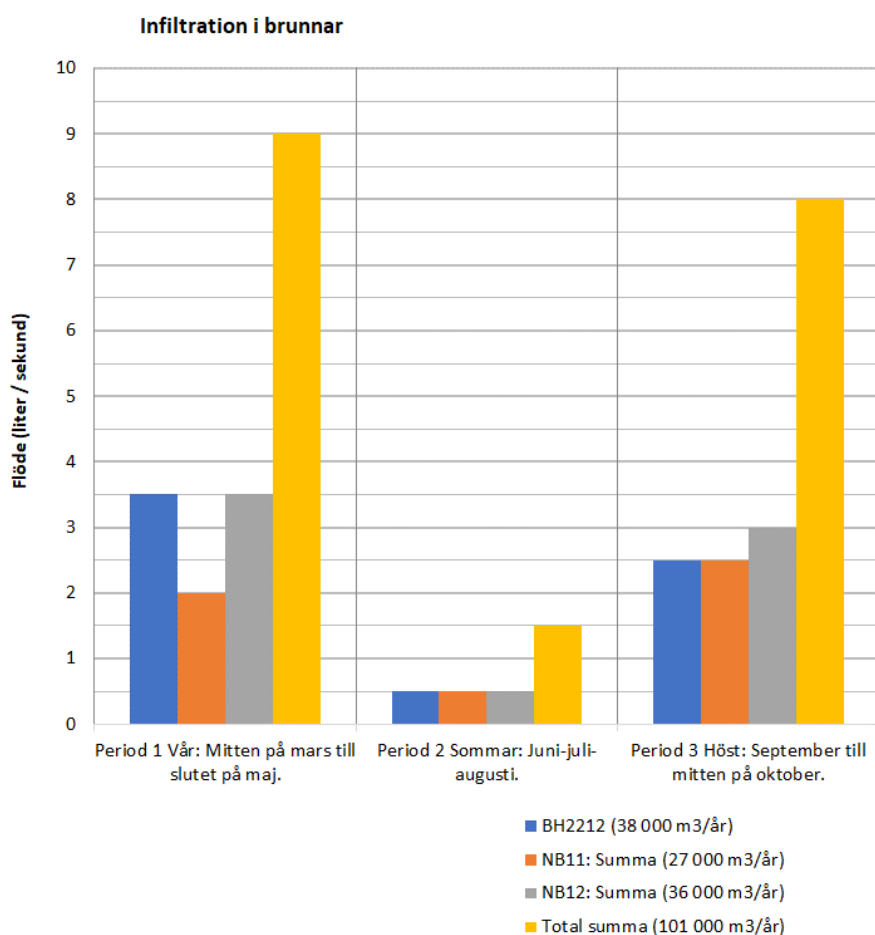
Ett lämpligt borrhål för infiltration är BH2212, som också har testats med infiltration av grundvatten i verkligheten. Detta borrhål har inkluderats i alla simulerade alternativ med infiltration. För ytterligare infiltrationskapacitet kan det krävas fler brunnar. Utöver borrhål BH2212 har två teoretiska brunnar inkluderats i modellen, NB11 och NB12. Nya infiltrationsbrunnar kan i verkligheten borraras i framtiden, t.ex. nära de infiltrationsbrunnar som har inkluderats i modellen (NB11 och NB12, se Figur 99, inom det område som utpekats i Figur 96). Brunnarnas exakta position är inte av avgörande betydelse, dock är de valda positionerna exempel på lämpliga områden. Att infiltrera nära det område som skall skyddas är naturligtvis en fördel.



Figur 99. Det lokala avrinningsområdet No.3 markerat med brandgul linje. Infiltrationsbrunnar markerade som blåa.

De i modellen infiltrerade volymerna infiltrationsbrunnarna framgår nedan av Figur 100 och Tabell 9. Volymen infiltrerat vatten per år den beräknade förlusten av vatten under vår-sommar-höst (40 000 m³/år) för det lokala avrinningsområdet No.3 + ytterligare volym om ca 1,5 ggr förlusten för att täcka för osäkerheter i beräkningarna. Dock matchar inte de månatliga volymerna exakt de beräknade förlusterna av vatten varje månad. Infiltrationens storlek är optimerad för att ge god effekt varje månad under växtsäsongen med fokus på påverkan under vår (april), sommar (juli) och höst (september). När infiltrationens påverkan ska optimeras, baseras bedömningarna på de av grundvattenmodellen beräknade påverkansområdena. När infiltrationen ger god effekt för dessa månader erhålls även god effekt för månaderna däremellan. För det studerade scenariot utan skyddsåtgärder är den uppskattade förlusten från mars månad till och med september månad för Område 3, ca 40 000 m³/år. Förlusten under vintern, som sker under en högvattensituation och dessutom inte under växtsäsongen, kompenseras inte med infiltration.

Under optimeringsarbetet har flera andra varianter med andra infiltrationsbrunnar, andra infiltrationsflöden och annorlunda fördelning över året studerats.



Figur 100 Infiltrationsflöde i infiltrationsbrunnar (Scenario -Sky5)

Tabell 9 Infiltrationsflöde i infiltrationsbrunnar (scenario Sky-5)

	Infiltration (liter/sekund)			
	BH2212	NB11	NB12	Totalt
Period 1 Vår: Mitten på mars till slutet på maj.	3.5	2	3.5	9
Period 2 Sommar: Juni-juli-augusti.	0.5	0.5	0.5	1.5
Period 3 Höst: September till mitten på oktober.	2.5	2.5	3	8

7.3.1 Flödesvägar från infiltrationsbrunnar

Infiltration av vatten i infiltrationsbrunnarna lyfter lokalt grundvattennivåerna och påverkar tydligt grundvattnets strömningsmönster, men infiltrationsbrunnarna kan inte förändra grundvattnets strömningsmönster i en större regional skala. Därför kommer vattnet som infiltreras i brunnarna att strömma i linje med det regionala flödesmönstret – från väster mot öster, från infiltrationsbrunnarna mot bergtäkterna och mot produktionsbrunnarna. Detta strömningsmönster har bekräftats av och visar god samstämmighet med spårämnesförsöket i borrhål BH2212, vilket beskrivs i kapitel 4.10.

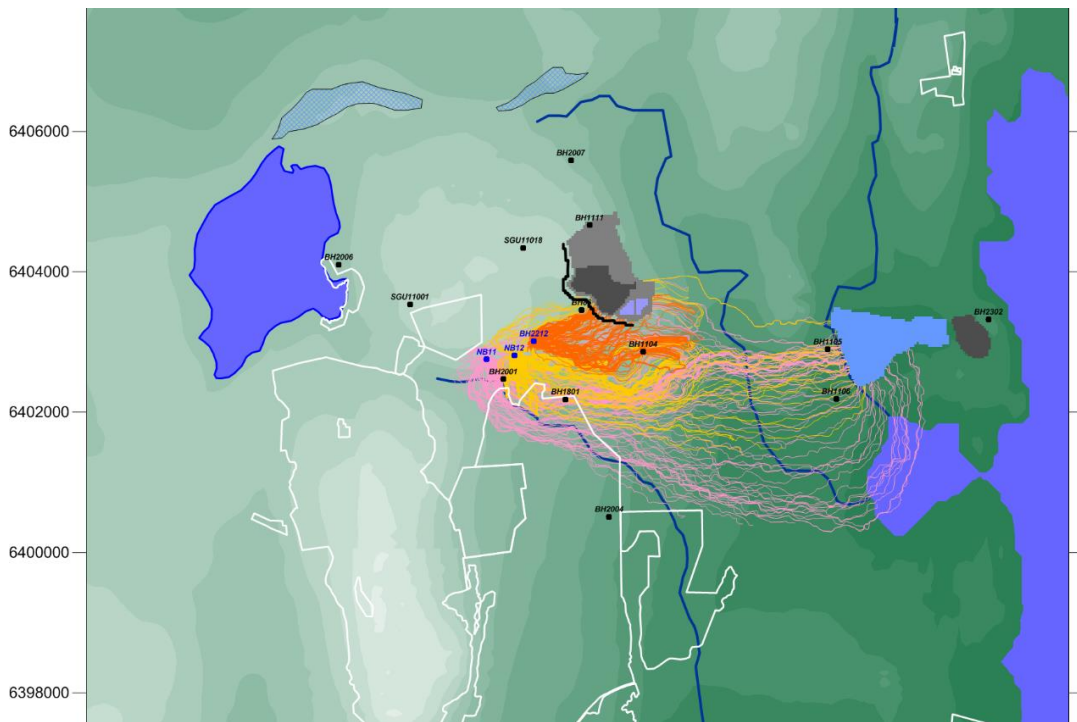
Flödesvägar beräknades genom partikelspårning i den upprättade modellen. Partiklarna och flödesvägarna initierades i de beräkningsceller som representerar infiltrationsbrunnarna, BH2212, NB11 och NB12. Partiklarna initieras slumpmässigt i de vattenförande lagren i infiltrationsbrunnarna. Partiklarna representerar inte en viss bestämd mängd vatten. Partiklarna följer det beräknade grundvattenflödet genom modellen och skapar därigenom flödesvägar. Partiklarna och flödesvägarna termineras när de når fram till markytan, bergtäkterna eller

kommunens produktionsbrunnar. Ingen dispersion har inkluderats i beräkningarna, förutom den naturliga spridningen av flödesvägarna som följer av modellens heterogena egenskaper.

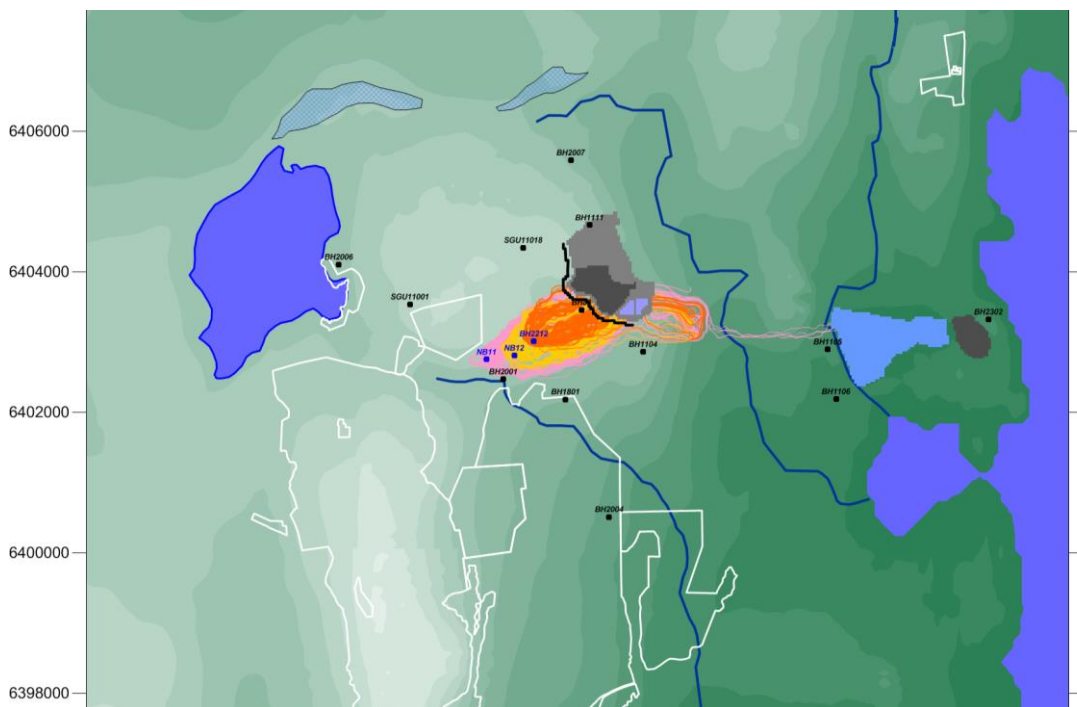
Simuleringar i modellen bekräftar resonemanget ovan. Genom infiltrationen av vatten i infiltrationsbrunnarna kommer grundvattennivåerna kring infiltrationsbrunnarna att höjas, vilket i sin tur trycker tillbaka påverkansområdet för berggrundvattnet (som orsakats av utökningen av File hajdar-täkten). Med infiltration av vatten i infiltrationsbrunnarna påverkas grundvattennivåerna i Natura 2000-områdena söder om File hajdar-täkten mindre av täktens utökning i jämförelse med en situation utan infiltrationsbrunnar.

Som nämnts ovan kan infiltrationsbrunnarna inte förändra grundvattnets strömningsmönster i en större regional skala. En analys i den upprättade modellen av beräknade flödesvägar från infiltrationsbrunnarna visar att vattnet som infiltreras i brunnarna strömmar mot (berg)täkterna och mot produktionsbrunnarna. Av det infiltrerade vattnet är det främst vatten från den västligaste brunnen NB11 som strömmar under den nordligaste delen av N2000 under vår och höstförhållande. Flödesvägarna fortsätter dock ut vidare mot berg- och vattentäkter. Inget vatten strömmar långt in i Natura 2000-områdena. Modellen indikerar att en viss mängd av det infiltrerade vattnet strömmar ut i närområdet kring brunnarna då de naturliga grundvattennivåerna är höga, t.ex. under april och september, men ingen sådan utströmning sker vid låga grundvattennivåer, t.ex. under juli. Om man så önskar kan ett sådant utflöde vid markytan nära infiltrationsbrunnarna åtgärdas (i verkligheten och i modellen) genom att infiltrerade volymer korrigeras eller genom att infiltrationen fokuseras på lite större djup i borrhålen.

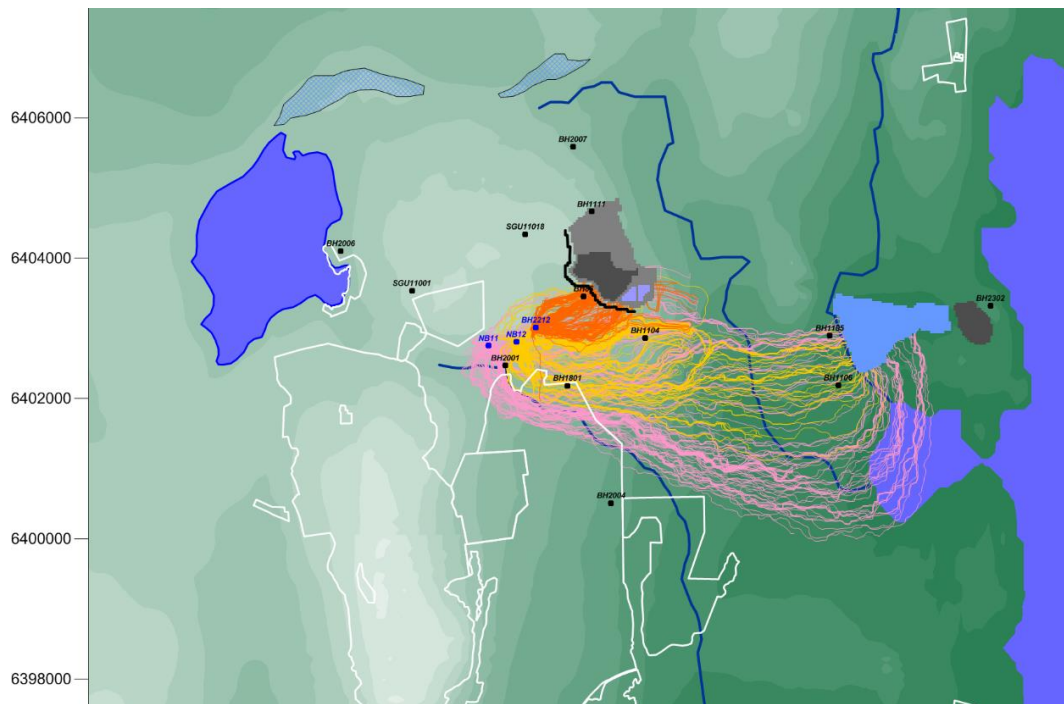
Nedan redovisas resultaten för år 8, Figur 101 (vår), Figur 102 (sommar) och Figur 103 (höst). Resultaten visualiseras även i 3D-vy för vårsituationen i Figur 104. Denna figur visar hur grundvattenflödet fördelar sig i de olika vattenförande lagren. Figuren visar flödesvägar från infiltrationsbrunn BH2212. Notera i den nedre av de två figurerna hur flödesvägarna tenderar att förekomma i subhorisontella vattenförande lager. Bergets lagrade struktur, med olika subhorisontella vattenförande lager på olika djup, illustreras tydligt i den nedre figuren av de horisontella blå linjerna. Även de slumpmässigt (stokastiskt) förekommande vertikala strukturerna framgår i figuren, som de vertikala blå linjerna mellan de subhorisontella vattenförande lagren.



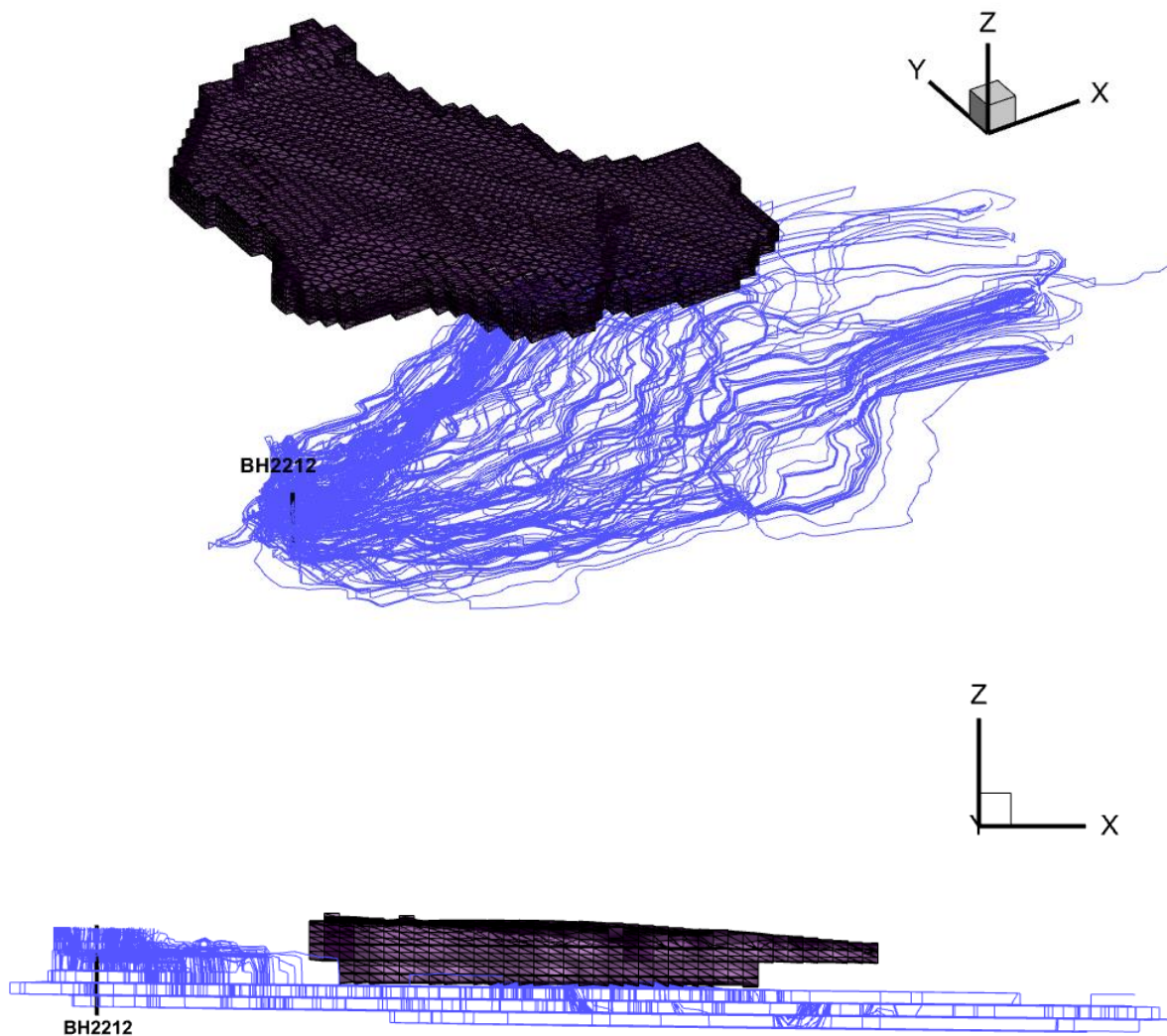
Figur 101 Flödesvägar från tre infiltrationsbrunnar, år 8, april Flödesvägar från BH2212-orange, NB12-gul, NB11-rosa (Sc8G1R4-VbG1Vam265-Sky5).



Figur 102 Flödesvägar från två infiltrationsbrunnar, år 8, juli. Flödesvägar från BH2212-orange, NB12-gul, NB11-rosa (Sc8G1R4-VbG1Vam265-Sky5)



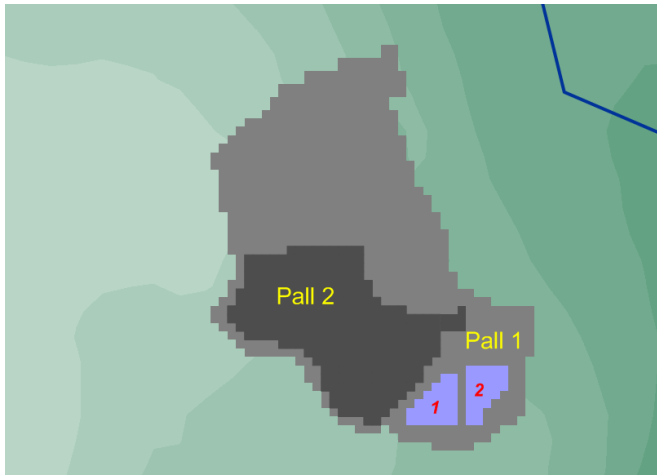
Figur 103 Flödesvägar från tre infiltrationsbrunnar, år 8, september. Flödesvägar från BH2212-orange, NB12-gul, NB11-rosa (Sc8G1R4-VbG1Vam265-Sky5)



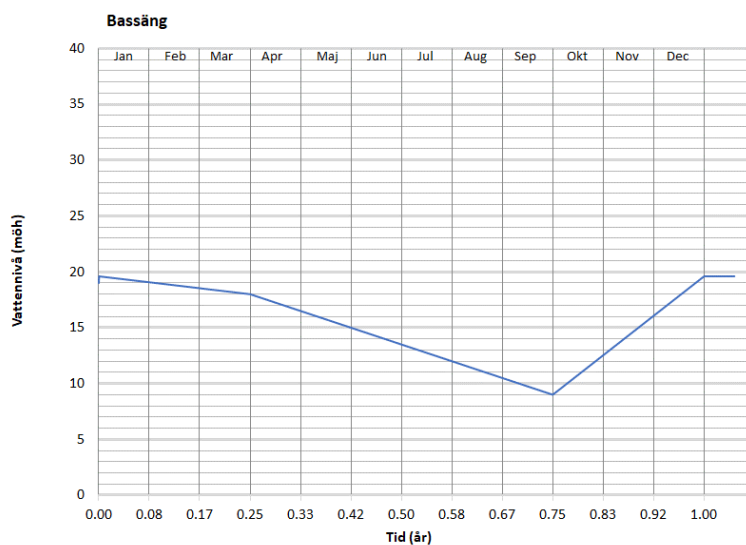
Figur 104 Visualisering av flödesvägar i 3D från BH2212, File hajdar-täkten av förväntad storlek år 8, inga skyddsåtgärder, april månad. Notera i den nedre figurhalvan hur flödesvägarna tenderar att förekomma i de vattenförande lagren. Bergets lagrade struktur, med olika vattenförande lager på olika djup, illustreras därmed tydligt. Den vertikala skalan i figuren är 3 gånger större än den horisontella skalan.

7.3.2 Vattenmagasinen i File hajdar-täkten

Heidelberg avser anlägga 1-4 magasin med en total lagringsvolym på ca 600 000 m³. Magasinen ska brytas ut i södra delen av File hajdar-täkten. Vattennivåerna i magasinerna kommer att variera under året, med höga nivåer på vintern och låga nivåer i slutet på sommaren. Vattennivån i magasinerna kommer dock att hållas över basnivån på pall 2 (+5 m), botten är därför planerad till ca +9 m. Därmed kommer vattenläckage från magasinerna genom berget strömma mot pall 2. Vattenmagasinen är inkluderade i modellen för de framtida scenarierna (se Figur 105), magasinerna är desamma för alla studerade framtida situationerna. De simulerade vattennivåerna i magasinerna visas i Figur 106, dessa nivåer är föreskrivna i modellen och inte resultat av simuleringar. Analyser i den upprättade modellen, som baseras på partikelspårning, bekräftar att läckagevatten från magasinerna strömmar mot pall 2. De totala läckagen från magasinerna bedöms vara i storleksordningen 25 000 m³/år. Läckagen varierar endast mycket ringa för de olika studerade scenarierna och tåktens successiva utökning (dränerad tåkt). Läckagen från magasinerna blir en del av vattnet som uppsamlas i pall 2.



Figur 105. De två vattenmagasinen i File hajdar-täkten för situationen vid år 8. Magasinen är markerade med blå färg, och numrerade som 1 och 2. Magasinen är desamma för alla studerade framtida situationer.



Figur 106. Simulerade vattennivåer i vattenmagasinen i File hajdar-täkten.

8 PÅVERKAN PÅ OMGIVNINGEN

Med hjälp av den upprättade numeriska grundvattenmodellen (se kapitel 6) har den ansökta verksamhetens framtida påverkan på omgivningen studerats. Syftet med modellstudier är vanligtvis att förutsäga vad som i framtiden kommer att hända med ett studerat naturligt system. Syftet med denna studie är att med hjälp av en modell beräkna hur grundvattensituationen i det studerade området påverkas av den ansökta utökningen av File hajdar-täkten. Dessutom beräknas hur grundvattensituationen påverkas av att täkterna i framtiden vattenfylls. Modellen är kalibrerad utifrån en medelsituation baserat på grundvattenförhållandena 2021. Utöver att beskriva hur förhållandena är vid slutet av ansökt tillståndstid efter 30 år simuleras den successiva utvecklingen från utgångsläget (när nuvarande tillstånd löper ut), efter 8 år, 20 år respektive ca 70-90 år efter att det ansökta tillståndet tagits i anspråk. Simuleringarna är gjorda för de olika grundvattenförhållanden som råder under året, representerat med olika simuleringar för månaderna april, juli, september och december.

Simuleringarna är även gjorda med respektive utan skyddsåtgärder. Under framtagandet av denna studie har flera olika utformningar av skyddsåtgärder studerats. Här redovisade och använda är den utformning som visats ge bäst effekt.

Nuvarande förhållanden är simulerade med nuvarande klimat medan framtida scenarion är modellerade med av SMHI beräknat framtida klimat, se bilaga 8.

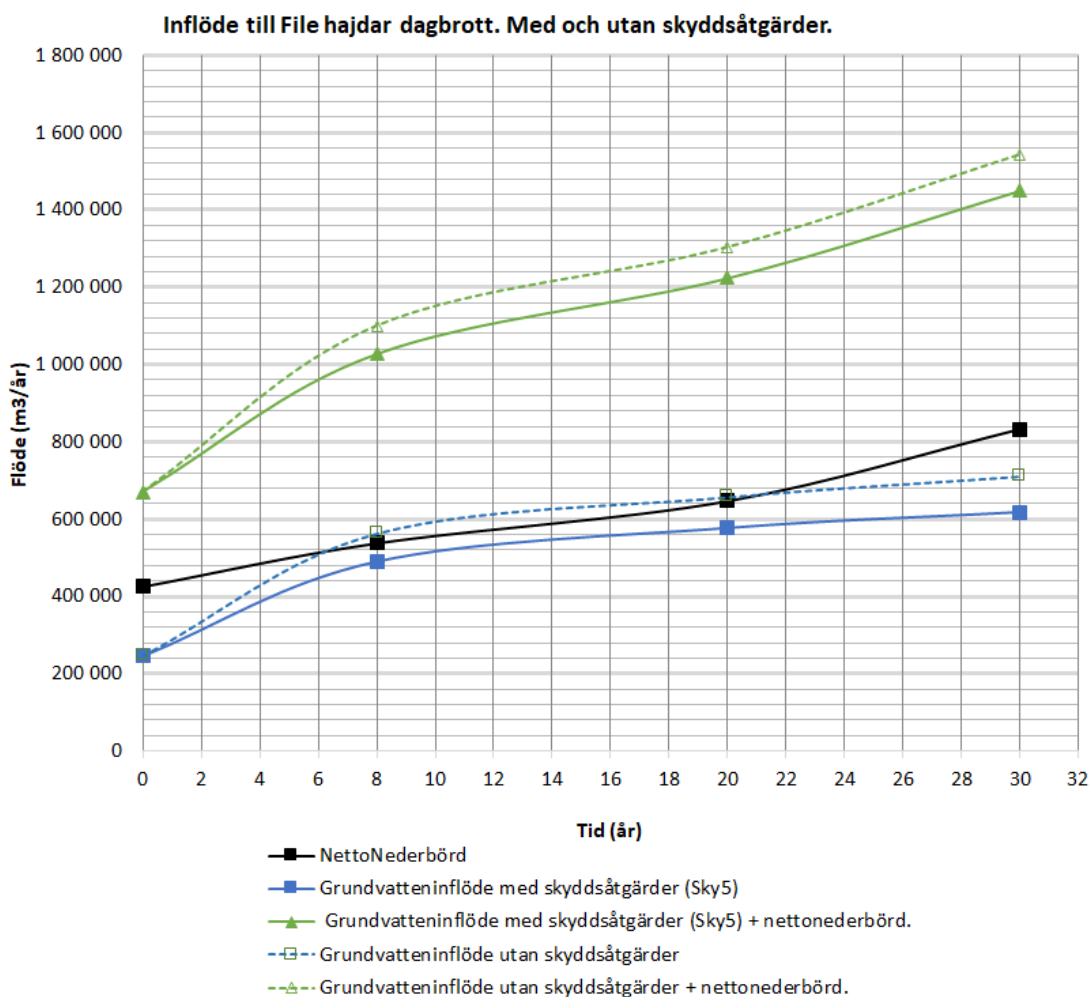
Totalt har ett mycket stort antal simuleringar genomförts. I föreliggande rapport redovisas de scenarion som bedömts mest relevanta för att beskriva en framtida påverkan i olika aspekter. För en mer komplett sammanställning av olika simuleringar hänvisas till Modellrapport i Bilaga 3.

8.1 VATTENINFLÖDE TILL TÄKTERNA

8.1.1 Vatteninflöde till File hajdar-täkten

Den ansökta verksamheten innebär att täkten kommer förbli dränerad fram till dess att brytningen avslutas. Beräkningar av inflödet till File hajdar-täkten har utförts för varje månad för ett normalår och summerats för att erhålla årsvärden. Den beräknade successiva utvecklingen av inflödet till File hajdar-täkten för situationer med respektive utan skyddsåtgärder visas i Figur 107.

Inflödet till File hajdar-täkten efter 30 års verksamhet, *utan* skyddsåtgärder, beräknas till totalt ca 1 540 000 m³/år, varav cirka 830 000 m³/år från direkt nettonederbörd och ca 710 000 m³/år från grundvatten. *Med* skyddsåtgärder i form av injektering samt två infiltrationsbrunnar beräknas inflödet till File hajdar-täkten bli ca 1 450 000 m³/år.



Figur 107. Den beräknade successiva utvecklingen av inflödet till File hajdar-täkten, för situationer med och utan skyddsåtgärder. Beräkningarna har utförts för varje månad för ett normalår, och summerats för att erhålla årsvärden.

Av Figur 107 framgår att den stora förändringen i grundvatteninflöde sker när den djupa pall 2 etableras i tåkten (+5 m), och det görs sannolikt inom de första 8 åren. Som framgår av figuren är grundvatteninflödet ungefär lika stort som nettonederbörden. När verksamheten avslutas efter 30 år kommer tåkten att vattenfyllas och inflödet minska beroende på vattennivå i tåkten.

8.1.2 Vatteninflöde till Västra och Östra brottet

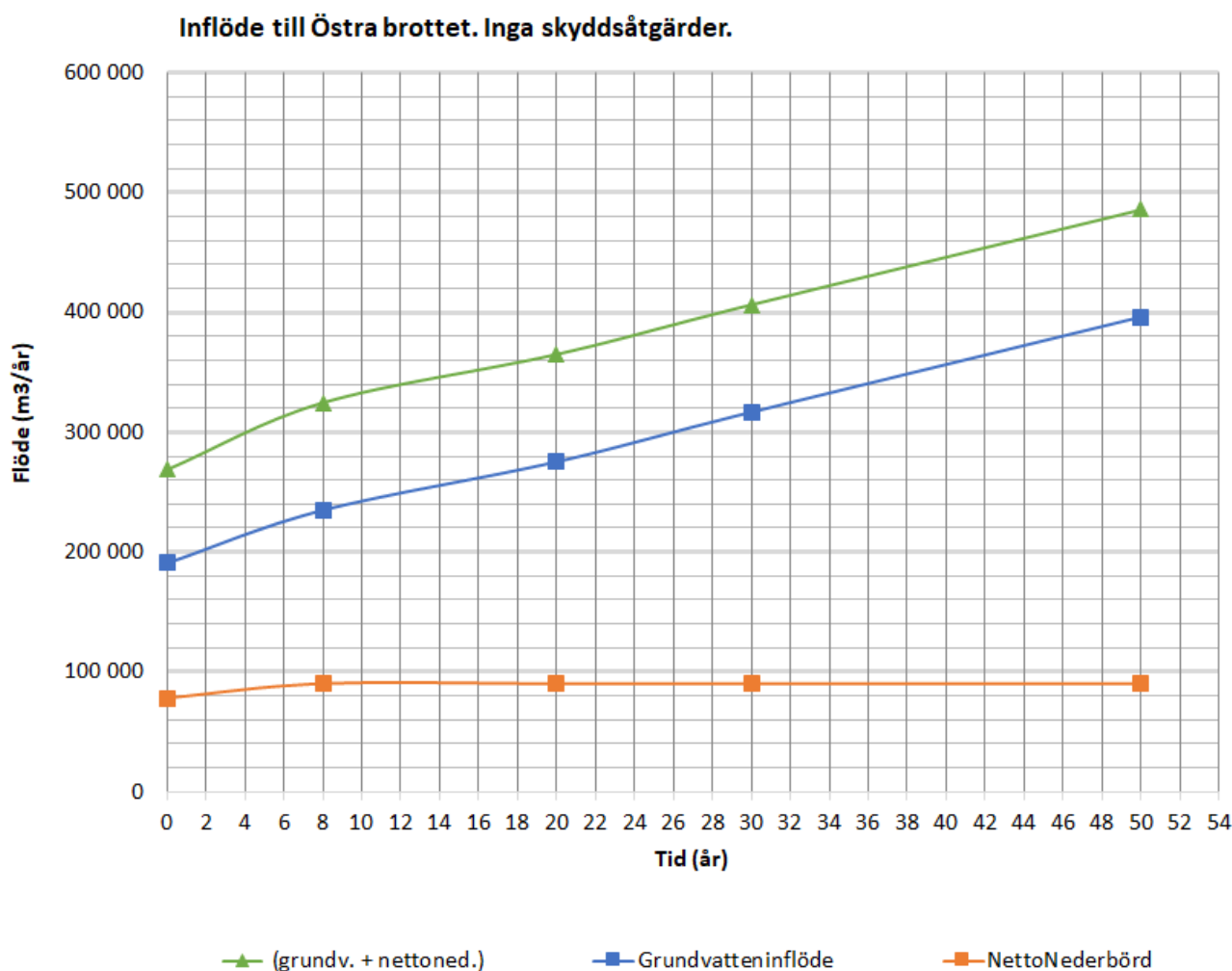
Den ansökta verksamheten innebär att Östra brottet kommer förbli dränerad under obegränsad tid. Västra brottet kommer länshållas under cirka 8 år.

Två större vägtunnlar och en mindre transporttunnel genomskär bergplinten mellan Västra och Östra brotten. Tunnlarna kommer att förseglas med mycket lågpermeabla tunnelpluggar av betong. Ridåinjektering kommer också att utföras i själva bergplinten. Detta beskrivs i större detalj i ansökans bilaga A4. I den använda grundvattenmodellen finns dessa tunnlar samt den planerade pluggningen och injekteringen inkluderad.

