

Hydrologiska och hydrogeologiska effekter på våtmarker och skogsområden av slutförvarsanläggningen i Forsmark

Resultat från modellering med MIKE SHE

Erik Mårtensson, Lars-Göran Gustafsson
Ann-Marie Gustafsson, Maria Aneljung, Ulrika Sabel
DHI Sverige AB

Juni 2010

Svensk Kärnbränslehantering AB
Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co
Box 250, SE-101 24 Stockholm
Phone +46 8 459 84 00



Hydrologiska och hydrogeologiska effekter på våtmarker och skogs- områden av slutförvarsanläggningen i Forsmark

Resultat från modellering med MIKE SHE

Erik Mårtensson, Lars-Göran Gustafsson

Ann-Marie Gustafsson, Maria Aneljung, Ulrika Sabel

DHI Sverige AB

Juni 2010

Denna rapport har gjorts på uppdrag av SKB. Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarnas egna. SKB kan dra andra slutsatser, baserade på flera litteraturkällor och/eller expertsynpunkter.

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från www.skb.se.

Sammanfattning

Denna rapport är ett underlag för utredningar och tillhörande konsekvensbeskrivningar rörande vattenverksamhet i form av bortledning av grundvatten från slutförvarsanläggningen för använt kärnbränsle i Forsmark. Rapporten redovisar fördjupade modelleringsresultat i form av kompletterande känslighetsanalyser samt detaljerade hydrologiska och hydrogeologiska analyser av specifika naturobjekt i Forsmark.

Känslighetsanalyserna syftar till att undersöka modellresultatens känslighet för i) de meteorologiska förhållandena, ii) hårdgjorda ytor samt iii) modellbeskrivningen av den befintliga anläggningen SFR (slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall). Ett antal beräkningsfall syftar till att studera kumulativa effekter av grundvattenbortledning från ett utbyggt SFR. Beräkningarna har utvärderats med avseende på grundvattentytans avsänkning samt trycksänkningar i berget.

I rapporten analyseras de hydrogeologiska och hydrologiska förhållandena för ett antal utvalda våtmarksobjekt och skogsobjekt. Urvalet av objekt avser att täcka in olika typer av värdefulla naturobjekt i olika geografiska lägen i förhållande till påverkansområdet för grundvattentytans avsänkning. Analysen omfattar grundvattennivåer för samtliga naturobjekt, medan våtmarker med särskilt höga naturvärden har studerats i detalj med avseende på ytvattendjup, behov av vattentillförsel och objektspecifika vattenbalanser. Dessa studier har utförts för olika meteorologiska förhållanden i form av ett typår (2006) samt ett statistiskt normal-, torr- respektive våtår, med en återkomsttid på 100 år för torr- respektive våtåret. Samtliga beräkningar för störda förhållanden med ett helt öppet förvar är utförda med en hydraulisk konduktivitet på $K_{inj} = 10^{-7}$ eller 10^{-8} m/s i den injekterade zonen kring slutförvarsanläggningens undermarksdelar.

Resultaten visar att tidsberoende nederbörd och snösmältning har stor inverkan på tidsvariationerna för djupet till grundvattentytan för opåverkade förhållanden. Nederbörd och snösmältning har även stor inverkan på avsänkningen av grundvattentytan till följd av grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen. För ett normalår, beräknat utifrån nederbördsdata från referensnormalperioden 1961–1990, är årsmedelvärdet för påverkansområdet 1,15 km² för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. Jämfört med normalåret är påverkansområdets storlek 17 % större under ett torrår och 19 % mindre under ett våtår. Grundvattentytans avsänkning varierar även under enskilda år. För typåret 2006 skiljer det en faktor tre i storlek mellan det största (november) och minsta (maj) modellberäknade påverkansområdet.

En implementering av den befintliga undermarksanläggningen SFR i modellverktyget MOUSE ger ett modellberäknat inläckage till SFR på 6,7 l/s, vilket kan jämföras med ett uppmätt inläckage på cirka 6 l/s. Enligt modellberäkningarna ger grundvattenbortledningen från SFR en avsänkning av grundvattentytan i ett område med en yta på 0,17 km². Avsänkningen är koncentrerad till SFR-piren och till områden där det finns vertikala sprickzoner i berget, norr och nordost om sjön Bolundsfjärden. Trycksänkningen i berget på nivån 50 m u h sträcker sig ut till modellranden i nordost. En utbyggnad av SFR är planerad. Enligt modellresultaten kommer utbyggnaden endast medföra en liten tillkommande avsänkning av grundvattentytan och sänkning av trycket i berget.

För våtmarksobjekten kan en förhållandevis liten avsänkning av grundvattentytan leda till vegetationsförändringar och på längre sikt igenväxning. Skogarna är inte lika känsliga för en avsänkning av grundvattentytan. Enligt modellberäkningarna innebär grundvattenbortledningen från förvaret att grundvattentytan avsänks med mer än 0,1 m som ett årsmedelvärde under ett normalår i en femtedel av de studerade våtmarksobjekten och i hälften av skogsområdena. Andelen objekt där grundvattentytan avsänks är högre under ett torrår och lägre under ett våtår.

Ytvattendjupen i de studerade våtmarksobjekten varierar mellan ett fåtal centimeter och en halvmeter. Ett antal våtmarksobjekt bedöms eventuellt behöva vattentillförsel för att bibehålla en ostörd vattennivå vid grundvattenbortledning från förvaret. Enligt modelleringsresultaten är vattenbehoven generellt störst under våren och hösten. I ett av våtmarksobjekten uppgår vattenbehovet till cirka 3 l/s som ett medelvärde för typåret 2006. Objektspecifika vattenbalanser och partikelspåringsberäkningar visar att tillrinningen till våtmarksobjekten huvudsakligen sker via jordlagren. Detta överensstämmer med den konceptuella bilden av ett ytligt flödessystem i jordlagren med många lokala in- och utströmningsområden. Grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen leder till att vattenbalansen förändras för några av de studerade våtmarksobjekten. Dessa förändringar beror generellt på en minskad grundvattenutströmning i utströmningsområden, en ökad grundvattenbildning i inströmningsområden och ett ökat nettoflöde från jord till berg.

Summary

This report provides background material for investigations and associated impact assessments concerning water operations in terms of withdrawal of groundwater from the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. The report presents detailed modelling results in the form of supplementary sensitivity analyses and detailed hydrological and hydrogeological analyses of specific nature objects in Forsmark.

The sensitivity analyses aim to investigate the sensitivity of the modelling results to i) the meteorological conditions, ii) impervious surfaces and iii) the model description of the present SFR (final repository for short-lived radioactive waste). A number of simulation cases aim to study cumulative effects of groundwater withdrawal from an extended SFR. The simulations are evaluated with respect to the groundwater table drawdown and head changes in the bedrock.

The report analyses the hydrogeological and hydrological conditions for a number of selected wetland objects and forest objects. The selection of objects aims to cover different types of valuable nature objects at different geographical locations in relation to the influence area of the groundwater table drawdown. The analysis comprises groundwater levels at all nature objects, whereas wetlands with particularly high nature values have been studied in detail with respect to surface water levels, the need for water supply and object-specific water balances. These studies have been performed for different meteorological conditions in the form of a type (2006) and a statistically normal, dry and wet year, respectively, with a return period of 100 years for the dry- and wet years. All simulations for disturbed conditions with a fully open repository are done with a hydraulic conductivity of $K_{inj} = 10^{-7}$ or 10^{-8} m/s in the grouted zone.

The results show that time-dependent precipitation and snow melt have large influence on the temporal variations of the depth to the groundwater table for undisturbed conditions. Precipitation and snow melt also have large influence on the drawdown of the groundwater table due to the groundwater withdrawal from the repository. For a normal year, based on precipitation data from the reference normal period 1961–1990, the annual average size of the influence area is 1.15 km² for a grouting level of $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. Compared to the normal year, the size of the influence area is 17% larger during a dry year and 19% smaller during a wet year. The groundwater table drawdown also varies during individual years. For the type year 2006, the size of the influence area is approximately three times larger in November than in May.

Implementation of the present SFR underground facility in the modelling tool MOUSE yields a groundwater inflow to SFR of 6.7 L/s, compared to a measured inflow of some 6 L/s. According to model calculations, the groundwater withdrawal from SFR causes groundwater table drawdown in an area with a size of 0.17 km². The influence area is concentrated to the SFR pier and areas with vertical fracture zones in the rock, located north and northeast of Lake Bolundsfjärden. The head change in the bedrock at the level 50 m b s l reaches the model boundary in the northeast. An extension of the SFR facility is planned. According to the modelling results, the extension will only yield small additional groundwater table drawdown and head changes in the bedrock.

For the wetland objects, even a relatively small drawdown of the groundwater table may cause vegetation changes and ultimately overgrowth. The forests are not as sensitive to a drawdown of the groundwater table. According to the model calculations, the groundwater withdrawal from the repository yields a groundwater table drawdown that exceeds 0.1 m as an annual average for a normal year in one fifth the studied wetland objects and in half of the forest objects. The fraction of objects with a groundwater table drawdown is higher during a dry year and lower during a wet year.

The surface-water depth in the studied wetland objects ranges from a few centimetres to half a metre. It is judged that a number of wetland objects may require water supply in order to maintain an undisturbed water level during groundwater withdrawal from the repository. According to the modelling results, the water-supply requirements are largest during spring and autumn. In one of the wetland objects, the water requirement is 3 L/s as an annual average for the type year 2006. Object-specific water balances and particle tracking calculations show that the inflow to the wetland objects mainly takes place through the Quaternary deposits. This is in accordance with the conceptual model, according to which there is a shallow groundwater flow system with many local recharge and discharge areas. The groundwater withdrawal from the repository implies that the water balance is changed for some of the studied wetland objects. These changes is generally due to a reduction of the groundwater discharge in discharge areas, increased groundwater recharge in recharge areas, and an increase of the net flow from the Quaternary deposits to the bedrock.

Innehåll

1	Introduktion	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	Omfattning och syfte	7
1.3	Översikt över modellversioner	8
1.4	Rapportinnehåll	8
2	Hydrogeologisk beskrivning	9
2.1	Hydrologiska och hydrogeologiska förhållanden	9
2.2	Modellverktyg	9
2.3	Modellområde och randvillkor	11
2.4	Terminologi	12
3	Beräkningsförutsättningar	13
3.1	Meteorologiska förhållanden	13
3.2	Hårdgjorda ytor	14
3.3	SFR – befintlig anläggning och framtida utbyggnad	14
3.4	Beräkningsfall	16
4	Övergripande resultat	19
4.1	Sammanställning av grundvattenytans avsänkning under typåret 2006	19
4.2	Grundvattenytans avsänkning för olika meteorologiska förhållanden	24
4.3	Inverkan av hårdgjorda ytor på grundvattenytans läge	30
4.4	Inverkan av SFR på grundvattenytans avsänkning och grundvattentrycket	32
4.5	Transpiration från omättad och mättad zon	38
5	Naturobjekt inom undersökningsområdet	41
5.1	Våtmarksobjekt	42
5.2	Skogsobjekt	44
6	Objektspecifika resultat	47
6.1	Vattenbalanser	47
6.2	Partikelspårning	52
6.2.1	Våtmarksobjektens avrinningsområden	52
6.2.2	Flöden från jord- och berglager	52
6.3	Grundvattennivåer för olika meteorologiska förhållanden	58
6.3.1	Avrinningsområdena för sjöarna Norra Bassängen och Puttan	58
6.3.2	Våtmarksobjekt	59
6.3.3	Skogsobjekt	62
6.4	Ytvattennivåer och behov av vattentillförsel	65
7	Sammanfattning av resultat	73
7.1	Grundvattenytans avsänkning och trycksänkningar i berget	73
7.2	Påverkan på specifika våtmarks- och skogsobjekt	73
8	Referenser	75
Bilaga 1	Vattenbalanser för våtmarksobjekt	77
Bilaga 2	Avrinningsområden	93
Bilaga 3	Vertikalt flöde i jord- och berglager	107
Bilaga 4	Modellberäknade ytvattendjup	123

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) har i uppdrag att ta hand om allt radioaktivt avfall från de svenska kärnkraftverken. I samband med uppförande, drift och avveckling av slutförvarsanläggningen för använt kärnbränsle i Forsmark i Östhammars kommun, planeras ett antal åtgärder som utgör vattenverksamhet enligt 11 kapitlet i miljöbalken. Under uppförande och drift av slutförvarsanläggningen kommer inläckande grundvatten att ledas bort från anläggningens undermarksdelar. Denna grundvattenbortledning kommer att ge upphov till förändringar av de hydrologiska och hydrogeologiska förhållandena ovan och kring förvaret. Dessa förändringar kan i sin tur medföra negativa ekologiska konsekvenser för olika arter och naturvärden. Det behövs därför stöd av hydrogeologiska och hydrologiska analyser för att kunna beskriva och förutsäga konsekvenserna. Analysresultaten är även ett redskap för att kunna utvärdera åtgärder som syftar till att förebygga negativa effekter och/eller begränsa konsekvenser.

I Forsmarksområdet finns det ett antal naturobjekt (våtmarker och skogsområden) med höga naturvärden och förekomst av rödlistade och/eller skyddade växt- och djurarter. En stor del av naturvärdena och flera av de djur- och växtarter som förekommer är beroende av blöta eller fuktiga förhållanden. Detta motiverar detaljerade analyser av effekterna av grundvattenbortledningen på grund- och ytvattennivåer i specifika naturobjekt. Det behövs även detaljerade analyser av åtgärder som kan bevara utpekade naturvärden och arter i området. Ytterligare faktorer som behöver belysas i sammanhanget är inverkan av andra befintliga eller planerade verksamheter i slutförvarsanläggningens omgivning, samt betydelsen av olika meteorologiska förhållanden under den förhållandevis långa totala tid (60–70 år) under vilken förvaret ska uppföras, drivas och slutligen avvecklas.

Denna rapport presenterar modellberäkningar som utförts med modellverktygen MIKE SHE och MOUSE, med inriktning på ovanstående frågeställningar. Rapporten utgör ett delunderlag för det MKB-dokument som SKB tar fram till samråd och tillståndsansökan enligt miljöbalken, rörande slutförvarsanläggningen i Forsmark. Specifikt utgör resultaten ett underlag till den ekologiska konsekvensbeskrivningen /Hamrén et al. 2010/ samt till en rapport /Werner et al. 2010/ som är en underbilaga till MKB-dokumentet vad gäller samråd och ansökan om tillstånd för grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen.

1.2 Omfattning och syfte

Denna rapport presenterar en fördjupning av den modellering som redovisas i /Gustafsson et al. 2009/. Den fördjupade modellstudien innefattar kompletterande känslighetsanalyser samt detaljerade analyser av specifika delområden i Forsmark. Specifikt analyseras i rapporten hydrogeologiska och hydrologiska förhållanden vid de våtmarker och skogsområden (naturobjekt) i Forsmark som identifierats och naturvärdesklassats i samband med ekologiska fältinventeringar /Hamrén och Collinder 2010/. Analyserna omfattar grund- och ytvattennivåer, grundvattnets flödesmönster i jord och berg, objektspecifika vattenbalanser, samt kvantifiering av den vattentillförsel som krävs för att upprätthålla grund- och ytvattennivåer i våtmarker. Vidare analyseras inverkan av den befintliga undermarksanläggningen SFR, den planerade utbyggnaden av SFR, samt hårdgjorda ytor inom slutförvarsanläggningens driftområde ovan mark. Ovanstående beräkningar har utförts för ett antal olika beräkningsfall som representerar de meteorologiska förhållandena under ett typår (2006), samt under statistiska normal-, torr- respektive våtår.

Den studie som presenteras i rapporten är ett underlag för konsekvensbeskrivningar och utredningar om åtgärder, specifikt avseende naturobjekt i Forsmark med höga naturvärden. I sådana beskrivningar och utredningar kan de resultat som presenteras i rapporten kombineras med den kunskap som finns om hur olika naturmiljöer och arter påverkas vid förändringar av de hydrogeologiska och hydrologiska förhållandena. Ett annat viktigt syfte med studien är att bidra till den generella förståelsen av de effekter som grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen kan ge upphov till. Denna förståelse avser effekterna i olika delar av Forsmarksområdet, effekterna i olika ”typmiljöer”, samt inverkan av olika meteorologiska förhållanden som kan komma att råda under förvarets långa drifttid.

1.3 Översikt över modellversioner

De modellberäkningar som redovisas i denna rapport baseras på den MIKE SHE-modell för ett öppet förvar som är beskriven i /Gustafsson et al. 2009/, som i sin tur är en uppdatering av den platsbeskrivande MIKE SHE-modellen /Bosson et al. 2008/. En senare modellversion för ett öppet förvar än den som beskrivs i /Gustafsson et al. 2009/ presenteras i /Mårtensson och Gustafsson 2010/. I /Mårtensson och Gustafsson 2010/ har modelldomänen utvidgats och en ny bergmodell har implementerats. Vidare har beräkningsrutinen för inläckaget till slutförvarsanläggningen, det vill säga kopplingen mellan modellverktygen MIKE SHE och MOUSE, ändrats för att ge en bättre överensstämmelse med en analytisk lösning för grundvatteninflöde till en injekterad tunnel. För en närmare beskrivning, se /Mårtensson och Gustafsson 2010/.

1.4 Rapportinnehåll

I kapitel 2 beskrivs de hydrogeologiska förhållandena i Forsmarksområdet. Vidare beskrivs modellverktygen och den aktuella MIKE SHE-modellen. De förändringar av MIKE SHE-modellen för Forsmark som ligger till grund för rapporten presenteras i kapitel 3. I kapitel 4 redovisas den modellberäknade avsänkningen av grundvattenytan och sänkningen av grundvattentrycket i berget till följd av grundvattenbortledningen. De specifika naturobjekt som valts ut för mer detaljerade analyser presenteras i kapitel 5. Objektspecifika resultat redovisas i kapitel 6, inklusive modellberäknade grund- och ytvattennivåer, vattenbalanser samt flödesmönster i jord och berg. Kapitel 7 sammanfattar de viktigaste resultaten från studien.

2 Hydrogeologisk beskrivning

I avsnitt 2.1 ges en kort beskrivning av Forsmarksområdets hydrologi och hydrogeologi. I avsnitt 2.2 presenteras modellverktygen MIKE SHE och MOUSE. Den aktuella MIKE SHE-modellens geografiska utsträckning, upplösning och randvillkor presenteras i avsnitt 2.3. I denna rapport ges endast en översiktlig beskrivning av de använda modellverktygen. För en mer detaljerad beskrivning, se /Bosson et al. 2008, Gustafsson et al. 2009/. I avsnitt 2.4 förklaras några viktiga termer och begrepp som används i rapporten.

2.1 Hydrologiska och hydrogeologiska förhållanden

Forsmarksområdet har en småskalig topografi där större delen av området befinner sig under nivån 20 m ö h (meter över havet, RHB 70), se figur 2-1. I den hydrologiska karaktäriseringen av området har 25 "sjöcentrerade" avrinningsområden och delavrinningsområden definierats /Brunberg et al. 2004/. Sjöarna i Forsmarksområdet förenas med havet via små bäckar. Bäckarna nedströms sjöarna Gunnarsboträsket, Eckarfjärden och Gällsboträsket är vattenförande under större delen av året, men de kan dock torka ut periodvis under torrår /Johansson 2008/. De största sjöarna i området är Eckarfjärden, Fiskarfjärden, Gällsboträsket och Bolundsfjärden. Samtliga sjöar är grunda, med ett medeldjup på mellan 0,1 m och 1 m.

Cirka 70 % av den totala ytan inom de definierade avrinningsområdena är täckt av skog. Jordbruksmark finns i den sydöstra delen. Våtmarker är vanligt förekommande och upptar mer än 25 % av ytan i några av avrinningsområdena. Den dominerande typen av kvartär avlagring är morän. Berg i dagen är vanligt förekommande. De kvartära avlagringarna är generellt grunda med ett medeldjup på ungefär 5 m. De mäktigaste avlagringarna (med en uppmätt mäktighet på 16 m) finns sydost om Fiskarfjärden. Bottnarna i de flesta av sjöarna består av finkorniga sediment, med en typisk sedimentstratigrafi som nerifrån och upp omfattar glaciala och/eller postglaciala leror, sand och grus, lera-gyttja och gyttja.