Inflödet till Östra brottet mäts inte enskilt i dagsläget utan endast som ett summaflöde av vattenbortledningen från Västra och Östra brottet. Inflödet till Västra brottet förväntas vara nära oförändrat under de inledande 8 åren innan länshållningen upphör. Ridåinjekteringen som genomförts längs den västra kanten på Västra brottet förväntas förvisso ha en dämpande effekt på inflödet, men denna kan vara svåruppmätt givet den stora mellanårsvariationen. Av denna anledning antas inflödet uppgå till vad som redovisats i 4.11 under de inledande 8 åren.

Inflödet till Östra brottet beror till hög grad på vattennivån i Västra brottet, som efter år 8 antas öka stadigt. Grundvattenflödet från Västra brottet till Östra brottet kommer att öka allteftersom vattennivån i Västra brottet stiger. Det bedöms ta cirka 30–40 år för att vattenfylla Västra brottet, därefter ökar inte inflödet till Östra brottet. De beräknade inflödet utgår från de vattennivåer i Västra brottet som beskrivs i kapitel 8.3. Om vattennivåerna i Västra brottet uppnås tidigare eller senare än vad som beskrivs i kapitel 8.3 uppnås även motsvarande flöde i motsvarande takt.

Det beräknade inflödet till Östra brottet visas Figur 108. Som framgår av figuren är grundvatteninflödet tydligt större än nettonederbörden. Den beräknade ökningen av grundvatteninflödet under de första åtta åren beror på den eventuella utjämningen och utökningen av markytan i Östra brottet. Delar av detta vatten är vatten som i dagsläget når Västra brottet.



Figur 108 Den beräknade successiva utvecklingen av inflödet till Östra brottet. Beräkningarna har utförts för varje månad för ett normalår, och summerats för att erhålla årsvärden.

8.2 GRUNDVATTENNIVÅER OCH PÅVERKANSOMRÅDEN

Påverkan på de omgivande grundvattennivåerna beräknas genom att grundvattennivåerna för olika situationer subtraheras från varandra och skillnaderna analyseras.

Påverkansområdet består dels av ett tillströmningsområde, inom vilket grundvattnets strömningsriktning blir mot tälkten, dels av ett indirekt påverkansområde, inom vilket grundvattennivåerna sänks men grundvattnet inte nödvändigtvis strömmar mot tälkten.

Det indirekt påverkansområdet har i detta projekt beräknats utifrån en förändring i grundvattentryck på 1 m och 0,3 m. Mindre förändringar än ca 1 m går inte att i verkligheten särskilja från den naturliga variationen i området, vilken är så stor som 20 m (eller större), se kapitel 5.4.3.

Påverkansområden definieras av gränsvärden. Varje valt gränsvärde producerar en linje, innanför linjen är påverkan större eller mindre än det valda gränsvärdet. De beräknade linjerna uppvisar ofta ett komplicerat mönster med isolerade öar. Detta komplicerade mönster följer av det studerade systemets heterogena egenskaper och grundvattnets tre dimensionella flödesmönster med stora årtidsbundna variationer.

8.2.1 Indirekt påverkansområde

Grundvattennivåerna kommer att avsänkas då File hajdar-tälkten görs större.

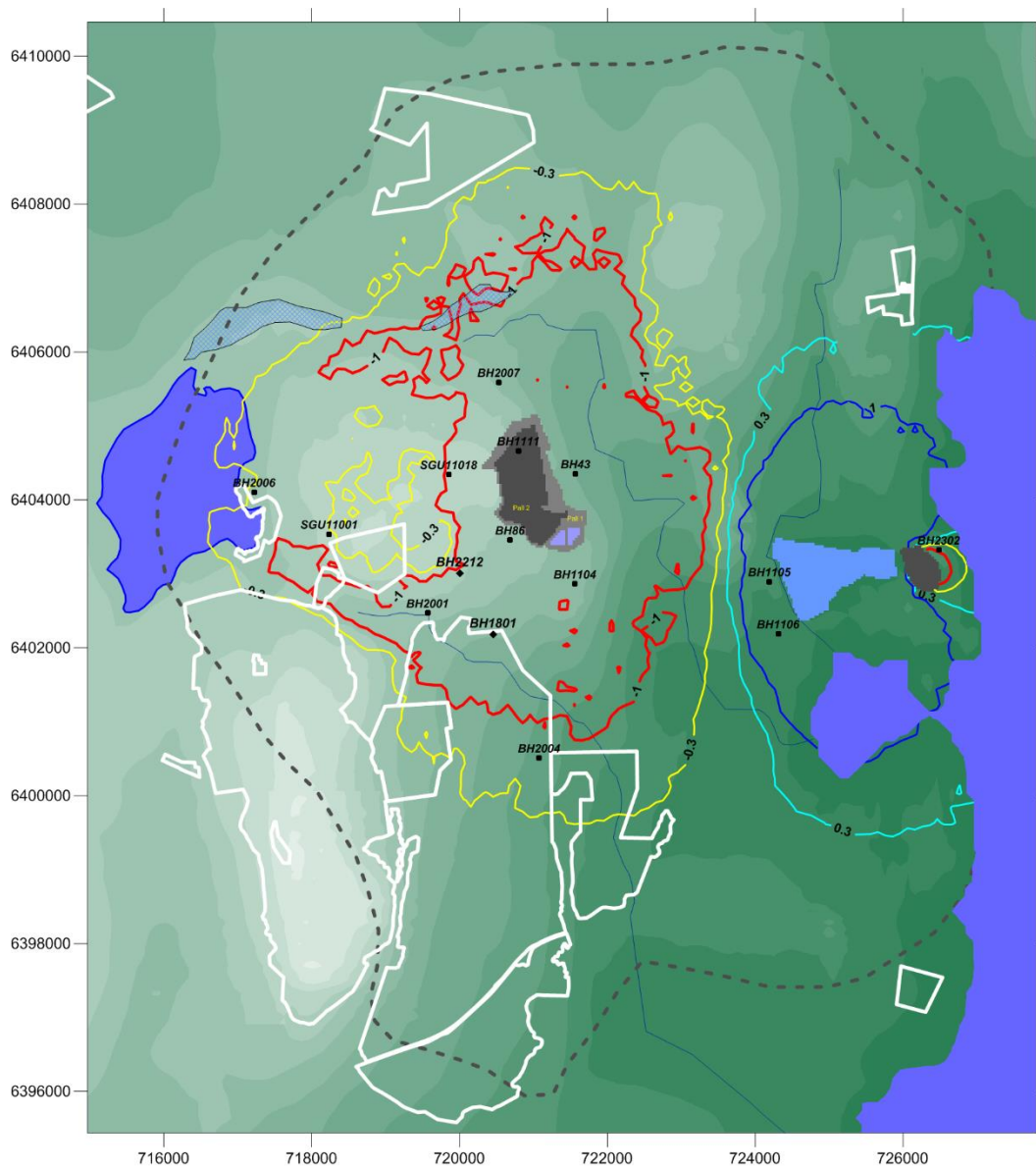
Grundvattennivåerna i närheten av Västra brottet kommer samtidigt att höjas då Västra brottet fylls med vatten.

Indirekt påverkansområde för grundvattennivåer i berg har beräknats för högvattensituationen (december) och för lågvattensituationen (juli). Beräkningar har även gjorts för vår (april) och höst (september), som bedöms utgöra de mest betydelsefulla perioderna för flora och fauna. De nedan redovisade påverkansområdena avser situationen år 30, dvs. då File hajdar-täkten är fullt utökad och fortsatt dränerad, samtidigt som Västra brottet har fått vattenfyllas under drygt två decennier.

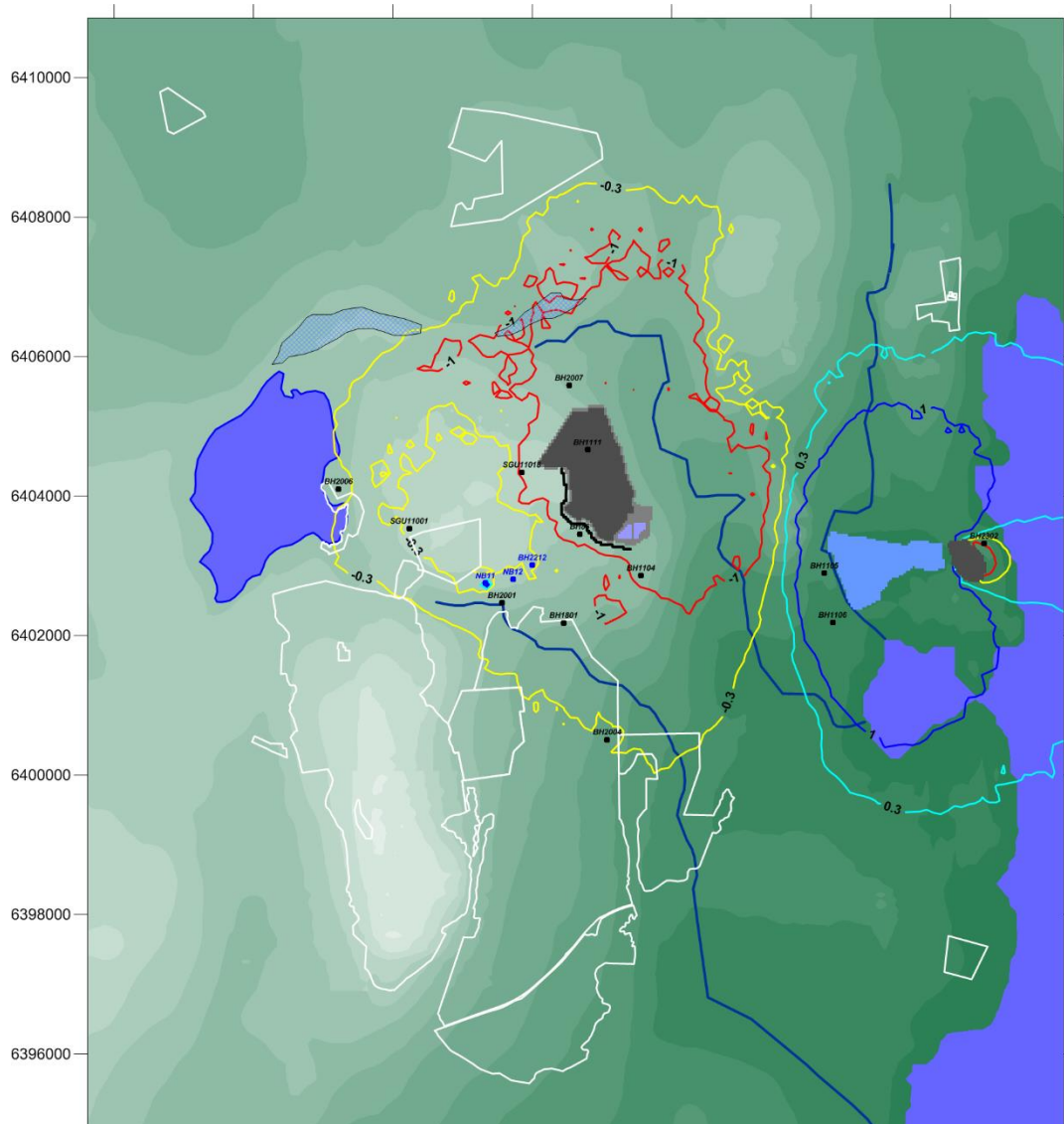
8.2.1.1 December

I Figur 109 (utan skyddsåtgärder) och Figur 110 (med skyddsåtgärder) syns påverkan under högvattensituation som en sänkning av grundvattnets trycknivå runt runt File hajdar-täkten på grund av den utökade brytningen. Runt Västra brottet syns en höjning av grundvattnets trycknivå på grund av vattenfyllnaden av den täkten. Situationen utan skyddsåtgärder, under hövattenförhållanden, skiljer sig inte särskilt mycket mot övriga året om än med något mindre influensavstånd (redovisas i kommande kapitel). Detta avser alltså påverkan i absoluta tal är nivåerna mycket högre vintertid.

Med skyddsåtgärderna infiltration och injektering begränsas påverkan kraftigt framförallt åt söder men i viss mån även åt väster. Detta innebär att påverkan kan begränsas till att endast uppgå till 0,3 m eller strax däröver i de norra delarna av Natura 2000-områdena söder om File hajdar-täkten. Det bör påpekas att det inte pågår någon infiltration under den här tiden av året så den begränsade påverkan är helt en effekt av ridåinjekteringen. Ridåinjekteringen har störst effekt vid höga vattennivåer.



Figur 109. Påverkansområde i december månad i berg efter 30 år, utan skyddsåtgärder och med klimateffekter. Gul linje motsvarar en sänkning av grundvattnets trycknivå med 0,3 m, röd 1m. Ljusblå linje motsvarar en höjning av grundvattnets trycknivå med 0,3 m, mörkblå 1m. Den yttre gråstreckade visar avgränsningen för samrådsretsen. Vit linje Natura 2000-områden



Figur 110. Påverkansområde i december månad i berg efter 30 år, med skyddsåtgärder och med klimateffekter. Gul linje motsvarar en sänkning av grundvattnets trycknivå med 0,3 m, röd 1m. Ljusblå linje motsvarar en höjning av grundvattnets trycknivå med 0,3 m, mörkblå 1m. Vit linje Natura 2000-områden

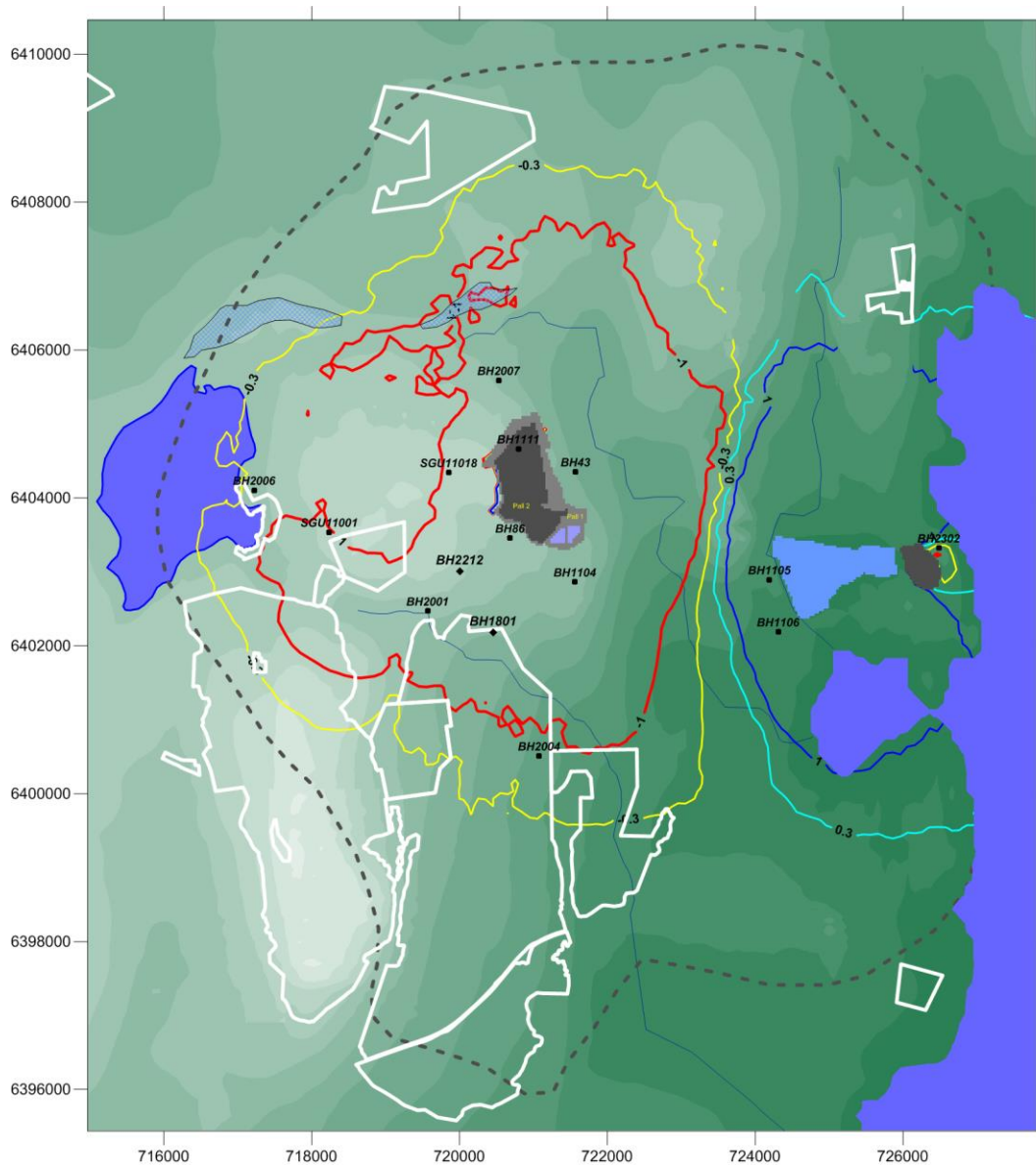
8.2.1.2 Juli

I Figur 111 (utan skyddsåtgärder) och Figur 112 (med skyddsåtgärder) syns påverkan under lågvattensituationen som en sänkning av grundvattnets trycknivå runt File hajdar-täkten på grund av den utökade brytningen. Runt Västra brottet syns en höjning av grundvattnets trycknivå på grund av vattenfyllnaden av den täkten.

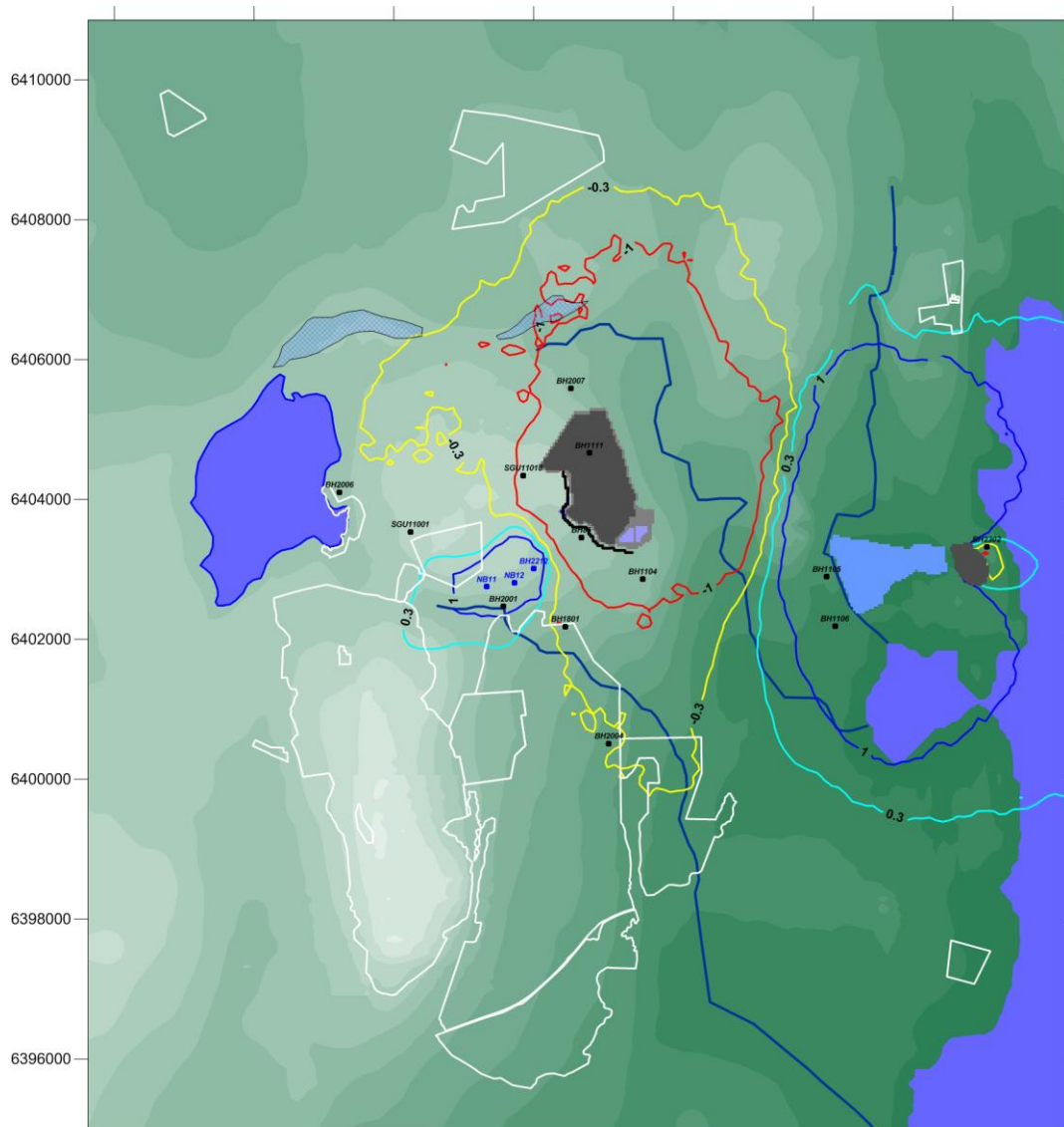
Sommartid, utan skyddsåtgärder, sträcker sig påverkansområdet i berg i nordlig och sydlig riktning ca 2,5 km (räknat med 1 m avsänkning) eller 3,5 km (räknat med 0,3 m avsänkning) från File hajdar-täkten. Åt väster är påverkan mycket mindre till följd av avsaknaden av de långa kontinuerliga subhorisontella lagren i revkalkstenen till skillnad från märgelstenen. En liten påverkan på 0,3–1 m kan dock förväntas framförallt i djupt liggande lager på upp till ca 3,5–4 km avstånd. Åt öster begränsas påverkansområdets utbredning till ca 1,5 km oavsett om man betraktar 0,3- eller 1 m- kurvan. I denna riktning syns effekten av de stigande vattennivåerna i Västra brottet vilket istället höjer grundvattennivåerna i ungefär motsvarande grad som sänkningen från File hajdar-täkten. Norr och söder om Västra brottet höjs grundvattennivåerna på upp till ca 3,5 km avstånd. Väster om Västra brottet möts den negativa påverkan från File hajdar-täkten med den positiva påverkan från Västra brottet ca 1 km väster om Västra brottet.

Detta scenario illustrerar den situation då den ansökta verksamheten har som störst påverkan på grundvattennivåerna. Scenariot innebär en avsänkning av grundvattennivåerna i berget under de norra delarna av Natura 2000-områdena Hejnum Kallgate, Kallgatburg och Bojsvätar. Påverkan når dock inte så långt norrut som till Forsviden Natura 2000-område och påverkar inte heller Tingstädeåsens grundvattenförekomst.

Med skyddsåtgärderna infiltration och injektering begränsas påverkan kraftigt framförallt åt söder och åt väster. Detta innebär att påverkan i stort sett kan undvikas i Natura 2000-områdena i söder. Påverkansområdet (0,3 m avsänkning) når den norra delen av Bojsvätar Natura 2000-områden. Infiltrationen kan sannolikt optimeras för att undvika även en sådan teoretisk påverkan. Men eftersom en minimal påverkan på trycknivån djupt nere i berget saknar betydelse för naturvärdena på markytan har inget vidare arbete lagts på en sådan optimering. Dessutom sammanfaller området i norra Bojsvätar i huvudsak med det område som planeras få ett tillskott av ytvatten och vatten i jordlagren pumpat från täkten uppströms den s.k. Vintersjön vilket ligger uppströms i samma avrinningsområde. Infiltrationen i jord beskrivs ytterligare i den hydrogeologiska utredningen (ansökningsbilaga B6) samt dess påverkan på Natura 2000-områden i Bilaga B7.



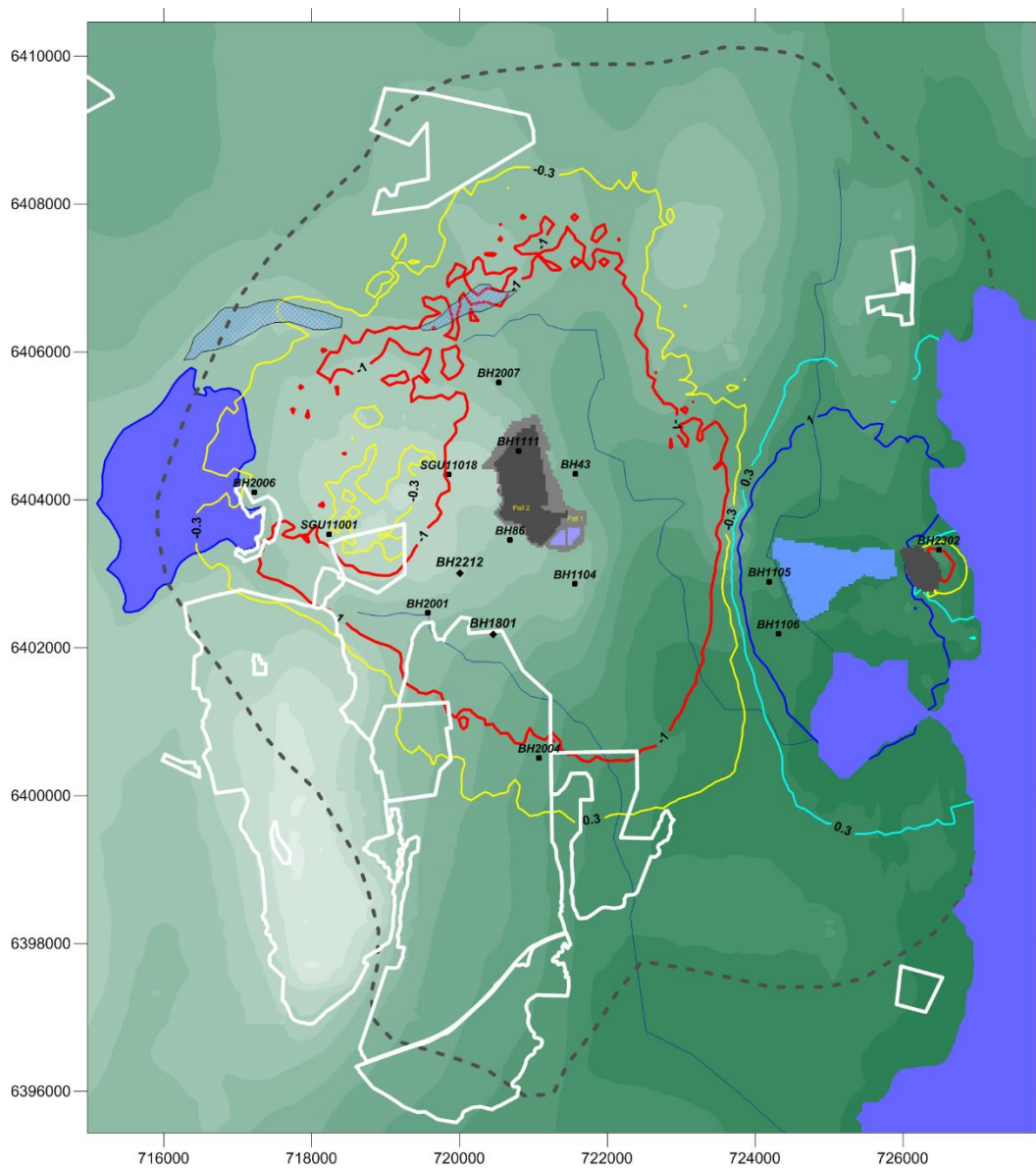
Figur 111. Påverkansområde i juli månad i berg efter 30 år, utan skyddsåtgärder och med klimateffekter. Gul linje motsvarar en sänkning av grundvattnets trycknivå med 0,3 m, röd 1m. Ljusblå linje motsvarar en höjning av grundvattnets trycknivå med 0,3 m, mörkblå 1m. Den yttre gråstreckade visar avgränsningen för samrådskretsen. Vit linje Natura 2000-områden



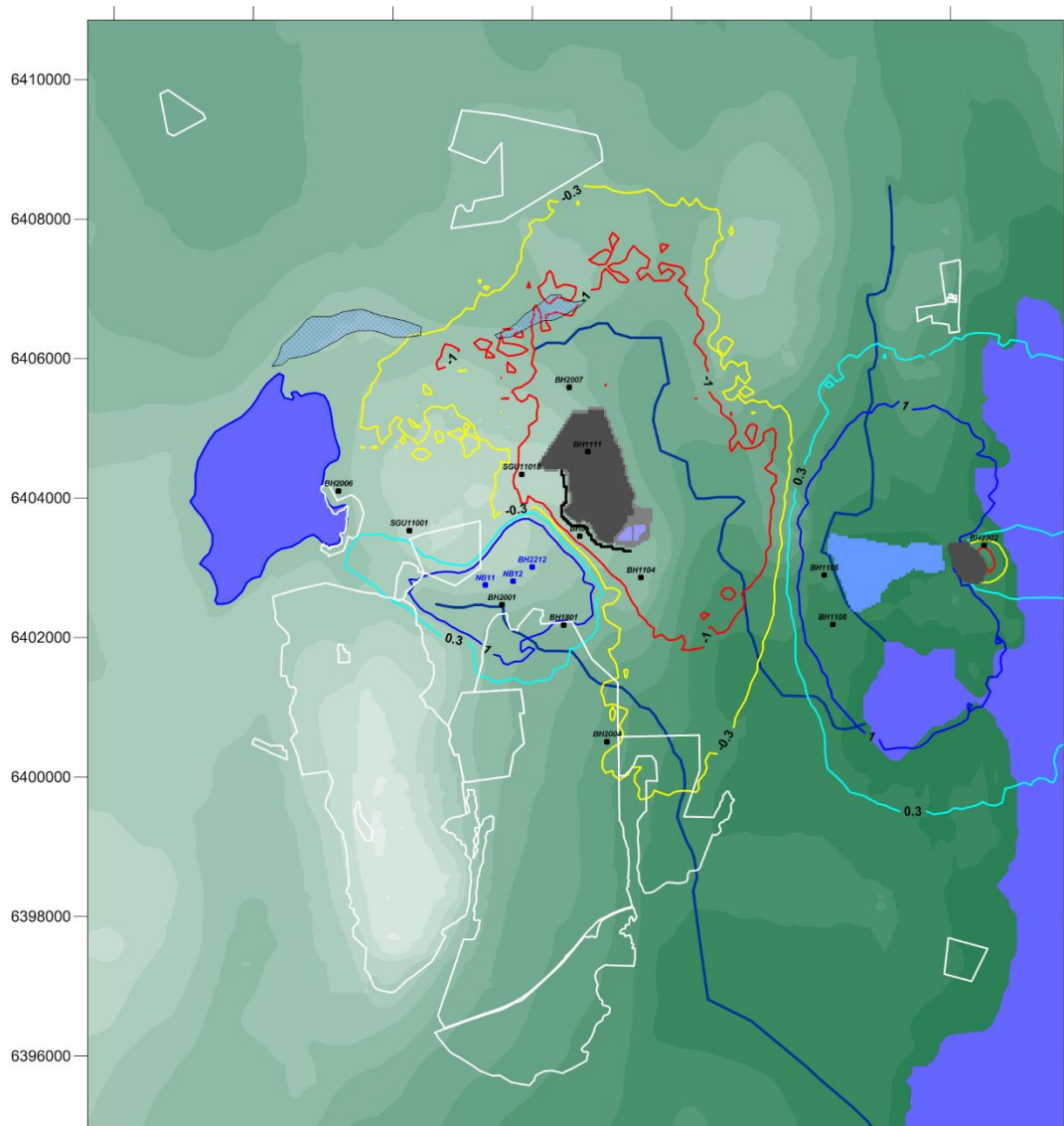
Figur 112. Påverkansområde i juli månad i berg efter 30 år, med skyddsåtgärder och med klimateffekter. Gul linje motsvarar en sänkning av grundvattnets trycknivå med 0,3 m, röd 1m. Ljusblå linje motsvarar en höjning av grundvattnets trycknivå med 0,3 m, mörkblå 1m. Vit linje Natura 2000-områden

8.2.1.3 April

Utan skyddsåtgärder (Figur 113) liknar vårens påverkansområde i hög grad vintersituationen Figur 109. Med skyddsåtgärder (Figur 114) begränsas påverkansområdet kraftigt. Påverkansområdena påminner mycket om sommarsituationen med skyddsåtgärder Figur 112, om än med något större påverkan i östlig riktning då effekten av Västra brottets vattenfyllnad blir mindre när grundvattennivåerna är högre. Området med höjda grundvattennivåer blir relativt stort i detta scenario och sträcker sig relativt långt i västlig riktning. Området med avsänkta grundvattennivåer beror inte bara på täktens utökning, utan även förväntade klimateffekter. De förväntade klimateffekterna förväntas ge den största minskningen i nettonederbörd för just april månad vilket innebär att klimateffekterna får större påverkan på dessa simuleringar jämfört med simuleringarna för övriga månader. I Bilaga 3 redovisas simuleringar även utan klimateffekter samt med en mindre infiltration (40 000 m³/år).



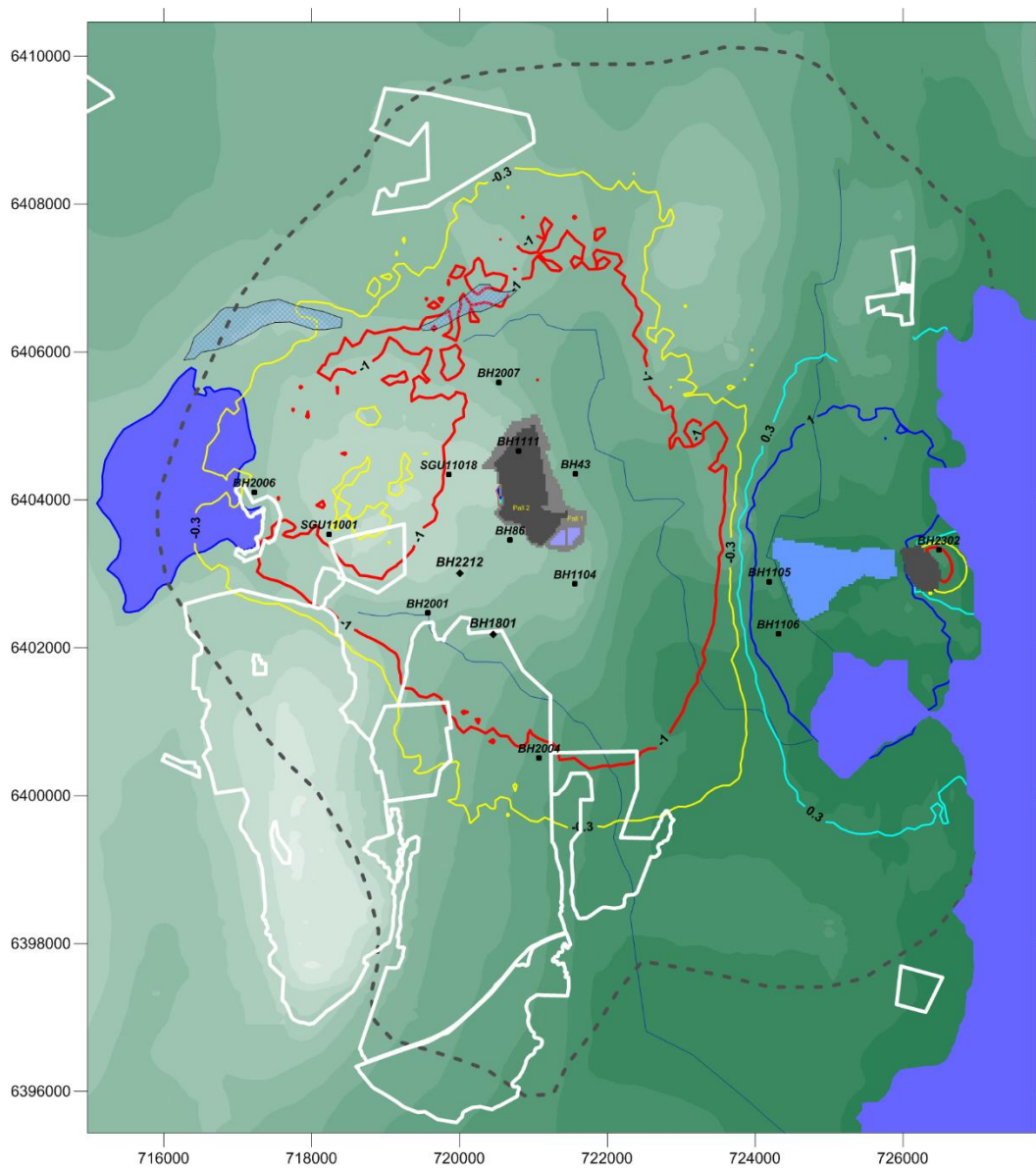
Figur 113 Påverkansområde i april månad i berg efter 30 år, utan skyddsåtgärder och med klimateffekter. Gul linje motsvarar en sänkning av grundvattnets trycknivå med 0,3 m, röd 1m. Ljusblå linje motsvarar en höjning av grundvattnets trycknivå med 0,3 m, mörkblå 1m. Den yttre gråstreckade visar avgränsningen för samrådskretsen. Vit linje Natura 2000-områden



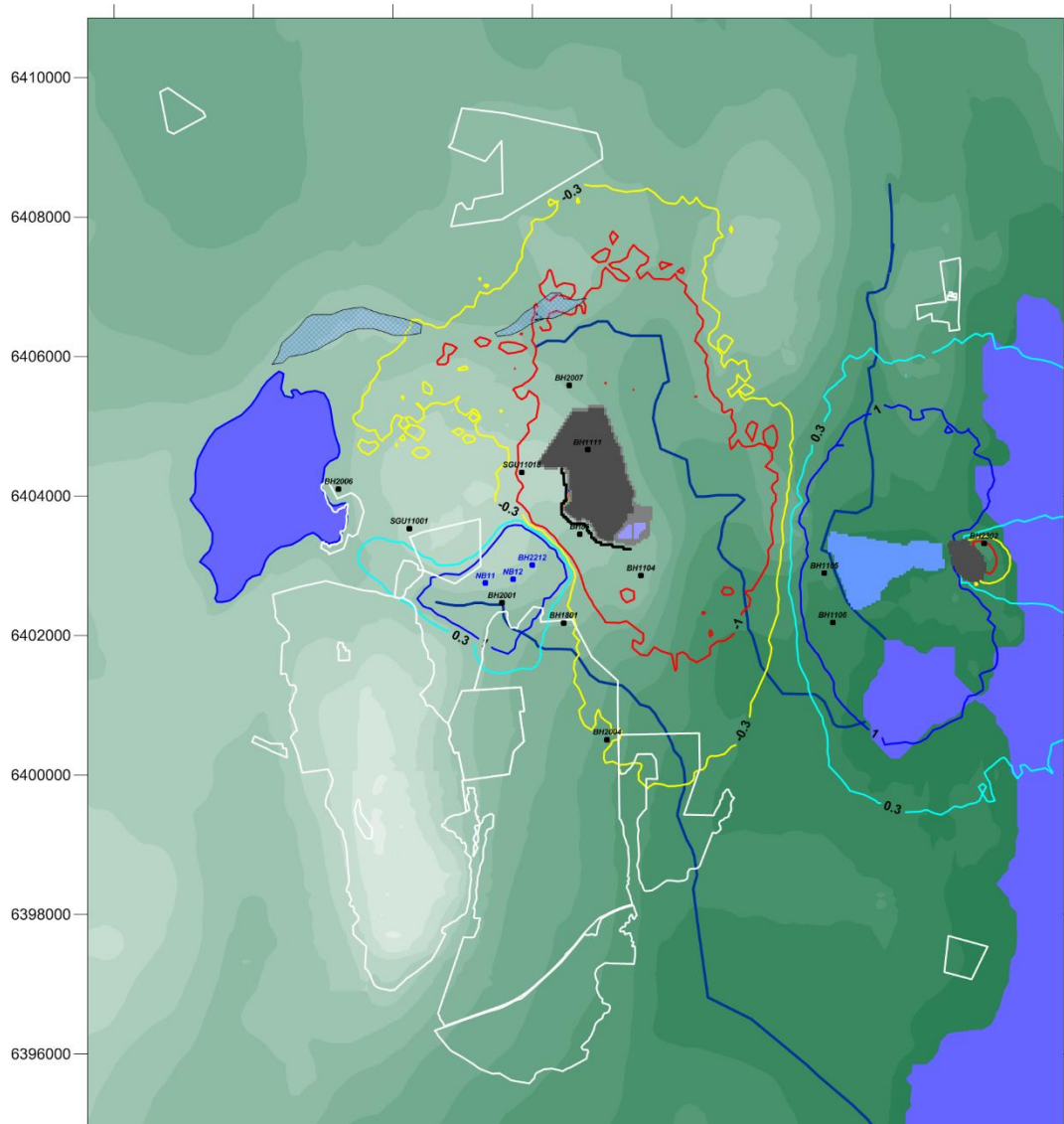
Figur 114 Påverkansområde i april månad i berg efter 30 år, med skyddsåtgärder och med klimateffekter. Gul linje motsvarar en sänkning av grundvattnets trycknivå med 0,3 m, röd 1m. Ljusblå linje motsvarar en höjning av grundvattnets trycknivå med 0,3 m, mörkblå 1m. Vit linje Natura 2000-områden

8.2.1.4 September

Påverkansområdena har även beräknats för hösten, situationen påminner i hög grad om våren. Utan skyddsåtgärder (Figur 115) liknar påverkansområdena vintersituationen Figur 109. Med skyddsåtgärder (Figur 116) begränsas påverkansområdet kraftigt. Påverkansområdena påminner mycket om sommarsituationen med skyddsåtgärder Figur 112, om än med något större påverkan i östlig riktning då effekten av Västra brottets vattenfyllnad blir mindre när grundvattennivåerna är högre. Även området med höjda grundvattennivåer blir något större i detta scenario. I Bilaga 3 redovisas simuleringar även med en mindre infiltration (40 000 m³/år).



Figur 115 Påverkansområde i september månad i berg efter 30 år, utan skyddsåtgärder och med klimateffekter. Gul linje motsvarar en sänkning av grundvattnets trycknivå med 0,3 m, röd 1m. Ljusblå linje motsvarar en höjning av grundvattnets trycknivå med 0,3 m, mörkblå 1m. Den yttre gråstreckade visar avgränsningen för samrådskretsen. Vit linje Natura 2000-områden



Figur 116 Påverkansområde i september månad i berg efter 30 år, med skyddsåtgärder och med klimateffekter. Gul linje motsvarar en sänkning av grundvattnets trycknivå med 0,3 m, röd 1m. Ljusblå linje motsvarar en höjning av grundvattnets trycknivå med 0,3 m, mörkblå 1m. Vit linje Natura 2000-områden

8.2.2 Successiv utveckling av de indirekta påverkansområdena

För att tydligare illustrera hur påverkansområdena förändras med tiden har vi valt ett gränsvärde som representerar en avsänkning av 0,65 m (vilket är samma sak som -0,65 m), eller en höjning av 0,65 m (vilket är samma sak som +0,65 m). Vi har valt detta gränsvärde för att det är medelvärdet av de två tidigare redovisade värdena (0,3 m och 1 m). Genom att använda detta gränsvärde blir det bara en linje för varje studerad situation. Simuleringar har gjorts för april, juli, september och december. För att inte få för många linjer i respektive figur redovisas områden med sänkning och höjning i separata figurer. Figurer med höjning redovisas i Bilaga 3.

8.2.2.1 April

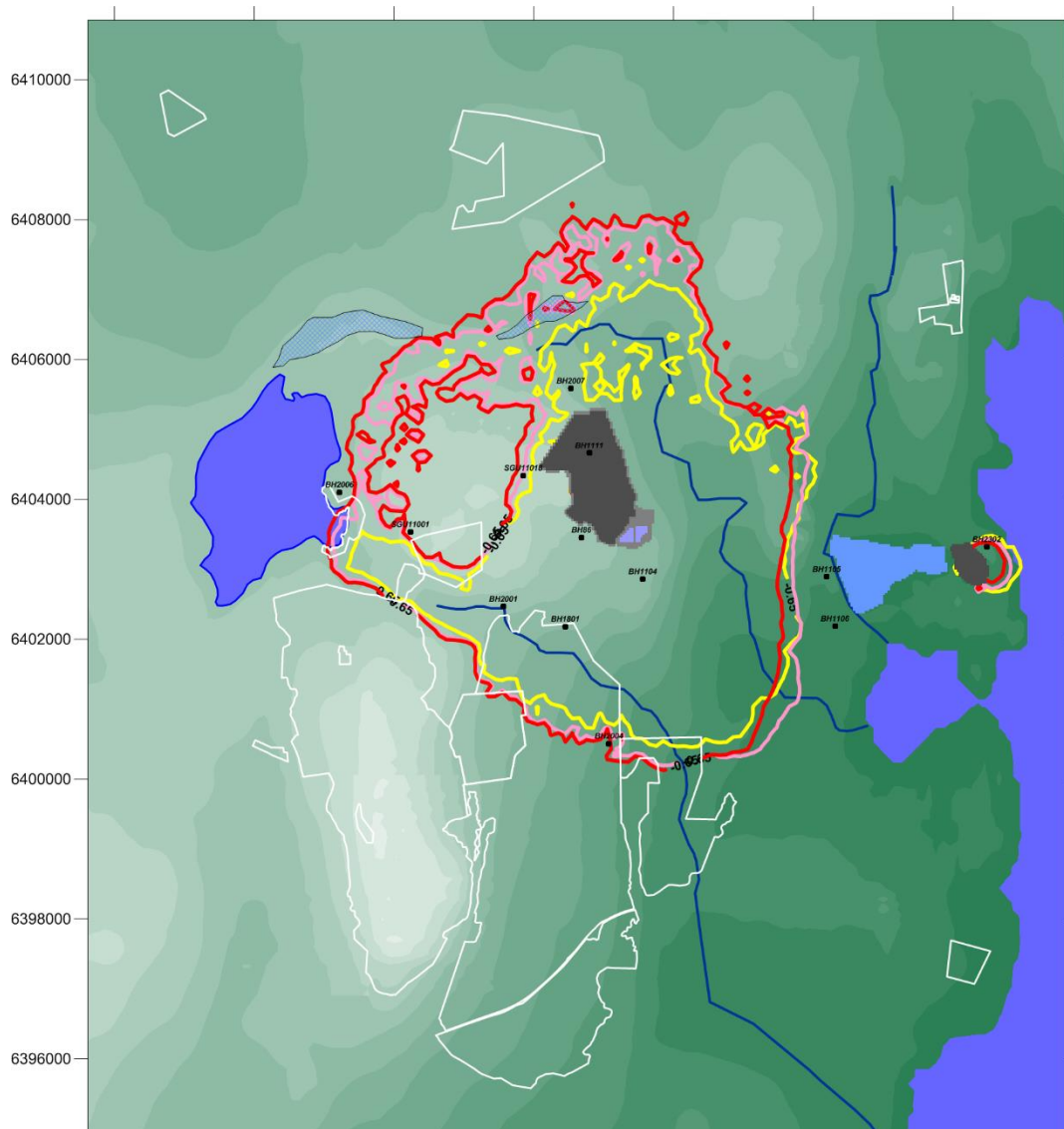
Figur 117 (utan skyddsåtgärder) och Figur 118 (med skyddsåtgärder) visar den successiva utvecklingen under april.

Efter ca 8 år stiger vattennivån i Västra brottet, vilket höjer vattennivåerna, och pressar tillbaka påverkansområdena mot väster. Denna effekt är dock inte så stor för april månad, som karakteriseras av sjunkande grundvattennivåer.

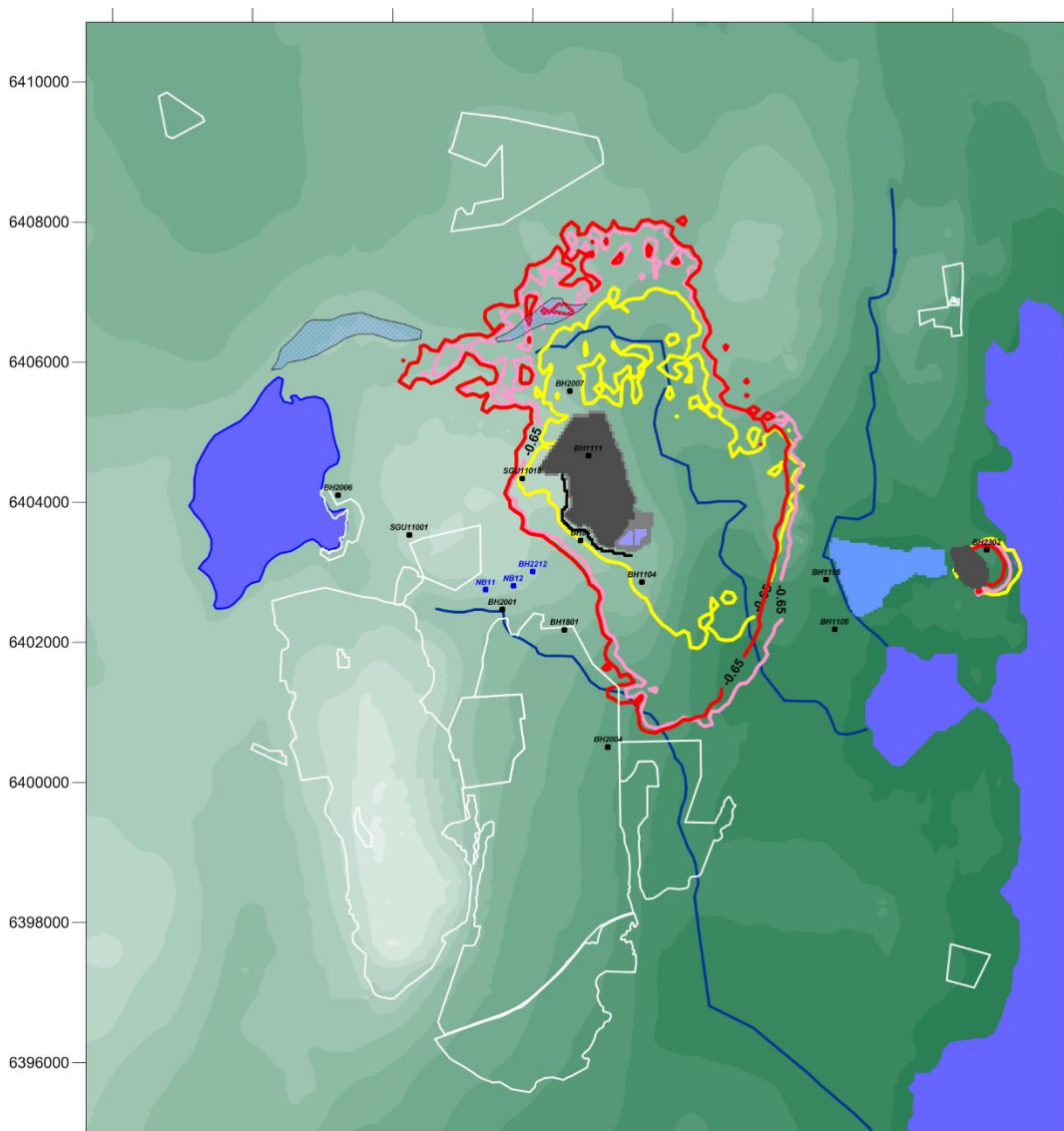
Figur 117 (utan skyddsåtgärder) visar att påverkansområdena expanderar med tiden. Utökningen av påverkansområdena mot nordväst är inte obetydlig efter år 8. Utökningen av områdena mot söder är små efter år 8. För Natura 2000-områdena är påverkan ungefär densamma för de olika tidpunkterna, dock sker en mycket liten ökning av påverkansområdena mot söder mellan år 8 och år 20.

Figur 118 (med skyddsåtgärder) visar att påverkan mot väster och söder blir tydligt annorlunda för situationen med skyddsåtgärder jämfört med situationen utan skyddsåtgärder.

Påverkansområdena betydligt mindre mot väster och söder då skyddsåtgärderna inkluderas. För situationen år 8, med skyddsåtgärder, är påverkansområdena små mot väster och söder. Vid år 20 har påverkansområdena expanderat ned mot söder och precis nått fram till Natura 2000-områdena. Expansionen av påverkansområdena mot väster är mycket liten.



Figur 117. Successiv utveckling av påverkansområden i april månad, utan skyddsåtgärder. Gul linje representerar år 8, rosa linje representerar år 20 och röd linje representerar år 30.



Figur 118. Successiv utveckling av påverkansområden april månad, med skyddsåtgärder. Gul linje 8 år, rosa linje 20 år och röd linje 30 år

8.2.2.2 Juli

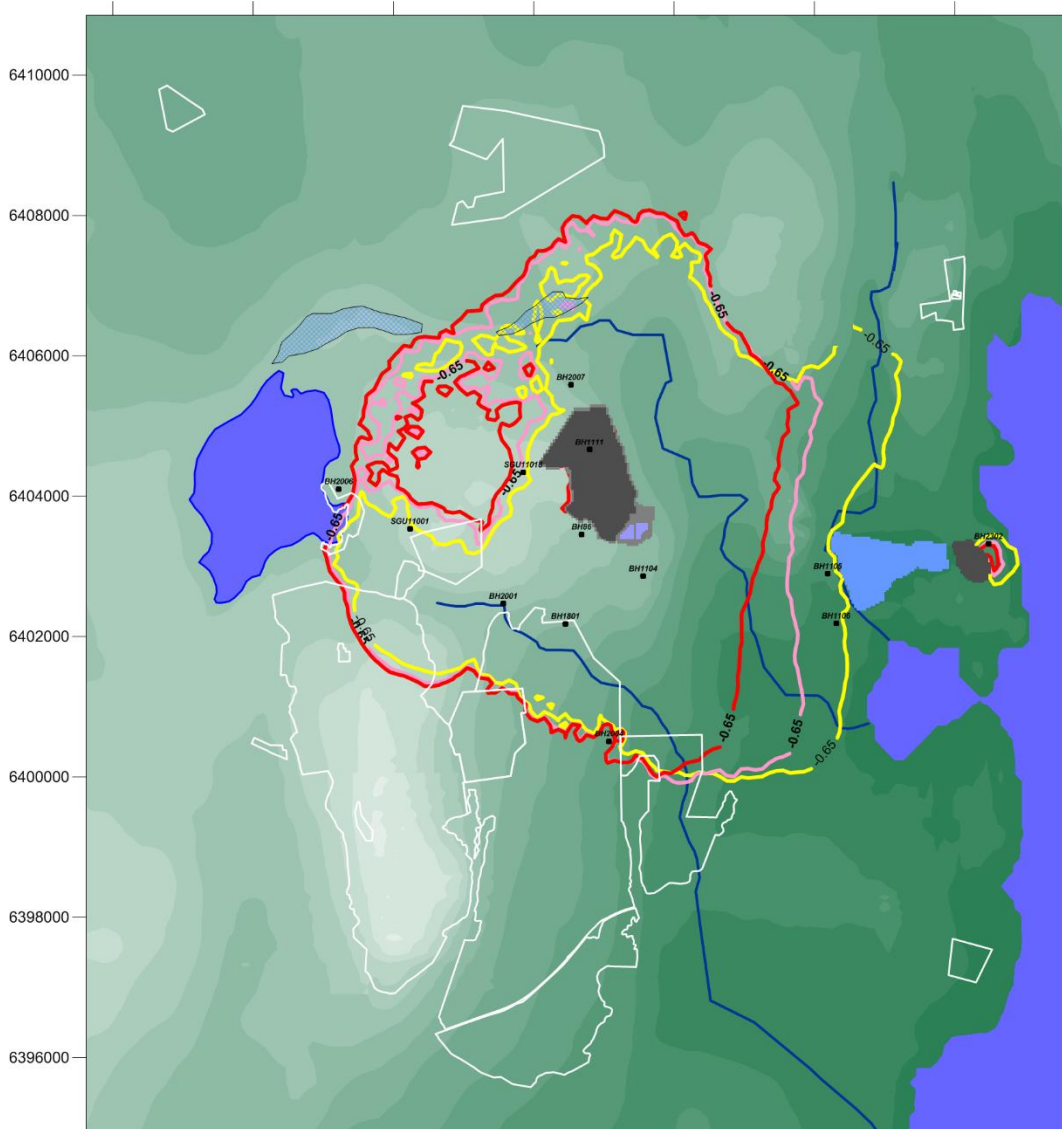
Figur 119 (utan skyddsåtgärder) och Figur 120 (med skyddsåtgärder) visar den successiva utvecklingen under juli.

Juli månad illustrerar lågvattensituationen under sommaren då grundvattennivåerna är som lägst. I vissa områden kan större påverkansområden uppkomma på våren och hösten, och även delvis på vintern, men då är grundvattennivåerna betydligt högre än under sommaren.

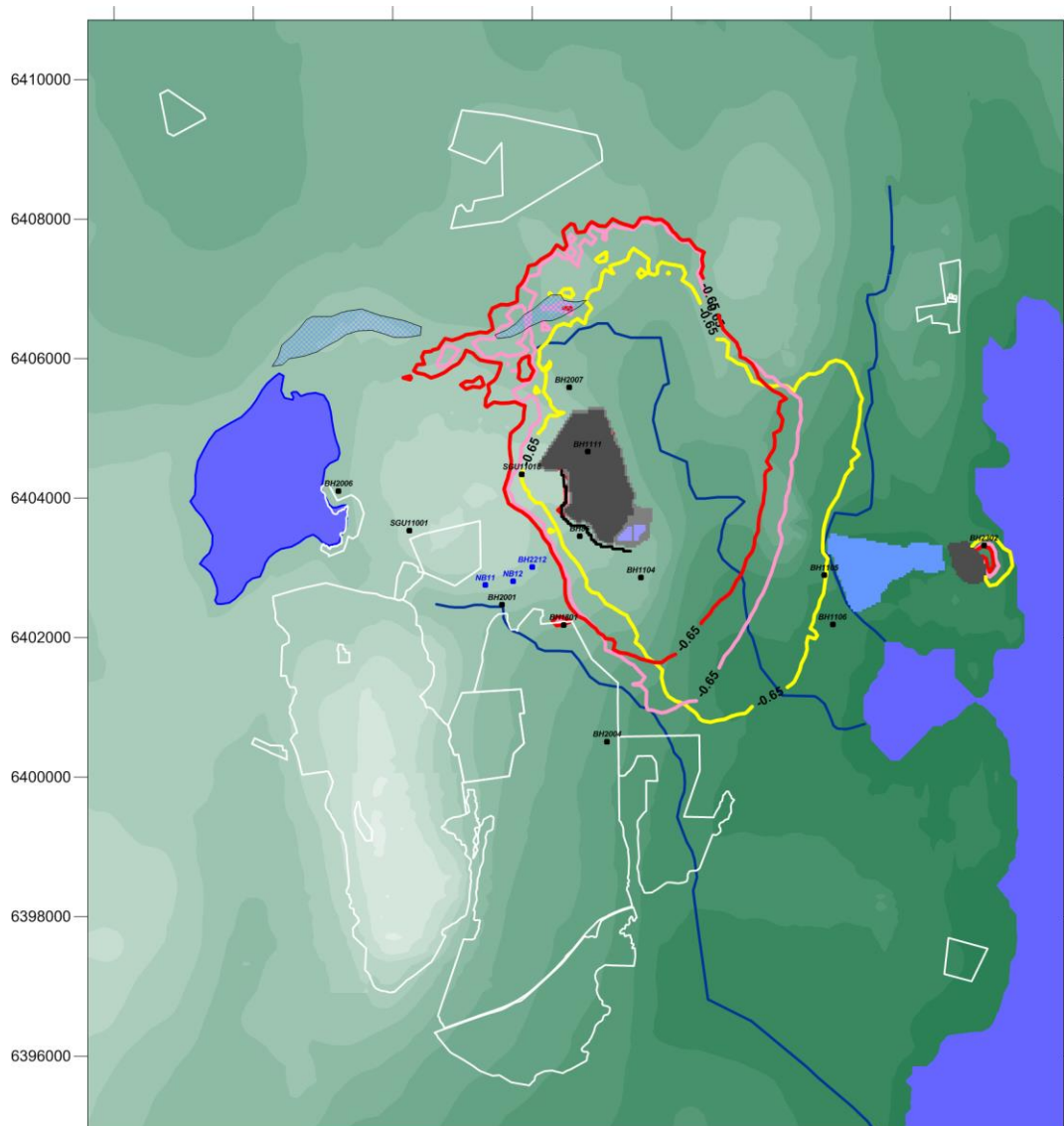
Notera att påverkansområdet både med och utan skyddsåtgärder är störst åt öster och söder i början av de studerade tidpunkterna (år 8), eftersom vattennivån i Västra brottet då är låg. Med tiden stiger vattennivån i Västra brottet, vilket pressar tillbaka påverkansområdena mot väster. I de andra riktningarna expanderar påverkansområdena med tiden, utökningen av påverkansområdena är inte obetydlig mot nordväst efter år 8, men utökningen av områdena mot söder är små efter år 8.

Det bör noteras att skillnaderna i storlek på påverkansområden söder om tänken är mycket liten för de olika tidpunkterna. Detta stämmer väl med flödena för växtsäsongen som visas i Figur 136 i kapitel 8.5.1.

Den generella utvecklingen av påverkansområdena är ungefär densamma med och utan skyddsåtgärder, dock är påverkansområdena betydligt mindre mot väster och söder då skyddsåtgärderna inkluderas och håller sig helt utanför Natura 2000-områdena med detta val av gränsvärde.



Figur 119. Successiv utveckling av påverkansområden juli månad, **utan** skyddsåtgärder. Gul linje 8 år, rosa linje 20 år och röd linje 30 år



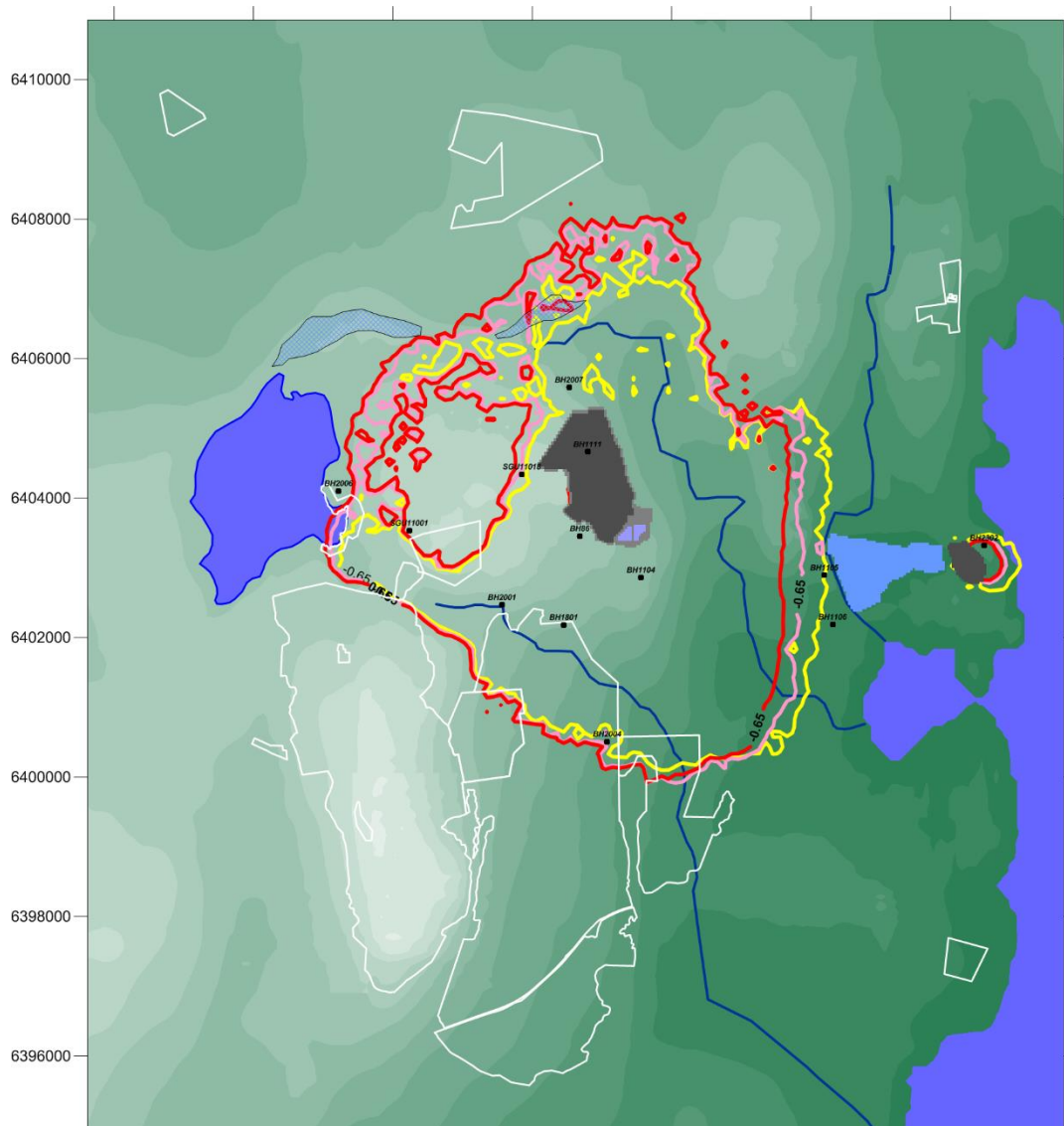
Figur 120. Successiv utveckling av påverkansområden juli månad, **med** skyddsåtgärder. Gul linje 8 år, rosa linje 20 år och röd linje 30 år

8.2.2.3 September

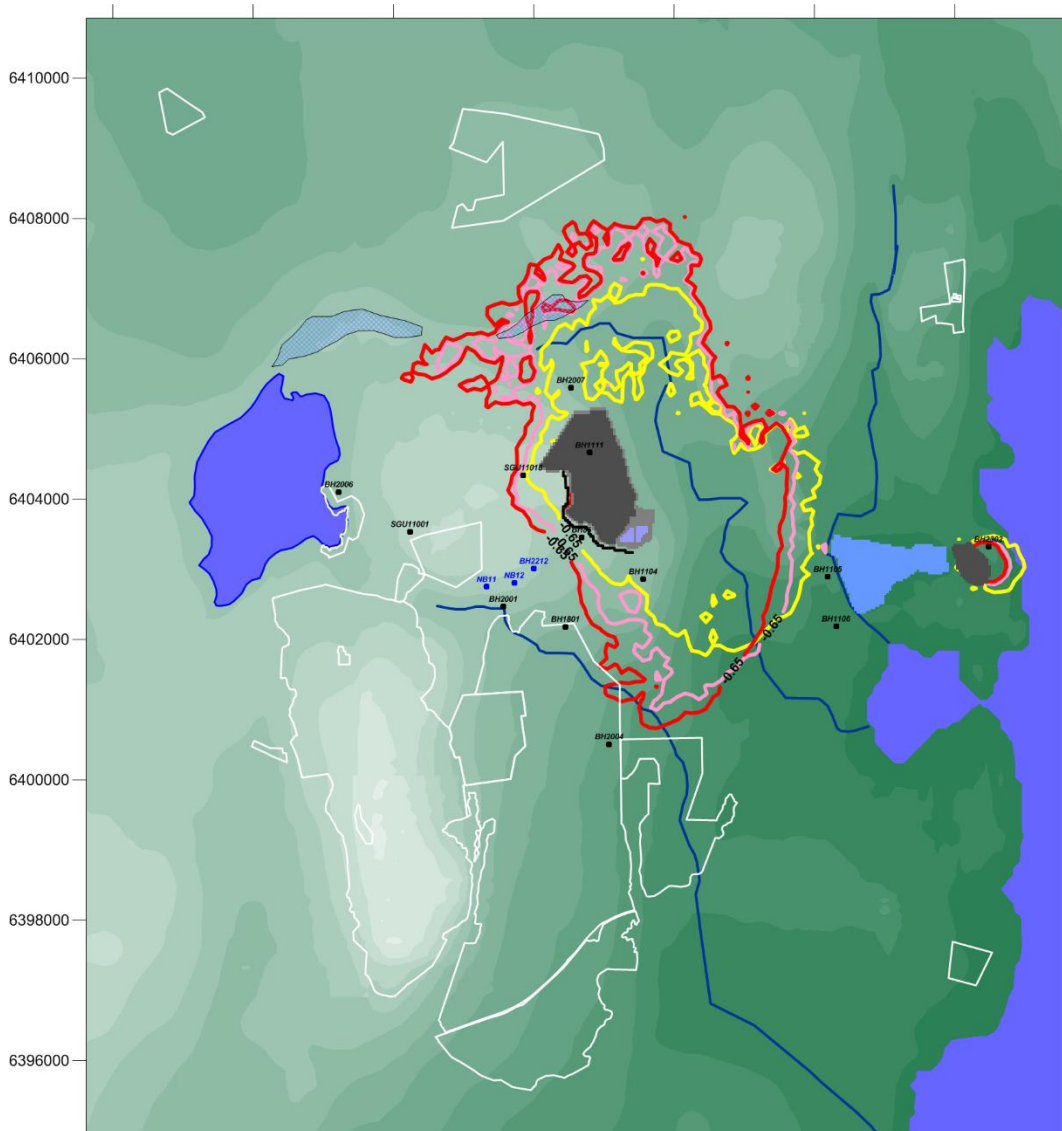
Figur 121 (utan skyddsåtgärder) och Figur 122 (med skyddsåtgärder) visar den successiva utvecklingen under september.

Figur 121 (utan skyddsåtgärder) visar hur påverkansområdena expanderar med tiden, undantaget mot öster där vattenfyllnaden av Västra brottet pressar tillbaka påverkansområdet med tiden. Utökningen av områdena mot söder är små efter år 8. För Natura 2000-områdena är påverkan ungefär densamma för de olika tidpunkterna.

Påverkansområdena i Figur 122 (med skyddsåtgärder) påminner mycket om motsvarande scenario för april månad Figur 118. Med skyddsåtgärder blir påverkan mot väster och söder tydligt annorlunda än för situationen utan skyddsåtgärder. För situationen år 8 är påverkansområdena små mot väster och söder. Vid år 30 har påverkansområdena expanderat ned mot söder och precis nått fram till kanten av Natura 2000-områdena. Med skyddsåtgärder är expansionen av påverkansområden mot väster mycket liten.