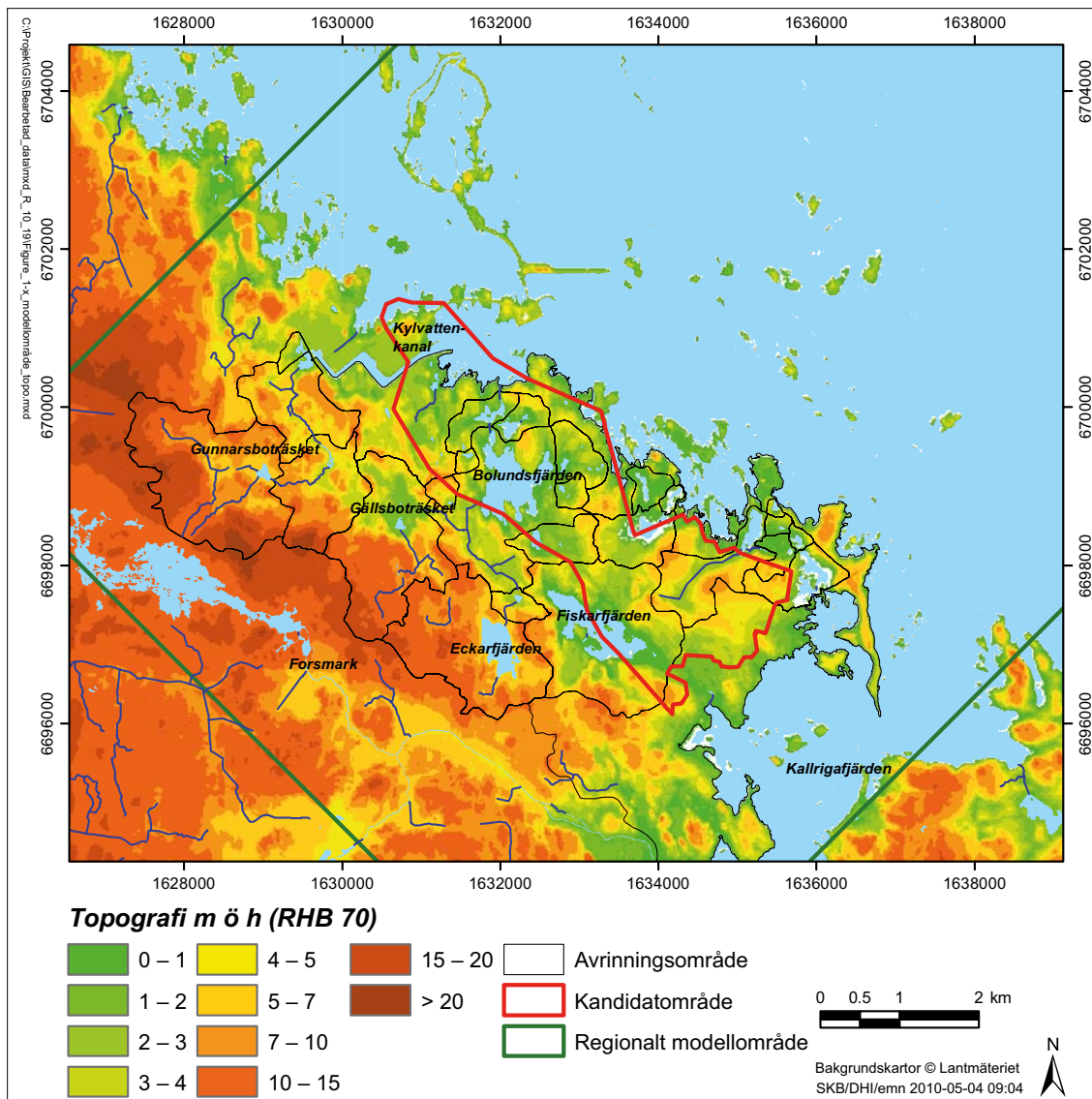
De ytnära grundvattendelarna inom modellområdet antas sammanfalla med ytvattendelarna. Den småskaliga topografien innebär att det finns många små avrinningsområden med lokala, ytliga flödessystem i jordlagren. Kombinationen av anisotropi och en med djupet minskande hydraulisk konduktivitet i moränen innebär att den största delen av grundvattnet följer grunda flödesvägar. Det genomsnittliga djupet till grundvattenytan är mindre än en meter i större delen av modellområdet. Den konceptuella modellen för områdets ytnära hydrogeologi beskrivs närmare i /Johansson 2008/.

De hydrogeologiska förhållandena i berget kännetecknas av en hydraulisk anisotropi inom den nordvästra delen av kandidatområdet (se figur 2-1). Inom detta område förekommer horisontella, högkonduktiva sprickor/bankningsplan i de övre 200 metrarna i berget. Platsundersökningar visar att dessa bankningsplan är hydrauliskt sammankopplade trots att avstånden mellan dem är stora /Follin et al. 2008, Johansson 2008, SKB 2008/. Berget mellan bankningsplanen är mindre konduktiv och under nivån 200 m är förekomsten av den här typen sprickor/bankningsplan liten och sprickfrekvensen är låg.

Grundvattenbildningen sker huvudsakligen via nederbörd och snösmältning. Under normala väderförhållanden fungerar sjöarna som utströmningsområden. Till följd av transpirationen kan grundvattennivåerna sänkas av runt sjöarna under torra somrar vilket kan leda till att sjöarna blir inströmningsområden. De lokala in- och utströmningsområdena i jordlagren underlagras av storskaliga flödessystem i berggrunden.

2.2 Modellverktyg

MIKE SHE är ett numeriskt modellverktyg med vilket man kan simulera de landbaserade huvudprocesserna i det hydrologiska kretsloppet, det vill säga nederbörd, infiltration, interception och evapotranspiration, samt vattenflöden på markytan och i den omättade respektive mättade zonen. Beräkningsalgoritmerna i MIKE SHE baseras på fysikaliska lagar. Indata kan varieras i både tid och rum. MIKE SHE är integrerad med kanalflödesmodellen MIKE 11, som beskriver nivåer och flöden i sjöar och vattendrag. Både MIKE SHE och MIKE 11 körs samtidigt och vattenuutbytet dem emellan beräknas kontinuerligt. Den specifika version av MIKE SHE som använts i denna studie är version 2008. För en detaljerad beskrivning av modellverktyget hänvisas till /DHI Software 2008a, Graham och Butts 2005/.



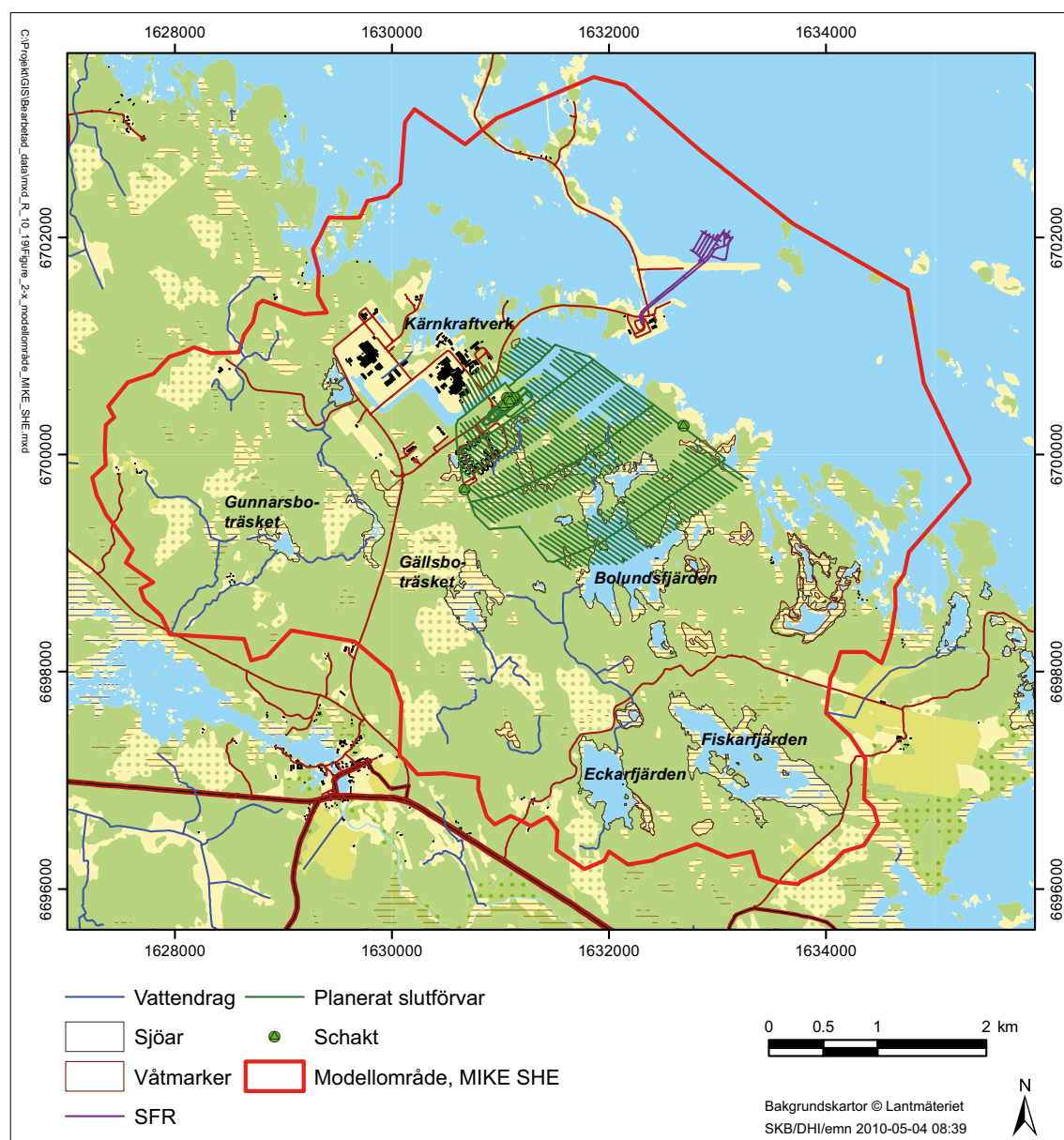
Figur 2-1. Topografisk karta över Forsmarksområdet.

Modellverktyget MOUSE har använts för att beräkna inläckaget av grundvatten till slutförvarsanläggningen. Kopplingen mellan MIKE SHE och MOUSE tillämpas typiskt vid beräkning av inläckage av grundvatten till avloppsledningar. I det här fallet beskrivs hela slutförvarsanläggningen förutom schakten som ett antal tunnelelement i MOUSE. Det beräknade inläckagets storlek beror dels på den hydrauliska konduktiviteten i det omgivande berget och dels på vattengenomsläppligheten (den hydrauliska konduktiviteten) i den injekterade zonen runt tunnarna. De vertikala schakten beskrivs i MIKE SHE som beräkningsceller med ett fasthållet tryck (atmosfärstryck) där inläckaget beräknas utifrån en framräknad konduktans som varierar mellan modellens beräkningslager. För en detaljerad beskrivning av modellverktyget MOUSE hänvisas till /DHI Software 2008b/. För en mer utförlig beskrivning av hur inläckaget till slutförvarsanläggningen beräknas, se /Gustafsson et al. 2009/.

2.3 Modellområde och randvillkor

Figur 2-2 visar det 37 km² stora modellområdet i MIKE SHE och läget för den planerade slutförvarsanläggningen. Modellområdet sträcker sig en bit ut i havet och följer ytvattendelaren för Forsmarksås avrinningsområde inåt landet. Grundvattendelarna antas sammanfalla med ytvattendelarna varför det inte antas ske något grundvattenflöde över modellranden på land. Samma typ av randvillkor används för underkanten på det djupaste beräkningslagret i modellen. Randvillkoret för modellens överkant styrs av tidsserier för nederbörd och potentiell avdunstning som är lika inom hela modellområdet.

Havet är beskrivet som ett högkonduktivt geologiskt lager och utgör en del av det översta beräkningslagret i de områden som utgörs av hav. Trycket i detta lager och längs modellområdets yttre havsrand varierar med den tidsvarierande havsnivån. Den horisontella upplösningen på beräkningsnätet är 40 gånger 40 meter inom hela modellområdet. Modellens vertikala upplösning varierar med djupet. Modellen sträcker sig ner till underkanten på det djupaste beräkningslagret på nivån 990 m u h (meter under havet, RHB 70).



Figur 2-2. Modellområde och läget för den planerade slutförvarsanläggningen.

2.4 Terminologi

SFR, slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall, benämns i rapporten SFR och det planerade förvaret för använt kärnbränsle benämns slutförvarsanläggningen. Eftersom hela slutförvarsanläggningen antas vara öppen i samtliga beräkningar i rapporten, förekommer även den mer allmänna termen ”ett öppet förvar”. Antagandet att hela slutförvarsanläggningen är öppen samtidigt är ett hypotetiskt fall. I verkligheten kommer förvaret att byggas ut i en rad etapper där tunnlar successivt öppnas och fylls igen.

Slutförvarsanläggningen är implementerad i modellverktyget MOUSE i form av ett antal tunnelsegment med en omgivande injekterad zon. Vattengenomsläppligheten (den hydrauliska konduktiviteten) i den injekterade zonen förkortas här K_{inj} och varierar mellan 10^{-7} och 10^{-8} m/s i olika beräkningsfall. Tjockleken på den injekterade zonen är satt till 5 m.

Grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen orsakar bland annat trycksänkning i berget och avsänkning av grundvattenytan. Avsänkningen avser skillnaden i grundvattenytans läge mellan opåverkade förhållanden (utan förvar) och påverkade förhållanden med förvar. Trycksänkningen på olika djup i berget beräknas och redovisas på motsvarande sätt. Området där avsänkningen av grundvattenytan överstiger 0,3 m benämns påverkansområde i rapporten. Med begreppet naturliga förhållanden menas de förhållanden som förelåg innan undermarksanläggningen SFR uppfördes.

I de flesta fall i rapporten redovisas resultat som ett medelvärde för ett helt år. Dock förekommer även redovisningar som avser kalendermånader samt växtperioden. I denna rapport definieras växtperioden som perioden april–oktober.

3 Beräkningsförutsättningar

Med utgångspunkt från MIKE SHE-modellen för ett öppet förvar /Gustafsson et al. 2009/ presenteras i detta kapitel de modellförändringar som ligger till grund för de tolv kompletterande beräkningsfall som redovisas i rapporten. Definitionerna av de tolv beräkningsfallen sammanfattas i avsnitt 3.4.

3.1 Meteorologiska förhållanden

/Gustafsson et al. 2009/ använde uppmätta meteorologiska data från åren 2005–2006 som indata, inklusive uppmätt nederbörd (korrigerad för olika typer av mätförluster). Året 2005 användes som initieringsperiod och redovisade resultat avsåg året 2006. För att undersöka inverkan av de meteorologiska förhållandena på grundvattenbortledningens effekter har här nederbördsdata för ett statistiskt normalår samt för ett torr- respektive våttår tagits fram enligt nedan.

I detta sammanhang definieras normalnederbörden som den genomsnittliga årssumman för perioden 1961–1990. Orsaken till att denna period valts är att den är en meteorologisk så kallad referensnormalperiod. De genomsnittliga månadssummorna för respektive månad ger tillsammans en genomsnittlig årssumma som antas motsvara den årliga normalnederbörden för perioden 1961–1990. Baserat på detta har den sammanhängande ettårsperiod med uppmätta data från perioden 2003–2007 valts ut som mest överensstämmer med normalnederbörden, både vad gäller årssumman och månadssummorna. Den identifierade period som uppvisar bäst överensstämmelse med normalnederbörden är perioden september 2003–augusti 2004. För denna ettårsperiod är den sammanlagda nederbörden 604 mm, vilket ska jämföras med den genomsnittliga årssumman på 569 mm för referensnormalperioden 1961–1990. Enligt tabell 3-1 var även typåret 2006 ett något torrt men förhållandevis normalt år, med en årsnederbörd på 533 mm. Under år 2006 var sommaren torr, vilket dock kompenseras av omfattande nederbörd under oktober.

Baserat på extremvärdesanalys av nederbördsdata från referensnormalperioden 1961–1990 har nederbördsmängder beräknats för olika återkomsttider (5, 10, 20, 50 och 100 år) /Johansson 2008, Appendix 1/. Sist i tabell 3-1 presenteras årssumman för ett torrt respektive vått år med en återkomsttid på 100 år. Genom att justera nederbörden för det utvalda normalåret (ettårsperioden september 2003–augusti 2004) för de månader med högst nederbörd, har tidsserier för torr- respektive våttår skapats som motsvarar en återkomsttid på 100 år med avseende på årssumman. De månader under normalåret som på detta sätt justerats är juli, oktober, november och december (gulmarkerade i tabell 3-1). För dessa månader har månadssummorna av nederbörden justerats till ett månadsvärde motsvarande 20–50 års återkomsttid för antingen stora eller små nederbördsmängder. För torråret reduceras den totala nederbörden med 38 % (–232 mm) och motsvarande ökning för våttåret är 43 % (260 mm) relativt normalåret. I MIKE SHE-beräkningarna används dygnsvärden på nederbörden och således är det dygnsvärdena som korrigerats för de aktuella månaderna under normalåret.

I tabell 3-1 presenteras de olika månadssummorna samt årssumman för normalnederbörden 1961–1990, 2006, det utvalda normalåret och för torr- respektive våttåret. Inverkan av de meteorologiska förhållandena på djupet till grundvattenytan och grundvattenytans avsänkning utvärderas i sex olika beräkningsfall i avsnitt 4.2.

Tabell 3-1. Månadssummor (mm) för referensnormalperioden 1961–1990, typåret 2006, det identifierade normalåret samt torr- respektive våtåret. Justerade månader för torr- respektive våtåret är markerade med gult.