Figur 121 Succesiv utveckling av påverkansområden september, utan skyddsåtgärder. Gul linje 8 år, rosa linje 20 år och röd linje 30 år



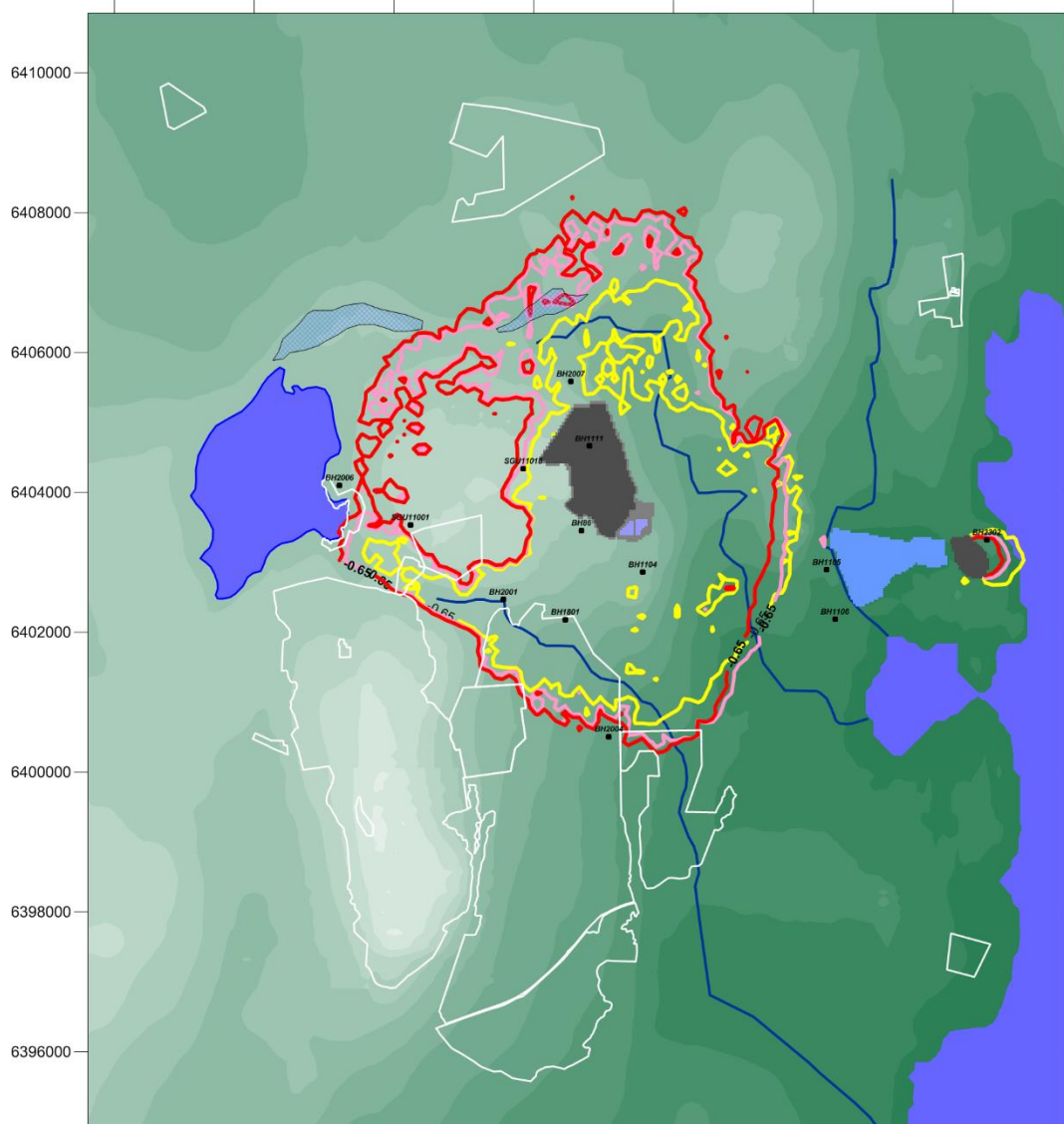
Figur 122 Succesiv utveckling av påverkansområden september, med skyddsåtgärder. Gul linje 8 år, rosa linje 20 år och röd linje 30 år

8.2.2.4 December

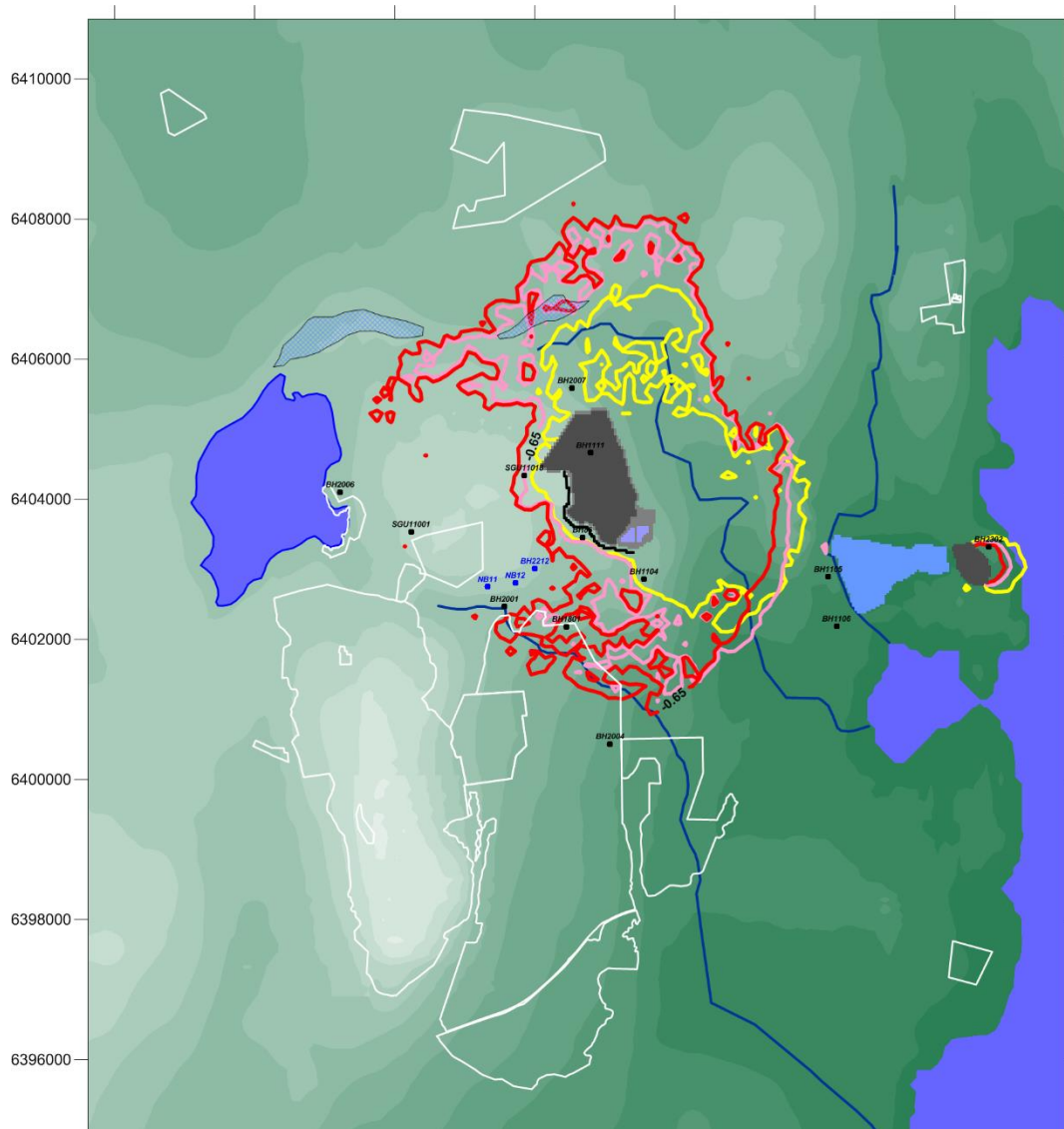
Figur 123 (utan skyddsåtgärder) och Figur 124 (med skyddsåtgärder) visar den successiva utvecklingen under december.

Figur 123 (utan skyddsåtgärder) visar hur vattennivån i Västra brottet stiger med tiden, vilket pressar tillbaka påverkansområdena mot väster, men denna effekt är ringa för högvattensituationen då nettonederbörden är stor och grundvattennivåerna är höga. I övriga riktningar expanderar påverkansområdena med tiden, utökningen av påverkansområdena är inte obetydlig mot nordväst efter år 8. Utökningen av områdena mot söder är små efter år 8, men större än för lågvattensituationen. För Natura 2000-områdena är påverkan ungefär densamma för de olika tidpunkterna, dock sker en viss liten (men tydlig) ökning av påverkansområdena mot söder med tiden. Detta stämmer med flödena för vintersäsongen som visas i Figur 109.

Figur 124 visar att med skyddsåtgärder blir påverkan mot väster och söder tydligt annorlunda än för situationen utan skyddsåtgärder. För situationen år 8 är påverkansområdena små mot väster och söder. Vid år 20 har påverkansområdena expanderat ned mot söder och precis nått fram till Natura 2000-områdena. Med skyddsåtgärder är expansionen av påverkansområdena mot väster mycket liten.



Figur 123. Succesiv utveckling av påverkansområden december, **utan** skyddsåtgärder. Gul linje 8 år, rosa linje 20 år och röd linje 30 år.



Figur 124. Succesiv utveckling av påverkansområden december, **med** skyddsåtgärder. Gul linje 8 år, rosa linje 20 år och röd linje 30 år.

8.2.3 Indirekt påverkansområde för grävda brunnar

Som nämnts ovan avser de beräknade påverkansområdena en representativ grundvattennivå i en bergborrad brunn. Påverkansområdet med avseende på en brunn grävd i jordlagren kan förväntas vara betydligt mindre. Orsaken till detta är både en betydligt större grundvattenbildning till jord än till underliggande berg samt jordlagrens mycket större vattenhållandeförmåga, vilket diskuteras i kapitel 5.4.2. Det är troligt att täkterna bara påverkar grävda brunnar (i jordlagren) om dessa brunnar är placerade i direkt anslutning till täkterna. Några grävda brunnar i direkt anslutning till täkterna har inte identifierats.

8.2.4 Grundvattenförhållandenas utveckling i nollalternativet

Nollalternativet innebär att den ansökta verksamheten inte kommer till stånd. All kalkstensbrytning och länshållning avslutas då den 31 december 2026, när det befintliga tillståndet löper ut. Därefter börjar samtliga tre täkter fyllas med vatten. Östra och Västra brottet kommer fortfarande vara förbundna med befintliga tunnlar. I detta alternativ kommer samtliga täkter vattenfyllas naturligt, eftersom vattenbortledningen från de dränerade täkterna då upphör.

Täkterna kommer att vattenfyllas upp till dränagenivå. Dränagenivån ligger nära markytan men kan justeras inom vissa ramar genom anläggande av utloppsdiken. För Västra och Östra brottet har ett utloppsdike mot Bogeviden antagits få en bottenivå på +1 m. För File hajdar-täkten är +26 m huvudalternativet vilket då ligger nära naturlig tröskelnivå och det som har använts för beskrivning av nollalternativet om inget annat anges. Jämförande simuleringar har även gjorts med en lägre dränagenivå (+22,5 m).

Vattenfyllnaden pågår under lång tid men tar olika lång tid för File hajdar-täkten och Västra brottet.

Att vattenfylla File hajdar-täkten till nivån +26 m tar i nollalternativet ca 20 år.

Västra- och Östra brottet är i nollalternativet vattenfyllda efter ca 50 år.

Grafer med utveckling av täktsjöarnas beräknade vattenfyllnad i nollalternativet respektive efter avslutad brytning i ansökt alternativ redovisas i 8.3.

För att kunna jämföra nollalternativ med ansökt alternativ behöver man förstå vad som händer i nollalternativet. Det är nämligen helt väsentligt att förstå nollalternativet på intet sätt är en statisk situation som det ser ut idag utan en dynamisk beskrivning av det händelseförlopp som kan förväntas inträffa om nu ansökt alternativ aldrig kommer till stånd. Det är även viktigt att förstå att utvecklingen som uppkommer i nollalternativet inte är en återgång till något som varit utan en utveckling av helt nya förhållanden.

När täkterna vattenfylls blir förändringarna i omgivande grundvattennivåer stora, särskilt för lågvattensituationen. När täkterna är helt eller delvis vattenfyllda kommer de inte att avsänka grundvattennivåerna på det sätt som de gör när täkterna är dränerade. För områdena runt File hajdar-täkten blir förändringen under lågvattensituationen särskilt stor, eftersom den dränerade File hajdar-täkten till stor del ligger ovanför grundvattenytan under sommaren. I situationen med vattenfyllda täkter finns vatten i File hajdar-täkten under hela sommaren, vatten som kan infiltrera till grundvattensystemet. Då kommer inte grundvattennivåerna i omgivningarna att sjunka på sommaren (lågvattensituationen), på det vis som de gör under nuvarande förhållanden (då File hajdar-täkten är dränerad). Det spelar roll om vattennivån i täkten är låg eller hög, men för File hajdar-täkten skapas den stora effekten av att det finns vatten i File hajdar-täkten under hela sommaren.

Infiltration av vatten från sjön i File hajdar-täkten till omgivningarna förutsätter att det finns en god hydraulisk kontakt mellan sjön i File hajdar-täkten och det omgivande grundvattensystemet, det är ett rimligt antagande baserat på hur förhållandena ser ut idag. I ett längre perspektiv, många år in i framtiden, är det troligt att sediment kommer att ansamlas i sjön, vilket på lång sikt kommer att förminska den hydrauliska kontakten mellan sjön och det omgivande grundvattensystemet. Därmed kommer också infiltrationen av vatten från sjön till omgivningarna att minska med tiden. Beräkningarna med vattenfyllda täkter, som presenteras i denna rapport, förutsätter en god hydraulisk kontakt mellan sjöarna i täkterna (t.ex. sjön i File hajdar-täkten) och det omgivande grundvattensystemet.

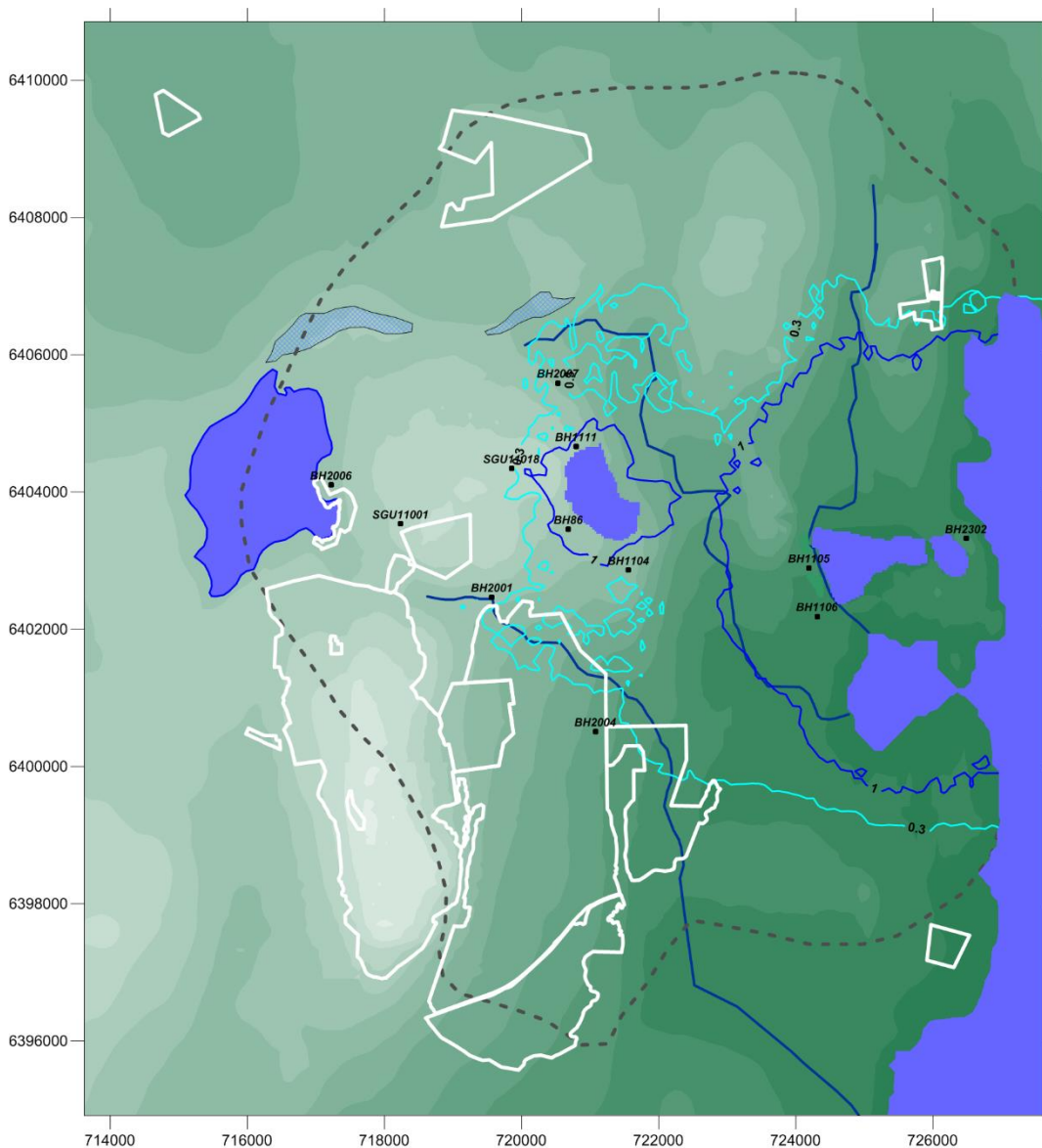
Grundvattensituationerna som erhålls då bergtäkterna vattenfylls är situationer som aldrig tidigare har förekommit. Det är alltså inte en återgång till en tidigare situation eller en jämförelse med förhållandena innan Cementas/Heidelberg Materials verksamhet i Slite startade i början av 1900-talet. Bergtäkterna har omvandlats till sjöar av en betydande storlek och volym. Dessa sjöar har aldrig tidigare existerat. Vattennivåerna i området, under sommarmånaderna, var förvisso sannolikt högre innan bergtäkter och vattentäkter anlades med start i början av förra seklet. Men så stora volymer vatten som sjöarna har aldrig tidigare funnits. Sjöarna antas stå i hydraulisk kontakt med grundvattensystemet.

Grundvattensituationen i nollalternativet har modellerats för de fyra årtiderna och för situationen år 8, år 20, år 30 och år 70 efter att befintligt tillstånd löper ut. Täkterna kommer att vara delvis fyllda (år 8, år 20 och år 30) respektive helt fyllda (år 70). Se modellrapport Bilaga 3

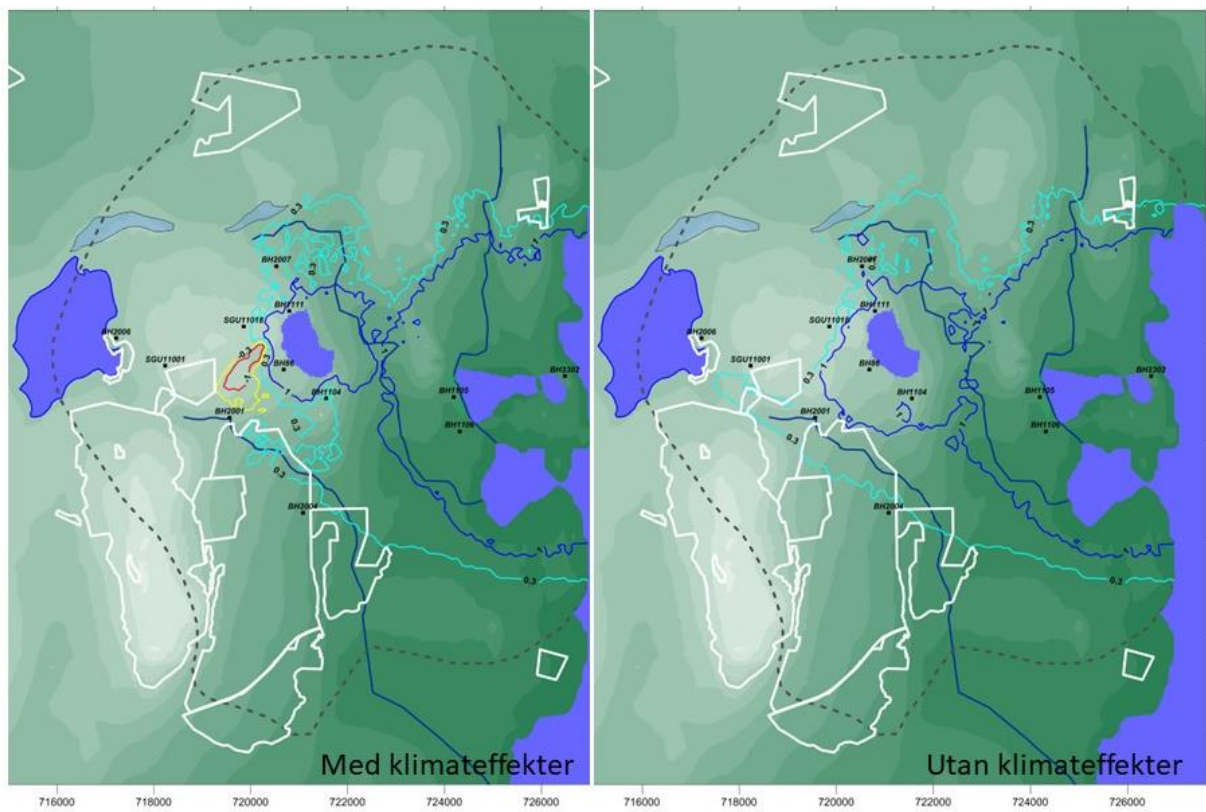
för vilken vattennivå som gäller för respektive täkt vid de olika tidpunkterna. Referenssituationen (LT2F) är definierat med det nuvarande klimatet. Den framtida situationen är definierat med ett framtida klimat enligt RCP 4.5 Period 2071-2100 (faktorer). Det betyder att de beräknade påverkansområdena inkluderar inte bara effekten av att täkterna vattenfylls utan också effekten av det framtida klimatet. Nettonederbörden definierar klimatet i modellen. Förändringen i nettonederbörd som följer av det framtida klimatet (klimatpåverkan) är ringa för alla månader utom april. Därför visas för april månad påverkansområden med klimateffekter, och påverkansområden där klimateffekterna har subtraherats bort, se Figur 126.

I denna rapport redovisas påverkan för situationen om 30 år (Figur 125 - Figur 128). För samtlig nedslag i framtiden se bilaga 3.

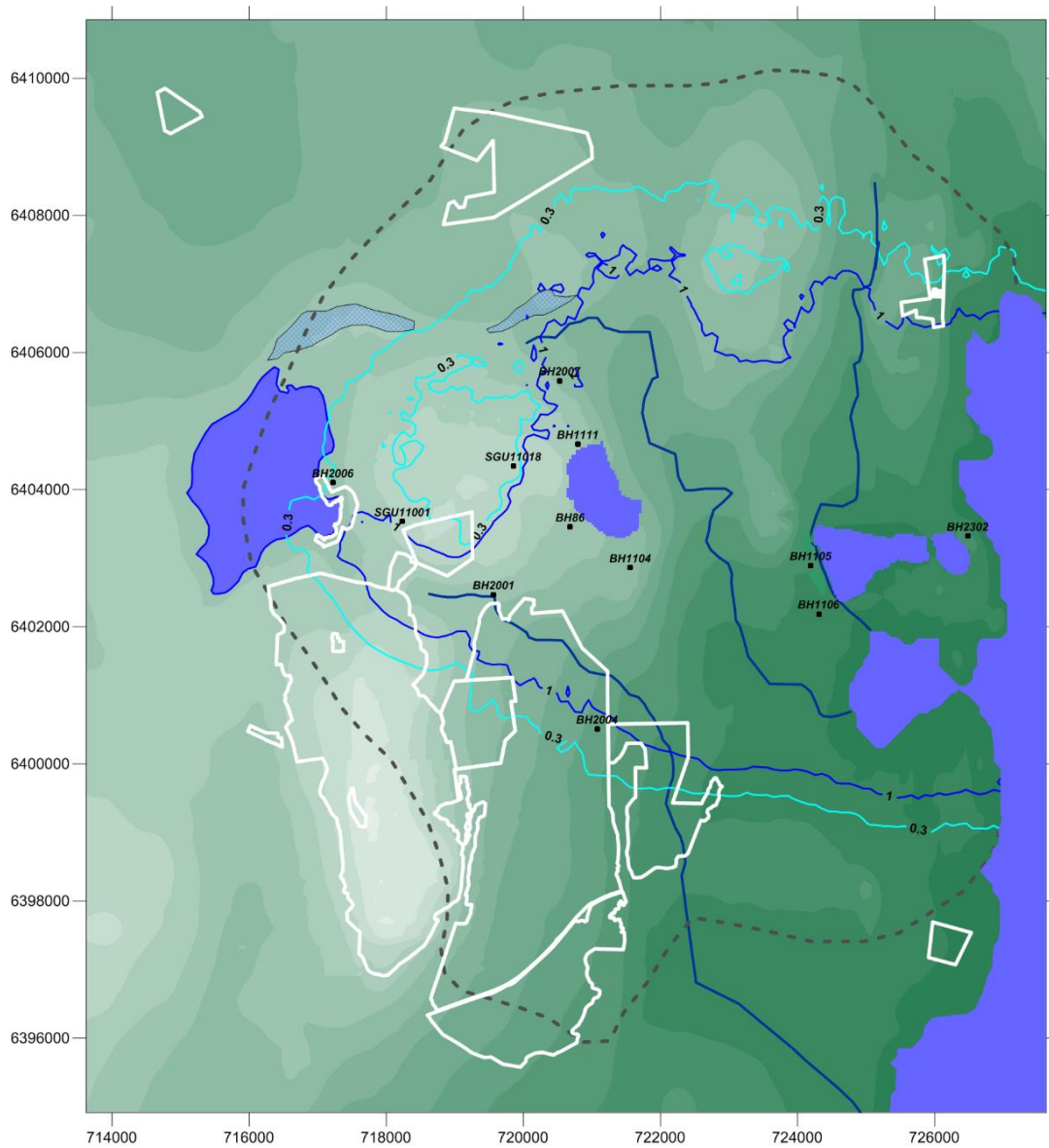
Modellen predikterar att då bergtäkterna vattenfylls kommer grundvattennivåerna att höjas tydligt inom ett mycket stort område, även nivåerna på större djup kommer att påverkas tydligt. Särskilt lågvattensituationen påverkas av att bergtäkterna omvandlas till sjöar. Regionens vattentäkt påverkas kraftigt på ett positivt vis med tydligt förhöjda vattennivåer.



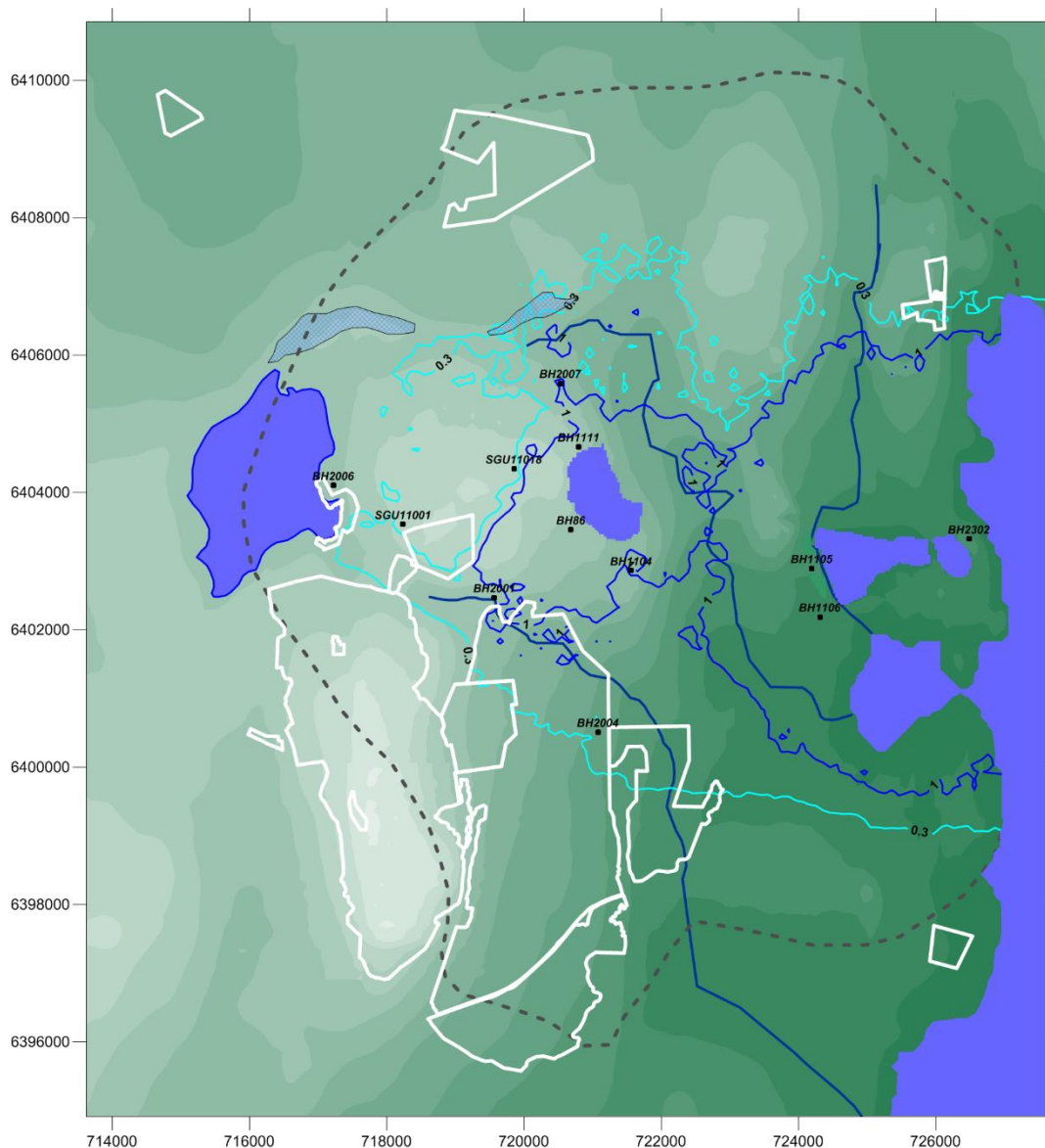
Figur 125. Påverkansområden för berggrundvatten, december i nollalternativet efter 30 år. Den yttre gråstreckade visar avgränsningen för samrådskretsen. Vit linje Natura 2000-områden



Figur 126: Påverkansområden för berggrundvatten, april i nollalternativet efter 30 år. Med respektive utan klimateffekter. April är den enda enskilda månaden då skillnaderna är stora med respektive utan klimateffekter.



Figur 127. Påverkansområden för berggrundvatten, juli i nollalternativet efter 30 år. Den yttre gråstreckade visar avgränsningen för samråds-kretsen. Vit linje Natura 2000-områden



Figur 128 Påverkansområden för berggrundsvatten, september i nollalternativet efter 30 år. Den yttre gråstreckade visar avgränsningen för samrådsområdet. Vit linje Natura 2000-områden

8.2.4.1 Nollalternativet – jämförelse mellan två framtida situationer

En särskild jämförelse av två olika möjliga framtida situationer har i samrådet efterfrågats av länsstyrelsen. Jämförelsen avser skillnaden mellan situationen i nollalternativet när täkterna är maximalt vattenfyllda jämfört situationen i ansökt alternativ 30 år efter att tillståndet tagits i anspråk med skyddsåtgärder.

Den studerade jämförelsen följer inte en ansökt eller naturlig tidslinje. Det är alltså inte en jämförelse av två möjliga situationer som följer på varandra. De påverkansområden som produceras av jämförelsen kan inte uppkomma i verkligheten, om man följer en ansökt eller naturlig tidslinje. Jämförelsen förutsätter en tidslinje där både nollalternativet på lång sikt äger rum och den ansökta brytningen genomförs fullständigt. De producerade påverkansområdena blir stora eftersom jämförelsen avser två ytterlighetsituationer. De producerade påverkansområdena är inte relevanta med avseende på den ansökta eller naturliga tidslinjen, de producerade påverkansområdena är därför endast av teoretiskt intresse. Jämförelsen redovisas därför endast som appendix till modellrapport bilaga 3.

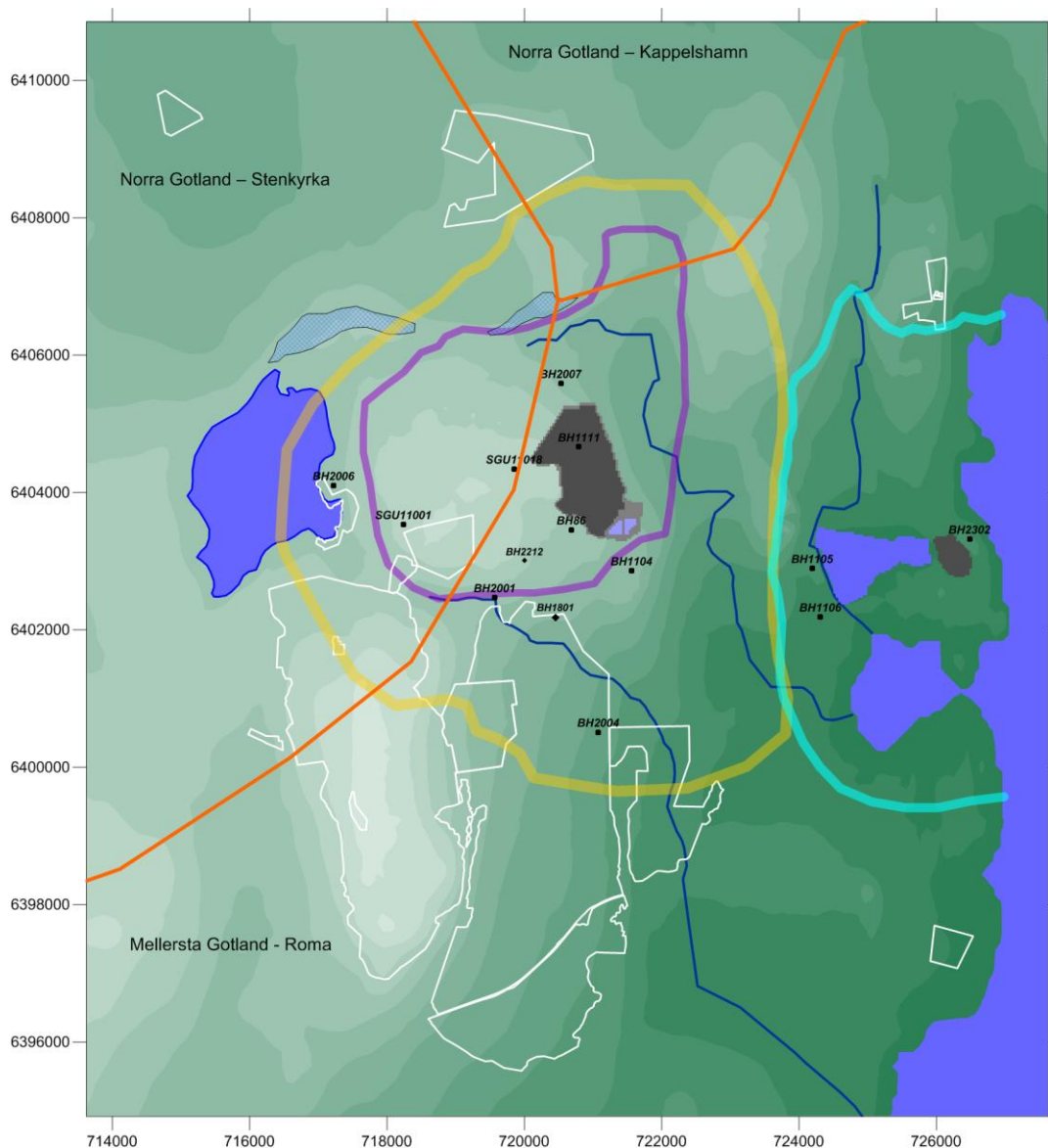
8.2.5 Tillströmningsområde

Ovan redovisade påverkansområden var som nämnt *indirekta påverkansområden*. Grundvattnet inom det indirekta påverkansområdet strömmar inte nödvändigtvis till täkterna, men grundvattennivåerna inom det indirekta påverkansområdet är påverkat av täkternas utökning.

Det område från vilket en stor andel av grundvatten strömmar direkt till den studerade täkten kan benämnas som täktens tillströmningsområde. Tillströmningsområdet svarar på frågan: Varifrån kommer grundvattnet som strömmar in i den studerade täkten?

Eftersom nettonederbörden och grundvattennivåerna varierar mycket under året, flödesmönstret är 3-dimensionellt och flödesmedia (berget) är heterogent (både i verkligheten och i modellen), varierar storleken på tillströmningsområdet med årstid, och studerat vattenförande lager. Detta gör tillströmningsområdet något svårberäknat, och det gör också att endast en andel av nettonederbörden som faller inom tillströmningsområdet når fram till täkten, t.ex. avrinner en del av nettonederbörden på markytan vid högvattensituationen. Tillströmningsområde beräknas via flödesvägsanalys, där flödesvägarna genereras i modellen av teoretiska partiklar som följer grundvattnets flödesmönster.

Tillströmningsområdet för File hajdar-täkten redovisas nedan i Figur 129 för ansökta situationen efter 30 år, då File hajdar-täkten är som störst. Detta scenario är utan skyddsåtgärder. Tillströmningsområdet som visas i figuren (lila linje) har storleken 18 km². Det areaviktade värdet på nettonederbörden är 222 mm/år. Nettonederbörden producerar en total vattenvolym över det tillströmningsområdet som är lika med 4 miljoner m³/år. För den studerade situationen år 30 avleder File hajdar-täkten totalt 1,5 miljoner m³/år. Det är alltså ungefär 35 % av nettonederbörden inom tillströmningsområdet som når fram till täkten. Motsvarande siffror med skyddsåtgärder är 1,45 miljoner m³/år och 17 km² dvs den procentuella påverkan är i det närmaste densamma. Beräkningarna med skyddsåtgärder samt för 8 års scenarierna redovisas i sin helhet i bilaga 3.



Figur 129 Indirekt påverkansområde (gul, största sänkning 0,3 m, turkos, största höjning 0,3 m) och tillströmningsområde (lila) för situationen år 30 utan skyddsåtgärder. Brandgula linjer anger gränserna för de olika grundvattenförekomsterna i berg. Ungefär 35 % av nederbörden inom tillströmningsområdet når fram till File hajdar-täkten eller faller på File hajdar-täkten.

8.3 BERÄKNAD VATTENIVÅ FÖR FRAMTIDA TÄKTSJÖAR

8.3.1 Täktsjön i Västra brottet

I utgångsläget är pall 2 i Västra brottet delvis vattenfylld och pall 1 i Västra brottet är dränerad. Efter cirka åtta års fortsatt länshållning kommer Västra brottet börja vattenfyllas. Östra brottet kommer förbli dränerat under obegränsad tid.

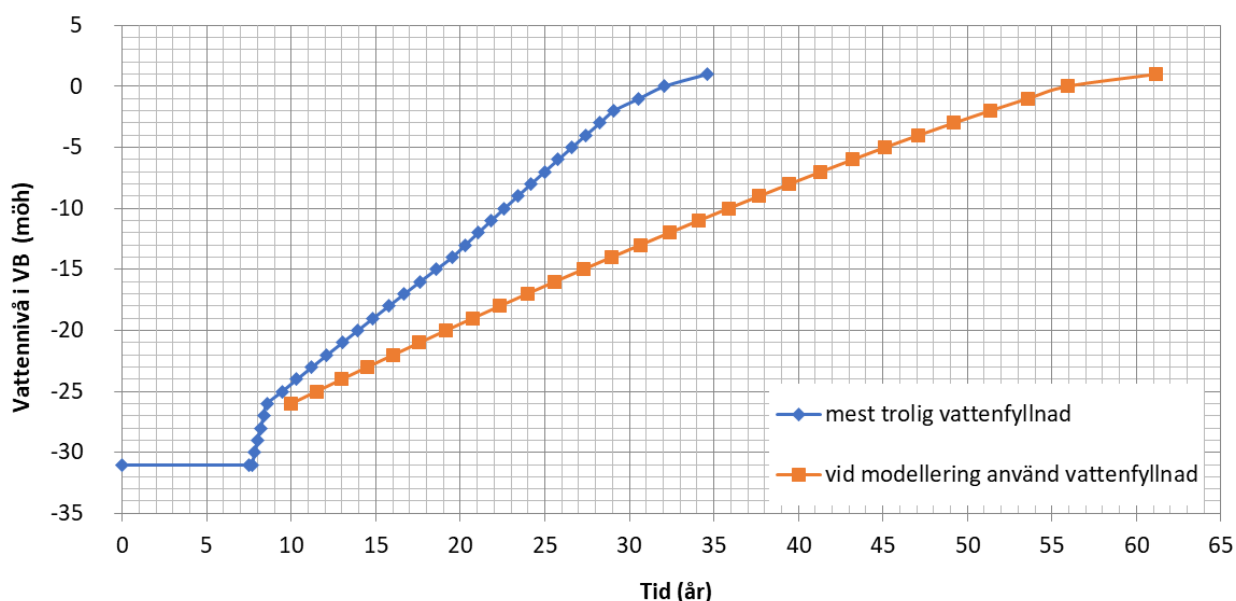
När länshållningen av Västra brottet upphör bedöms vattennivån i pall 2 ligga nära basnivån för pall 1, vid ungefär -26.5 m. När länshållningen upphör kommer vattennivån i pall 2 att stiga. Vid ungefär år 8 översvämmas Pall 1. Hela Västra brottet blir då en sjö. Vattennivån i denna sjö kommer sakta att stiga.

Så småningom nås en vattennivå i Västra brottet som ligger nära havets nivå. Den totala tiden för en vattenfyllnad av Västra brottet bedöms uppgå till cirka 30–40 år, delvis beroende av vid vilken nivå som Västra brottet kan anses som vattenfyllt och vilka tillskott respektive uttag av vatten som sker.

Den beräknade och uppskattade utvecklingen av vattennivån i Västra brottet visas i Figur 130. Figuren redovisar två scenarier för vattenfyllnad. Det första scenariot benämns som det "mest troliga". Detta scenario förutsätter att länshållningsvattnet från Östra brottet leds till Västra brottet, samt att överskottsvatten från File hajdar-täkten inklusive rejektivatten från den planerade reningsanläggningen leds till Västra brottet. Detta scenario förutsätter också att 300 000 m³ vatten/år leds från Västra brottet till cementfabriken. Kurvan ska därmed betraktas som en uppskattning som kan justeras till att gå både snabbare eller långsammare beroende på tillskott eller uttag av vatten.

Det andra scenariot kan benämnas "vid modellering använd vattenfyllnad". Modellering av olika grundvattensituationer och scenarier har pågått under ca ett års tid. Alla förutsättningar för vattenhanteringen har inte funnits tillgängliga under hela denna tid. För att inte överskatta den positiva effekten av vattenfyllnaden av Västra brottet i övriga simuleringar har en konservativt vald vattenfyllnadshastighet använts. Detta scenario inkluderar bl.a. inget tillskott av vatten från File hajdar-täkten eller reningsanläggningen tillförs Västra brottet.

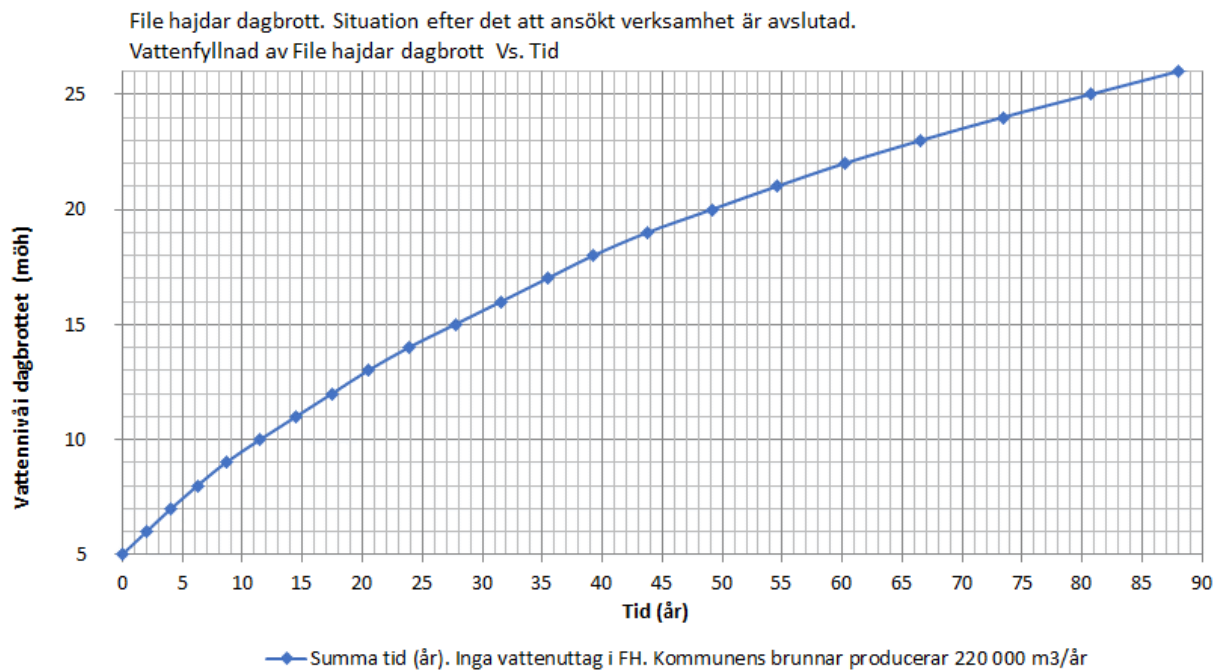
I det sistnämnda scenariot ("vid modellering använd vattenfyllnad") översvämmas pall 1 efter ca 10 år från det att tillståndet tas i anspråk (dvs. r ca 2 år senare än vad som förfäntas). 20 år efter det att tillståndet tas i anspråk bedöms vattennivån vara ca -18 m, och efter 30 år bedöms vattennivån vara ca -11 m. Utvecklingen av vattennivån i Västra brottet är ett föreskrivet randvillkor i den upprättade modellen. Höjningen av vattennivån i Västra brottet sker mycket långsamt då vattennivån i täkten kommer nära havets nivå.



Figur 130. Beräknad framtida vattennivå i Västra brottet. Tidpunkten noll motsvarar utgångsläget, dvs. den 31 december 2026. Fram till år 8 respektive år 10 kontrolleras vattennivån i Västra brottet genom pumpning. I scenariot "mest trolig vattenfyllnad" tillförs överskottsvatten från File hajdar-täkten, rejektivatten från reningsanläggningen och länshållningsvatten från Östra brottet, samtidigt som uttag till fabriken görs med 300 000 m³/år.

8.3.2 Täktsjön i File hajdar-täkten

Efter att den ansökta täktverksamheten har avslutats upphör vattenbortledningen från File hajdar-täkten, vilket leder till att en vattenyta bildas i täkten. Så småningom utvecklas täkten till en sjö. Den beräknade utvecklingen av vattennivån i File hajdar-täkten efter avslutad verksamhet visas i Figur 131. Kurvan som visas i figuren förutsätter att inga stora vattenuttag görs i täkten, och att heller inga stora flöden tillförs täkten. Det antas dock att kommunens produktionsbrunnar har ett uttag på 220 000 m³/år. Kurvan ska betraktas som en uppskattning.

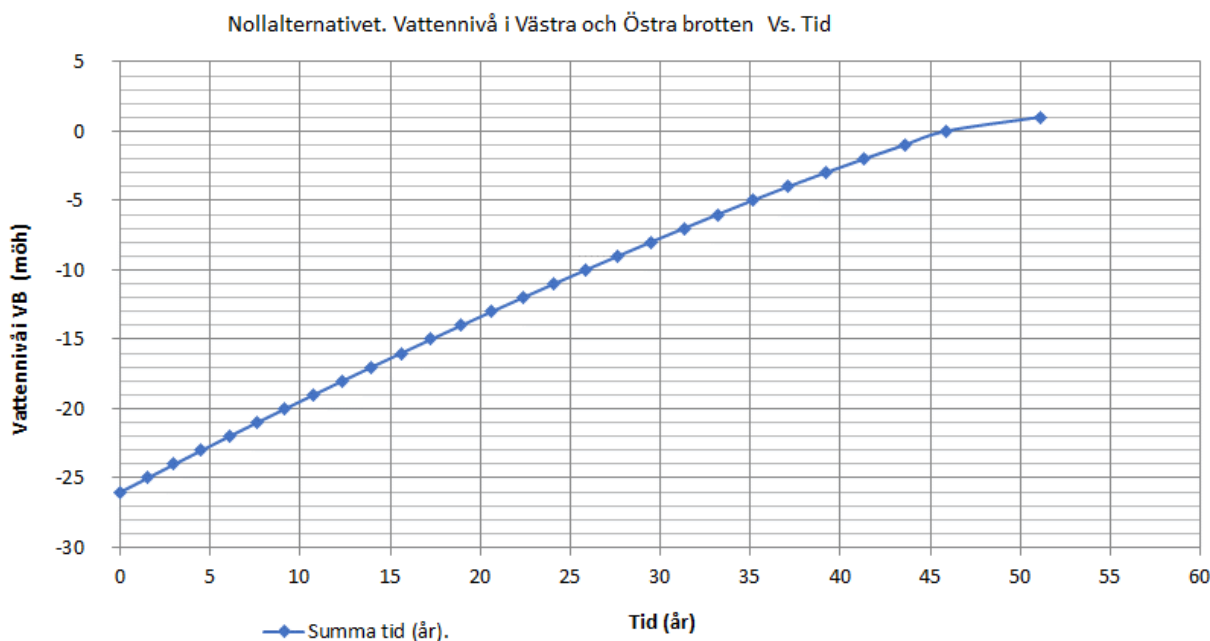


Figur 131 Situationen efter att den ansökta verksamheten har avslutats. Beräknad framtida vattennivå i File hajdar-täkten. Tidpunkten noll motsvarar tidpunkten då den ansökta täktverksamheten avslutas. Basen på File hajdar-täkten kommer i framtiden att ligga på +5 m. Det är från denna nivå som vattenytan i täkten kommer att stiga.

8.3.3 Utvecklingen i nollalternativet

Västra och Östra brottet

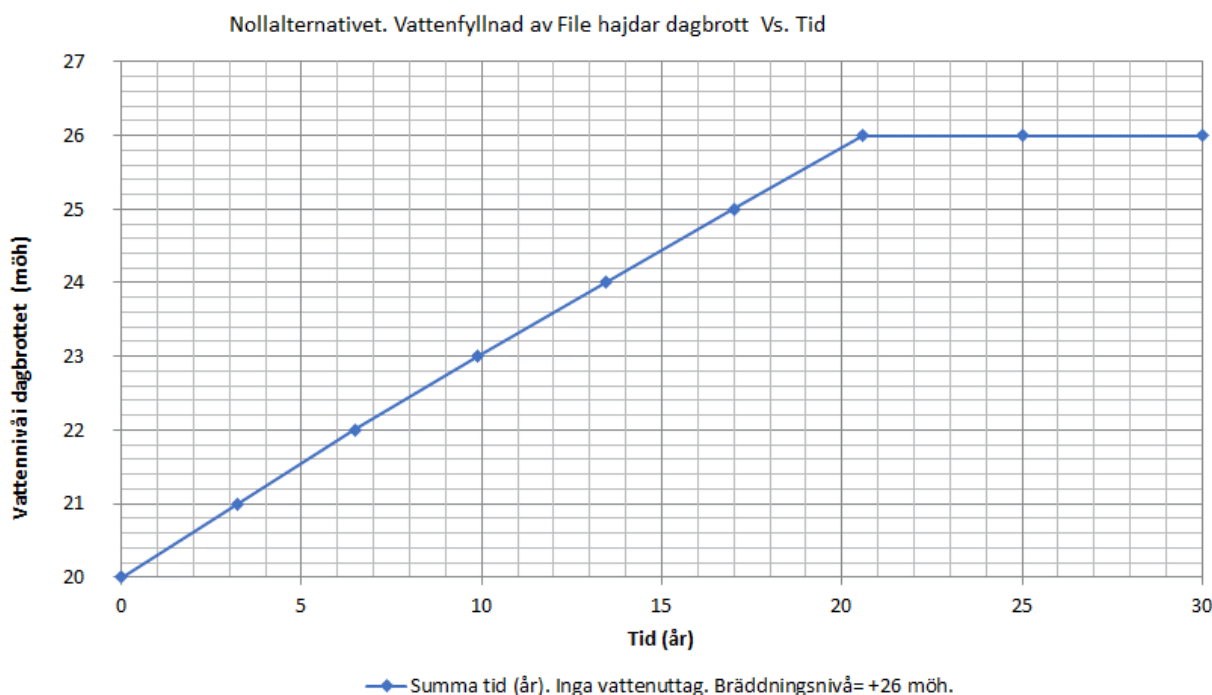
I nollalternativet upphör vattenbortledningen från Västra och Östra brotten den 31 december 2026, vilket leder till att en vattenyta bildas i täkterna. Så småningom utvecklas de båda täkterna till sjöar. Eftersom Västra och Östra brotten är sammanbundna med tunnlar kommer vattennivån vara densamma i de båda täkterna. Den beräknade utvecklingen av vattennivån i Västra och Östra brotten i nollalternativet visas i Figur 133. Kurvan som visas i figuren förutsätter att inga stora vattenuttag görs i täkterna, och att heller inga stora flöden pumpas till täkterna. Det antas att en utloppsränna konstrueras med en bräddningsnivå vid +1 m. De beräknade vattennivåerna ska ses som uppskattningar.



Figur 132 Nollalternativet. Beräknad framtida vattennivå i Västra och Östra brotten Tidpunkten noll motsvarar utgångsläget. Inga uttag av vatten görs från täkterna.

File hajdar-täkten

I nollalternativet upphör vattenbortledningen från File hajdar-täkten den 31 december 2026, vilket leder till att en vattenyta bildas i täkten. Så småningom utvecklas täkten till en sjö. Den beräknade utvecklingen av vattennivån i File hajdar-täkten visas i Figur 133. Kurvan som visas i figuren förutsätter att inga stora vattenuttag görs i täkten, och att heller inga stora flöden pumpas till täkten. Det antas dock att kommunens produktionsbrunnar har ett uttag på 220 000 m³/år. Det antas dessutom att en utloppsränna konstrueras med en bräddningsnivå vid +26 m. De beräknade vattennivåerna ska ses som uppskattningar. Den stora skillnaden mot ansökt alternativ beror dels på taktens volym men framförallt i skillnaden i basnivå.



Figur 133. Nollalternativet. Beräknad framtida vattennivå i File hajdar-täkten. Tidpunkten noll motsvarar utgångsläget. Basen på File hajdar-täkten kommer i nollalternativet att ligga på +20 m. Det är från denna nivå som vattenytan i ökar.

8.4 GEOTEKNISKA OCH HYDROGEOLOGISKA RISKER AV VATTENFYLLDA BROTT

Utifrån de i framtiden förändrade förhållandena med ett vattenfyllt Västra brottet och i nollalternativet även ett vattenfyllt Östra brottet har en bedömning gjorts av hydrogeologiskt- och geotekniskt relaterade risker i närområdet, se Bilaga 7 för fullständig rapport. Bedömningen omfattar inte eventuella geotekniska risker eller risker för förorenings spridning från de äldre deponier som finns inom området, som bedöms i en separat utredning, se ansökans bilaga B4.

8.4.1 Geotekniska risker

Markområdena kring Västra brottet utgörs i huvudsak av plan fast mark bestående av jordlager med moränlera eller lerig morän, dvs. markslag som geotekniskt sett inte utgör några risker med avseende på geotekniska frågeställningar. I direkt anslutning till den norra delen av Västra brottet visar dock den geologiska jordartskartan på förekomst av ett ytligt jordlager bestående av lera/silt vilket geotekniskt sett är ett något lösare jordlager än moränlera. Detta jordlager bedöms ha en begränsad mäktighet på ca 1 till 2 m. Med hänsyn till idag rådande geotekniska och topografiska förutsättningar i området, begränsad förekomst/ mäktighet av lera/silt samt plan markyta, föranleder planerad förändring (höjning av grundvattenytan) inte någon framtida risk för vare sig marksättningar eller problematik kopplad till markstabilitet.

Förekommande jordlager bestående av lera/silt är idag utsatta för en större belastning än i framtiden med en högre belägen grundvattenyta. Detta då en höjning av grundvattenytan i praktiken innebär att jordlagret avlastas (effektivspänningen sänks) och att sättningsrisken därigenom minskar vid en höjning av grundvattenytan.

8.4.2 Hydrogeologiska risker

I **ansökt alternativ** bedöms inga hydrogeologiskt betingade negativa risker uppkomma till följd av vattenfyllnaden i Västra brottet.

Den eventuella påverkan som kan uppkomma på privata brunnar bedöms främst vara i positiv riktning för brunnsägaren. Om uttagskapacitet eller vattenkemi förändras kan det förväntas mer tillgängligt vatten sommartid och en något nedpressad nivå till salt grundvatten.

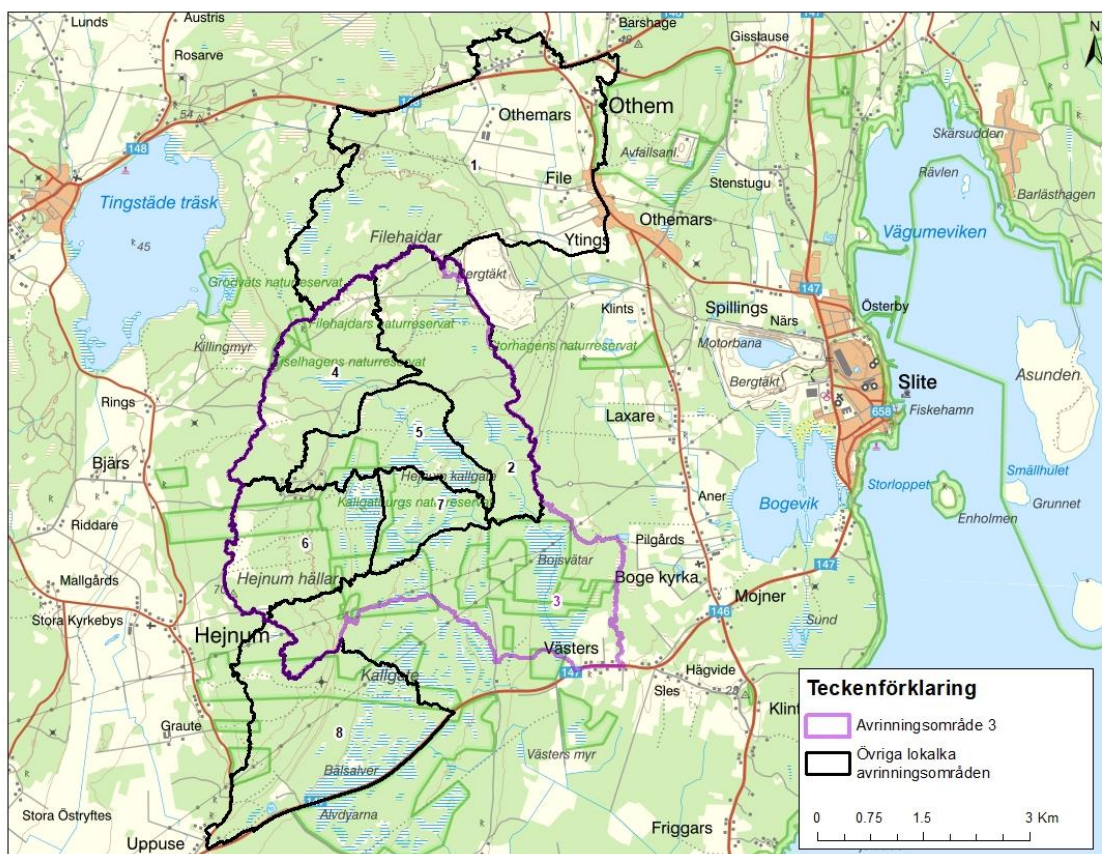
Jordlagren väster om Slite utgörs främst av täta jordar av moränlera eller lera. Kontakten mellan ytvatten och grundvatten bedöms vara mycket begränsad. Ytvattenförhållandena i området bedöms därmed inte förändras på något påtagligt vis av en vattenfylld täkt.

I **nollalternativet** höjs vattennivån även runt Östra brottet. Bedömningen gällande enskilda brunnar och ytvatten är densamma för ansökt alternativ och nollalternativet. För nollalternativet kan det dock inte uteslutas att en vattenfyllnad av Västra och Östra brottet kan medföra fuktproblematik i 22 identifierade källare i närheten av Östra brottet. Problemet ligger dock minst 30 år framåt i tiden och bedöms begränsat givet att många av de identifierade husen dessutom är belägna på sandiga jordar vilka sluttar ut mot havet.

8.5 YTVATTEN

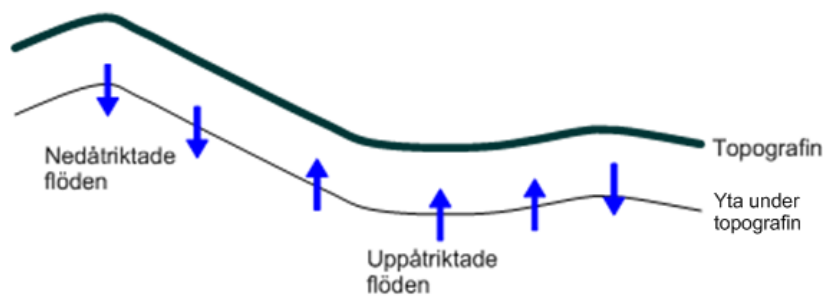
8.5.1 Grundvattenflöden i berget i lokala avrinningsområden

Grundvattenflödena i berget påverkas av File hajdar-täktens utvidgning och en framtida vattenfyllnad av File hajdar-täkten och Västra brottet. Förändrad ut- och inströmning kan ge en indirekt påverkan på ytvattenflödena på markytan. Men hjälp av modellen har beräknats hur grundvattenflödena på ringa djup förändras i lokala avrinningsområden runt täktområdena. De lokala avrinningsområdena framgår av Figur 134.



Figur 134. Lokala avrinningsområden.

Inom varje avrinningsområde har det vertikala grundvattenflödet beräknats längs med en yta på djupet 7,5 m. Det finns både uppåtriktade och nedåtriktade grundvattenflöden inom varje område, vilket illustreras av Figur 135.



Figur 135. Principskiss som visar uppåtriktade och nedåtriktade grundvattenflöden längs med en yta på ett visst djup, t.ex. 7,5 m.

Ett nettoflöde för det ytliga berggrundvattnet kan beräknas som skillnaden mellan de uppåtriktade och nedåtriktade grundvattenflödena på djupet 7,5 m. Nettoflödena för det ytliga berggrundvattnet är i områdena kring täkterna nedåtriktade, främst på grund av grundvattnets naturliga flödesmönster från högre topografiska nivåer till lägre topografiska nivåer samt bortledning av vatten från djupa geologiska lager genom de kommunala dricksvattenbrunnarna och dräneringen av Västra brottet.

Nettoflödet har beräknats för varje studerat område för dels utgångsläget, dels ett antal olika framtida situationer (år 8, år 20 och år 30). Nettoflödena för de framtida situationerna har jämförts med utgångsläget.

Som tidigare nämnt är syftet med skyddsåtgärden infiltrationen att kompensera för förlusten av ytligt berggrundvatten under växtperioden i Natura 2000-områdena söder om File hajdar-täkten. Med avseende på ytligt berggrundvatten plottas i Figur 136 förändring i nettoflöde i det lokala avrinningsområdet No.3 mot tid, för de olika studerade situationerna *utan* skyddsåtgärder. Det lokala avrinningsområdet No.3 är det som ger störst samlad påverkan för Natura 2000-områdena. Vad som är intressant med Figur 136 är att den visar att förlusten av ytligt berggrundvatten under växtperioden inte förändras tydligt efter år 8. Detta betyder att mängden infiltrerat vatten – med avseende på just förlusten av det ytliga berggrundvattnet – inte behöver ökas efter år 8.

Förändringen (förlusten) sker när den djupa pall 2 etableras i File hajdar-täkten. Denna pall bedöms vara relativt stor redan omkring år 8 och då täcka ca 30 hektar. Orsaken till att förlusten är liten efter år 8 är att täkten då nästan enbart utvidgas åt norr, inte åt söder, och inte mot Natura 2000-områdena. När täkten utökas efter år 8 sker de nya förlusterna av berggrundvatten under växtperioden huvudsakligen i andra områden, t.ex. norrut.

Om vi väljer att studera berggrundvatten under vintern, så visar Figur 136 att förlusten av berggrundvatten ökar allteftersom täkten görs större. Detta beror på att grundvattensituationen under vintern är annorlunda än grundvattensituationen under växtperioden; under sommaren är grundvattennivåerna låga, under vintern är grundvattennivåerna tydligt högre.

De beräknade påverkansområdena som har presenterats i 8.2 har beräknats för ett djupare berggrundvatten, baserat på ett transmissivt medelvärde av de simulerade grundvattennivåerna i olika lager mellan djupen 7,5 m och 47 m. Påverkansområdena indikerar att täktens utökning influerar den djupare grundvattensituationen söder om täkten, och att det påverkade området ökar något i storlek även efter år 8. Därför kan det vara rimligt att öka mängden infiltrerat vatten och antalet infiltrationsborrhål från ett till två eller tre efter år 8. Detta demonstreras också av simuleringarna med skyddsåtgärder.

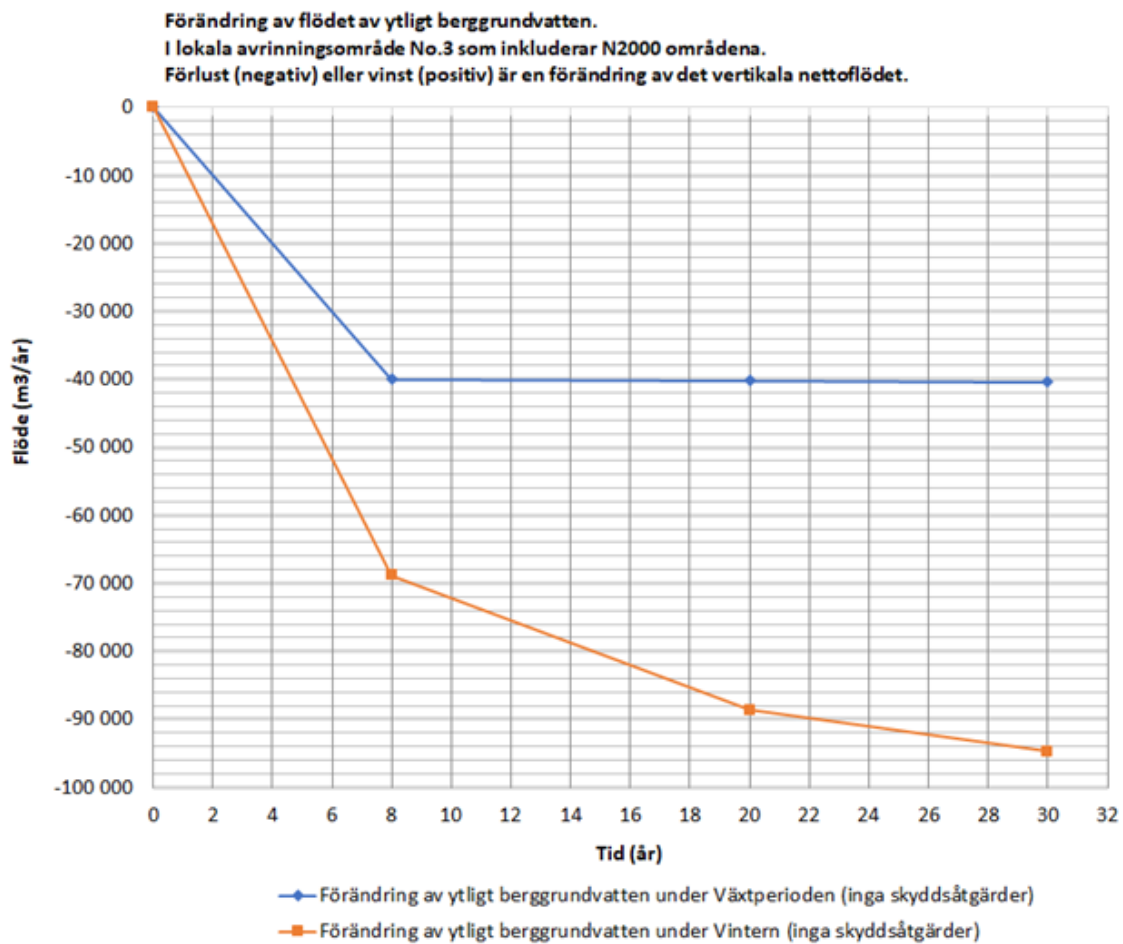
Med avseende på ytligt berggrundvatten plottas Figur 137 förändring i nettoflöde i det lokala avrinningsområdet No.3 mot tid, för de olika studerade situationerna *med* skyddsåtgärder. Av figuren framgår att skyddsåtgärderna fungerar väl, det blir ingen förlust av ytligt berggrundvatten under växtperioden i det studerade området. Istället blir det en liten vinst av ytligt

berggrundvatten under växtperioden. För vinterperioden blir det en vinst vid år 8, men en förlust vid år 20 och år 30.

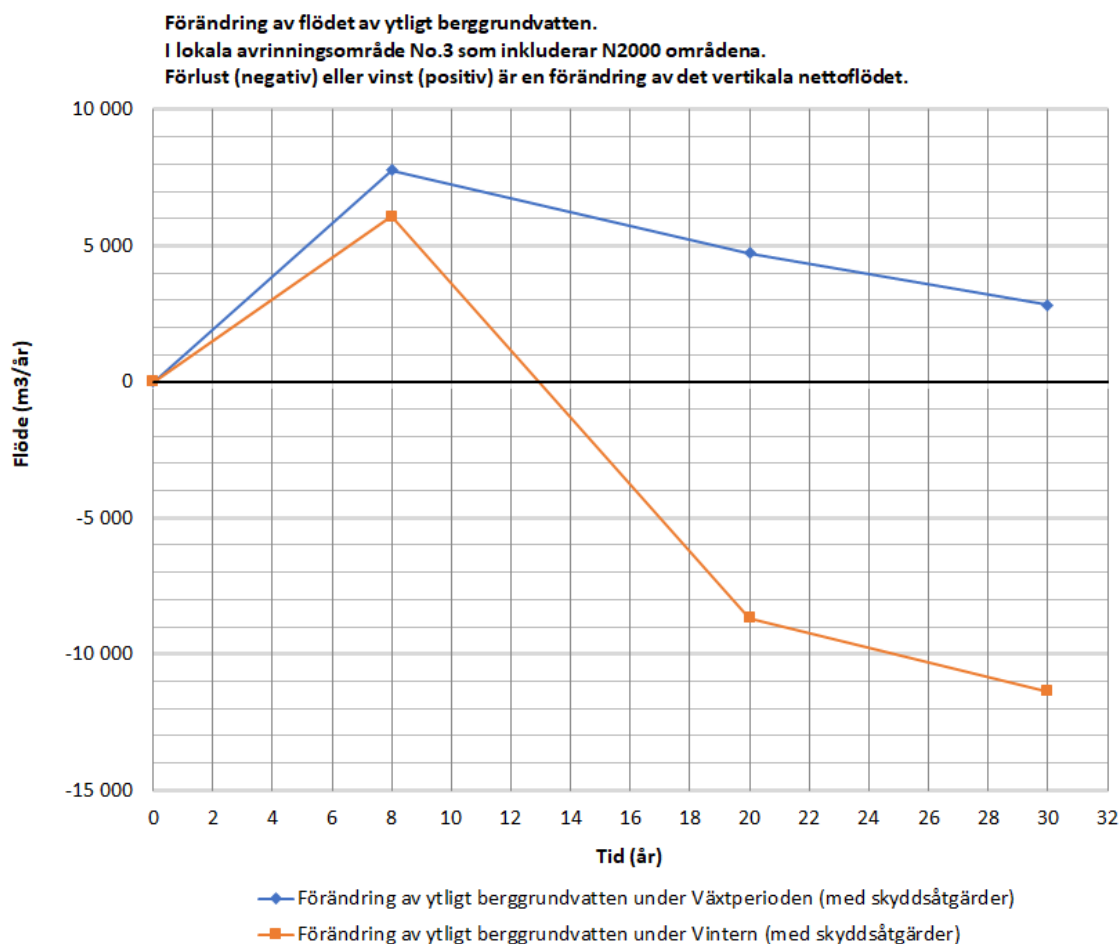
Med avseende på det ytliga berggrundvattnet visas i Tabell 10 nedan förändringen av nettoflöde (för hela året) i det lokala avrinningsområdet No.3 i tabellform för olika beräkningsfall, med respektive utan skyddsåtgärder, i m³ per år och i procent av nettonederbörden över det studerade avrinningsområdet (222 mm/år). Skyddsåtgärderna är de som tidigare diskuterats (injektering och infiltration i tre brunnar). Vad tabellen främst visar är att i jämförelse med nettonederbörden är de beräknade förändringarna av nettoflöde för det ytliga berggrundvattnet i det studerade avrinningsområdet mycket små, även utan skyddsåtgärder. Utvecklingen över tid visas i Figur 137.

Tabell 10. Förändring av nettoflöde av ytligt berggrundvatten i det lokala avrinningsområdet No.3 för olika situationer. Förändringen i nettoflöde avser hela året, och inte bara växtsäsongen.