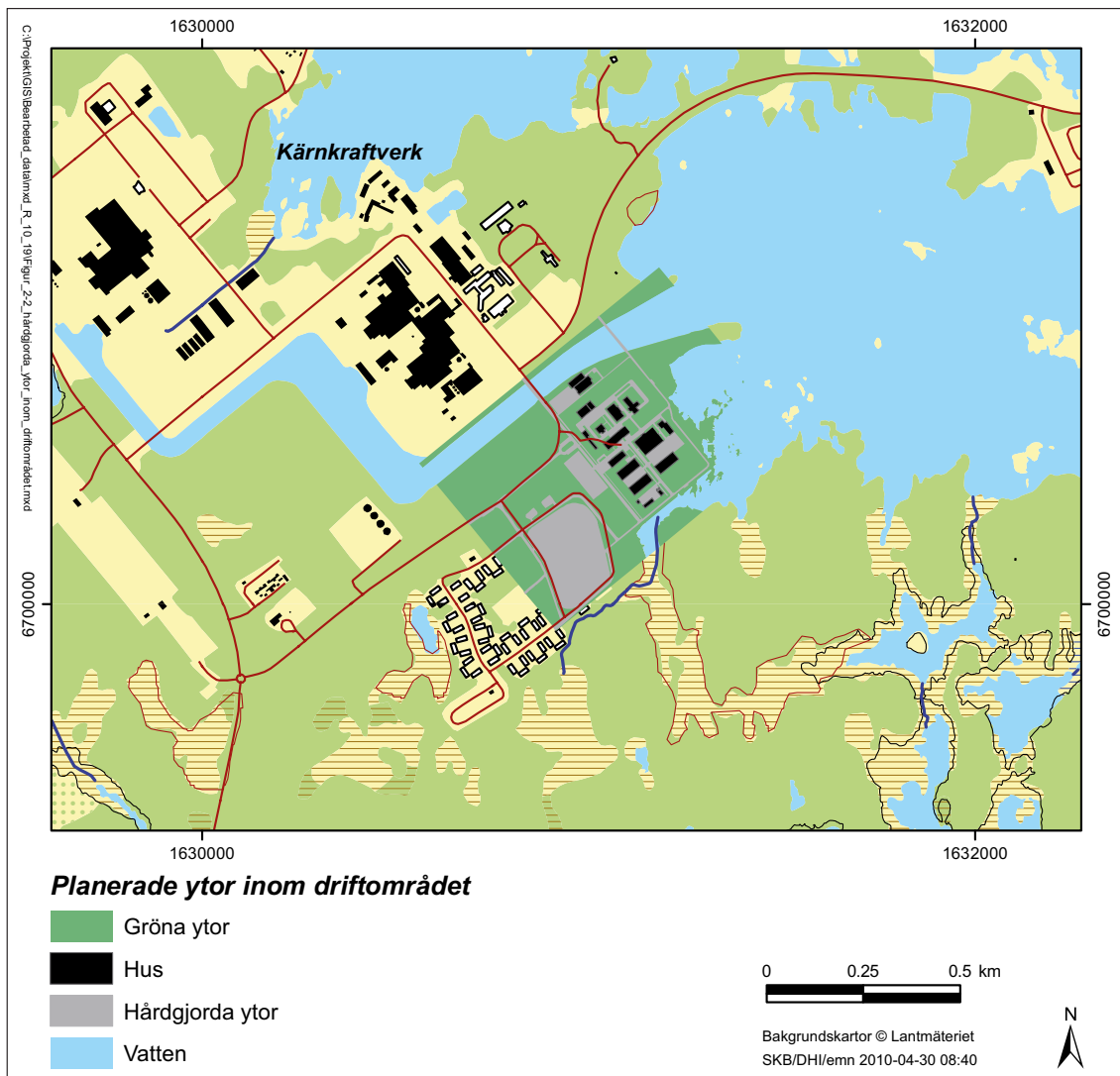
Månad	Medelsumma, 1961–1990, beräknad nederbörd	2006, uppmätt nederbörd	Normalår, sep. 2003–aug. 2004, uppmätt nederbörd	Torrår, justerad nederbörd	Våtår, justerad nederbörd
Januari	44	18	43	43	43
Februari	33	46	16	16	16
Mars	29	52	26	26	26
April	35	33	31	31	31
Maj	27	18	44	44	44
Juni	39	31	46	46	46
Juli	71	11	84	15	172
Augusti	66	60	55	55	55
September	61	51	50	50	50
Oktober	53	135	74	15	144
November	61	58	60	15	122
December	50	20	73	15	114
Årssumma	569	533	604	372	864
Årssumma med 100 års återkomsttid enligt extremvärdesanalys				373	851

3.2 Hårdgjorda ytor

I samband med tidigare MIKE SHE-modellering för Forsmark /Bosson et al. 2008, Gustafsson et al. 2009/ har alla befintliga samt planerade hårdgjorda ytor i slutförvarsanläggningens driftområde ovan mark (exempelvis asfalterade ytor och hus) ansatts som gräsytor. I figur 3-1 visas de ytor som kommer att hårdgöras. Inverkan av att en yta hårdgörs är att infiltrationen blir lika med noll samt att avrinningen sker så snabbt att avdunstningen blir marginell. I modellen antas avdunstningen från en hårdgjord yta vara noll. I avsnitt 4.3 presenteras resultatet från två beräkningsfall som genomförts avseende de hårdgjorda ytor som visas i figur 3-1.

3.3 SFR – befintlig anläggning och framtida utbyggnad

I tidigare MIKIE SHE-modellering har inläckaget till undermarksanläggningen SFR beskrivits enligt två olika metoder. I den platsbeskrivande SDM-modellen representerades inläckaget i ett känslighetsfall i form av en pump med ett specificerat uttag på totalt 6 l/s mellan nivåerna 40 och 140 m u h /Bosson et al. 2008/. Under stora delar av simuleringstiden blev dock denna pump inaktiv i modellen. Detta berodde på att de beräkningsceller inom vilka pumpen fanns representerad blev torrlagda, vilket medförde att inläckaget till SFR inte representerades i modellen. I /Gustafsson et al. 2009/ och i de flesta beräkningsfall i denna rapport beskrivs istället inläckaget till SFR i form av ett antal beräkningsceller med en intern tryckrand. Trycket i cellerna är hämtade från SDM-modellens beräkningsresultat. Med denna beskrivning uppnås endast ett inläckage på i genomsnitt 3,6 l/s (det verkliga inläckaget är cirka 6 l/s). För en mer detaljerad beskrivning av hur befintligt SFR tidigare modellerats, se /Bosson et al. 2008, Gustafsson et al. 2009/.



Figur 3-1. Planerade ytor inom slutförvarsanläggningens driftområde ovan mark.

För att uppnå ett modellberäknat inläckage till SFR som motsvarar det uppmätta inläckaget, har i ett antal beräkningsfall SFR implementerats i form av tunnelsegment i MOUSE, på motsvarande sätt som slutförvarsanläggningen. Vattengenomsläppligheten i den injekterade zonen, $K_{inj, SFR}$, har i dessa beräkningsfall kalibrerats mot det observerade inläckaget samt mot uppmätta grundvattennivåer. Denna kalibrering resulterade i ett modellberäknat inläckage på 6,7 l/s med $K_{inj, SFR} = 10^{-8}$ m/s.

En utbyggnad av SFR är planerad. Vid tiden för framtagandet av denna rapport var inga beslut fattade rörande den exakta utformningen på utbyggnaden. Här används därför en arbetsversion vad gäller utformningen. I figur 3-2 visas läget för befintligt SFR samt SFR-utbyggnadens preliminära utformning. Den i modellen ansatta vattengenomsläppligheten i den injekterade zonen kring den utbyggda delen av SFR är densamma som den för befintligt SFR, det vill säga $K_{inj, SFR} = 10^{-8}$ m/s. Inverkan av implementeringen av befintligt SFR i MOUSE, den framtida utbyggnaden och kumulativa effekter av grundvattenbortledning från SFR och slutförvarsanläggningen redovisas i avsnitt 4.4.



Figur 3-2. Befintligt SFR och dess framtida utbyggnad (preliminär utformning).

3.4 Beräkningsfall

I tabell 3-2 sammanfattas samtliga beräkningsfall som studeras i avsnitten 4.2 till 4.4. Samtliga tre fall vad avser nederbörden (normal-, torr- och våtår) har simulerats för opåverkade förhållanden och med ett öppet förvar, med en vattengenomsläpplighet i den injekterade zonen på $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. Detta ger sammantaget sex olika beräkningsfall (beräkningsfall 1–6 i tabell 3-2). I fallen 1 och 2 har det utvalda normalåret, september 2003–augusti 2004, repeterats två gånger. Det första året har enbart använts som en initialiseringsperiod. Beräkningsfallen 3–6 (med nederbördsdata för torr- respektive våtår) har startats från de förhållanden som förelåg i slutet av det första året enligt simuleringarna med normalnederbörd och opåverkade förhållanden (beräkningsfall 1). Detta innebär att det första torr- respektive våtåret inte föregås av ett initieringsår, och de ska således ses som ett initieringsår för det andra våt- respektive torråret. Resultat med avseende på grundvattenytans avsänkning för beräkningsfallen 1–6 presenteras i avsnitt 4.2. Beräkningsfallen 7 och 8 syftar till att utvärdera effekterna av hårdgjorda ytor utan respektive med ett förvar. Dessa resultat redovisas i avsnitt 4.3.

I beräkningsfallen 9–12 representeras befintligt SFR med modellverktyget MOUSE. I övriga beräkningsfall representeras SFR enligt /Gustafsson et al. 2009/, det vill säga som ett antal celler med intern tryckrand vilket ger ett inläckage på cirka 3,6 l/s. Tre olika beräkningsfall har definierats med avseende på befintligt SFR, ett utbyggt SFR och slutförvarsanläggningen. I beräkningsfall 10 studeras endast befintligt SFR, i fall 11 både befintligt och utbyggt SFR och i fall 12 studeras den kombinerade (kumulativa) effekten av fall 11 tillsammans med slutförvarsanläggningen. Som nämnts tidigare, har för befintligt SFR vattengenomsläppligheten i den injekterade zonen baserat på kalibrering ansatts värdet $K_{inj, SFR} = 10^{-8}$ m/s. Detta värde har även ansatts för den utbyggda delen av SFR. Som referens till beräkningsfallen 10–12 används en beräkning utan SFR (beräkningsfall 9), vilket motsvarar naturliga förhållanden. Samtliga beräkningsfall avser perioden 2005–2006, där året 2005 använts som initialiseringsperiod. Resultaten presenteras i avsnitt 4.4.

Tabell 3-2. Sammanfattning av de beräkningsfall som ingår i denna studie. Beräkningsresultat är framtagna för de år som är gulmarkerade.

Beräkningsfall	Befintligt SFR (inre rand)	Befintligt SFR (MOUSE)	Utbyggt SFR (MOUSE)	Öppet förvar	Hårdgjorda ytor	Meteorologiska förhållanden	
1	x	–	–	–	–	Normalår	Normalår
2	x	–	–	$K_{inj} = 10^{-7}$ m/s	–	Normalår	Normalår
3	x	–	–	–	–		Torrår
4	x	–	–	$K_{inj} = 10^{-7}$ m/s	–		Torrår
5	x	–	–	–	–		Våtår
6	x	–	–	$K_{inj} = 10^{-7}$ m/s	–		Våtår
7	x	–	–	–	x	2005	2006
8	x	–	–	$K_{inj} = 10^{-8}$ m/s	x	2005	2006
9	–	–	–	–	–	2005	2006
10	–	$K_{inj} = 10^{-8}$ m/s	–	–	–	2005	2006
11	–	$K_{inj} = 10^{-8}$ m/s	$K_{inj} = 10^{-8}$ m/s	–	–	2005	2006
12	–	$K_{inj} = 10^{-8}$ m/s	$K_{inj} = 10^{-8}$ m/s	$K_{inj} = 10^{-8}$ m/s	–	2005	2006

4 Övergripande resultat

I detta kapitel redovisas övergripande modelleringsresultat avseende grundvattenytans avsänkning. Avsnitt 4.1 redovisar medelvärden för grundvattenytans avsänkning för varje månad under typåret 2006 baserat på beräkningarna i /Gustafsson et al. 2009/. Dessa beräkningar avser ett helt öppet förvar och tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. Referens för dessa beräkningar är dagens situation med grundvattenbortledning från SFR. I avsnitt 4.2 presenteras inverkan av de meteorologiska förhållandena på djupet till grundvattenytan samt grundvattenytans avsänkning. Effekterna av hårdgjorda ytor beskrivs i avsnitt 4.3. I avsnitt 4.4 presenteras resultat vad gäller effekter av grundvattenbortledningen från befintligt SFR, från ett utbyggt SFR och från ett helt öppet förvar. I avsnitt 4.5 redovisas grundvattenbortledningens effekter på transpirationen (vegetationens vattenupptag) i omättad och mättad zon.

4.1 Sammanställning av grundvattenytans avsänkning under typåret 2006

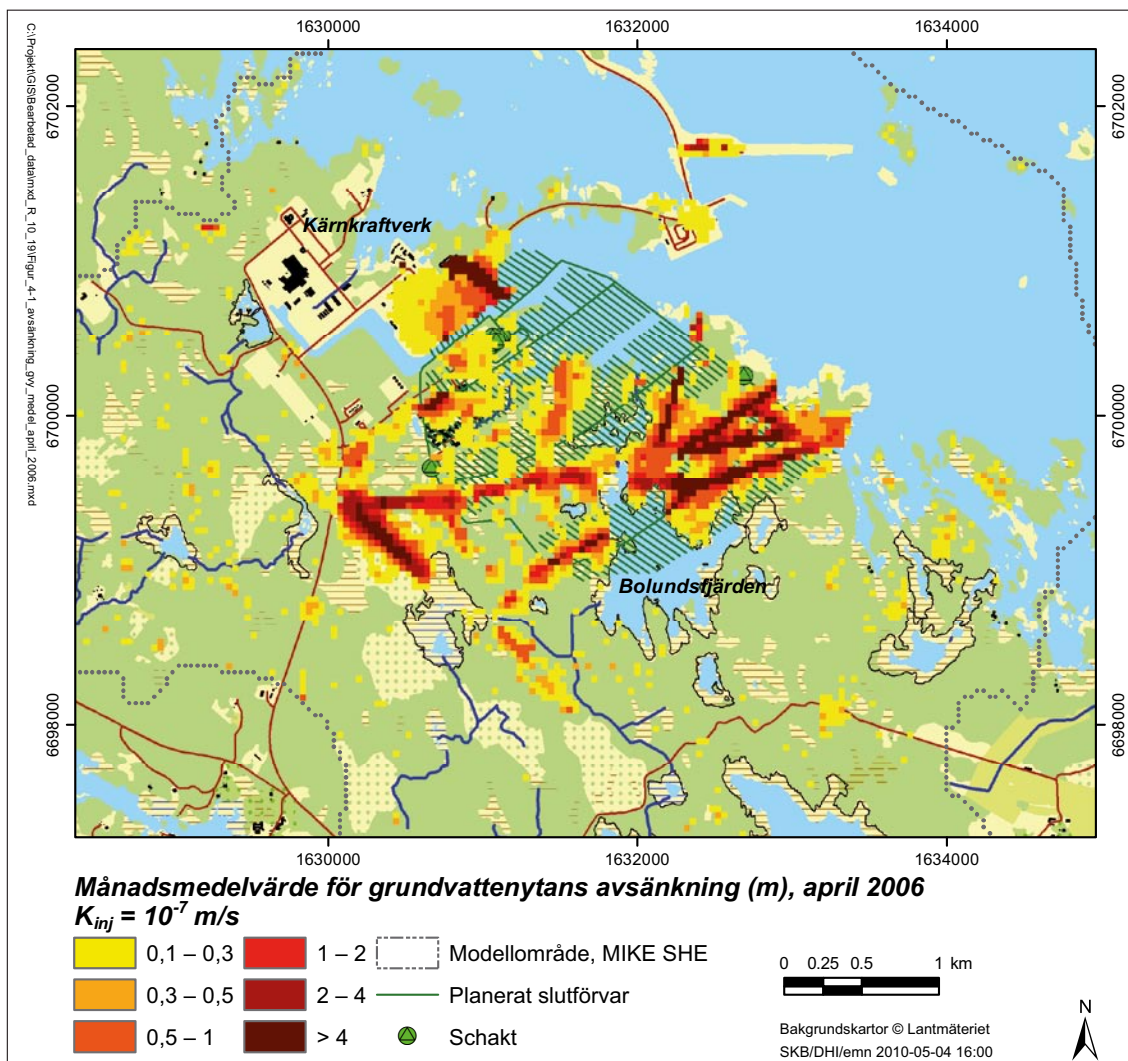
I tabell 4-1 redovisas minimum, maximum och medelvärde per månad under typåret 2006 för det modellberäknade påverkansområdets storlek (här för en avsänkingsgräns på 0,3 m). Tabellen visar således variationer inom och mellan olika månader. Tabellen visar på tydliga årstidsvariationer. Påverkansområdets storlek minskar under våren och är minst i juli. Påverkansområdets storlek ökar under hösten och vintern och är störst under december.

Av resultaten i tabell 4-1 framgår att månadsmedelvärdet för påverkansområdets storlek för de flesta månaderna är närmare månadens minimumvärde än månadens maximumvärde. Detta beror på att perioder med kraftigt regn orsakar en temporär stor avsänkning av grundvattenytan relativt opåverkade förhållanden, medan perioder med torra förhållanden har längre varaktighet och därmed slår igenom mer på medelvärdet. Avsänkningen av grundvattenytan beror delvis på en ökad nedåtriktad gradient som förstärks i samband med kraftiga regn. Ett exempel på detta är snösmältningen i april 2006 som skapar ett stort, temporärt påverkansområde med maximum i april. Under de efterföljande månaderna minskar den nedåtriktade gradienten och så även påverkansområdets storlek. I /Gustafsson et al. 2009/ presenteras en djupare analys av orsakerna till tidsvariationerna av påverkansområdets storlek.

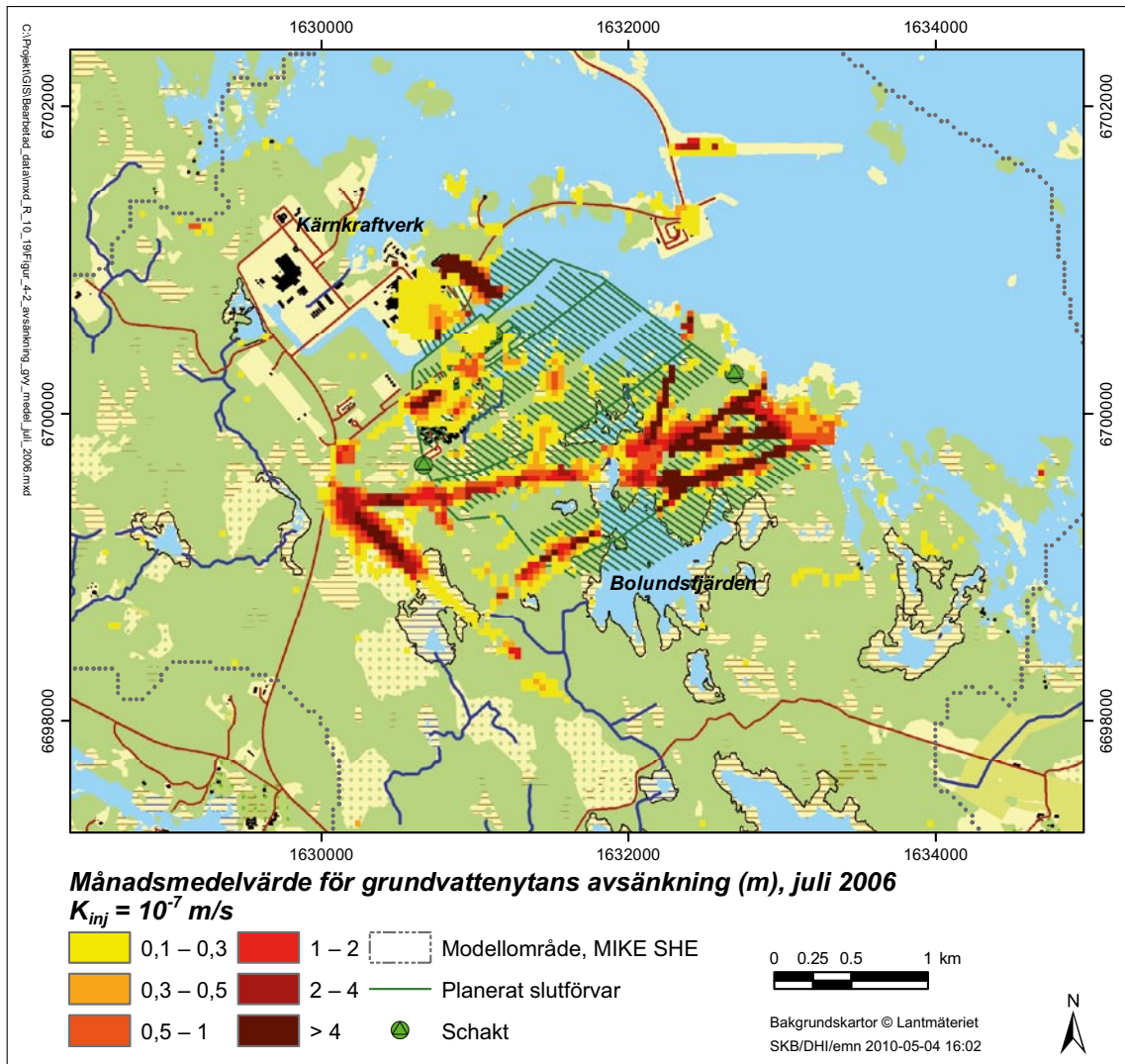
Enligt tabell 4-1 kan variationerna av påverkansområdets storlek vara kraftiga även under en enskild månad. Som ett exempel skiljer det under april en faktor tre mellan påverkansområdets minimum och maximum. Sett över hela typåret 2006 når som nämns ovan storleken på påverkansområdet sitt maximum i november (3,40 km²) och sitt minimum i maj (0,94 km²). I figurerna 4-1 till 4-4 visas översiktskartor med månadsmedelvärden för grundvattenytans avsänkning i april, juli, september och december 2006, beräknade för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. Av dessa översiktskartor framgår att påverkansområdet inte omfattar några andra delområden under december (figur 4-4) jämfört med juli (figur 4-2), trots att det skiljer en faktor två i storlek på påverkansområdet mellan dessa två månader. Skillnaden i storlek beror i stället på att påverkansområdet under juli utvidgas fram till december.

Tabell 4-1. Min-, medel- och maxvärden per månad för året 2006 avseende påverkansområdets storlek (km²), baserat på en tidsupplösning på fem dygn. Påverkansområdet är redovisat för en avsänkingsgräns på 0,3 m och tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.

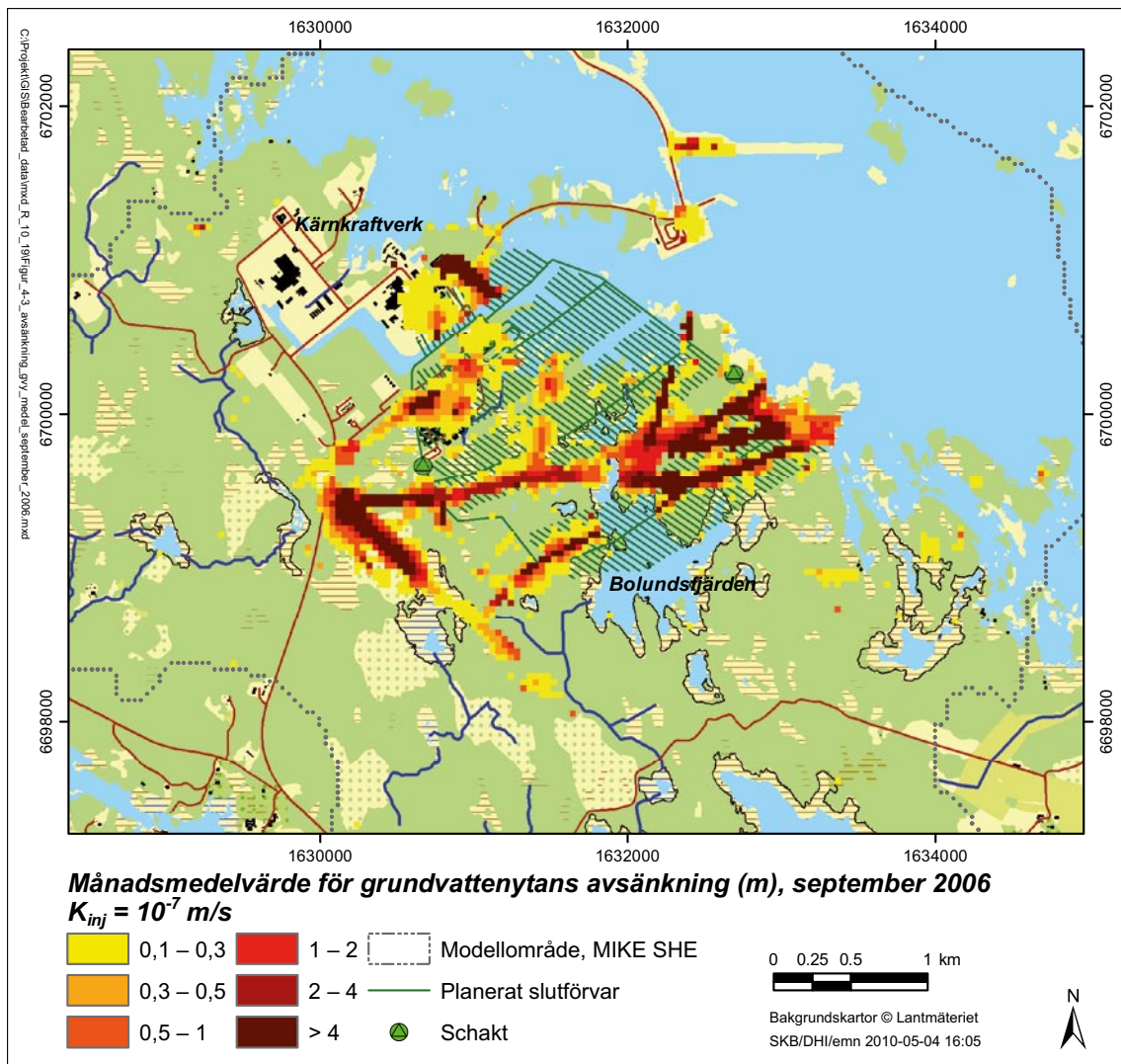
Månad	Min	Medel	Max
Januari	1,73	2,06	2,40
Februari	1,67	2,04	2,53
Mars	1,67	1,81	2,10
April	0,99	1,70	3,05
Maj	0,94	1,19	1,73
Juni	1,00	1,19	1,48
Juli	1,05	1,19	1,46
Augusti	1,17	1,31	2,03
September	1,35	1,48	1,61
Oktober	1,46	1,81	3,02
November	1,63	2,36	3,40
December	2,15	2,36	2,56
Hela året 2006	0,94	1,57	3,40



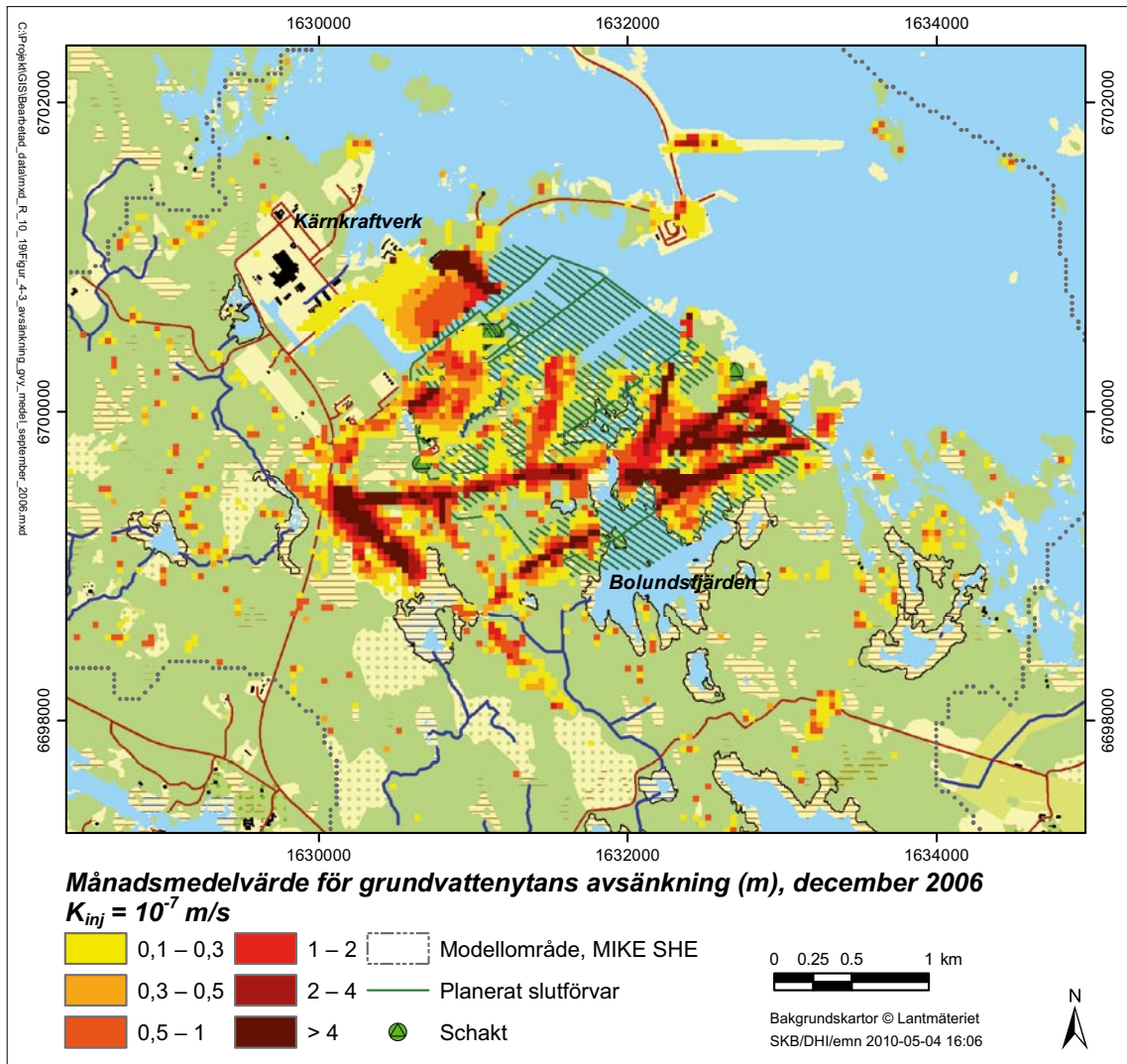
Figur 4-1. Beräknat månadsmedelvärde av grundvattenytans avsänkning (m) under april 2006, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.



Figur 4-2. Beräknat månadsmedelvärde av grundvattenytans avsänkning (m) under juli 2006, $K_{inj} = 10^{-7} \text{ m/s}$.



Figur 4-3. Beräknat månadsmedelvärde av grundvattenytans avsänkning (m) under september 2006, $K_{inj} = 10^{-7} \text{ m/s}$.

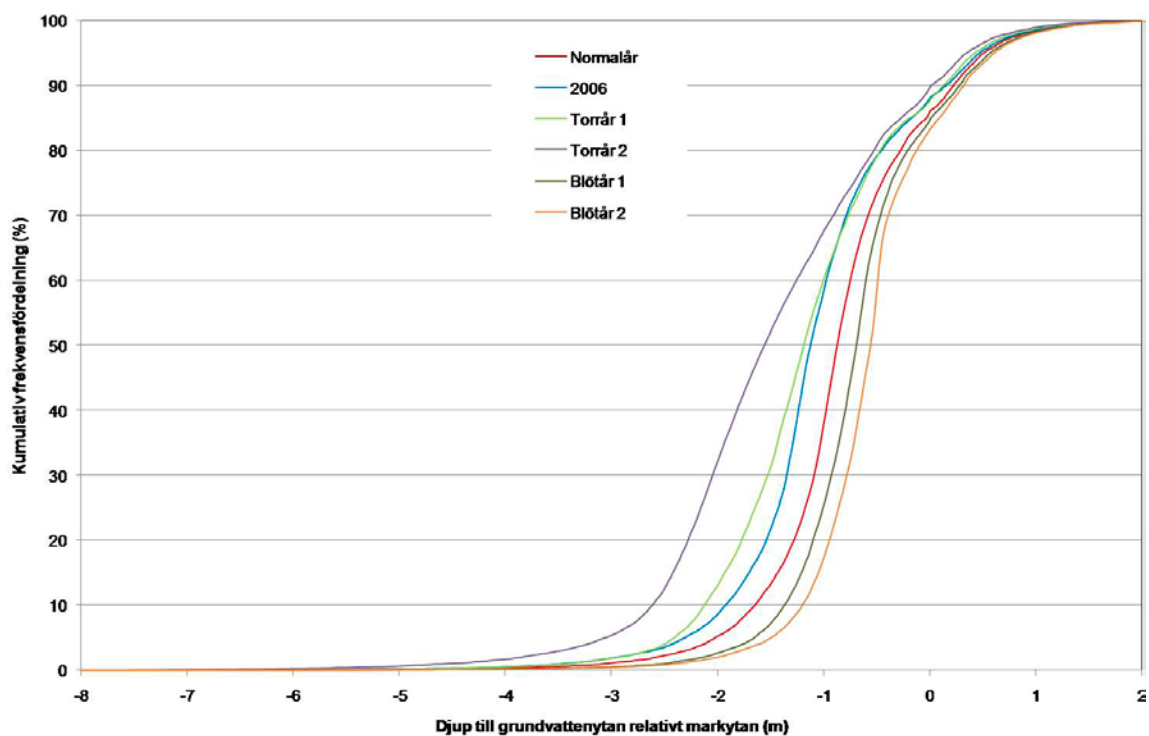


Figur 4-4. Beräknat månadsmedelvärde av grundvattenytans avsänkning (m) under december 2006, $K_{inj} = 10^{-7} \text{ m/s}$.

4.2 Grundvattenytans avsänkning för olika meteorologiska förhållanden

I detta avsnitt presenteras inverkan av de meteorologiska förhållandena på djupet till grundvattenytan samt på avsänkningen till följd av grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen. I figur 4-5 visas den kumulativa frekvensfördelningen för djupet till grundvattenytan för opåverkade förhållanden. Tabell 4-2 visar medeldjupet till grundvattenytan (havet exkluderat) för olika meteorologiska förhållanden. I denna tabell anges även påverkansområdets storlek för olika avsänkingsgränser (tätningsfall $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s). Resultaten redovisas för typåret 2006, normalåret, samt det första respektive andra torr- och våtåret. Skillnaderna i nederbörd mellan de olika beräkningsfallen beskrivs i avsnitt 3.1. Figur 4-5 och tabell 4-2 visar att grundvattendjupet och även påverkansområdets storlek påverkas av förändringar i nederbördsförhållandena.

Under opåverkade förhållanden är grundvattenytan i medel belägen cirka 0,25 m lägre under typåret 2006 än under normalåret. Denna skillnad kan förklaras av att normalåret är blötare än 2006, som kännetecknas av en torr sommar och inledning på hösten. Enligt figur 4-5 motsvarar den kumulativa frekvensfördelningen för djupet till grundvattenytan för typåret 2006 fördelningen för det första torråret. Under det första torråret är grundvattenytan belägen cirka 0,3 m djupare jämfört med normalåret. Motsvarande skillnad jämfört med typåret 2006 är mindre än 0,1 m. Under det andra torråret är grundvattenytan i medel belägen 0,35 m lägre jämfört med det första torråret. Under det första våtåret är grundvattenytan belägen cirka 0,2 m högre än under normalåret och ytterligare 0,1 m högre under det andra våtåret.

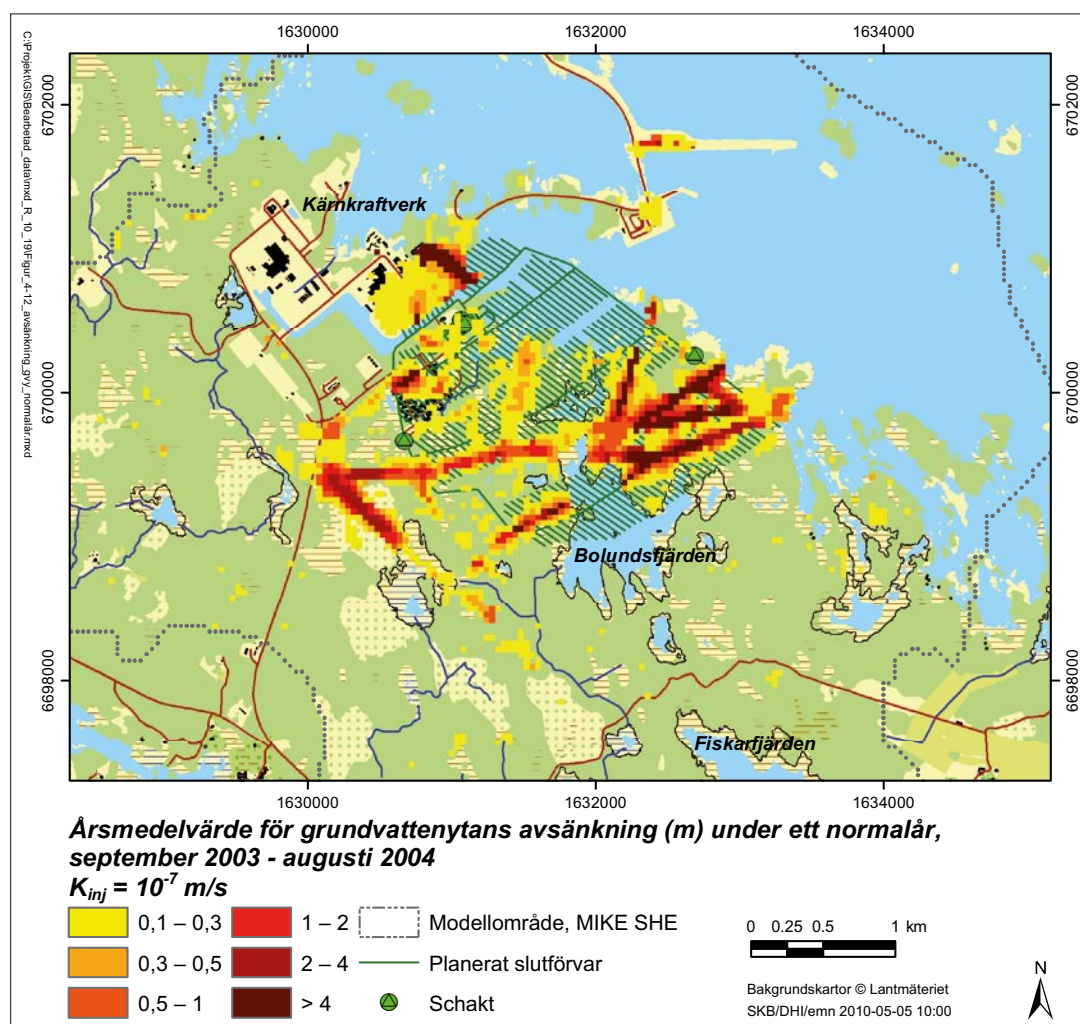


Figur 4-5. Kumulativ frekvensfördelning för djupet till grundvattenytan relativt markytan för opåverkade förhållanden (havet exkluderat) för typåret 2006, normalåret, samt det första och andra torr- respektive våtåret ("blötår" i figuren).

Tabell 4-2. Medelgrundvattendjup (m u my; meter under markytan) för opåverkade förhållanden (havet exkluderat) samt påverkansområden (km²) vid påverkade förhållanden. Resultaten avser tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s och typåret 2006, normal-, torr- och våtår.