Scenario	Förändring	
	m ³ /år	% av nettonederbörden
År 8, inga skyddsåtgärder	-108 000	-2.2
År 20, inga skyddsåtgärder	-128 000	-2.6
År 30, inga skyddsåtgärder	-135 000	-2.8
År 8, med skyddsåtgärder	+11 000	+0.22
År 20, med skyddsåtgärder	-3 500	-0.07
År 30, med skyddsåtgärder	-6 500	-0.13
10 år efter avslutad täktverksamhet, utan skyddsåtgärder:	+1 000	+0.02
80 år efter avslutad täktverksamhet, utan skyddsåtgärder:	+98 000	+2.0



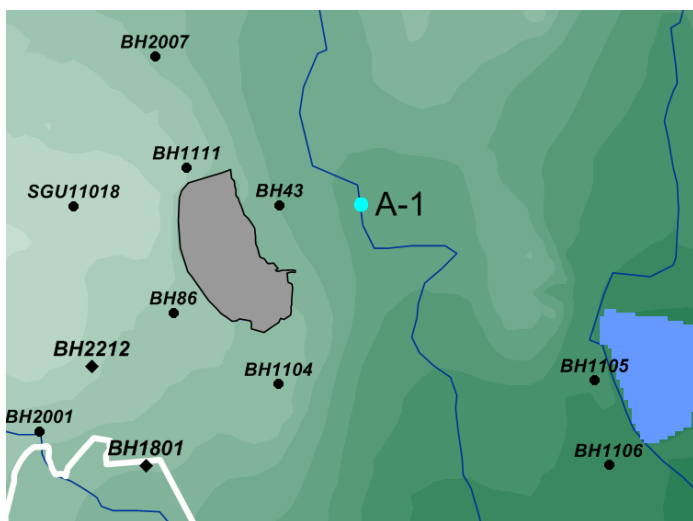
Figur 136. I figuren visas förändring i nettoflöde i det lokala avrinningsområdet No.3 mot tid, för de olika studerade situationerna (år 8, år 20 och år 30) utan skyddsåtgärder. Ett negativt flöde är en förlust för det studerade lokala avrinningsområdet.



Figur 137. I figuren visas förändring i nettoflöde i det lokala avrinningsområdet No.3 mot tid, för de olika studerade situationerna (år 8, år 20 och år 30) med skyddsåtgärder. Ett negativt flöde är en förlust för det studerade lokala avrinningsområdet.

8.5.2 Flöde i Anerån

Förändringen i vattenföring i Anerån har beräknats vid sammanflödespunkten mellan Anerån och länshållningsvattnet från File hajdar-täkten (i Figur 138 benämnd A-1). Effekterna av flödesförändringarna diskuteras vidare i den hydrologiska rapporten, ansökans bilaga B6.



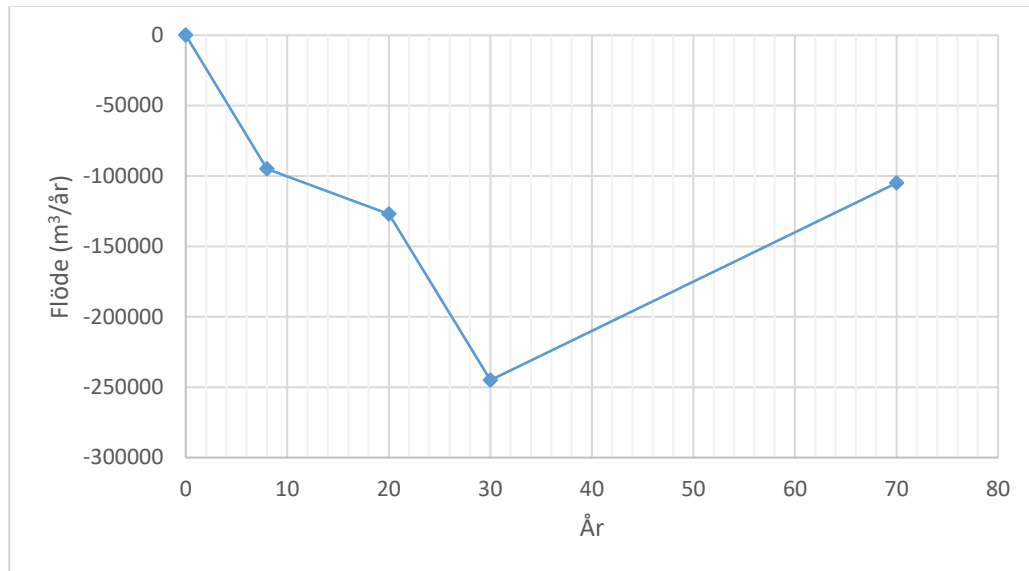
Figur 138. Position A-1 anger sammanflödespunkten mellan Anerån och länshållningsvattnet från File hajdar-täkten.

Förändringen av flödet i Anerån, som den har beräknats i modellen, beror av:

- Täckens utvidgning (indirekt påverkan)
- Förändring i avrinningsområdets storlek (pga. täckens utvidgning)
- Förändring i nettonederbörden (förändrat klimat)
- Förändring i storleken på grundvattenflödet till vattendraget
- Förändring i storleken på grundvattenflödet från vattendraget

Förändringen i flöde har beräknats för varje månad, och summerats för att erhålla årsvärden.

Skyddsåtgärderna är av ringa betydelse för vattenflödet i Anerån.



Figur 139. Förändring av flöde i Anerån vid sammanflödespunkten med länshållningsvatten från File hajdar-täkten.

Notera att den beräknade minskningen år 70 (vilket anger när täkten är nära full även om det inte nödvändigtvis infaller just år 70) inte inkluderar det vatten som bräddas från den vattenfyllda File hajdar-täkten, och som troligen kommer att tillföras Anerån som ett ytvattenflöde. Om detta flöde tillförs Anerån vid position A-1 blir det ingen minskning utan ett överskott på ungefär 100 000 m³/år vid nämnda position.

8.5.3 Tingstäde träsk

Det sker ett inflöde och utflöde av grundvatten till och från Tingstäde träsk. Grundvattenflödet varierar med årstiden. Inflödet av ytligt grundvatten (jordgrundvatten) längs med eller nära strandlinjen är mycket större än det djupare grundvattenutbytet vid sjöns botten.

Som beskrivet i kapitel 5.3 är bottensediment och underliggande berg mycket täta och belägen på revartad kalksten utan kontinuerliga vattenförande lager. Om sjön hade haft en god hydraulisk kontakt med de djupare vattenförande lagren i berget hade vi inte sett de stora avsänkningarna i vattennivå i borrhål i berget under sommaren, som vi nu observerar i borrhål på File hajdar och nära Natura 2000-områdena. Om sjön hade haft en god hydraulisk kontakt med de djupare vattenförande lagren i berget hade ytvatten från sjön infiltrerat ned i berget och bildat berggrundvatten under sommaren, och därmed hållit uppe vattennivåerna i berget under sommaren.

8.5.3.1 Vattenbalans

Den beräknade vattenbalansen för Tingstäde träsk för ett normalår framgår av Figur 140. Beräkningen utgår från dagens klimat (1991–2020).

Inflödet från omgivningarna uppgår till ca 3,2 miljoner m³/år (222 mm nettonederbörd över 14,5 km²). Nederbörden på sjöytan är i medeltal 3 000 000 m³/år (632 mm över 4,68 km²). Avdunstningen är i medeltal 2 800 000 m³/år (600 mm över 4,68 km²). Nettonederbörden² över sjön uppgår med andra ord till ca 150 000 m³/år (32 mm över 4,68 km²).

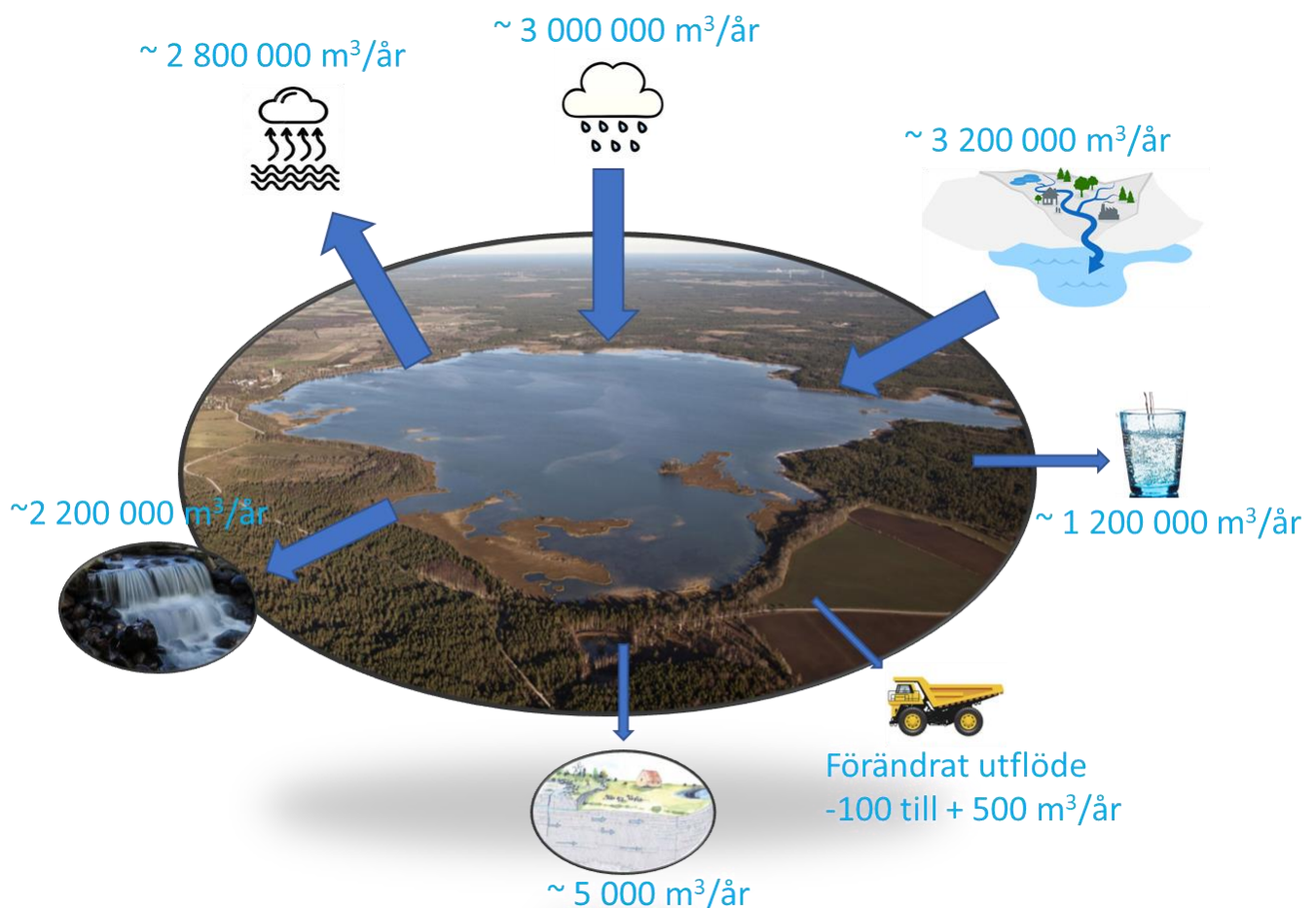
Det kommunala vattenuttaget uppgår årligen till ca 1 200 000 m³/år. Överskottet, ca 2 200 000 m³/år, avrinner som ytvatten via Ireån.

Vattenutbytet via berggrundvatten genom sjöbotten är i sammanhanget mycket begränsat. Utifrån modellering beräknas sjön ha ett nettoutflöde genom sjöbotten på ca 5000 m³/år.

Utan skyddsåtgärder beräknas utflödet öka med 1000 m³/år efter 8 år, nära 1500 m³/år efter 20 år och ca 1800 m³/år efter 30 år. Dessa volymer är försumbara och med flera storleksordningars marginal inom osäkerheten för alla andra parametrar i vattenbalansen.

Med skyddsåtgärder är påverkan om möjligt än mer försumbar med ytterligare en storleksordning mindre förändring i vattenbalansen. År 8 innebär faktiskt ett mindre utflöde till berggrundvatten än dagsläget (-100 m³/år). År 20 och år 30 ger ett mycket litet ökat utflöde (300 m³/år vid år 20 respektive 500 m³/år vid år 30). Volymerna är under alla förhållanden försumbara.

² Diskrepansen för nettonederbörd mellan (beräknad utifrån mm nederbörd/sjöarea) och (skillnaden mellan nederbörd och avdunstning) är en effekt av avrundning till jämna tal.



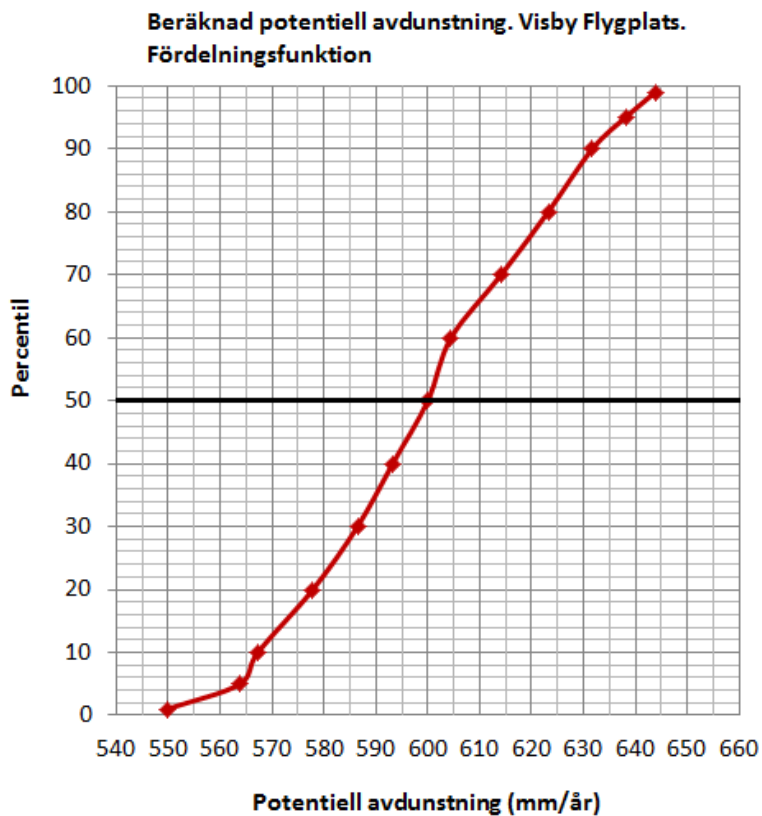
Figur 140. Uppskattad och beräknad vattenbalans för Tingstäde träsk för ett normalår (beräknat med dagens klimat). Utökningen av File hajdar-täkten förväntas inte påverka sjöns vattenbalans men kan teoretiskt ge en påverkan på minskat utflöde på 100 m³/år till ökat utflöde på 500 m³/år. 100 m³/år är en helt försumbar volym som t.ex. motsvarar 0,02 mm nederbörd över sjöytan.

För att illustrera storleksordningen på de olika förändringarna av grundvattenflöden (i jämförelse med övriga flöden i Tingstäde träsk vattenbalans, följer nedan fyra kapitel med osäkerhetsanalyser av övriga parametrar i vattenbalansen eller hur dessa varierar.

8.5.3.2 Variation i avdunstning

För att illustrera hur avdunstningen över sjön kan variera mellan olika år har vi beräknat avdunstningen från sjön med hjälp av data från Visby flygplats. Den potentiella avdunstningen har beräknats via Thornthwaites ekvation. Resultatet ges i Figur 141 som en sannolikhetsfunktion (fördelningsfunktion).

Den statistiska fördelningen av de beräknade årsvärdena för avdunstningen visas i Figur 141. Av figuren framgår att avdunstningen med 80 % sannolikhet varierar mellan 567 mm/år och 631 mm/år. Detta motsvarar en relativ variation från medelvärdet som motsvarar plus/minus 32 mm/år. Vattenbalansen för Tingstäde träsk visar att en avdunstning på 600 mm/år motsvarar 2 770 000 m³/år. Av detta följer att en variation på plus/minus 32 mm/år (80 % sannolikhet) motsvarar en variation i avdunstning på plus/minus 150 000 m³/år.



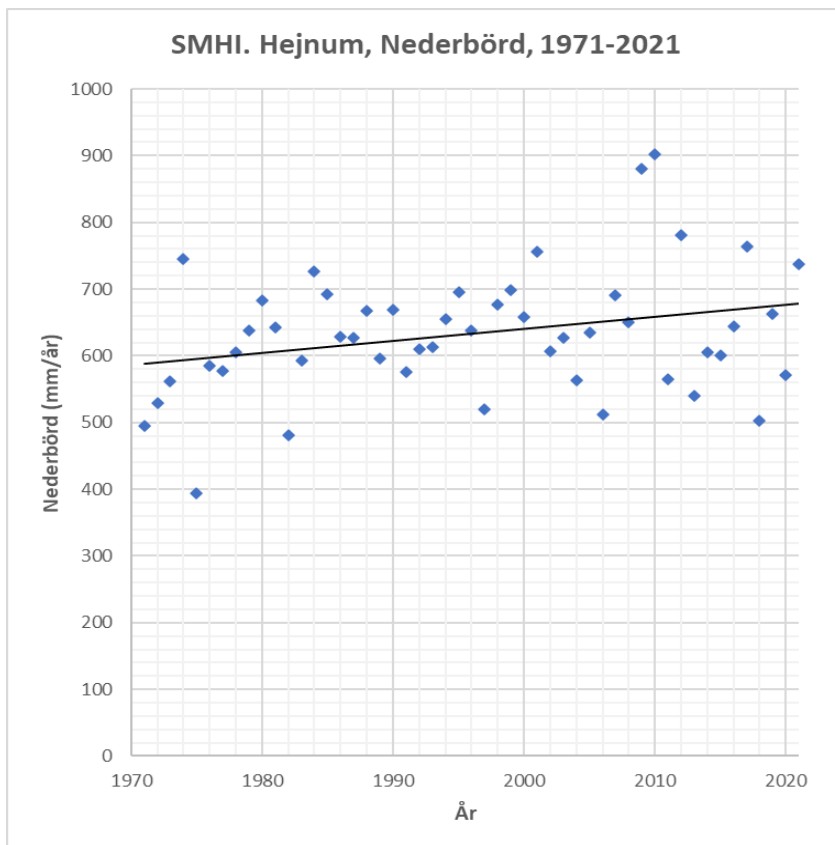
Figur 141. Beräknad potentiell avdunstning. Data från Visby flygplats. Fördelningsfunktion.

8.5.3.3 Variation i nederbörd

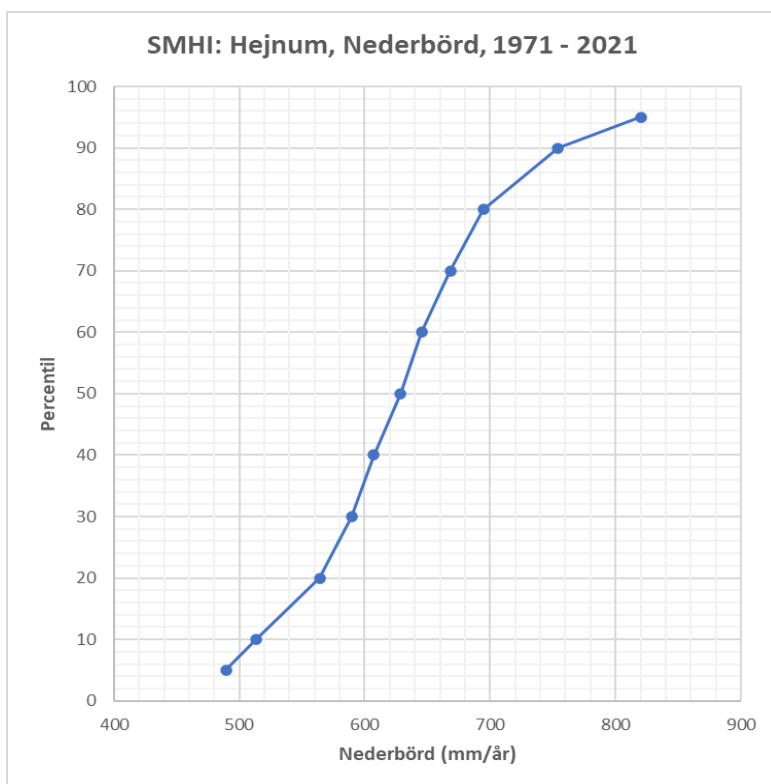
Beräkningar har utförts i syfte illustrera hur nederbörden kan variera och hur detta påverkar sjöns vattenbalans.

Den uppmätta mängden nederbörd vid SMHI:s station på Hejnum hållar visas i Figur 142. Det är rimligt att anta att samma nederbörd faller på Tingstäde träsk och dessutom på sjöns tillrinningsområde. Av figuren framgår tydligt att variationen i årsnederbörd är betydande: medelvärde 632 mm/år, minimivärde 394 mm/år, maximivärde 902 mm/år. Trenden är också tydlig; årsnederbörden ökar, mellan 1971 och 2019 visar trendlinjen i figuren på en ökning med ca 100 mm/år (för hela perioden).

Den statistiska fördelningen av de beräknade årsvärdena för nederbörden visas i Figur 143. Av figuren framgår att nederbörden med 80 % sannolikhet varierar mellan 513 mm/år (percentil 10) och 754 mm/år (percentil 90). Detta motsvarar en relativ variation från medianen som motsvarar plus/minus 120 mm/år.



Figur 142. Uppmätta mängd nederbörd vid SMHI:s station på Hejnum hällar, period 1971 till 2021.



Figur 143. Uppmätt årsnederbörd vid SMHI:s station på Hejnum hällar. Fördelningsfunktion.

Om vi analyserar hur denna variation i nederbörd påverkar hur mycket vatten som faller direkt på sjön och på dess tillrinningsområden får vi följande resultat:

Nederbörd på Tingstäde träsksjöarea

Tingstäde träsksjöarea är 4,68 km² (enl. Svenskt vattenarkiv, via Wiki). Av detta följer att en variation på plus/minus 120 mm/år (80 % sannolikhet) motsvarar en variation på plus/minus 563 000 m³/år.

Nederbörd på Tingstäde träsk tillrinningsområde

Tingstäde träsk tillrinningsområdes area är ca 14,5 km². Arean är beräknad från den avgränsning som är gjord utifrån analys av höjdmmodell korrigerad utifrån fältobservationer i den hydrologiska utredningen (se ansökansbilaga B6).

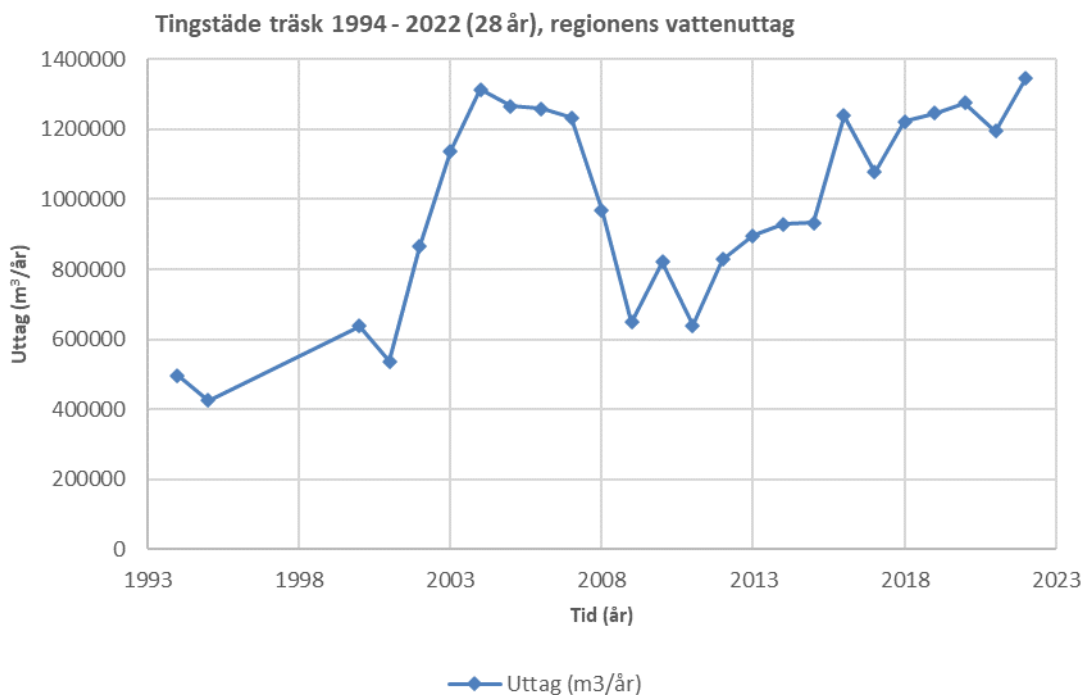
Avrinningsområdets storlek varierar mellan olika källor utifrån noggrannheten på kartläggningen. Korrigerat för sjöarean så anger svenskt vattenarkiv, via Wiki, 13,9 km² medan VISS anger 15,6 km². Av detta följer att en variation på plus/minus 120 mm/år (80 % sannolikhet) motsvarar en variation på plus/minus 1,74 miljoner m³/år.

Tillrinningen i vattenbalansen utgår från hela områdets areaviktade nettonederbörd på 222 mm (Bilaga 8). Avrinningsområdena runt sjön har dock ytterligare högre nettonederbörd vilket indikerar att det regnar mer på inre delarna av ön än nära kusten vilket innebär att denna siffra kan vara lågt satt.

Variationen kan också ställas i relation till osäkerheten i tillrinningsområdets storlek som motsvarar ca 370 000 m³/år för normalåret med 222 mm nettonederbörd.

8.5.3.4 Variation i regionens vattenuttag

Region Gotlands årliga vattenuttag från Tingstäde träsk framgår av Figur 144. Av figuren framgår att uttaget har ökat tydligt sedan 1990-talet. Under åren 2016 till 2022 ligger uttaget på ca 1,2 miljon kubikmeter per år. Det är detta värde som har använts i vattenbalansen (se Figur 140). De relativt låga lägsta vattennivåerna i sjön efter år 2015 har ett samband med de stora uttagen under denna period.



Figur 144. Regionens årliga vattenuttag ur Tingstäde träsk. Period 1994 till 2022.

8.5.3.5 Variation i vattennivå

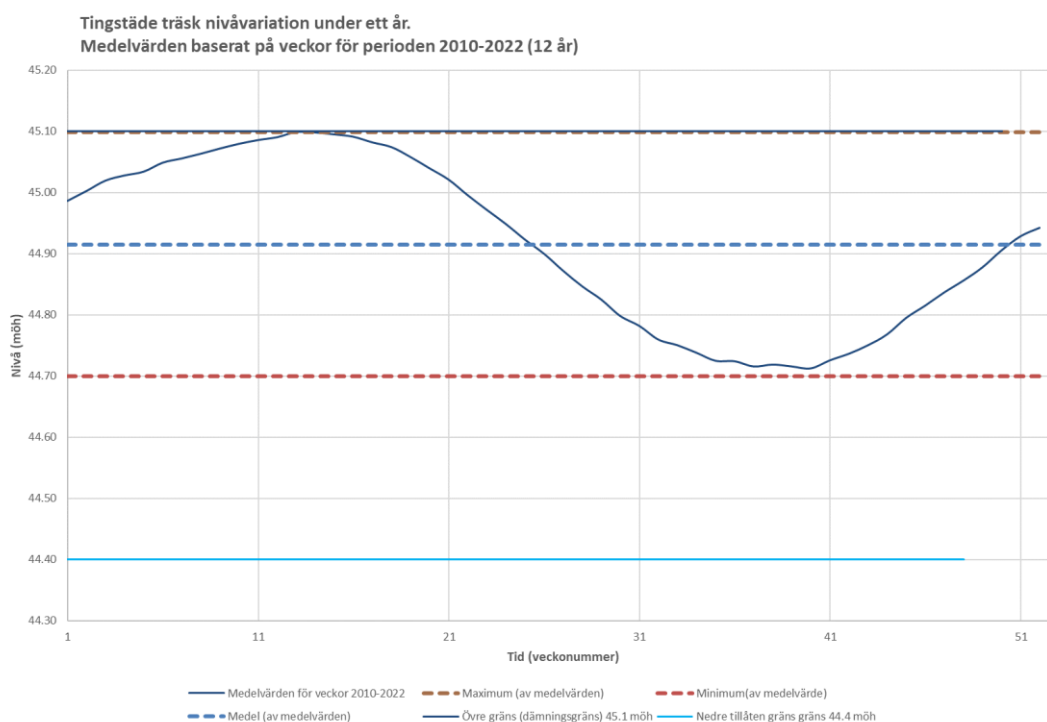
Vattennivån i Tingstäde träsk är reglerad. Följande text är ett citat från Region Gotlands hemsida:

”Tingstäde träsk är reglerat sedan mitten av 1960-talet. Befintligt tillstånd för uttag för ytvatten från Tingstäde träsk för allmän vattenförsörjning medger uttag ned till nivå + 44,4 m. Dämningsgränsen är +45,1 m. Detta ger en möjlig avsänkning på 70 cm om vattennivån når dämningsgränsen under vinterhalvåret. [Region Gotland, u.å]

Vattennivån i sjön sjunker under sommarhalvåret dels på grund av uttag av vatten för allmän vattenförsörjning men framförallt på grund av avdunstning. Enligt befintligt tillstånd ska en minimitappning om 10 l/s (motsvarande 864 m³ per dygn) släppas till Ireån. Minimitappningen motsvarar dock en sänkning av vattennivån i sjön motsvarande 0,2 mm per dygn (0,6 cm per månad eller 6,7 cm per år).

Region Gotlands uttag från Tingstäde träsk var ca 1 100 000 m³ vatten 2017, vilket motsvara 27,5 cm sänkning.”

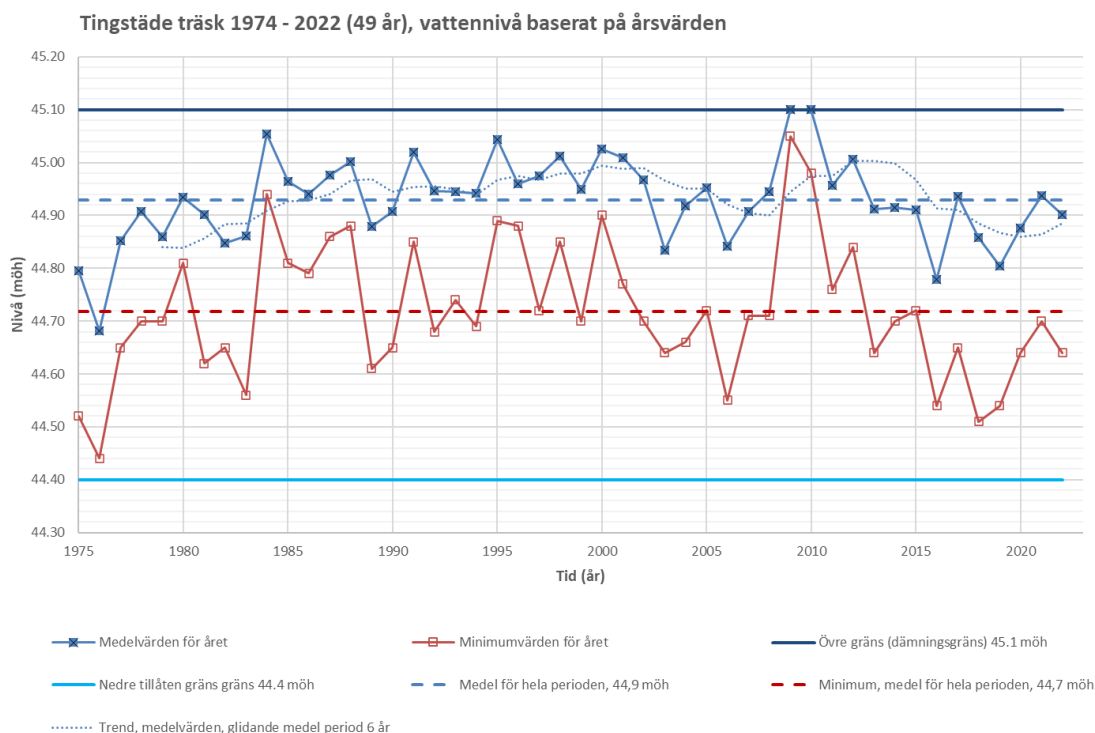
All data som har använts i analyserna av vattennivåer nedan har tillhandahållits av Region Gotland. En medelvärdesbeskrivning av hur vattennivån i Tingstäde träsk varierar under ett år har beräknats baserat på medelvärden för veckor för perioden 2010 till 2022 (12 år). Resultatet ges i Figur 145. Det bör kommenteras att Region Gotland anger dämningsgränser för sjön i RH00 vilket avviker ca 16 cm från RH2000 som används i denna rapport i övrigt.



Figur 145. Medelvärdesbeskrivning av hur vattennivån i Tingstäde träsk varierar under ett år, beräknat baserat på medelvärden för perioden 2010 till 2022 (12 år).

Figur 145 visar att vattennivån i sjön normalt når upp till dämningsgränsen under vintern. Under sommaren sjunker vattennivån med 0,4 m (medelvärde) ned till nivån +44,7 m (medelvärde). Vattennivåns medelvärde för den studerade perioden är +45,1 m.

Vattennivån i Tingstäde träsk varierar från år till år. Vi har beräknat medelvärden för alla år under perioden 1974 till 2022, baserat på de veckovärden som tillhandahållits av Region Gotland. Dessutom har vi beräknat miniminivån för alla år under samma period, också baserat på veckovärdena. Resultaten ges i Figur 146.



Figur 146. Tingståde träsk. Vattennivåns variation under perioden 1974 till 2022. Analysen baseras på årsvärden, som sin tur har beräknats baserat på veckovärden.

Av Figur 146 framgår att för den studerade perioden var vattennivåerna i Tingståde träsk som lägst runt mitten av 1970-talet, sommaren 1976. Mellan 1985 och 2015 varierade vattennivån runt ett medelvärde som är relativt stabilt (~+44,9 m). Sedan 2016 har dock medelvärdet och lägstvärdet tydligt fallit och legat vid eller under det värde som representerar hela den studerade periodens medelvärde. Miniminivåerna är för hela perioden är tydligt över den nedre tillåtna gränsen (+44,4 m).

Som tidigare beskrivits i kapitel 8.7.3.1 beror vattennivån i sjön på nettonederbördens variation och på det kommunala vattenuttaget.