Beräkningsfall	Medelgrundvattendjup, opåverkade förhållanden (m u my)	Påverkansområde > 0,3 m (km ²)	Påverkansområde > 1 m (km ²)
2006	1,06	1,57	0,75
Normalår	0,82	1,15	0,55
Torrår, år 1	1,13	1,34	0,55
Torrår, år 2	1,47	2,66	1,34
Våtår, år 1	0,65	0,93	0,21
Våtår, år 2	0,54	0,88	0,29

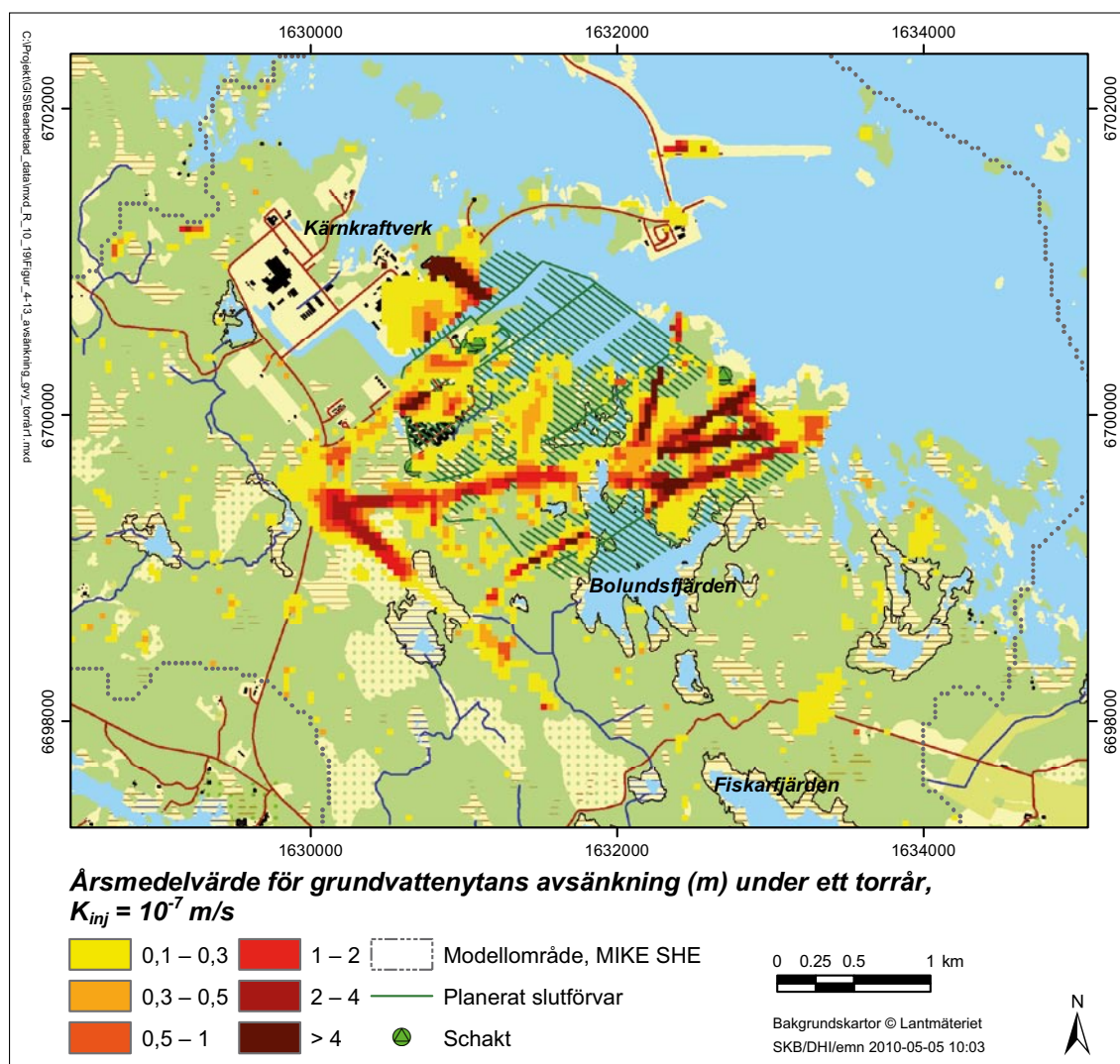
En jämförelse mellan påverkansområdet (avsänkning > 0,3 m) för typåret 2006 och påverkansområdet för normalåret (tabell 4-2) visar att detta område är 36 % större under det torrare året 2006. Sett över hela året är inläckaget till slutförvarsanläggningen och de nedåtriktade gradienterna i berget mer eller mindre konstanta. Detta betyder att under ett våtår krävs ett mindre tillrinningsområde för att ”upprätthålla” samma inläckage som under ett torrare år, vilket i sin tur innebär till ett mindre påverkansområde under ett våtår. Variationen inom året beskrivs i avsnitt 4-1. Grundvattenytans avsänkning för normalåret visas i figur 4-6.



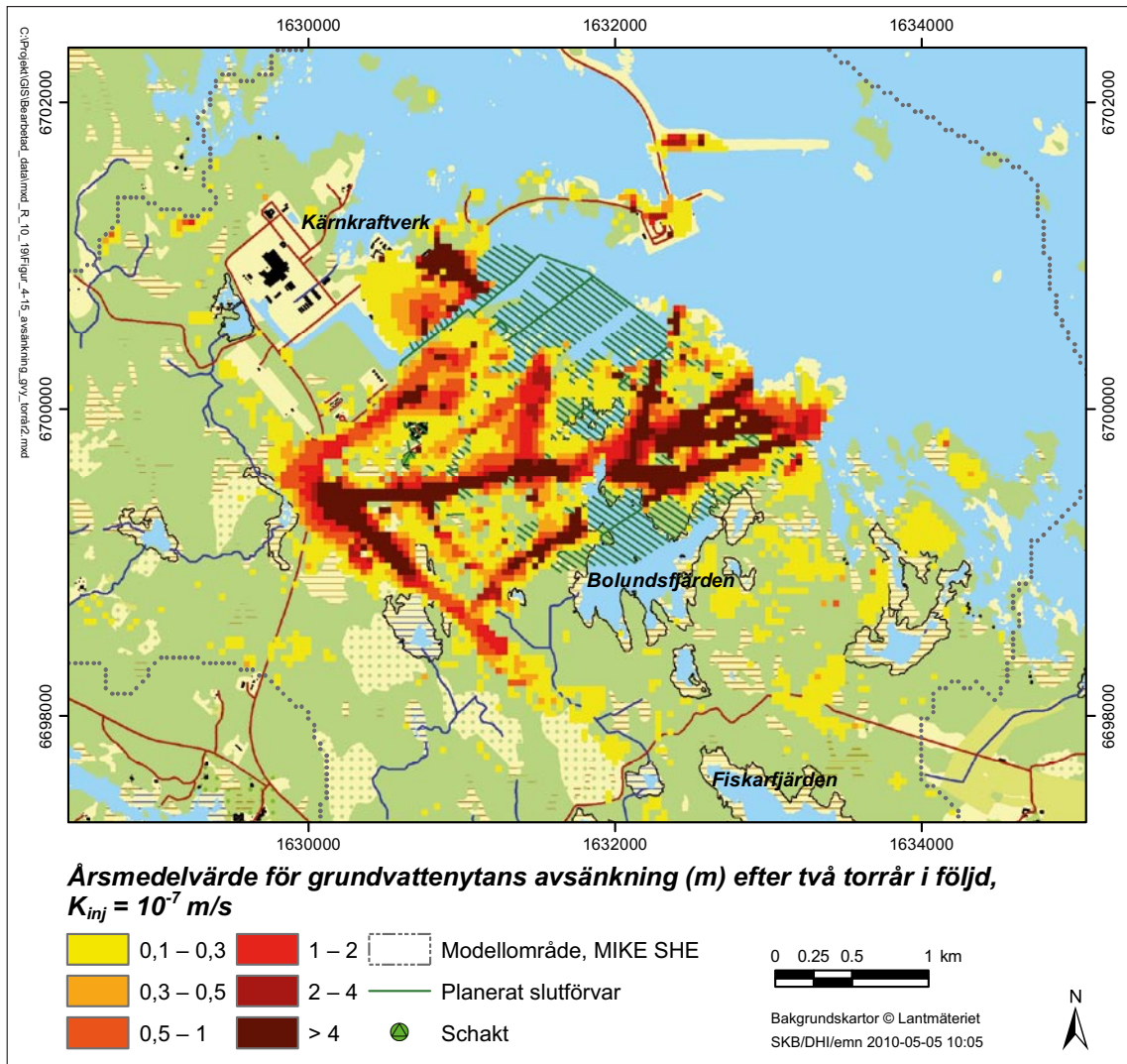
Figur 4-6. Beräknat årsmedelvärde av grundvattenytans avsänkning (m) under ett normalår, september 2003 – augusti 2004, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.

I figur 4-7 visas grundvattenytans medelavsänkning under det första torråret. I jämförelse med normalåret ökar påverkansområdet med 17 %, medan området där avsänkningen är större än 1 m är oförändrat. Under det andra torråret dubblas påverkansområdets storlek jämfört med det första torråret, se figur 4-8. Även området där avsänkningen överstiger 1 m ökar kraftigt jämfört med första torråret. I figurerna 4-9 och 4-10 visas grundvattenytans medelavsänkning under det första respektive det andra våtåret. Påverkansområdets storlek minskar med 19 % under det första våtåret jämfört med normalåret och med ytterligare 5 % under det andra våtåret i jämförelse med det första. Man kan notera större skillnader mellan normalåret och våtåren vad gäller områden med en avsänkning > 1 m. För denna avsänkingsgräns minskar påverkansområdets storlek med 50–60 %, och skillnaden är störst mellan det första våtåret och normalåret.

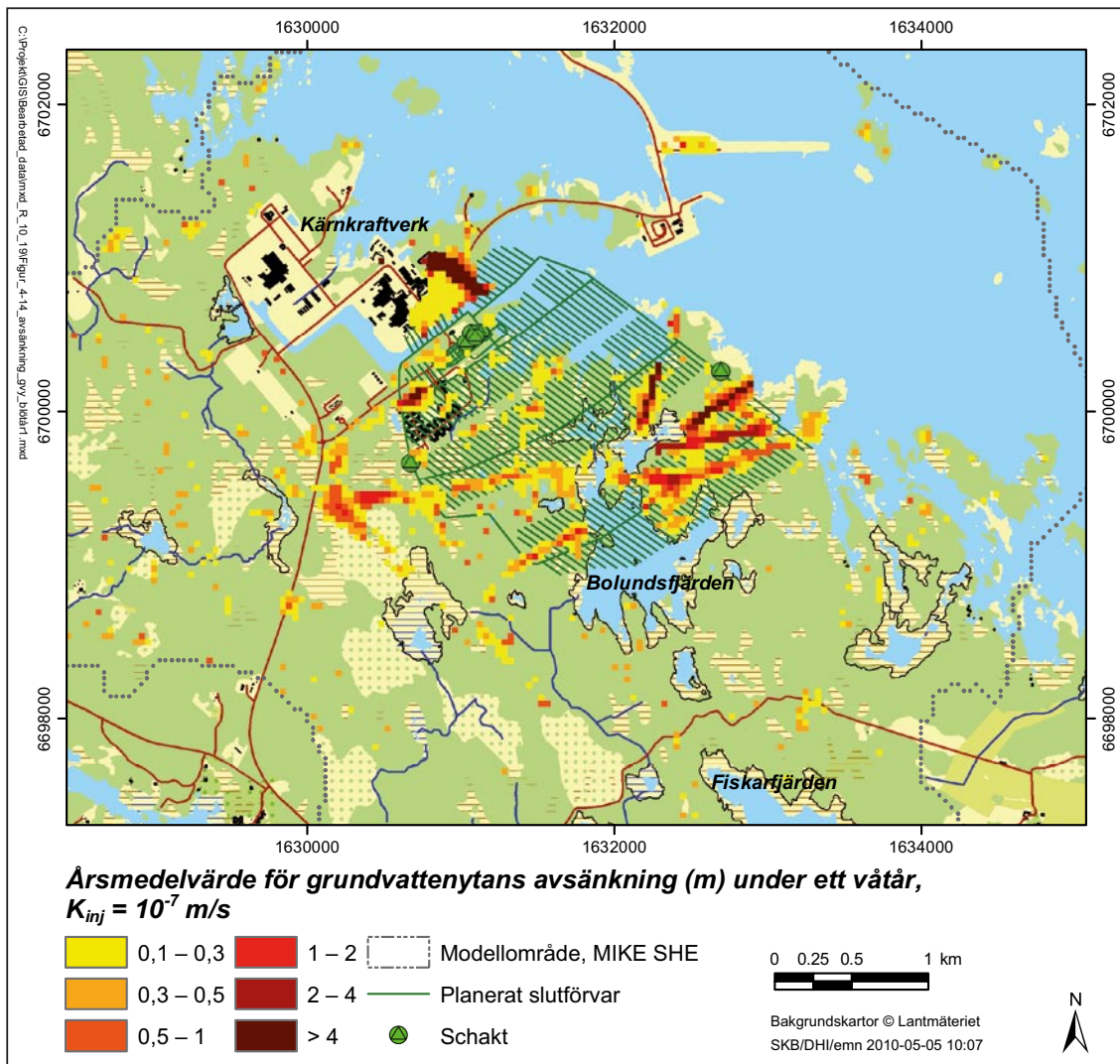
Inverkan av nederbörden blir förstas tydligast om man jämför det andra torråret med det andra våtåret (se figur 4-11). För opåverkade förhållanden (utan förvar) är medeldjupet till grundvattenytan nästan 1 m större under det andra torråret jämfört med det andra våtåret. För påverkade förhållanden är påverkansområdet tre gånger så stort under det andra torråret. Man bör observera att detta är en jämförelse mellan två extremer, med två direkt på varandra följande torr- respektive våtår, vardera med en återkomsttid på 100 år.



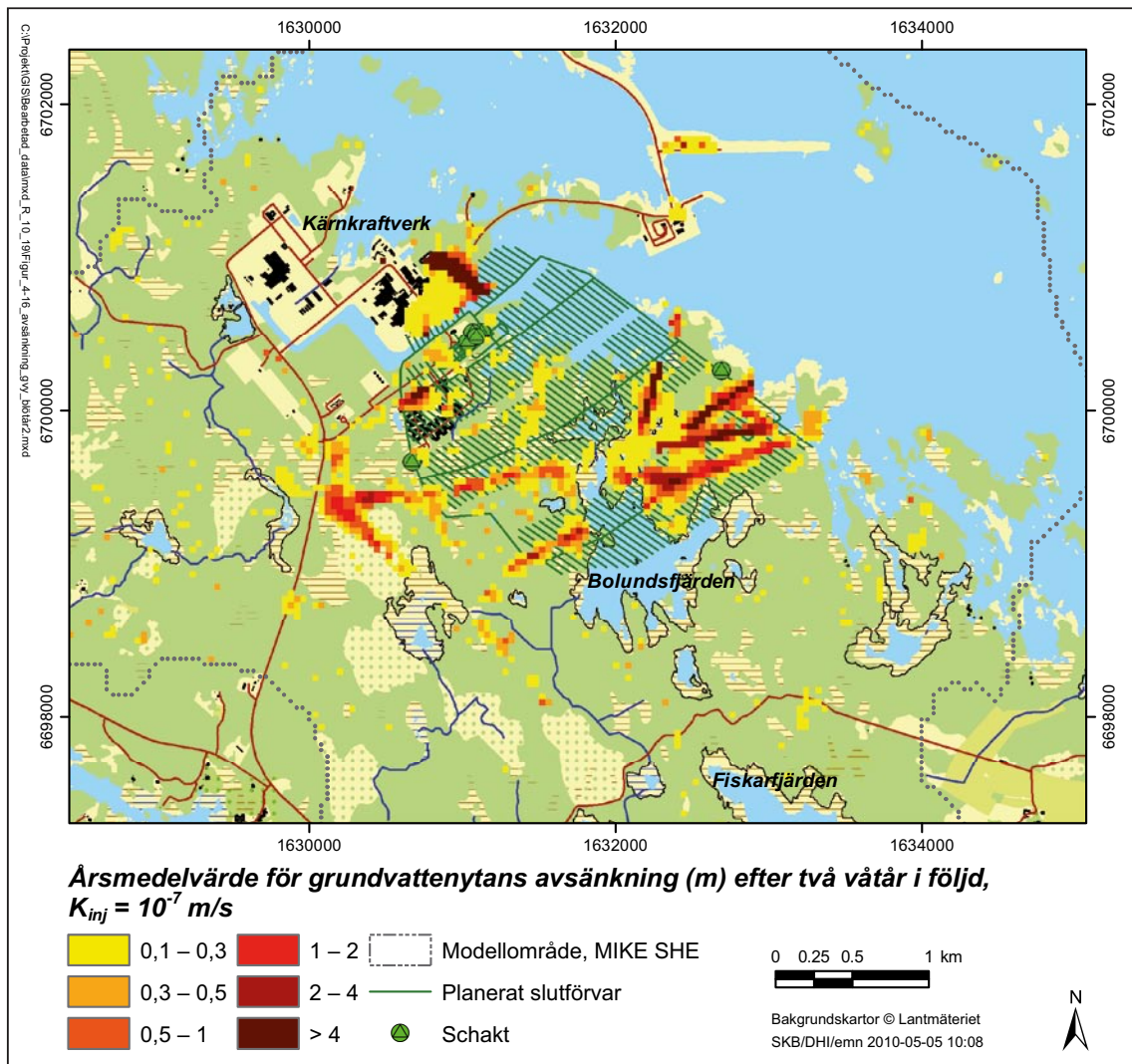
Figur 4-7. Beräknat årsmedelvärde av grundvattenytans avsänkning (m) under ett torrår; $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.



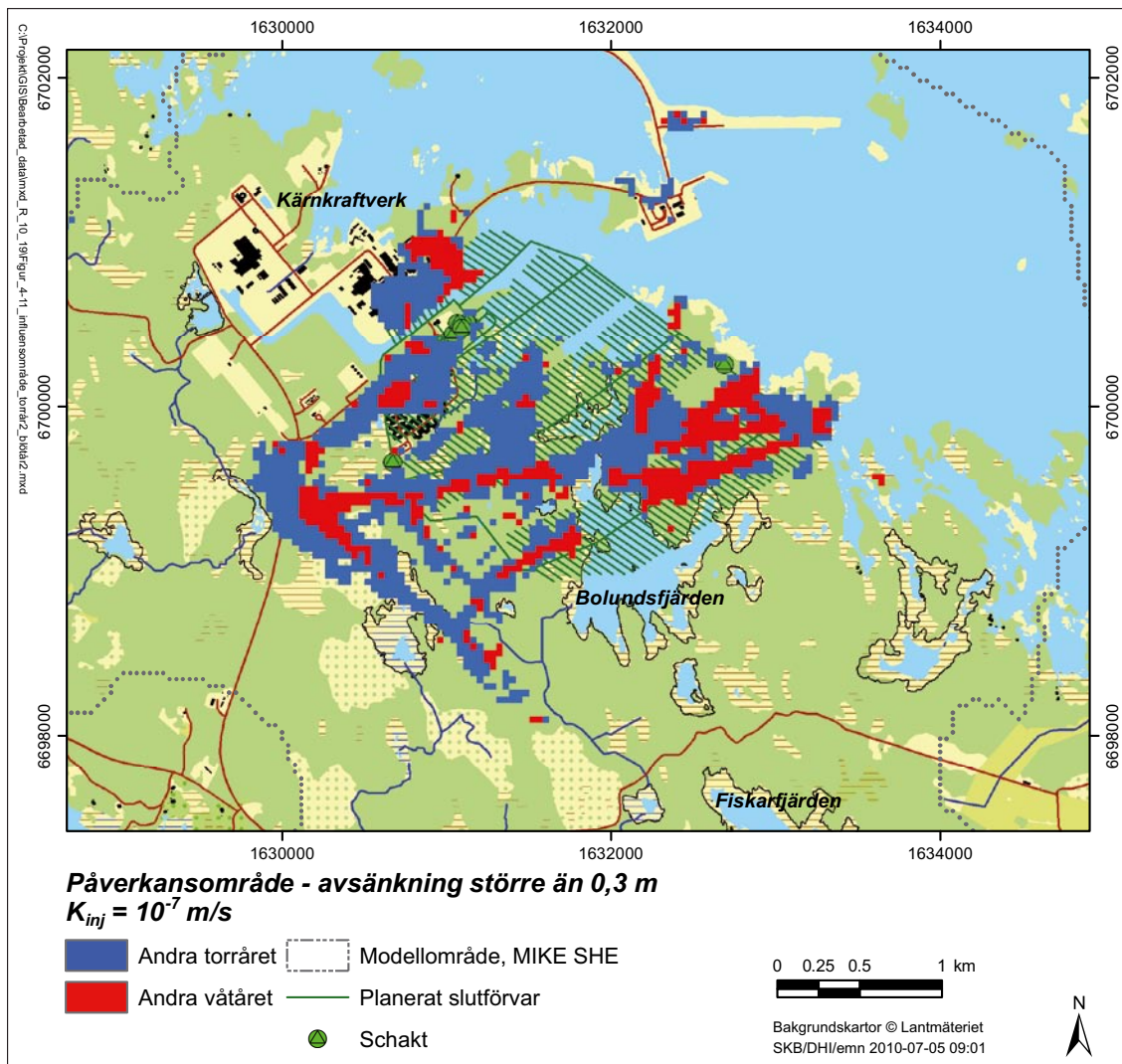
Figur 4-8. Beräknat årsmedelvärde av grundvattenytans avsänkning (m) under det andra av två på varandra följande torrår; $K_{inj} = 10^{-7} \text{ m/s}$.