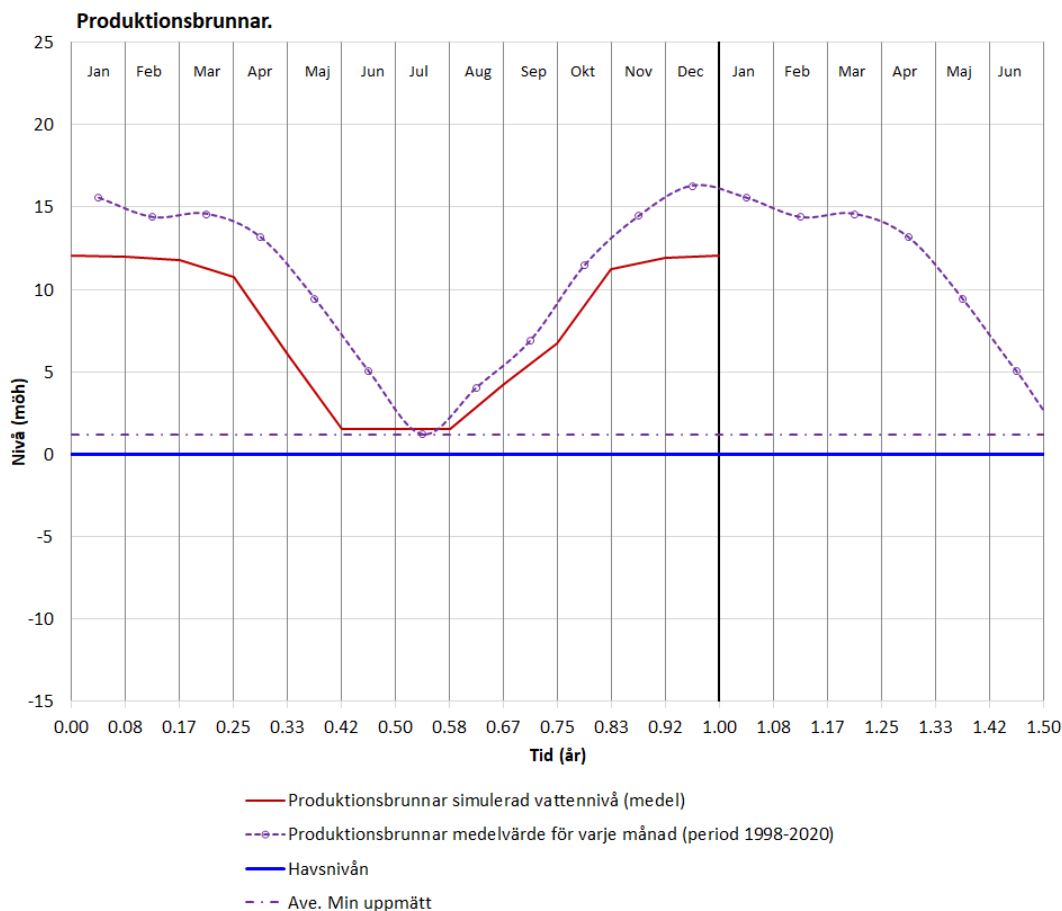
8.6 DRICKSVATTEN

8.6.1 Dyhagens vattentäkt

Det totala uttaget ur produktionsbrunnarna är 220 000 m³/år. Vattennivåerna i produktionsbrunnarna varierar under ett normalår med en betydande skillnad mellan högsta nivå (vinter) och lägsta nivå (sommaren), amplituden är i storleksordningen 15 m räknat som medelnivå. Nivån i enskilda brunnar kan vara ytterligare lägre när pumpning pågår samt högre när de inte pumpas vintertid.

En frågeställning är vilken betydelse en liten förändring i vattennivå under sommaren har för produktionen i brunnarna. Förhöjda kloridhalter under torrsommaren 2018 indikerar att man bör undvika lägre lägstanivåer för att undvika saltuppträngning. För att kvantifiera detta har simulerats vilken begränsning av produktionen det skulle innebära om vattennivån i produktionsbrunnarna aldrig tilläts vara lägre än den nuvarande miniminivån. Detta betyder att produktionen måste begränsas under juni och juli månad, vilket illustreras i Figur 147. *Utan* skyddsåtgärder ger denna begränsning ett produktionsbortfall lika med ca 13 000 m³/år efter 30 år med ansökt verksamhet. Det är en mycket liten förändring i jämförelse med det totala uttaget. Efter 8 års brytning är bortfallet ca 7 000 m³ och efter 20 år har det fulla bortfallet på 13 000 m³/år uppstått.

Med föreslagna skyddsåtgärder beräknas produktionsbortfallet minska till 6 000 m³ efter 8 år, 7000 m³/år efter 20 år samt 7000 m³/år efter 30 år. Att trenden vänder hänger ihop med Västra brottets vattenfyllnad. Efter att brytningen upphör och tälten börjar vattenfyllas ökar uttagsmöjligheterna i produktionsbrunnarna högst avsevärt.



Figur 147 Nuvarande samt beräknade framtida nivåer i vattentälten efter 30 års brytning i File hajdar-tälten.

8.6.2 Enskild vattenförsörjning

Som redovisat i kapitel 3.2 finns ett flertal brunnar inom det område som kan komma att påverkas av den ansökta verksamheten. Sänkta grundvattennivåer kan men behöver inte påverka uttagskapaciteten på ett sätt som innebär att den blir otillräcklig för enskild konsumtion.

Av alla de brunnar som redovisas i Figur 10 är det endast för ett fåtal som det bedöms föreligga någon egentlig risk. Sliteområdet har kommunal vattenförsörjning redan idag och effekten kommer att bli höjda grundvattennivåer till följd av vattenfyllnaden av Västra brottet. Brunnarna på fastigheter längst vägen mellan Klints och Laxare (mellan Västra brottet och File hajdar-tälten) bedöms med tiden få bättre grundvattentillgång än i dagsläget till följd av Västra brottets vattenfyllnad. Beroende på hastigheten för effekterna av positiv påverkan (från Västra brottet) och negativ påverkan (från File hajdar) kan nivåerna dock först försämrats något innan de förbättras. Störst risk föreligger därför i nordlig och nordostlig riktning från File hajdar tälten. Detta är den riktning där de närmaste brunnarna finns belägna. Att ersätta en enskild försämrad brunn är som regel tekniskt okomplicerat. Norr om File hajdar-tälten finns dock en mjölkgård med en större djurbesättning, vilken kan vara komplicerat att förse med ersättningsvatten bara genom att borra en eller flera nya brunnar. Av denna anledning är eventuellt ersättningsvatten till denna mjölkgård inkluderat i planerna för ett vattenverk, se ansökans bilaga B6. Vilket projekteras med en kapacitet så det ska vara möjligt att dra fram vatten som kan ersätta den eventuella förlusten.

8.7 GRUNDVATTENFÖREKOMSTER

8.7.1 Största påverkansområdets andel av nettonederbörden

Den ansökta verksamheten är ovanlig på det sättet att den inkluderar både negativ påverkan på grundvattennivåerna av den utökade länshållningen och positiv påverkan av vattenfyllnaden av Västra brottet. I detta avsnitt 8.7.1 redovisas och görs beräkningar för det samlade område som (grundvattenmässigt) påverkas av verksamheten, vare sig det är positiv eller negativ påverkan. I nästföljande avsnitt redovisas påverkan på varje grundvattenförekomst. Påverkan på kloridhalter redovisas i avsnitt 8.9.

För den ansökta framtida situationen efter 30 år kommer grundvattennivåerna kring täkterna att förändras enligt vad som redovisats ovan under kapitel 8.2. Detta medför en påverkan på de olika grundvattenförekomsterna inom det studerade området. I denna rapport redovisas i huvudsak endast beräkningarna för påverkan på de olika grundvattenförekomsterna år 30 då File hajdar-täkten når sin maximala utbredning. Undantaget är påverkan på Mellersta Gotland – Roma vilket redovisas även för scenariot för år 8. För mer ingående beskrivning av påverkan på övriga grundvattenförekomster år 8 hänvisas till bilaga 3.

Ett samlat största påverkansområde kan uppskattas genom att alla påverkansområdena, för olika årstider, i figurerna i kapitel 8.2, läggs ovanpå varandra och den yttersta linjen identifieras (längst bort från täkterna). En linje kan då ritas som följer de yttersta linjerna för påverkansområdet med gränsvärdet 0.3 m. Två sådana gemensamma linjer kan identifieras, en linje för gränsvärdet -0.3 m (avsänkning), en linje för gränsvärdet +0.3 m (höjning). Dessa två linjer representerar det största påverkansområdet för gränsvärdet 0.3 m, för situationen år 30 med skyddsåtgärder (Sc30G1R4K-VbG1Vam11-Sky5).

Områdena visas i Figur 148 nedan. Figuren visar också de olika grundvattenförekomsterna inom det studerade området. Tre grundvattenförekomster i berg finns inom det största påverkansområdet

- Grundvattenförekomsten Norra Gotland – Stenkyrka
- Grundvattenförekomsten Norra Gotland – Kappelshamn
- Grundvattenförekomsten Mellersta Gotland – Roma

Två grundvattenförekomster i jord finns i kanten av eller strax utanför största påverkansområde i berg

- Grundvattenförekomsten Tingstädeåsen
- Grundvattenförekomsten Lärbo

Arean för de sammanlagda påverkansområdena i Figur 148(gul och blå linjer) är:

Påverkansområdet för gränsvärdet -0.3 m (avsänkning) har area = 3300 hektar.

Påverkansområdet för gränsvärdet +0.3 m (höjning) har area = 3200 hektar.

Totalt = 6500 hektar

Den areaviktade nettonederbörden för ett normalår för den nuvarande situationen är 222 mm/år. Förändringar i nettonederbörd för det framtida klimatet är små. Betraktas nettonederbörden för hela året blir skillnaden liten mellan nettonederbörden för den nuvarande situationen och nettonederbörden för de framtida situationerna, se Tabell 11. En nettonederbörd lika med 222 mm/år producerar en total volym av nettonederbörd för de två områdena i Figur 148 lika med 14,5 miljoner m³/år.

Tabell 11. Faktorer för beräkning av nettonederbörden för framtida tidsperioder. Faktorerna baseras på beräkningar av SMHI.

Månad	Faktorer för nettonederbörd	
	Framtida period	
	2021-2050	2071-2100
1	1,058	1,067
2	1,005	1,042
3	1,043	0,951
4	0,747	0,783
5	1,000	1,000
6	1,000	1,000
7	1,000	1,000
8	0,901	1,001
9	1,063	0,913
10	0,994	1,045
11	1,075	1,006
12	1,051	0,977
	medel	medel
	0,99	0,98

Den framtida totala vattenavledningen från File hajdar-täkten (nettonederbörd och grundvatteninflöde minus infiltrerat vatten med skyddsåtgärder) och det vatten som används för fabriken från Östra- eller Västra brottet har beräknats till totalt 1,65 miljoner m³/år, vid slutet av tillståndstiden. Denna volym utgör ungefär 11% av nettonederbörden över det sammanlagda största påverkansområdet.

I den framtida totala vattenavledningen (som nämnts ovan) ingår vattenavledningen från den utökade File hajdar-täkten (med skyddsåtgärder) och vattenuttag till fabriken (som i praktiken sker från Västra brottet). Ökningen från File hajdar är ungefär 800 000 m³/år (nettonederbörd och grundvatteninflöde). Samtidigt upphör länshållningen av Västra brottet Detta innebär att den totala vattenbortledningen är ca 240 000 m³/år mindre år 30 jämfört med utgångsläget.

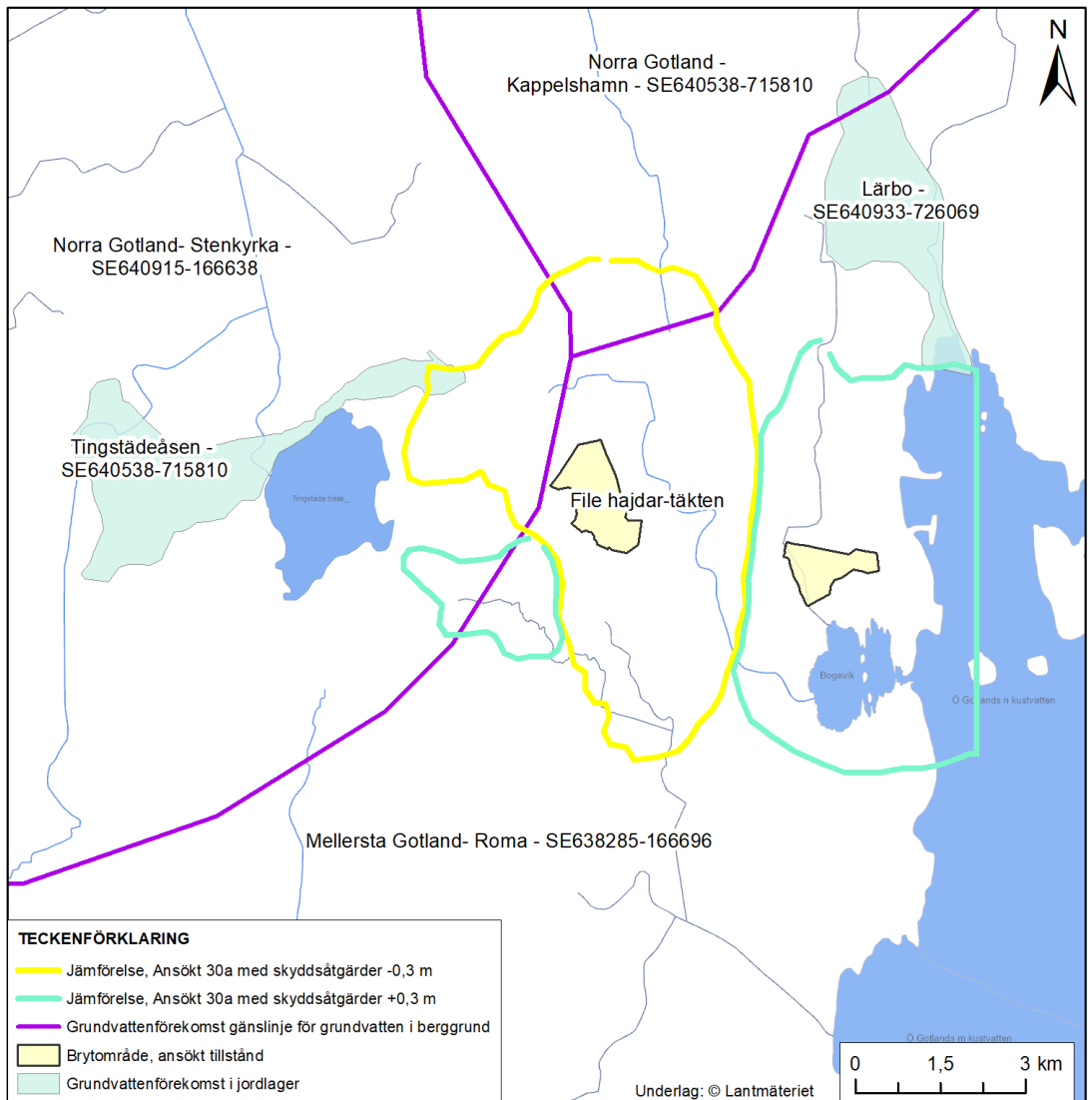
Även med avseende på grundvattensituationen och den totala grundvattenavledningen (dvs. nederbörd borträknad) har den framtida situationen år 30 en positiv vattenbalans. År 30 avleds ca 110 000 m³/år mindre grundvatten än när den ansökta situationen inleds. Orsaken till detta är dels att länshållningsvatten tillförs grundvattensystemet genom skyddsåtgärden infiltration (100 000 m³/år), dels att ökningen av volymen avlett grundvatten från i File hajdar-täkten är mindre än minskningen avlett grundvatten i Västra brottet. Minskningen i grundvattenbortledning motsvarar ca 1% av nettonederbörden över det sammanlagda största påverkansområdet.

Störst vattenavledning sker år 8 innan länshållningen av Västra brottet upphör. Avledningen av grundvatteninflöde och nettonederbörd förväntas då uppgå till 2,05 miljoner m³/år eller 21 % av nettonederbörden inom det påverkansområde som beräknats för år 8. Vilket alltså motsvarar en ökning om ca 100 000 m³/å jämfört med idag eller ca 1% av nettonederbörden över det sammanlagda största påverkansområdet för 8 års scenariot. Man bör betänka att

skyddsåtgärderna medför att påverkansområdet minskar vilket höjer den procentuella påverkan inom det beräknade området, men påverkan i faktisk volym (kubikmeter vatten) minskar.

Även när man bara betraktar grundvatten (ej nederbörd) blir bortledningen störst år 8, innan läns hållningen i Västra brottet upphör, då avledningen av grundvatten trots infiltration har ökat med ca 100 000 m³/år vilket motsvarar ca 1% av nettonederbörden över det sammanlagda största påverkansområdet.

Samtliga beräkningar redovisas mer ingående i bilaga 3.



Figur 148 Maximalt påverkansområde 30 år med skyddsåtgärder, 0,3 m gränsvärde Gränserna för de olika grundvattenförekomsterna i berg framgår i figuren med lila gränslinjer, grundvattenförekomsterna i jord är turkos. Det största negativa påverkansområdet är markerat med fet gul linje, största positiva området turkos färg

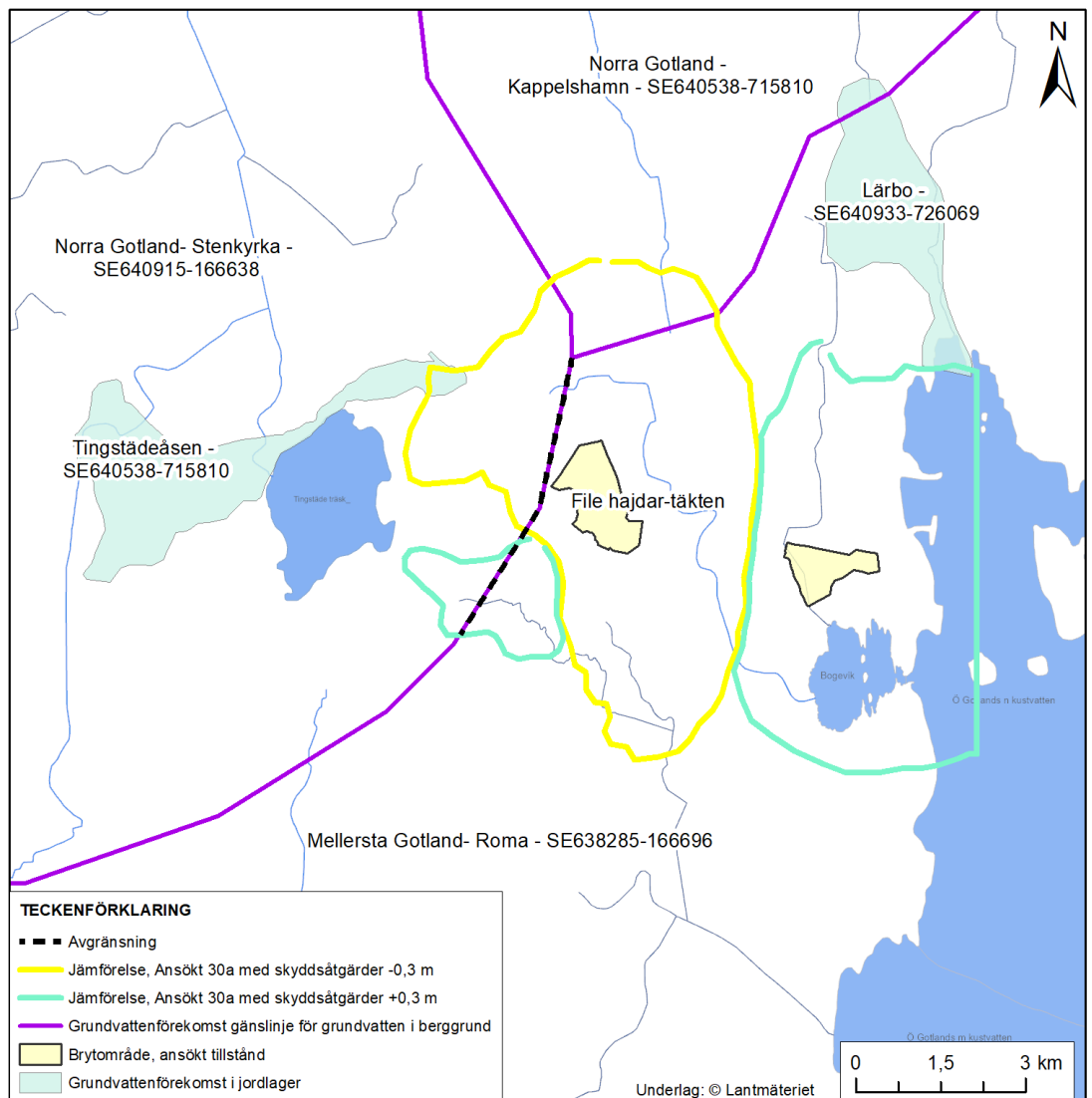
8.7.2 Norra Gotland – Stenkyrka

Den del av Norra Gotland - Stenkyrka som ligger innanför det största påverkansområdet (år 30) utgör ca 8,7 km² av vattenförekomstens totala area på 212 km² Se Figur 149. Figuren visar det studerade området med täkterna etc. Förändringen i grundvattenflöde från grundvattenförekomsten Stenkyrka har beräknats längs med svarta streckade linjen i Figur 149.

Modellberäkningar, se Bilaga 3 för metodik och avgränsningar, visar att utflödet från vattenförekomsten ökar med nära 220 000 m³/år (för ett normalår, år 30). Notera att det är förändringen i flöde jämfört med utgångsläget (slutet av innevarande tillståndspériod), inte det totala flödet. Förändringen i flöde blir en förlust för grundvattenförekomsten Stenkyrka. Förlusten

om 220 000 m³/år kan jämföras med nettonederbörden över areasnittet som är lika med 1,9 miljoner m³/år. Ökningen i utflöde motsvarar således 11% av nettonederbörden över areasnittet eller 5 promille av nettonederbörden över hela vattenförekomsten. Förändringen i flöde blir en vinst för grundvattenförekomsten Mellersta Gotland – Roma.

År 8 är ökningen av utflöde från Norra Gotland - Stenkyrka till Mellersta Gotland - Roma 95 000 m³/år.



Figur 149. Det studerade området med täkterna etc. Gränserna för de olika grundvattenförekomsterna framgår i figuren med lila linjer. Det största negativa påverkansområdet är markerat med fet gul linje, gränsvärde -0,3 m. Förändringen i utflöde från Grundvattenförekomsten Norra Gotland Stenkyrka har beräknats längs med den strejkade linjen.

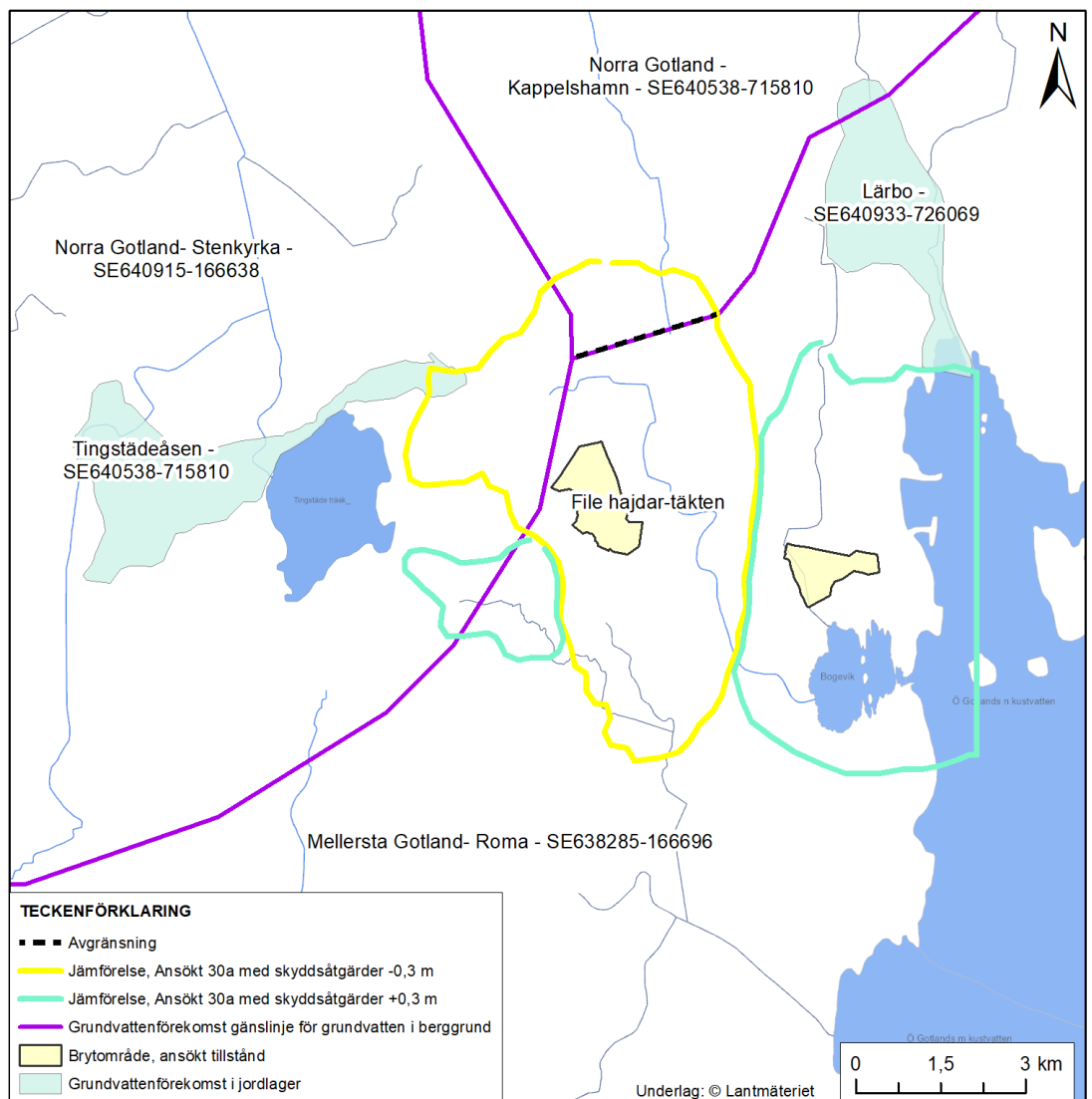
8.7.3 Norra Gotland – Kappelshamn

Den del av Norra Gotland – Kappelshamn som ligger innanför det största påverkansområdet utgör ca 3,5 km² av vattenförekomstens totala area på 161 km², se Figur 150. Figuren visar det studerade området med täkterna etc. Förändringen i grundvattenflöde från grundvattenförekomsten Norra Gotland – Kappelshamn har beräknats längs med svarta streckade linjen i Figur 150.

Modellberäkningar, se Bilaga 3 för metodik och avgränsningar, visar att utflödet från vattenförekomsten för ett normalår ökar med nära 115 000 m³ jämfört med utgångsläget (slutet av innevarande tillståndspériod). Notera att det är förändringen i flöde, inte det totala flödet. Vilket kan jämföras med nettonederbörden över areasnittet som är lika med 770 000 m³/år. Ökningen i utflöde motsvarar således 15% av nettonederbörden över areasnittet eller 3 promille

av nettonederbörden över hela vattenförekomsten. Förändringen i flöde blir en förlust för grundvattenförekomsten Norra Gotland – Kappelshamn. Förändringen blir samtidigt en vinst för grundvattenförekomsten Mellersta Gotland – Roma.

År 8 är ökningen av utflöde från Norra Gotland – Kappelshamn till Mellersta Gotland - Roma 22 000 m³/år.



Figur 150. Det studerade området med täkterna etc. Gränserna för de olika Grundvattenförekomsterna framgår i figuren med lila linjer. Det största negativa påverkansområdet är markerat med fet gul linje, gränsvärde -0.3 m. Förändringen i utflöde från Grundvattenförekomsten Kappelshamn har beräknats längs med den strejkade linjen.

8.7.4 Mellersta Gotland - Roma

Täkterna ligger i grundvattenförekomsten Mellersta Gotland - Roma. Med avseende på grundvattenflöden kan påverkan på grundvattenförekomsten Mellersta Gotland - Roma uppskattas som förändringen i grundvattenbortledningen från täkterna, plus förändringen i grundvattenflöden till och från de omgivande grundvattenförekomsterna. Utökningen av täkterna leder, som redovisat ovan, till ökade grundvattenflöden från grundvattenförekomsten Norra Gotland - Stenkyrka samt från grundvattenförekomsten Norra Gotland - Kappelshamn till grundvattenförekomsten Mellersta Gotland – Roma.

8.7.4.1 30 år

Den ansökta utökningen av File hajdar-täkten under 30 års tid medför att grundvatteninflödet till täkten ökar. Ökningen blir en förlust för grundvattenförekomsten Mellersta Gotland – Roma om

ca 360 000 m³/år jämfört med utgångsläget (slutet av innevarande tillståndperiod), (år 30 med skyddsåtgärder beaktade).

Grundvatteninflödet från Norra Gotland – Stenkyrka beräknas till 220 000 m³/år.

Grundvatteninflödet från Norra Gotland – Kappelshamn beräknas till 115 000 m³/år. Dessa två flöden är en vinst för grundvattenförekomsten Mellersta Gotland – Roma.

Östra brottet fortsätter att vara dränerat och förändras endast i liten omfattning i framtiden. Höjningen av vattennivån i Västra brottet leder dock till ett ökat grundvatteninflöde till Östra brottet både till följd av generellt högre grundvattennivåer och som ett inflöde genom bergpallen mellan de båda täkterna. Denna ökning i inflöde blir en förlust om vattnet inte pumpas tillbaka till Västra brottet, medan om vattnet pumpas tillbaka till Västra brottet blir det ingen förlust. Ökningen i inflöde beräknas till 130 000 m³/år, vid tidpunkten år 30, men då vattnet planeras pumpas tillbaka till Västra brottet sätts påverkan på vattenförekomstens vattenbalans till noll.

Vattenbortledningen från Västra brottet kommer att upphöra i framtiden efter år 8, och Västra brottet kommer att vattenfyllas. Genom att täktsjön och grundvattenförekomsten står i hydraulisk kontakt blir detta en vinst för grundvattensystemet i grundvattenförekomsten Mellersta Gotland – Roma. Vinsten motsvarar grundvattenbortledningen från Västra brottet för den tillståndsgivna situationen, som kan uppskattas till ca 500 000 m³/år (nettonederbörd borträknat).

Dessutom ingår grundvatteninfiltration i skyddsåtgärderna. År 30 förväntas infiltrationen uppgå till 100 000 m³/år. Detta vatten tillförs grundvattensystemet och blir alltså en vinst för grundvattenförekomsten Mellersta Gotland – Roma

En vattenbalans för Mellersta Gotland Roma inkluderar således

- Inflöden från intilliggande vattenförekomster
- Skyddsåtgärden infiltration
- Upphörandet av grundvattenbortledning från Västra brottet
- Återpumpning av inläckande vatten i Östra brottet till Västra brottet
- Uttag av vatten från Västra brottet som processvatten till fabrik i enlighet med ansökan

Ovanstående beaktat gör vattenförekomsten en vinst på ca 450 000 m³/år för år 30 jämfört med utgångsläget. Noterbart är att vinsten är i samma storleksordning som det som erhålls genom upphörandet av länshållning av grundvatten från Västra brottet, d.v.s. vid år 30 är påverkan även ökat vinsten från inflödet i Västra brottet, men med övriga åtgärder, nära noll.

Utöver beräknade vinst kan Heidelberg Materials tillhandahållande av renat länshållningsvatten från File hajdar-täkten som dricksvatten till region Gotland på 300 000 m³/år antas minska uttagen av grundvatten på andra håll på Gotland. Men då det inte är självklart till vilken grad uttag minskas eller i vilken vattenförekomst det sker är dessa vattenvolymer ej inkluderade i vattenbalansen. Detta får anses vara ett konservativt angreppssätt.

Samtliga beräkningar redovisas mer ingående i bilaga 3.

8.7.4.2 8 år

Motsvarande beräkningar som ovan har även gjorts för 8-årsscenario, dvs. innan länshållningen upphör i Västra brottet och den totala vattenavledningen därmed är som störst. Utökningen av File hajdar-täkten medför att grundvatteninflödet till täkten ökar. Ökningen blir en förlust för Grundvattenförekomsten Mellersta Gotland – Roma, om ca 240 000 m³/år. (Täkten år 8 med skyddsåtgärder).

Grundvatteninflödet från Norra Gotland – Stenkyrka beräknas till 100 000 m³/år.

Grundvatteninflödet från Norra Gotland – Kappelshamn beräknas till 20 000 m³/år. Dessa två flöden är en vinst för grundvattenförekomsten Mellersta Gotland – Roma.

Östra brottet fortsätter att vara dränerat och förändras endast i liten omfattning i framtiden. Höjningen av vattennivån i Västra brottet leder dock med tiden till ett ökat grundvatteninflöde till Östra brottet både till följd av generellt högre grundvattennivåer och som ett inflöde genom bergpallen mellan de båda täkterna. Denna ökning i inflöde blir en förlust om vattnet inte pumpas tillbaka till Västra brottet. Men genom att vattnet pumpas tillbaka till Västra brottet blir det ingen förlust. Heidelberg ansöker om ett uttag för fabriken om 300 000 m³/år. Uttaget för fabriken är större än det grundvatten som i utgångsläget strömmar in i Östra brottet vilket därmed medför en mindre förlust.

Vattenbortledningen från Västra brottet har i denna beräkning ännu inte upphört.

Grundvatteninfiltration ingår som skyddsåtgärd. År 8 förväntas vara det år då infiltrationen uppgår till 100 000 m³/år. Detta vatten tillförs grundvattensystemet och blir alltså en vinst för grundvattenförekomsten Mellersta Gotland – Roma.

När ovanstående summeras blir nettouttaget ur grundvattenförekomsten ungefär det samma som i utgångsläget eftersom ökningen i grundvatteninflöde till File hajdar-täkten lite drygt balanseras av infiltration och inflöde från andra vattenförekomster.

Det verkliga utfallet är beroende på när flöden justeras i infiltrationsanläggningar, länshållning de fakto upphör etc. Det kan inte uteslutas att det finns något år av de första åren uppkommer en marginell förlust på några 10 000 m³ eller maximalt 100 000 m³.

Samtliga beräkningar redovisas mer ingående i bilaga 3.

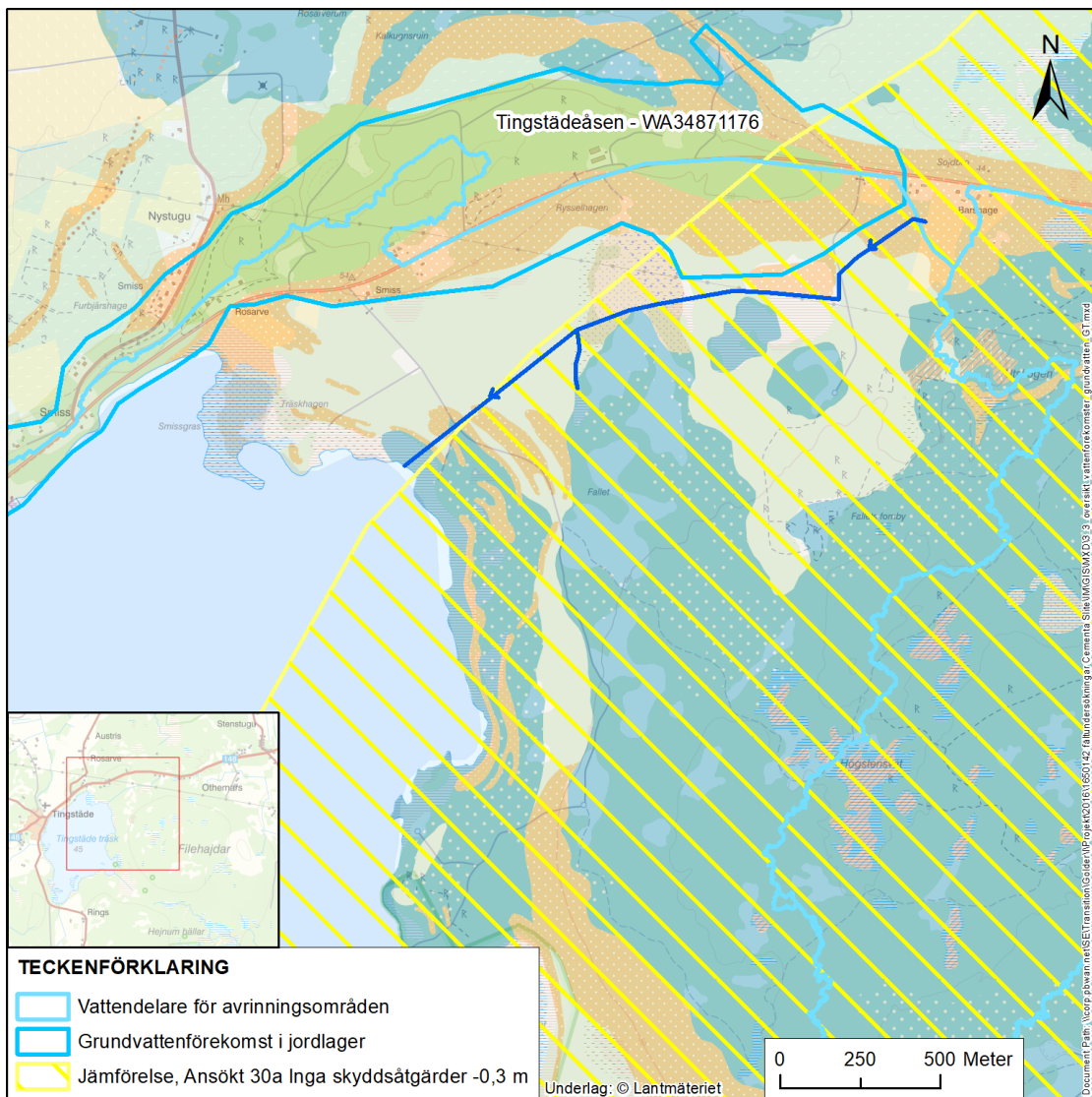
8.7.4.3 Nollalternativet

I nollalternativet vattenfylls täkterna. Hela grundvattensituationen förändras kring täkterna. I nollalternativet erhålls ingen kvantitativ förlust för grundvattenförekomsten Mellersta Gotland – Roma eller omkringliggande vattenförekomster. Istället erhålls en kvantitativ vinst som motsvarar hela vattenbortledningen från täkterna (grundvatten plus nettonederbörd) som för den tillståndsgivna situationen är ca 1,8 miljoner m³/år. Dock bör man notera att nettonederbörden förändras när täkterna vattenfylls. Nettonederbörden minskar betydligt i jämförelse med situationen då täkterna är dränerade (eftersom avdunstningen är mycket stor från en fri vattenyta i täkterna på sommaren). I det ansökta alternativet kommer täkterna också att vattenfyllas, efter det att verksamheten har avslutats. Samma kvantitativa vinst erhålls då som för nollalternativet, men efter det att verksamheten har avslutats.

8.7.5 Tingstädeåsen

Beräknat påverkansområde i berg sträcker sig in under ett litet hörn av grundvattenförekomsten i jord Tingstädeåsen. Hela vattenförekomsten redovisas i Figur 11 ett utsnitt av den östligaste delen redovisas i Figur 151 nedan. I enlighet med de diskussioner som förts fram ovan gällande strandavlagringar om skillnaden mellan jordgrundvatten och berggrundvatten kan kontakten mellan magasinen förväntas vara mycket begränsad och grundvattenbildningen i de grova jordlagren kan förväntas vara i stort sett hela nettonederbörden. Givet beräkningarna som redovisades under 8.7.2 ovan att endast 220 000 m³/år kommer från de 8,7 km² som ligger inom Norra Gotland Stenkyrka så kan den volym av detta som härrör från jordlagren i Tingstädeåsen antas vara försumbara.

Grundvattenmagasin i jord kan teoretiskt tänkas påverkas av minskad ytavrinning till följd av ökad grundvattenbildning. I fallet Tingstädeåsen kan dock denna påverkan avskrivras. Åsen ligger dels inte inom det avrinningsområde som ligger närmast och därmed påverkas mest av täkten. Vidare finns ett stort dike i lågpunkten mellan åsen och Filehajdar. Åsen ligger åt norr från diket sett. En eventuell förändring av ytvattenavrinning skulle därmed endast påverka mängden vatten som når diket, ej grundvattenvolymen i åsen. Se Figur 151.



Figur 151. Beräknat påverkansområde -0,3m, 30 år inga skyddsåtgärder (gult raster) placerat på jordartskarta och Tingstädeåsens grundvattenförekomst. Observera diket söder om åsen.

8.7.6 Lärbro

I samrådet har grundvattenförekomsten i jord lyfts som en grundvattenförekomst som skulle kunna komma att påverkas. Beräkningarna visar nu att den ligger helt utanför påverkansområdet och därmed inte påverkas, se Figur 150. Även om den hamnat innan för hade påverkan varit mycket liten och i positiv riktning.

8.8 NATURA 2000-OMRÅDEN

I tidigare kapitel har den samlade grundvattenpåverkan från täkterna beskrivits i form av påverkansområden, flödesförändringar per avrinningsområde, påverkan på vattenförekomster etc. I detta kapitel sammanfattas påverkan per Natura 2000-område. Kapitlet inkluderar även ett antal Natura 2000-områden som ligger utanför påverkansområdet och därmed inte påverkas. Det var under samrådsskedet inte möjligt att utesluta en påverkan på dessa Natura 2000-områden, varför även de har inkluderats i detta kapitel.

8.8.1 Bojsvätar

Bojsvätar tar emot allt ytvatten från delavrinningsområdena norr och väster om området, d.v.s. från File hajdar-täkten och områden sydväst om täkten. Avrinningsområdet kommer att minska med täkten och det finns därmed en risk att minskad ytavrinning. Påverkan av ett minskat

avrinningsområde bedöms och beräknas i ansökans bilaga B6. I samma dokument beskrivs även de skyddsåtgärder som är framtagna för att minska påverkan på ytvattenflödena inom Bojsvätar avrinningsområde.

Till följd av det ökade grundvatteninläckaget till File hajdar-täkten påverkas även grundvattensystemet. Påverkansområdet i grundvattensystemet har *utan skyddsåtgärder* beräknats sträcka sig ner till norra halvan av Bojsvätar med en nivåpåverkan på 0,3–1 m. Påverkan är ungefär lika stor för alla årstider. Påverkan uppkommer under de första 8 åren och är därefter i det närmaste konstant. Nivåpåverkan i djupt liggande lager i berget saknar dock betydelse för växtligheten på markytan. Uppmätta kraftiga artesiska tryck i djupa borrhål, avsaknaden av observerat utträngande berggrundvatten i karteringar och drönarkartläggningar samt med geofysik lokaliserade lager vilka löper nära parallellt under markytan är alla tydliga indikationer på att yt- och grundvattensystemet inte är sammankopplat inom Bojsvätar Natura 2000-område. Den påverkan som trots allt uppkommer – om inga skyddsåtgärder vidtas – är minskat utflöde av grundvatten (eller i praktiken främst ökad grundvattenbildning) inom området liksom inom det uppströms liggande delavrinningsområdet. Modelleringar har beräknat att minskningen i flöde inom delavrinningsområdet (No 3) under vegetationsperioden uppgår till ca 40 000 m³/år. Förlust av vatten utanför vegetationsperioden saknar betydelse då det finns ett stort överskott under denna period.

Med skyddsåtgärderna infiltration i berg och ridåinjektering kompenseras hela förlusten av vatten med att hela den förlorade vattenvolymen tillförs berget med en fördelning som innebär att det naturliga årsmönstret och variationen bibehålls. I nu genomförda modelleringar kvarstår en liten nivåpåverkan (ca 0,3 m i djupt liggande berg). Denna saknar som nämnt betydelse, men skulle sannolikt kunna optimeras bort. Nivåsänkningen försvinner dessutom med tiden då den positiva påverkan av vattenfyllnaden i Västra brottet kommer ifatt och förbi den negativa påverkan från utökningen av File hajdar-täkten.

8.8.2 Bälsalvret

Bälsalvret Natura 2000-område är beläget söder om Hejnum Kallgate och väg 147. Det var i ett tidigt skede inte möjligt att utesluta en påverkan på detta område. Området ligger dock med stor marginal utanför påverkansområdet i samtliga körda modellscenarier och kommer därmed inte påverkas. Området försörjs med grundvatten från södra Hejnum hållar eller områden ytterligare söderut. Det är även ett eget avrinningsområde som försörjs av ytvatten från Hejnum hållars södra delar så det finns inte heller någon risk för påverkan inom andra delar av avrinningsområdet.

8.8.3 Filehajdar

Filehajdar är det Natura 2000-område som ligger närmast File hajdar-täkten, men det ligger topografiskt högre än täkten. Det förekommer ingen grundvattenutströmning inom området. Området är i huvudsak beläget på revartad kalksten vilken saknar kontinuerliga vattenförande lager. Någon påverkan på de ytliga grundvattensystemen förväntas därmed inte uppkomma. Utan skyddsåtgärder visar modelleringen att en mindre grundvattennivåsänkning kan uppkomma. Detta avser dock en påverkan på stort djup där det finns kontinuerliga vattenförande lager och är alltså inget som kan påverka växtlighet på markytan. Med skyddsåtgärder uppkommer istället en viss grundvattennivåhöjning i södra delen av området, på stort djup, under vegetationsperioden.

8.8.4 Forsviden

Forsviden är ett glest skogbevuxet hållmarksområde i mosaik med alvar, skogsmark och våtmark beläget norr om File hajdar och väg 148. Det var i ett tidigt skede inte möjligt att utesluta en påverkan på detta område. Området ligger dock utanför påverkansområdet i samtliga körda modellscenarier och kommer därmed inte påverkas. Den västligaste delen av

Natura 2000-området utgörs av norra delen av våtmarken Stora Pussmyr. Våtmarken ligger i sin helhet utanför samtliga körda modellscenarier med och utan skyddsåtgärder. Någon risk för påverkan av förändrad hydrologi i andra delar av våtmarken föreligger alltså inte heller. Det löper heller inte några ytvattendrag från Filehajdar mot Forsviden som riskerar att påverkas.

8.8.5 Grodvät

Grodvät Natura 2000-område är beläget vid stranden av Tingstäde träsk och är en del av ett stort sammanhängande våtmarksområde som kantar hela östra sidan av träsket. Mätningar av vattennivåer och vattenkemi har visat att Grodvät kan ha ett kontinuerligt tillflöde av vatten genom hela den torra sommarperioden tack vare den mäktiga sandavlagring som finns belägen öster om området, se kapitel 4.7.1.

Området är beläget på revartad kalksten vilken saknar kontinuerliga vattenförande lager. Någon påverkan på de ytliga grundvattensystemen förväntas därmed inte uppkomma. Mellan File hajdar-täkten och Grodvät finns en topografisk vattendelare vilket innebär att ytvattenförhållandena ej påverkas. Modelleringar med grundvattenmodellen visar förvisso att området i en lågvattensituation, *utan skyddsåtgärder*, ligger inom ett påverkansområde på 0,3 m–1 m. Påverkan är dock av helt akademisk karaktär då den finns på stort djup. Faktum är att området tillhör de delar där de geofysiska undersökningarna visar på störst mäktighet av revartad kalksten och kontinuerliga vattenförande lager förväntas först på >50 m djup. Av samma anledning finns det inte heller någon risk för den delen av Natura 2000-området som utgörs av kransalgsjö och därmed är beroende av hela träskets vattennivå. *Med skyddsåtgärder* minskas påverkansområdet ytterligare så att påverkan på grundvattennivåer ca 50 m ner i berget endast är 0,3 m. Vintertid förväntas en avsänkning om 0,3 m. Under våren förväntas istället en höjning om 0,3 m. Övriga tider på året bedöms grundvattennivåerna vara det närmaste oförändrade.

8.8.6 Hejnum hållar

Hejnum hållar är ett höjdområde som är skilt från det höjdområde där File hajdar-täkten finns. Ytvattnet ingår i ett avrinningsområde utan kontakt med täktområdet. Den modellerade grundvattenpåverkan utan skyddsåtgärder sträcker sig in under den nordligaste delen av Hejnum hållar berör just lagren under området. De topogena rikkärren på höjden får sitt vatten från nederbörden och har täta bottnar av berg. De soligena rikkärren är beroende av nederbörd och ytavrinning från de högre delarna inom området. De hydrologiska förhållandena på Hejnum hållar kommer med andra ord inte att påverkas. *Med skyddsåtgärder* når inte påverkansområdena till Hejnum hållar.

8.8.7 Hejnum Kallgate

Hejnum Kallgate är ett stort Natura 2000-område som i väster begränsas av Hejnum hållar och i norr av File hajdar. Området lutar svagt åt sydost. Området försörjs därmed med vatten från båda nämnda höjdområden. Den del av vattenförsörjningen som sker från Hejnum hållar kommer inte påverkas av en utökad täkt. Grundvattenströmningen från File hajdar kommer dock att påverkas.

Till följd av det ökade grundvatteninläckaget till täkten skulle grundvattennivåerna *utan skyddsåtgärder* om 30 år sänkas med >0,3 m i de norra ca 2/5-delarna av området och med >1 m i den nordligaste 1/5 delen. Nivåpåverkan i djupt liggande lager i berget saknar dock som tidigare nämnts betydelse för växtligheten på markytan. Det finns tydliga indikationer på att yt- och grundvattensystemet inte är sammankopplade inom området:

- Uppmätta artesiska tryck i djupa borrhål vintertid respektive >20 meter ner till grundvattenytan delar av sommaren samtidigt som det finns vatten i bäcken eller grundvattenrören i jord ovanpå

- Avsaknaden av observerat utträngande berggrundvatten i karteringar och drönarkartläggningar
- Avsaknad av ytvatten med en kemisk karaktäristik liknande berggrundvatten
- Med geofysik samt hydrauliska tester lokaliserade lager vilka löper nära parallellt under markytan

De kalktuffkällor med kontinuerligt utströmmande vatten under hela sommaren kan tydligt kopplas till jordgrundvatten som strömmar ut från strandavlagringar. Dessa påverkas alltså inte av grundvattennivån i berg.

Precis som i Bojsvätar är den påverkan på grundvatten som trots allt uppkommer om inga skyddsåtgärder vidtas ett minskat utflöde av grundvatten (eller i praktiken främst ökad grundvattenbildning) inom området liksom inom det uppströms liggande delavrinningsområdet. Den del av Hejnum Kallgate som påverkas ligger inom samma delavrinningsområde (No 3) som det som rinner vidare mot Bojsvätar. Modelleringar har beräknat att minskningen i flöde inom delavrinningsområdet (No 3) under vegetationsperioden uppgår till ca 40 000 m³/år. Påverkan uppkommer under de första 8 åren och är därefter i det närmaste konstant. Förlust av vatten utanför vegetationsperioden saknar betydelse då det finns ett stort överskott under denna period. **Norra delen av Hejnum Kallgate ligger också geografiskt så att grundvattenförhållandena påverkas av den kommunala dricksvattentäkten och därmed finns en risk för kumulativa effekter.**

Med skyddsåtgärderna infiltration i berg och ridåinjektering kompenseras hela förlusten av vatten med att hela den förlorade vattenvolymen tillförs berget med en fördelning som innebär att det naturliga årsmönstret och variationen bibehålls. I nu genomförda modelleringar kvarstår en liten negativ nivåpåverkan (ca 0,3 m i djupt liggande berg) i det nordöstligaste hörnet samtidigt som det finns en motsvarande positiv påverkan närmast infiltrationsbrunnarna. Denna nivåpåverkan saknar som nämnt betydelse men skulle sannolikt delvis kunna optimeras bort. Nivåsänkningen försvinner dessutom med tiden då den positiva påverkan av vattenfyllnaden i Västra brottet kommer ifatt och förbi den negativa påverkan från utökningen av File hajdar-täkten.

Spårämnesförsök och modellering visar att det infiltrerade vattnet strömmar mot Dyhagen vattentäkt och de bägge bergtäktena. Infiltrationsvattnet bildar en hydraulisk barriär vilket bromsar upp det grundvatten som naturligt strömmar från väster i de djupa vattenförande lagren. Det infiltrerade vattnets kemi har därmed ingen påverkan på vattenkemin inom Natura 2000-området. Möjligen kan det infiltrerade vattnet strömma ut lokalt runt infiltrationsbrunnarna vid infiltration tidigt på våren när nivåerna ännu är höga. Men detta är med största sannolikhet något som kan optimeras bort med val av flöden och startpunkt för infiltration inom ramen för en adaptiv utformning

8.8.8 Kallgatburg

Kallgatburg Natura 2000-område är beläget vid Hejnum hållars östra fot. Vattenförsörjningen kommer från Hejnum hållar och som nederbörd. Området ligger i ett avrinningsområde som inte påverkas av täktens ytavrinning. *Utan skyddsåtgärder* får den norra delen av Kallgatburg en modellerad grundvattennivåpåverkan på 0,3–1 m. Samma förhållanden råder här som inom Hejnum Kallgate så en nivåpåverkan bedöms i praktiken sakna betydelse. *Med skyddsåtgärder* blir det inte heller någon nivåpåverkan.

8.8.9 Tiselhagen

Området är beläget i dalgången mellan höjdområdena File hajdar och Hejnum hållar. Områdets bevarandevärden är taiga, grön sköldmossa och nipsippa. Taiga som naturmiljö är beroende av rörligt markvatten, som når området via ytvatten och ytligt grundvatten från omgivande höjdområden. Tiselhagen berörs inte av den ansökta verksamhetens påverkan på

ytvattenavrinningen till följd av den vattendelare som Filehajdars höjdområde utgör. Det stora jorddjupet möjliggör ett grundvattenmagasin i jord, vilket inte finns i de andra Natura 2000-områdena. Modelleringen av grundvattenavsänkningen *utan skyddsåtgärder* visar en påverkan på området, men modelleringen avser grundvatten i berg och här finns som sagt ett grundvattenmagasin i jord. Modellering *med skyddsåtgärder* visar på påverkan i berget i form av höjda grundvattennivåer på ca 0,3 m under vår och höst, oförändrade nivåer sommartid och sänkta nivåer på ca 0,3 m vintertid. Det finns därmed inte någon risk att förändringar i vattenförhållandena på grund av täktverksamheten påverkar naturmiljön på ett betydande sätt.

8.9 KLORIDHALTER I GRUNDTVATTNET

8.9.1 Salthalter i grundvattnet kring Västra och Östra brotten vid vattenfyllning av täkterna

När Västra och Östra brotten är dränerade inströmmar grundvatten till täkterna. En del av detta grundvatten kommer från djupare delar av det omgivande berget och innehåller relativt höga koncentrationer av salt (klorid). Höga salthalter i grundvattnet i och omkring Västra och Östra brotten beror huvudsakligen på täkternas närhet till havet. Salt grundvatten på några tiotals meters djup har förekommit i det studerade området sedan området vid Slite låg under det salta Littorinahavets vattenyta (ca 3000 år sedan). Brytningen av kalksten påbörjades i slutet av 1960-talet i Västra brottet och i början av 1980-talet i File hajdar-täkten. Som tidigare nämnt uppmättes redan på 50-talet, alltså före Västra brottets tillkomst, höga salthalter i brunnar i Slite. Exempelvis uppgick medelhalten klorid vid årliga provtagningar under 50-talet i den kommunala vattentäkten Klint 1 (belägen strax norr om Spillingsmagasinet, vid Västra brottet) till över 0.4 kg/m³, vilket är högre än smakgränsen. Tydliga parametrar som påverkar salthalterna i en kustnära brunn är brunnens djup och uttaget i brunnen – djupa brunnar har höga salthalter, och stora uttag ger höga salthalter. Dessa förhållanden gäller kustnära brunnar oavsett täkternas påverkan.

För närvarande är File hajdar tækten och Östra brottet helt dränerade, i Västra brottet är pall 1 helt dränerad, men i pall 2 ansamlas vatten och där finns en fri vattenyta på en nivå av ca -30m. När Västra brottet vattenfylls kommer grundvatteninflödet till tækten att minska tydligt. Därmed kommer grundvatten från stort djup, som innehåller salt, inte längre att strömma mot Västra brottet – detta är en positiv effekt av att vattenfylla Västra brottet med avseende på salthalter i det omgivande grundvattnet. Så småningom kommer även grundvattennivåerna i ett större område kring Västra brottet att stiga betydligt. Detta betyder att mängden sött grundvatten i täkternas omgivning kommer att öka. Detta är positivt med avseende på vattenuttag i brunnar i omgivningarna, bland annat därför att det gör det möjligt att göra uttag i brunnarna med mindre risk för att ett djupare salthaltigt grundvatten kan tränga fram till brunnarna. Dessa förändringar kommer dock att inträffa långsamt, inga tydliga förändringar kan förväntas inträffa på många år, bland annat eftersom det bedöms ta över 30 år att vattenfylla Västra brottet.

En uppskattning av förväntat djup till salthalten 0,3 kg/m³ (smakgränsen), baserat på uppmätta salthalter, är för området kring Västra brottet ungefär 35 m motsvarande ca -30 m. Simuleringar av framtida situationer kring västra brottet visar att djupet till ett saltvatten med en koncentration lika med smakgränsen (0,3 kg/m³) kommer att öka. Det finns dock två processer att beakta:

- Det stigande grundvattnet lyfter grundvattnet med låga salthalter på ringa djup, till högre nivåer; vilket ger aningen högre salthalter på ringa djup
- De stigande grundvattennivåerna gör att grundvattnet med låga salthalter på ringa djup ersätts med sötvatten.

I det längre perspektivet kan vi förvänta oss att den andra processen blir den dominerande.

Det som diskuteras ovan, att vattenfyllning av Västra brottet leder till att saltvattnet kring tækten pressas nedåt, i jämförelse med utgångsläget, är inte en särskilt stor effekt. Mediandjupet till

koncentrationen 0.3 kg/m³ ökar med ca 1 m, när Västra brottet vattenfylls. En orsak till den inte så stora effekten är att Östra brottet bibehålls som dränerat. Det dränerade Östra brottet är dock inte den viktigaste orsaken till den begränsade effekten, den viktigaste orsaken är närheten till havet.

Att vattenfylla Västra brottet kommer inte förändra de historiska naturliga förutsättningarna för grundvattenuttag i området kring täkterna. Salt grundvatten på några tiotals meters djup har förekommit i det studerade området sedan området vid Slite låg under det salta Littorinahavets vattenyta. Risken för saltvatteninträngning i en lokal brunn nära havet kommer att vara betydande även då Västra brottet är vattenfyllt. En lokal brunn placerad nära det vattenfyllda Västra brottet, och som huvudsakligen får sitt vatten från det vattenfyllda tåkten, kan naturligtvis (teoretiskt sett) producera en större mängd vatten med låg salthalt, men då är det vatten från täkterna som når fram till brunnen.

För Nollalternativet (alla täkter vattenfyllda) och för situationen efter avslutad verksamhet med File hajdar-täkten vattenfylld och Västra brottet vattenfyllt (år 70), kommer saltvattenuppkoningen under täkterna att minska och sjunka tillbaka, men förändringen går långsamt, eftersom de hydrauliska gradienterna under täkterna är mycket mindre med vattenfyllda täkter, än då täkterna var dränerade. När täkterna var dränerade förekom stora hydrauliska gradienter riktade mot täkterna, när täkterna är vattenfyllda reverseras inte dessa gradienter till motsatsen, utan istället blir gradienterna mycket mindre. Vid vattenfyllda täkter förekommer både inflöden och utflöden av grundvatten till och från täkterna.

8.9.2 Framtida salthalter vid File hajdar-täkten och Dyhagens vattentäkt

Simuleringar av salthalter i produktionsbrunnarna visar att den ansökta utökningen av File hajdar-täkten med skyddsåtgärder, inte påverkar salthalterna i de kommunala produktionsbrunnarna. I kombination med ovan beskrivna av förbättrade förhållanden till följd av Västra brottets vattenfyllnad, kan man därmed utesluta påverkan i form av saltvatteninträngning på grundvattenförekomsten Mellersta Gotland – Roma eller någon av de intilliggande vattenförekomsterna.

En mer detaljerad beskrivning av modelleringen inklusive de minimala skillnader som förväntas vid olika simulerade situationer redovisas i bilaga 3.

Kring File hajdar-täkten är salthalterna i grundvattnet mycket låga, vilket demonstreras av att salthalterna i de kommunala produktionsbrunnarna är mycket låga för nuvarande situation. En framtida vattenfyllning av File hajdar-täkten är därför av mindre betydelse för salthalterna i observationsbrunnarna kring tåkten.

För de kommunala produktionsbrunnarna öster om tåkten är vattenfyllning av File hajdar-täkten av större intresse, eftersom det möjliggör en ökad produktion i brunnarna. Vattenfyllning av File hajdar dagbrott är också av intresse med avseende på salthalterna i produktionsbrunnarna, eftersom det minskar risken för saltvatteninträngning i produktionsbrunnarna om produktionen skulle ökas eller under torra somrar. Simuleringar av så väl nollalternativet som scenariot med ett vattenfyllt framtida täkt efter den ansökta verksamheten avslutas visar bägge att salthalterna i produktionsbrunnarna inte kommer stiga märkbart under sommarmånaderna utan istället ligga på nivåer som motsvarar vad som uppmäts under vinterhalvåret i nuläget.

9 REFERENSER

- Ali, S., & Patel, K. (2021). *Time-series Analysis Using a Transfer Function Noise Model Interpolation of Groundwater Levels from File Hajdar, Gotland*. [Masteruppsats, Chalmers Tekniska Högskola]. Chalmers Open Digital Repository.
<https://hdl.handle.net/20.500.12380/302911>
- Alm, P.-G. (2016). *Loggingrapport. Borrhålsloggning Gotland* (diarienummer: 423-2454/2016). Sveriges geologiska undersökning (SGU). 79 sid.
- Dahlqvist, P., Thorsbrink, M., Hjerne, C.-A. & Maxe, L. (2022). *Beskrivning av grundvattnet på Gotland* (SGU-rapport 2022:14). SGU.
<https://resource.sgu.se/dokument/publikation/sgurapport/sgurapport202214rapport/s2214-rapport.pdf>
- Dahlqvist, P., Triumf, C.-A., Persson, L., Bastani, M., Erlström, M., Jørgensen, F., Olander, T. H., Gustafsson, M., Thorsbrink, M., Schonning, K. & Curtis, P. (2015). *SkyTEM-undersökningar på Gotland* (Rapporter och Meddelanden 136). SGU.
<https://resource.sgu.se/dokument/publikation/rm/rm136rapport/rm136-rapport.pdf>
- Dahlqvist, P., Triumf, C.-A., Persson, L., Bastani, M., Erlström, M., & Schonning, K. (2017). *SkyTEM-undersökningar på Gotland, del 2* (Rapporter och Meddelanden 140). SGU.
<https://resource.sgu.se/dokument/publikation/rm/rm140rapport/rm140-rapport.pdf>
- Ek, B.-M., Thunholm, B., Östergren, I., & Mjönes, L. (2007). *Naturlig radioaktivitet, uran och andra metaller i dricksvatten* (SGU-rapport 2007:13). SGU.
<https://resource.sgu.se/dokument/publikation/sgurapport/sgurapport200713rapport/s0713-rapport.pdf>
- Erlström, M., Dahlqvist, P., Sopher, D., & Hjerne, C.-A. (2022). *Karaktärisering av karst på Gotland – en pilotstudie på mellersta Gotland* (SGU-rapport 2022:04). SGU.
<https://resource.sgu.se/dokument/publikation/sgurapport/sgurapport202204rapport/s2204-rapport.pdf>
- Erlström, M., Persson, L., Sivhed, U., & Wickström, L. (2009). *Beskrivning till regional berggrundskarta över Gotlands län*. (K 221). SGU.
<https://resource.sgu.se/dokument/publikation/k/k221beskrivning/k221-beskrivning.pdf>
- Freeze, R.A., & Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall. Inc.
- Friberg, N. (2022). *Geological 3D modelling of the File hajdar quarry, Slite*. [Examensarbete, Uppsala universitet]. DiVA.
- Föreningen skogen. (2000). *Vissningsgräns, permanent vissningsgräns*.
<https://www.skogen.se/glossary/vissningsgrans-permanent-vissningsgrans>
- Geovista AB (2016). Borrhålsloggning med Acoustic televiewer och temperatur vid Cementa ABs kalkbrott i Slite, Gotland. Geovista, Luleå.
- Geovista AB (2017). Borrhålsloggning med Acoustic televiewer, temperatur och elektrisk Konduktivitet vid Cementa ABs kalkbrott i Slite, Gotland. GeoVista, Luleå.
- GeoVista AB (2021). *Slite, resistivitetskampanj 2*. GeoVista, Luleå.
- Golder. (1991). *Täktverksamhetens inverkan på grundvattenförhållandena*. Golder.
- Golder (2016). *Bottenförhållanden i Tingstäde träsk, Gotland*. Golder, Göteborg.
- Golder. (2017). *Hydrogeologiska fältundersökningar på File Hajdar*. Golder,
https://www.cement.heidelbergmaterials.se/sites/default/files/assets/document/6d/fb/4._grundvat

[tenmodell - bilaga 2 hydrogeologiska faltundersokningar pa file hajdar med underbilagor-1.pdf](#)

Golder. (2020a). *Dämning vid Ancylusvallen vid Orghagarområdet vid Slite*. Golder, Göteborg.

Golder. (2020b). *Tekniskt PM, Jämförelse mellan uppmätta resultat från flowlogging och grundvattenmodell*. Golder, Göteborg.

Jones, W. K. (2013). Physical Structure of the epikarst. *Acta Carsologica* (42), 311- 314.
<https://doi.org/10.3986/ac.v42i2-3.672>

Livsmedelsverket. (2022). *Livsmedelsverkets föreskrifter och dricksvatten*. LIVSFS 2022:12.

Lundin, L. (1977). Grundvattnets vägar i moränmark. *Vannet i Norden*, nr. 2. Nordisk hydrologisk förening.

Lundqvist, G. (1940). *Sjösediment från Gotland* (SGU Årsbok 1940, nr 4). SGU.

Munthe et al. (1933), Kartblad. Sveriges Geologiska Undersökning. Ser. C. No 331.

Naturvårdsverket. (2007). *Modeller för transport och spridning av föroreningar fas 2* (Rapport 5692, Hållbar sanering). Naturvårdsverket.
<https://www.naturvardsverket.se/4a436e/globalassets/media/publikationer-pdf/ovriga-pub/hallbar-sanering/riskbedomning/620-5692-1.pdf>

Persson, L. (2021). *Geologisk 3D-modell: Gotland* (SGU-rapport 2021:27). SGU.
<https://resource.sgu.se/dokument/publikation/sgurapport/sgurapport202127rapport/s2127-rapport.pdf>

Region Gotland (u.å.a.) <https://www.gotland.se/100395>

SGU (Sveriges Geologiska Undersökning). (1977). *Hydrogeologiska synpunkter på planerad brytning av kalksten och märtelsten på File hajdar* (SGU-rapport 1977-10-31). SGU, Uppsala.

SGU. (2019, 9 oktober). *Konceptuell Modell*. <https://www.sgu.se/anvandarstod-for-geologiska-fragor/bedomning-av-influensomrade-avseende-grundvatten/utgangslage-och-utredningsstrategi/konceptuell-modell/>

SGU. (u.å.a). *Brunnar*. [Dataset]. <https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-brunnar.html>

SGU. (u.å.b). *Grundvattennivåer, Tidsserier* [Dataset].
<https://www.sgu.se/grundvatten/grundvattennivaer/matstationer/>

Sjöholm et al. Bestämning av permeabilitet hos restprodukter och jord, in situ, och på laboratorium. Nordtest Report. 254, 1994

Sparrenbom, C., & Jeppson, H. (2022). *Grundvattenboken*. Studentlitteratur AB.

Svantesson S-I. (2008) SGU K4 Beskrivning till jordartskartan Gotland
<https://resource.sgu.se/dokument/publikation/k/k4beskrivning/k4-beskrivning.pdf>

Svenskt Vatten. (2008). *Råvattenkontroll - Krav på råvattenkvalitet*. Svenskt Vatten.

Svensson, C., & Sällfors, G. (1985). *Beräkning av dimensionerande grundvattentryck 1. Göteborgsregionen* (Meddelande nr 78). Chalmers Tekniska Högskola.
https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/179512/local_179512.pdf

Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI). (2013). *Svenskt vattenarkiv*.
<https://www.smhi.se/data/hydrologi/svenskt-vattenarkiv>

Sveriges Speleologförbund (SSF). (u.å.). *SSF Grottdatabas*. [Dataset].
<https://basen.speleo.se/rel/login.php>

Tullström, H. (1955). *Hydrogeologiska förhållanden inom Slite köping på Gotland* (Årsbok 48 Nr.3). SGU. <https://resource.sgu.se/dokument/publikation/c/c538rapport/c538-rapport.pdf>

VIAK AB. (1974). *PM. Ang utökat vattenuttag från grundvattentäkter vid Filehajdar och Klints. Slite*, Gotlands kommun.

VIAK AB. (1981). *Redogörelse för undersökningar vid grundvattentäkten Klints i Slite samt förslag till åtgärder*. Gotlands kommun.

Williams, P. W. (2008). The role of epikarst and cave hydrogeology – a review. *International journal of speleology* 37(1), 1-10. <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.37.1.1>

WSP Golder. (2022). *Hydrogeologisk utredning inför ansökan om tillstånd till täktverksamhet. Utredning avseende Cementas täktverksamhet i Slite*. Daterad 2022-04-08.

08FS 2016:15 Riktvärden

<https://www.lansstyrelsen.se/download/18.151739f161e6faa20626110/1526068935791/201615%20BILAGA%204.pdf>

Muntliga källor

Mikael Erlström, SGU, 2021

Tony Gustafsson, Region Gotland, 2023

Otto Pile, SGU, 2023

Kommentar gällande referenser

Denna utredning är framtagen och utformad för att innefatta all relevant hydrogeologisk information för den aktuella prövningen. För att hela det vetenskapliga arbete som har utförts ska vara spårbart innehåller det referenser till tidigare utförda utredningar. Den av författarna bedömt relevanta informationen för målet från dessa utredningar finns inkluderande i föreliggande material. Om någon granskare av materialet skulle bedöma att det är relevant att mer i detalj studera tex metodiken för en enskild undersökning, borrhöret från ett enskilt borrhål finns alla hydrogeologiskt relaterade undersökningar som Heidelberg låtit göra mellan 1990 och 2022 sammanfogade som ett dokument (1200 sidor) på följande länk

<https://www.cement.heidelbergmaterials.se/sites/default/files/2022-04/Bilaga%20B5.%20Hydrogeologisk%20utredning.pdf>

Av spårbarhetsskäl innehåller denna rapport även små referenser till olika jämförda modelleringsscenarier. Dessa för läsaren sannolikt obegripliga kombination av siffror och bokstäver är endast avsedda för att författarna ska kunna verifiera och vid behov justera jämförda scenarion. Totalt har hundratals modelleringsscenarier gjorts inom projektet.

BILAGOR

1. KARTA - ALLA BORRHÅL
2. HYDROGEOLOGISK FÄLTRAPPORT: HYDROGEOLOGISKA UNDERSÖKNINGAR RUNT FILE HAJDAR-KALKSTENSTÄKT 2022 – 2023
 - A. ÖVERSIKTSKARTA – ALLA BORRHÅL
 - B. BORRPROTOKOLL
 - C. SONDERINGS PROTOKOLL
 - D. UTVÄRDERADE HYDRAULTESTER
 - E. FÄLT PROTOKOLL BORRHÅLSLOGGNING
 - F. UTVÄRDERADE BORRHÅLSLOGGAR
 - G. GRUNDVATTENNIVÅER
3. GRUNDVATTENMODELL FÖR ANSÖKAN OM UTÖKADE TÄKTER 2023
 - A. SENSITIVITETSANALYS AV MODELLENS KALIBRERING
 - B. JÄMFÖRELSE AV TVÅ FRAMTIDA SITUATIONER
 - C. NOLLALTERNATIVET – VARIANT 2
 - D. FÖRÄNDRING AV GRUNDVATTENFLÖDEN I LOKALA OMRÅDEN. BERÖKNINGSMETODIK.
 - E. BERÄKNAD FÖRÄNDRING AV FLÖDET AV YTLIGT BERGGRUNDVATTEN I LOKALA AVRINNINGSSOMRÅDEN.
 - F. HUR EFFEKTEN AV INJEKTERING AV BERGET ÄR INKLUDERAD I MODELLEN.
4. TTEM UNDERSÖKNING MED SAMTOLKNING MED SKYTEM OCH GEOLOGISK MODELL: SLITE, GOTLAND RAPPORT
 - A. ÖVERSIKTS OCH KVALITETSKARTOR, TTEM OCH SKYTEM
 - B. MEDELMOTSTÅNDSKARTA, TTEM OCH SKYTEM
 - C. PROFILER, TTEM OCH SKYTEM
 - D. TTEM SYSTEMINSTÄLLNINGAR
5. RIDÅINJEKTERING: FILE HAJDAR OCH VÄSTRA BROTTET
6. STRUKTURGEOLOGISKA OBSERVATION FILEHAJDAR: FÄLT OBSERVATIONER 2020, LINEAMENTANALYS 2022
7. HYDROGEOLOGISKT UTLÅTANDE: RISKER VID VATTENFYLLNAD AV ÖSTRA OCH VÄSTRA BROTTET
 - A. METODBESKRIVNING
 - B. GEOTEKNISKT UTLÅTANDE
8. BERÄKNING AV KORRIGERAD NEDERBÖRD OCH EVAPOTRANSPIRATION FÖR NORDÖSTRA GOTLAND