Figur 4-9. Beräknat årsmedelvärde av grundvattenytans avsänkning (m) under ett våtår, $K_{inj} = 10^{-7} \text{ m/s}$.



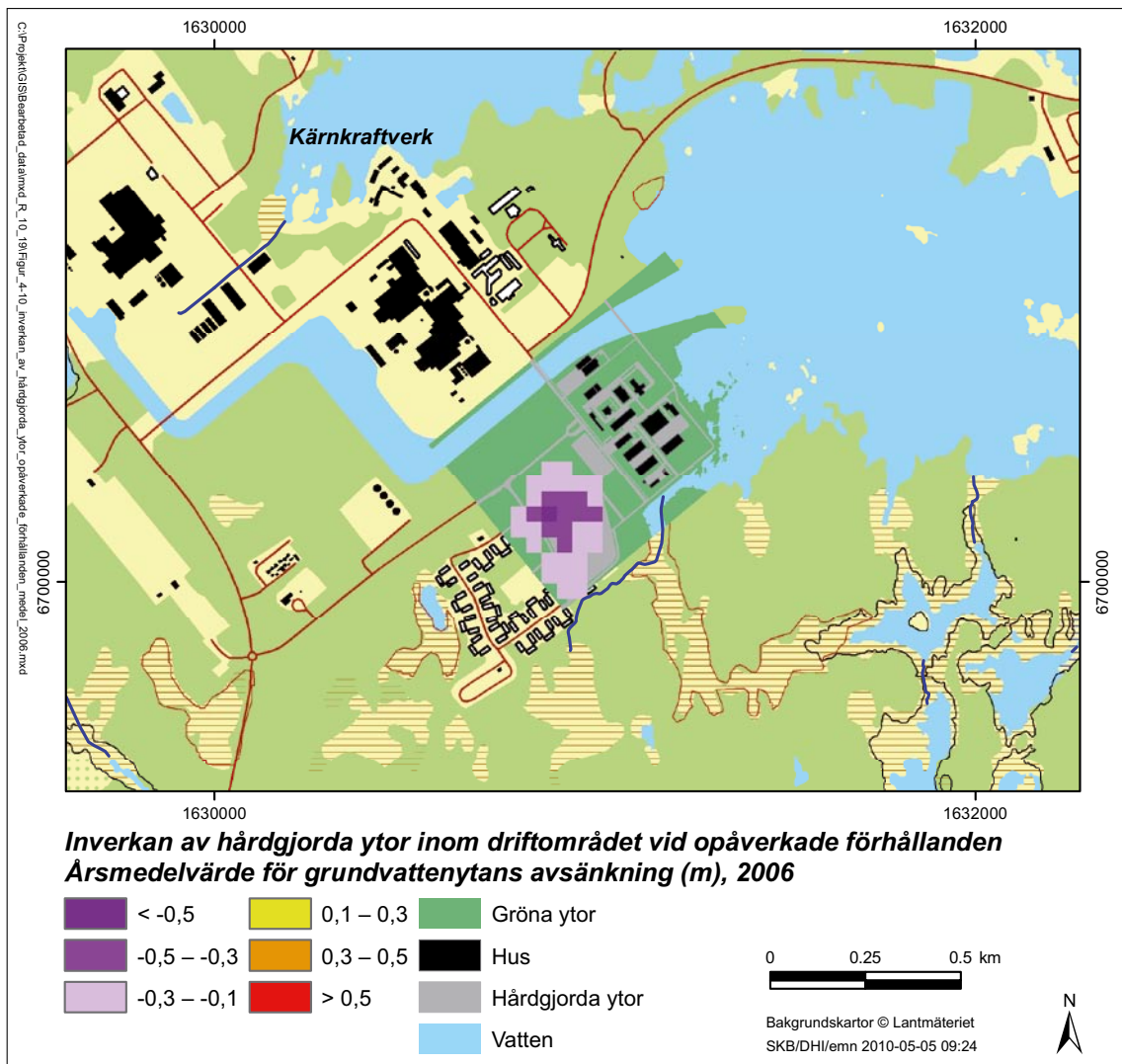
Figur 4-10. Beräknat årsmedelvärde av grundvattenytans avsänkning (m) under det andra av två på varandra följande våtar, $K_{inj} = 10^{-7} \text{ m/s}$.



Figur 4-11. Påverkansområde (avsänkingsgräns 0,3 m) för det andra torråret (blå och röda områden) och det andra våtåret (röda områden), $K_{inj} = 10^{-7} \text{ m/s}$.

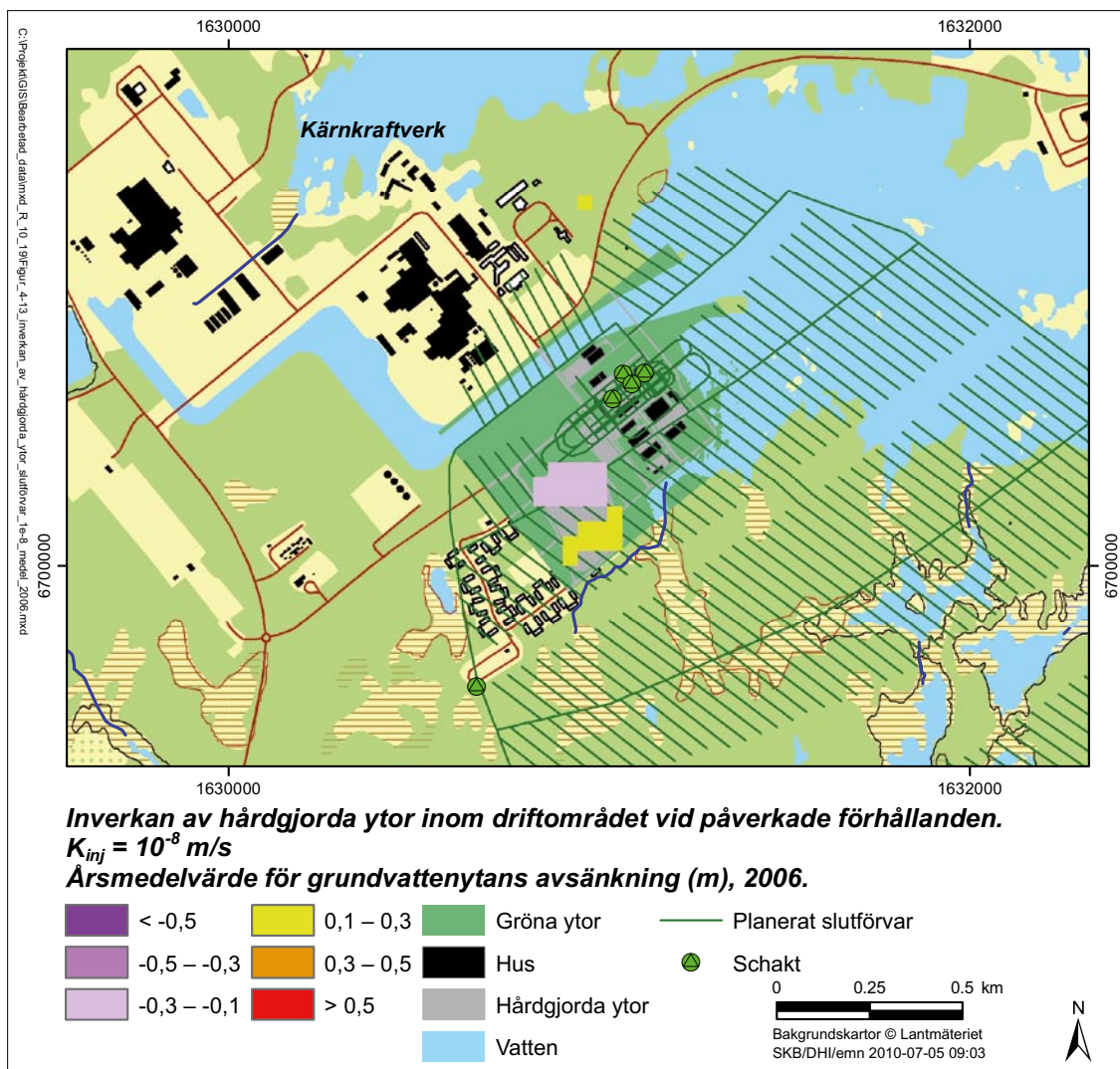
4.3 Inverkan av hårdgjorda ytor på grundvattenytans läge

Detta avsnitt behandlar inverkan av hårdgjorda ytor inom slutförvarsanläggningens planerade driftområde ovan mark. I den beräkning som ligger till grund för figur 4-12 är inte slutförvarsanläggningen medtagen. De beräkningsresultat som visas i figuren avser typåret 2006. Driftområdet kommer att vara beläget nära havet i ett utströmningsområde. En hårdgjord yta antas innebära att både infiltrationen och avdunstningen blir noll. Enligt figur 4-12 innebär detta att grundvattenytan stiger med upp till 0,5 m. Denna höjning kan förklaras av att i ett utströmningsområde har den minskade avdunstningen större effekt på grundvattenytans läge än att den lokala grundvattenbildningen blir noll. Nettoeffekten blir således att grundvattenytan stiger.



Figur 4-12. Beräknat årsmedelvärde för grundvattenytans avsänkning (m) (negativa värden innebär en höjning av grundvattenytan) avseende typåret 2006, till följd av hårdgjorda ytor inom det planerade driftsområdet. I beräkningen som ligger till grund för figuren finns inte slutförvarsanläggningen med.

I den beräkning som ligger till grund för figur 4-13 ingår både de hårdgjorda ytorna och grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen (tätningsfall $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s). Figur 4-13 visar på en något annorlunda inverkan av de hårdgjorda ytorna jämfört med figur 4-12. Grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen leder till att grundvattenutströmningen inom driftområdet minskar, vilket i sin tur leder till en avsänkning av grundvattenytan i den del av driftområdet som är beläget längst bort från kylvattenkanalen. I detta område är grundvattenutströmningen för opåverkade förhållanden mindre än utströmningen närmare kylvattenkanalen. Detta innebär att grundvattenytan här avsänks mer till följd av den minskade lokala grundvattenbildningen. I området närmast kylvattenkanalen med större grundvattenutströmning ökar grundvattenytans läge något till följd av de hårdgjorda ytorna.



Figur 4-13. Beräknat årsmedelvärde för grundvattenytans avsänkning (m) avseende typåret 2006, till följd av hårdgjorda ytor inom det planerade driftsområdet. I beräkningen som ligger till grund för figuren ingår även grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen (tätningsfall $K_{inj} = 10^{-8} \text{ m/s}$).

4.4 Inverkan av SFR på grundvattenytans avsänkning och grundvattentrycket

För att uppnå en bättre överensstämmelse med det verkliga inläckaget till undermarksanläggningen SFR har beskrivningen av befintligt SFR uppdaterats enligt avsnitt 3.3. Uppdateringen innebär att SFR i modellen beskrivs på samma sätt som slutförvarsförvarsanläggningen, det vill säga som ett antal tunnelsegment i modellverktyget MOUSE. Vattengenomsläppligheten i den injekterade zonen kring befintligt SFR har baserat på kalibrering ansatts till $K_{inj, SFR} = 10^{-8} \text{ m/s}$. Med denna beskrivning av befintligt SFR uppnås ett inläckage på 6,7 l/s, vilket kan jämföras med det verkliga uttaget på 6 l/s /Johansson 2008/.

I /Mårtensson och Gustafsson 2010/ är den på motsvarande sätt framkalibrerade vattengenomsläppligheten i den injekterade zonen $K_{inj, bef. SFR} = 2.5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$. Detta beror på att en ny kopplingsrutin mellan MIKE SHE och MOUSE används. Den nya rutinen ökar det modellberäknade inläckaget med 20–40 % jämfört med den kopplingsrutin som använts i föreliggande beräkningar. Vid jämförelser med en analytisk lösning har den nya rutinen visat sig ge ett inläckage som endast avviker med några få procent från den analytiska lösningen /Mårtensson och Gustafsson 2010/. Baserat på detta rekommenderas därför att de resultat som presenteras i /Mårtensson och Gustafsson 2010/ i första hand används.

I tabell 4-3 presenteras påverkansområdets storlek för olika avsänkingsgränser för tre olika fall avseende SFR och slutförvarsanläggningen. Referensen utgörs av situationen utan SFR (naturliga förhållanden). Påverkansområdets storlek redovisas enbart för fallen med befintligt SFR och för ett utbyggt SFR (i båda fallen med $K_{inj, SFR} = 10^{-8}$ m/s) samt för ett utbyggt SFR och slutförvarsanläggningen, i det senare fallet för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s. Resultaten i tabell 4-3 visar att påverkansområdets storlek endast ökar marginellt (6 % för en avsänkingsgräns på 0,3 m) med grundvattenbortledning från den utbyggda delen av SFR, i jämförelse med påverkansområdets storlek med grundvattenbortledning från befintligt SFR. Om slutförvarsanläggningen inkluderas ökar påverkansområdets storlek nästan sju gånger, jämfört med dagens situation med enbart grundvattenbortledning från befintligt SFR.

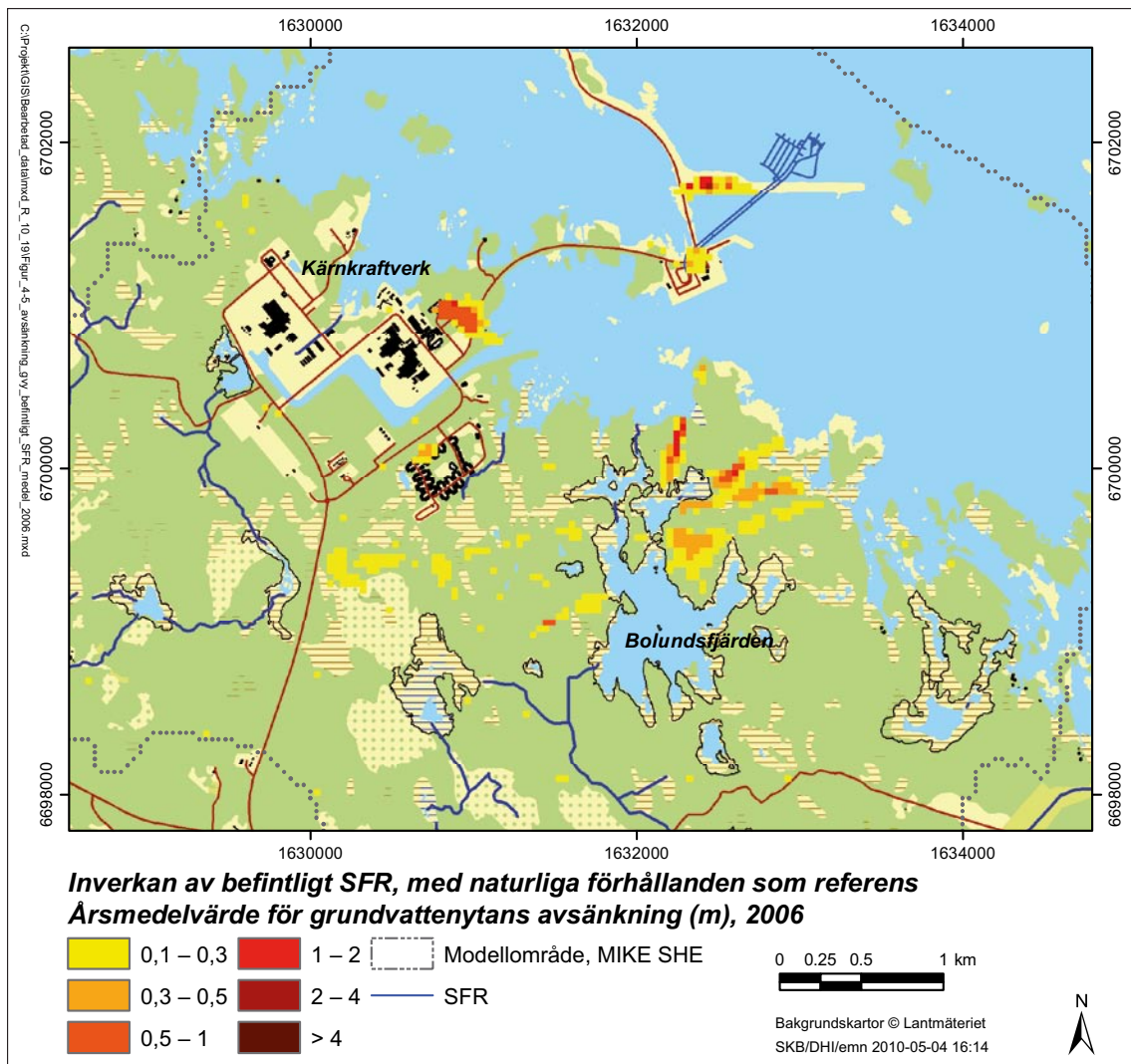
I figur 4-14 visas den modellberäknade avsänkningen av grundvattenytan till följd av grundvattenbortledningen från befintligt SFR. Referensen utgörs av situationen utan SFR (naturliga förhållanden). Som även framgår av tabell 4-3 orsakar inläckaget till befintligt SFR en avsänkning av grundvattenytan som är större än 0,3 m inom en yta på 0,17 km². Påverkansområdet är koncentrerat till områden med vertikala deformationszoner i berget norr om sjön Bolundsfjärden och i områden på SFR-piren. Även nordost om kärnkraftverket syns en tydlig effekt med en avsänkning på 0,5–1 m. Figur 4-15 visar förändringen av grundvattentrycket på nivån 50 m u h till följd av grundvattenbortledningen från befintligt SFR. Enligt figuren är påverkansområdet för sänkningen av grundvattentrycket betydligt större än det för avsänkningen av grundvattenytan och sträcker sig ut till modellranden i nordost. I /Mårtensson och Gustafsson 2010/ har modellområdet i MIKE SHE utökats för att undvika att påverkansområdet i berget når fram till modellranden.

Ett framtida utbyggt SFR orsakar endast en marginell tillkommande avsänkning av grundvattenytan jämfört med dagens situation med befintligt SFR; inte någonstans är avsänkningen större än 0,1 m. Det modellberäknade inläckaget till den utbyggda delen av SFR uppgår till 0,4 l/s, att jämföra med 6,7 l/s till befintligt SFR. En liten men tydlig effekt av inläckaget till den utbyggda delen av SFR kan ses på grundvattentrycket på nivån 50 m u h i figur 4-16. Området där sänkningen av grundvattentrycket i berget överstiger 0,3 m är beläget under havet nära den utbyggda delen.

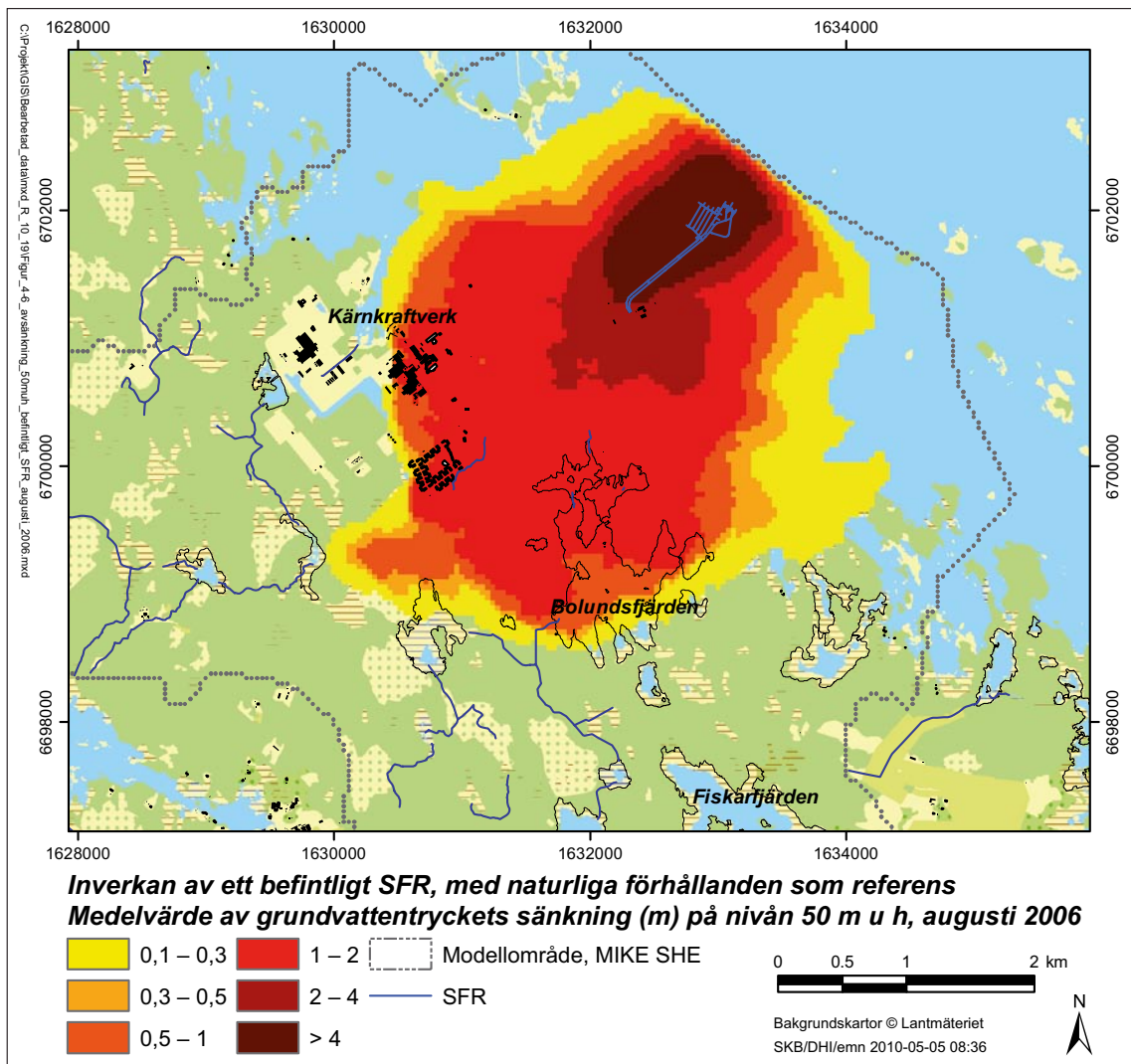
I figur 4-17 visas grundvattenytans avsänkning till följd av grundvattenbortledningen från ett framtida utbyggt SFR och från slutförvarsanläggningen. Både för ett utbyggt SFR och för slutförvarsanläggningen antas $K_{inj} = K_{inj, SFR} = 10^{-8}$ m/s. Referensen utgörs av dagens situation med grundvattenbortledning enbart från befintligt SFR. För en avsänkingsgräns på 0,3 m omfattar påverkansområdet en yta på 1,04 km², vilket kan jämföras med 1,16 km² om man utgår från naturliga förhållanden (utan SFR). Enligt figur 4-18 når sänkningen av grundvattentrycket på nivån 50 m u h fram till modellranden i öster.

Tabell 4-3. Påverkansområden (km²) för olika avsänkingsgränser för tre olika fall avseende SFR och slutförvarsanläggningen.

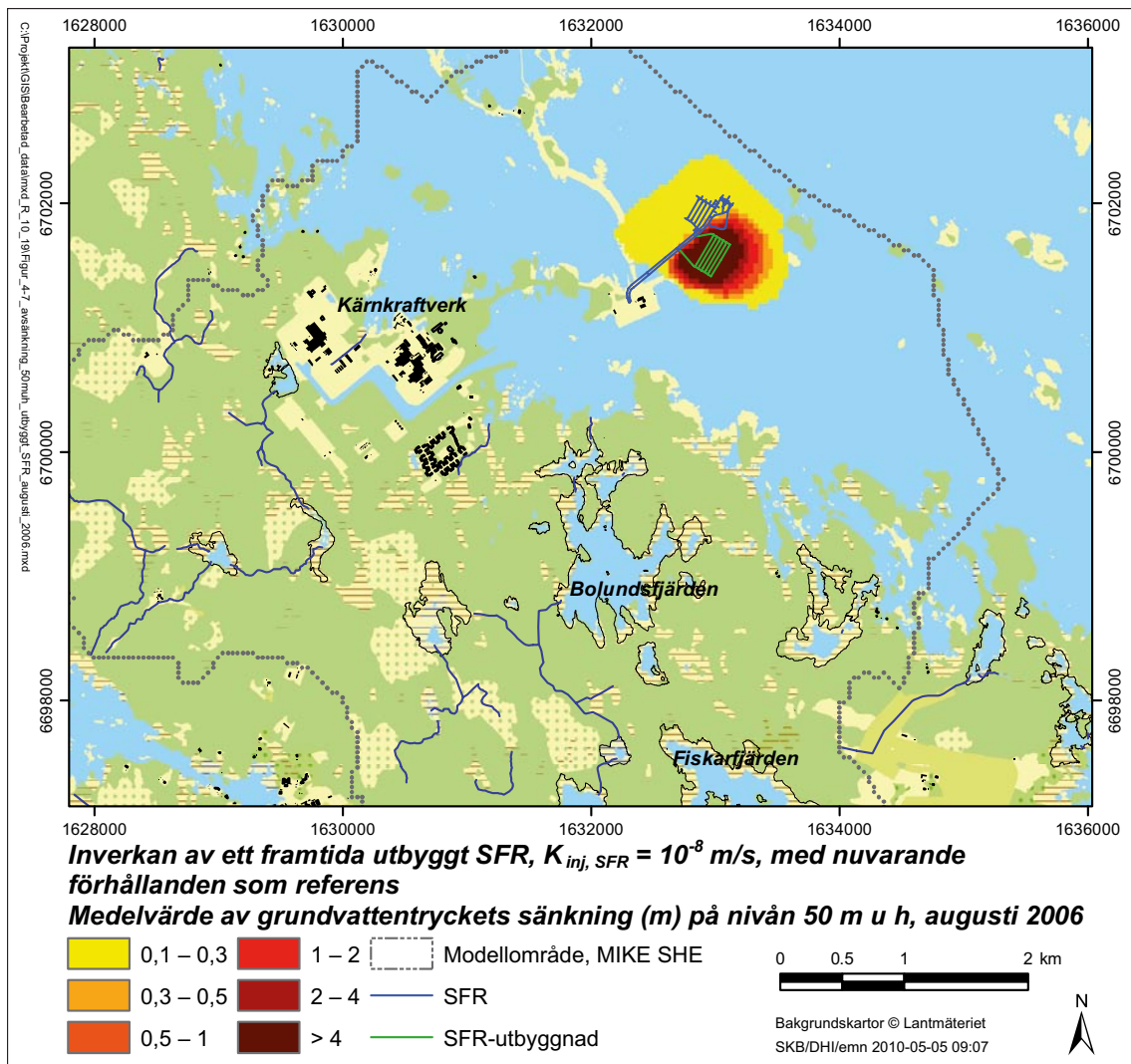
Beräkningsfall	Avsänkingsgräns 0,1 m	Avsänkingsgräns 0,3 m	Avsänkingsgräns 0,5 m	Avsänkingsgräns 1,0 m
Befintligt SFR (ingen slutförvarsanläggning)	0,65	0,17	0,07	0,02
Utbyggt SFR (ingen slutförvarsanläggning)	0,68	0,18	0,07	0,02
Utbyggt SFR samt slutförvarsanläggningen	2,34	1,16	0,85	0,54



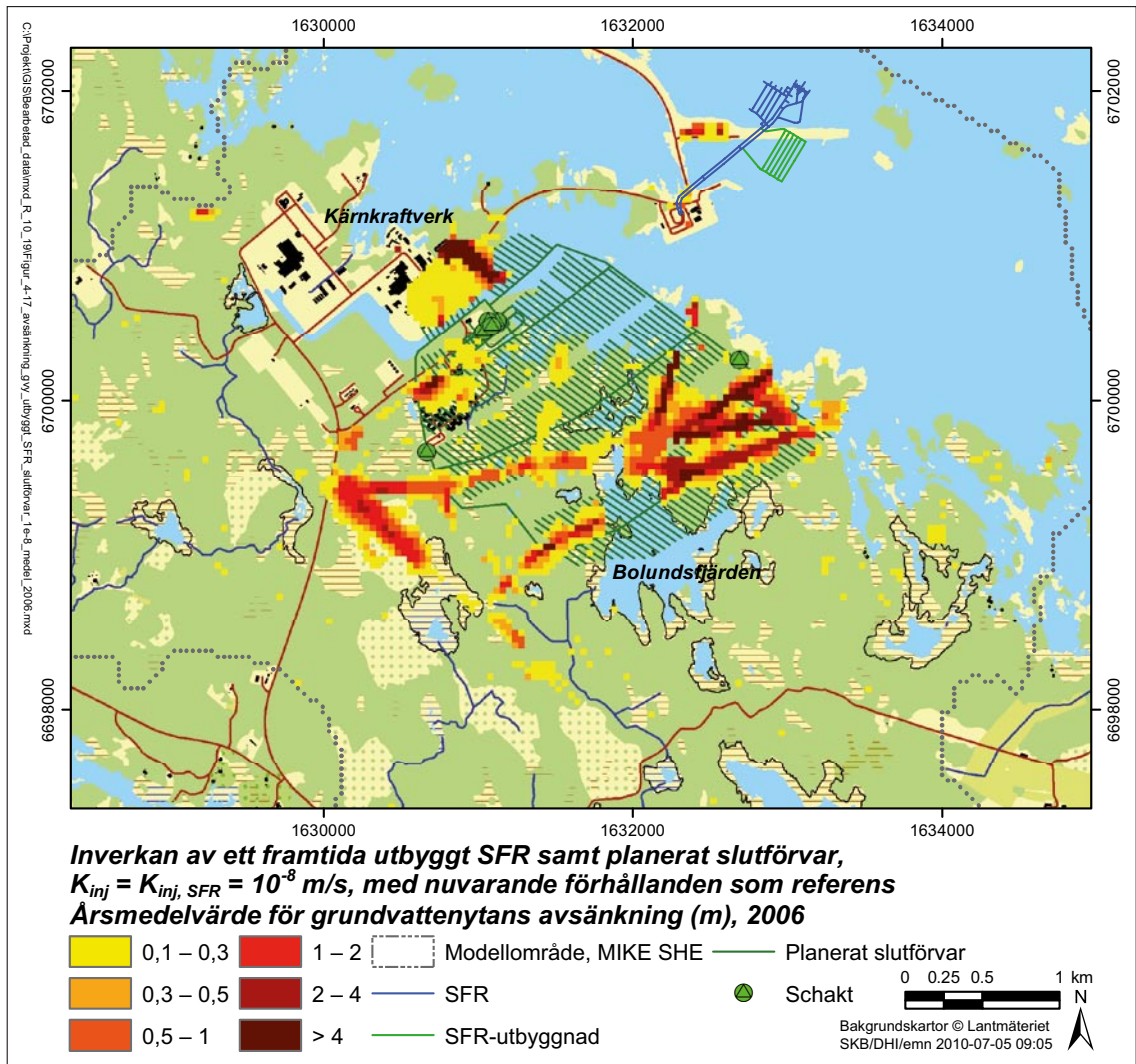
Figur 4-14. Beräknat årsmedelvärde av grundvattenytans avsänkning (m) under typåret 2006 till följd av grundvattenbortledning från befintligt SFR, $K_{inj, SFR} = 10^{-8}$ m/s.



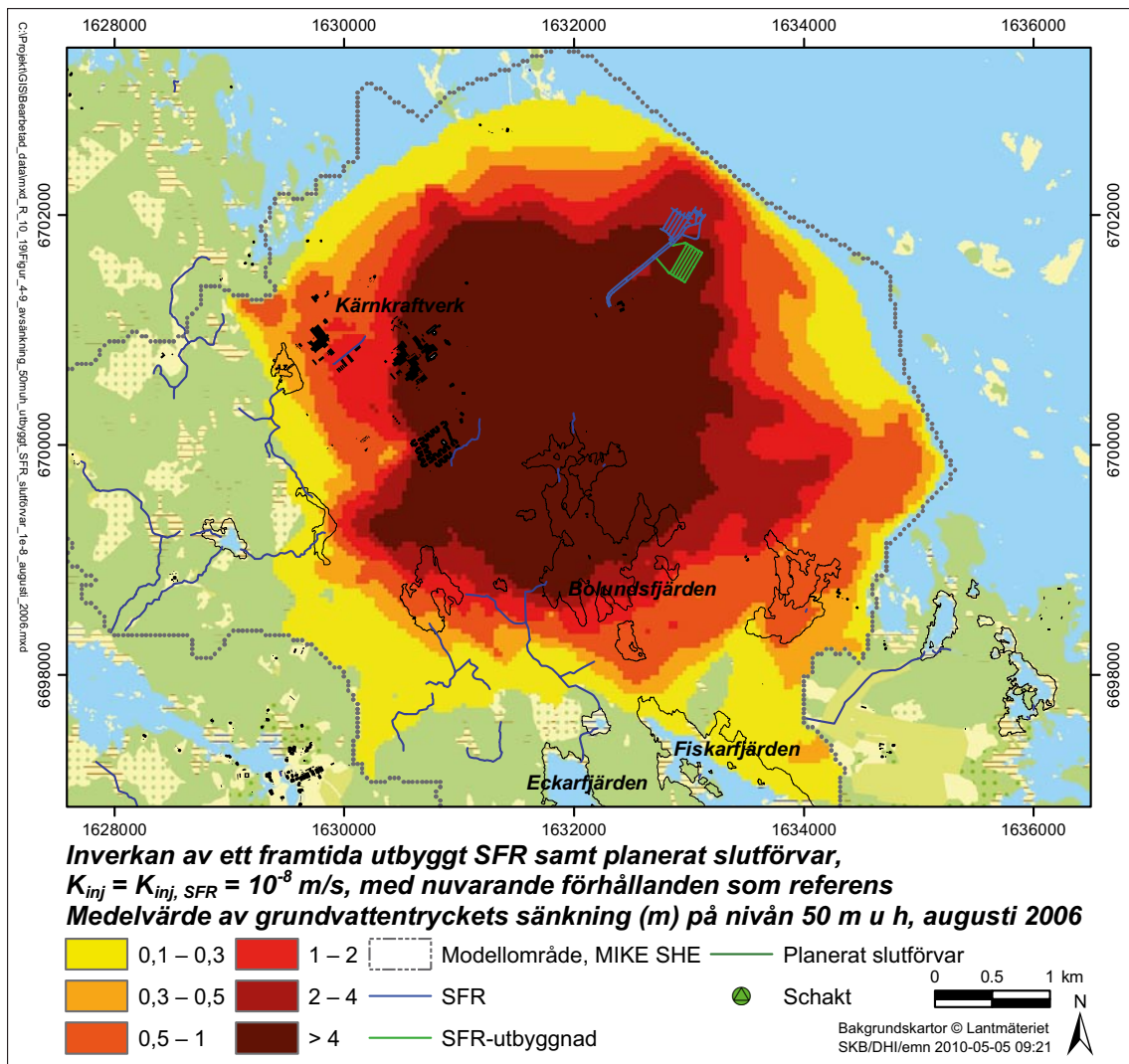
Figur 4-15. Beräknat månadsmedelvärde av sänkning (m) av grundvattentrycket på nivån 50 m u h under augusti 2006 till följd av grundvattenbortledning från befintligt SFR, $K_{inj, SFR} = 10^{-8}$ m/s.



Figur 4-16. Beräknat månadsmedelvärde (augusti 2006) av sänkningen (m) av grundvattentrycket på nivån 50 m u h under augusti 2006 till följd av grundvattenbortledning från ett framtida utbyggt SFR, $K_{inj, SFR} = 10^{-8}$ m/s.



Figur 4-17. Beräknat årsmedelvärde av grundvattenytans avsänkning (m) under typåret 2006 till följd av grundvattenbortledning från ett framtida utbyggt SFR och planerat slutförvarsanläggning. Både för ett utbyggt SFR och slutförvarsanläggningen antas $K_{inj} = K_{inj, SFR} = 10^{-8} \text{ m/s}$.



Figur 4-18. Beräknat månadsmedelvärde av sänkningen (m) av grundvattentrycket på nivån 50 m u h. under augusti 2006 till följd av grundvattenbortledning från ett framtida utbyggt SFR och slutförvarsanläggningen. Både för ett utbyggt SFR och slutförvarsanläggningen antas $K_{inj} = K_{inj, SFR} = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s.

4.5 Transpiration från omättad och mättad zon

Med transpiration menas växternas avgivande av vattenånga från klyvöppningar och/eller epidermis (bladens yttersta cellskikt). Denna process är helt beroende av mängden växttillgängligt vatten i rotzonen. Djupet till grundvattenytan inom landdelarna av modellområdet i Forsmark är i medeltal cirka 1 m, och ännu närmare markytan nära sjöar och våtmarker. Detta innebär att rotzonen i många områden sträcker sig ner till den mättade zonen och således sker även här ett vattenupptag av växterna. I områden med större grundvattendjup sker vattenupptaget från den omättade zonen. Som ett stöd till konsekvensutredningen avseende grundvattenbortledningens konsekvenser för vegetationen i Forsmarksområdet, har modellresultat tagits fram som kvantifierar avsänkningens inverkan på mängden växttillgängligt vatten i rotzonen och därmed växternas transpiration.

I tabell 4-4 redovisas årsmedelvärden på den modellberäknade transpirationen från den omättade zonen och den mättade zonen under den ansatta växtperioden under typåret 2006 (april–oktober). I tabellen visas även motsvarande medelvärden för den totala transpirationen för landdelarna av MIKE SHE-modellens modellområde. Resultat redovisas både för opåverkade förhållanden och med ett helt öppet förvar (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s), vilket ger ett mått på den relativa förändringen till följd av grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen. Tabell 4-5 redovisar motsvarande resultat specifikt för påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s, här definierat som det område där årsmedelvärdet för grundvattenytans avsänkning är större än 0,3 m.

Inom både landområdet och påverkansområdet utgör transpirationen från den mättade zonen knappt 10 % av den totala transpirationen under opåverkade förhållanden. Med ett helt öppet förvar (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s) minskar transpirationen från den mättade zonen inom påverkansområdet med 83 % jämfört med opåverkade förhållanden. Växterna kompenserar för det minskade upptaget från den mättade zonen med ett ökat vattenupptag från den omättade zonen, vilket i sin tur orsakar ett ökat uppåtriktat flöde från den mättade zonen till den omättad zonen. Denna kompensation innebär att den totala transpirationen inom påverkansområdet sammantaget minskar med endast 2 %. Inom landområdet sker motsvarande förändringar, men sett till hela detta område minskar den totala transpirationen endast marginellt.

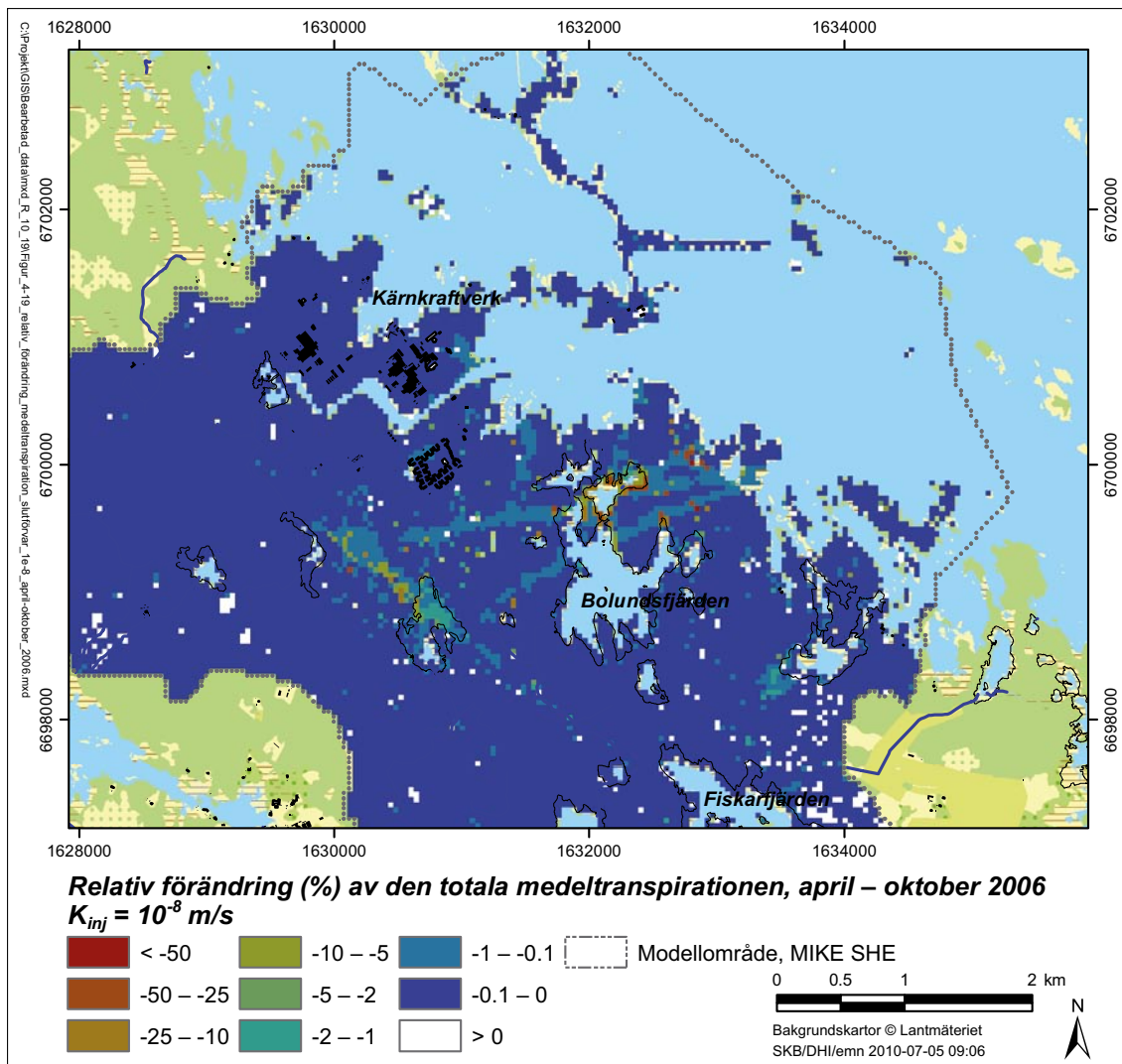
Översiktskartan i figur 4-19 visar den relativa förändringen av dygnsmedelvärdena av den totala transpirationen från landdelarna av MIKE SHE-modellens modellområde under växtperioden under typåret 2006. Enligt figuren sker den största transpirationsförändringen i landområdena runt sjön Puttan. I detta område medför grundvattenbortledningen att transpirationen minskar med mer än 25 %. En jämförelse med figur 4-6 visar att områden med stor minskning av transpirationen sammanfaller med områden med en stor avsänkning av grundvattenytan. I övriga delar av modellområdet är dock förändringen av transpirationen under växtperioden liten (< 0,1 %).

Tabell 4-4. Dygnsmedelvärden på transpirationen (mm/d) under växtperioden (april–oktober) typåret 2006, från omättad och mättad zon. I tabellen redovisas också den sammanlagda transpirationen (från omättad zon och mättad zon) för landdelarna av MIKE SHE-modellens modellområde. Resultat redovisas för opåverkade förhållanden och för fallet med ett helt öppet förvar (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s).

	Opåverkade förhållanden	Påverkade förhållanden	Förändring (%)
Transpiration från omättad zon	1,259	1,266	0,5
Transpiration från mättad zon	0,132	0,124	-6,4
Total transpiration	1,391	1,389	-0,2

Tabell 4-5. Dygnsmedelvärden på transpirationen (mm/d) under växtperioden (april–oktober 2006) från omättad zon, mättad zon, samt den totala transpirationen inom påverkansområdet. Påverkansområdet avser avsänkingsgränsen 0,3 m och tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. Resultat redovisas för opåverkade förhållanden och för fallet med ett helt öppet förvar (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s).

	Opåverkade förhållanden	Påverkade förhållanden	Förändring (%)
Transpiration från omättad zon	1,196	1,273	6,5
Transpiration från mättad zon	0,123	0,022	-83
Total transpiration	1,319	1,294	-1,9



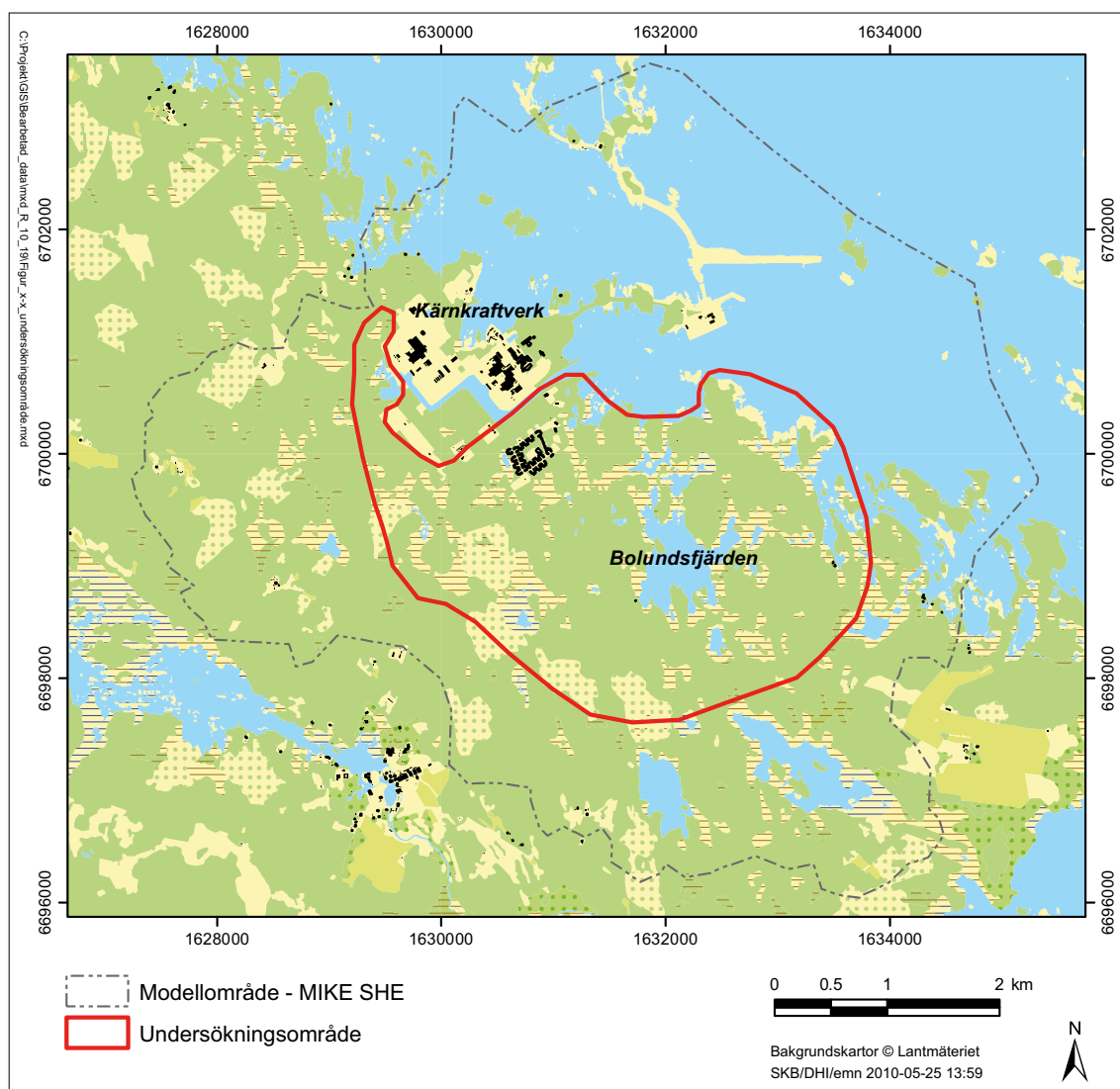
Figur 4-19. Relativ förändring (%) av dygnsmedelvärdet (mm/d) av den totala transpirationen under växtperioden typåret 2006 (april–oktober) från landdelarna av MIKE SHE-modellens modellområde till följd av grundvattenbortledningen från ett helt öppet förvar (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8} \text{ m/s}$).

5 Naturobjekt inom undersökningsområdet

Ekologiska fältinventeringar har utförts i Forsmarksområdet i syfte att identifiera, beskriva och naturvärdesklassificera naturobjekt och tillhörande arter /Hamrén och Collinder 2010/. Samtliga kalkgölar, rikkärr, sjöar och skogsobjekt som befinner sig inom ett preliminärt undersökningsområde (se figur 5-1) har detaljstuderats med MIKE SHE. Det preliminära undersökningsområdets geografiska omfattning har definierats utifrån målsättningen att täcka in olika typer av värdefulla våtmarksobjekt i olika geografiska lägen i förhållande till det modellberäknade påverkansområdet för grundvattenytans avsänkning. Med olika typer av våtmarksobjekt menas huvudsakligen objekt med/utan sediment och ytvatten, samt objekt med/utan ytvatten.

Huvuddelen av de identifierade naturobjekten består av rikkärr och kalkgölar (små kalkrika sjöar), större sjöar (Bolundsfjärden) samt örtrika kalkbarrskogar på frisk och fuktig mark. Objekten har naturvärdesklassats enligt följande skala /Hamrén och Collinder 2010/:

- Klass 1: Nationellt naturvärde.
- Klass 2: Regionalt naturvärde.
- Klass 3: Kommunalt naturvärde.
- Klass 4: Lokalt naturvärde.



Figur 5-1. Undersökningsområde för detaljstudier av naturobjekt.

Ett flertal av de identifierade våtmarksobjekten är av nationellt intresse (klass 1) eller regionalt intresse (klass 2). Den höga klassningen av naturobjekten grundar sig bland annat på följande:

- Rikkärr och kalkrika gölar är ovanliga naturtyper nationellt sett. Utanför kalkrika områden som Gotland och Jämtland är de till och med mycket ovanliga.
- Flera av naturobjekten är livsmiljöer åt rödlistade och/eller skyddade arter, bland annat gölgroda, gulyxne och större vattensalamander. Dessa arter omfattas samtliga av något av Naturvårdsverkets åtgärdsprogram. Lokalerna i Forsmark utgör habitat för gölgroda, prioriterad av Länsstyrelsen för restaureringsåtgärder. Arterna omfattas av EU:s art- och habitatdirektiv samt av artskyddsförordningen, liksom flera andra påträffade arter /Hamrén och Collinder 2010/.

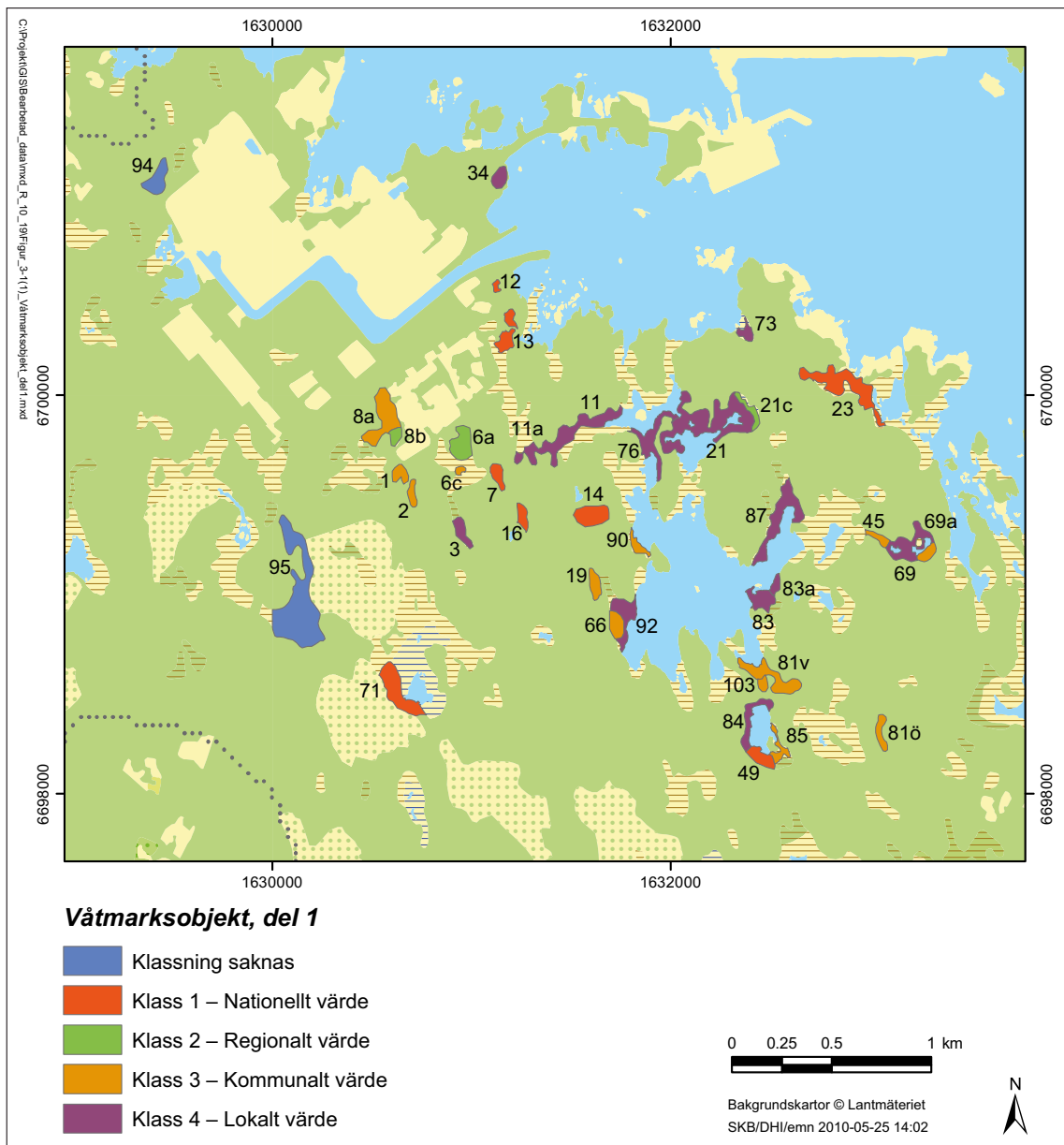
Objektspecifika modelleringsresultat redovisas i kapitel 6.

5.1 Våtmarksobjekt

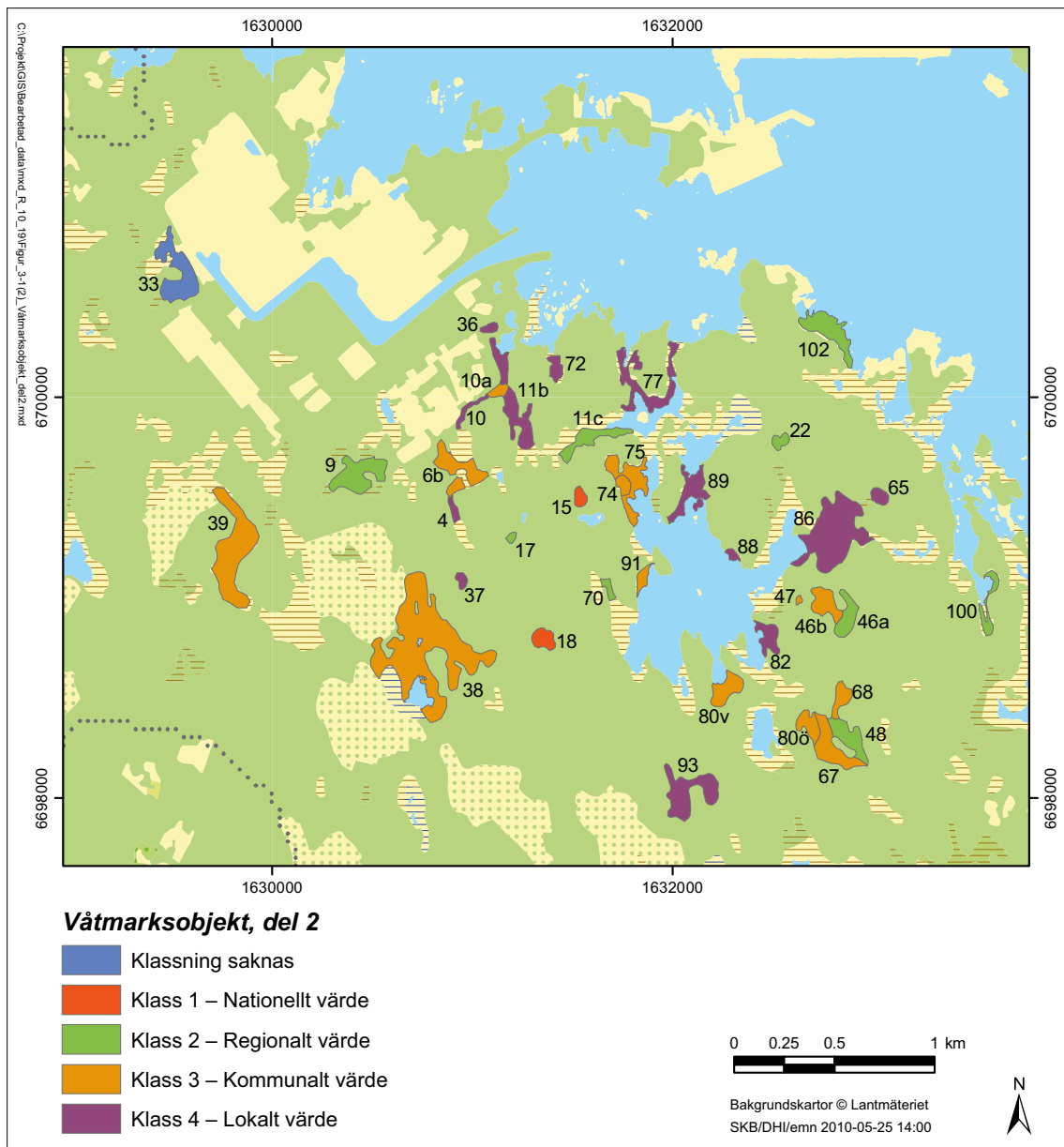
I figurerna 5-2 och 5-3 visas lägen samt naturvärdesklassning /Hamrén och Collinder 2010/ för de våtmarksobjekt som ingår i denna studie. Av totalt 61 våtmarksobjekt som studerats här är 32 stycken objekt av regionalt (klass 2) eller nationellt värde (klass 1). Våtmarksobjektens id-nummer, geografiska utsträckning och naturvärdesklass har successivt justerats under arbetet med karaktärisering och beskrivning av våtmarksobjekten och deras naturvärden. Detta innebär att de id-nummer och naturvärden som anges i denna rapport delvis skiljer sig från vad som anges i /Hamrén och Collinder 2010/. Vidare har vissa objekt sedermera tillkommit eller utgått. Exempelvis har våtmarksobjekten med id-numren 33, 94, 95 utgått, varför de i figurerna 5-2 och 5-3 saknar naturvärdesklassning. En del objekt är små, exempelvis objekten med id-numren 17 och 47. Detta innebär att de endast omfattar en eller ett fåtal beräkningsceller i MIKE SHE.

Geologiska undersökningar av våtmarkerna och gölarna i Forsmarksområdet visar att bottarna ofta utgörs av morän. I flera fall underlagras de dock helt eller delvis av sediment med låg vattengenomsläpplighet såsom lera och gyttja. Generellt är moränen i Forsmark genomsläpplig ner till en meters djup för att sedan vara hård och mindre vattengenomsläpplig. Många av de växter och djur som förekommer i kärr och gölar i området är beroende av en marknära grundvattenyta. Även en mycket liten avsänkning av grundvattenytan (> 0,1 m) kan leda till vegetationsförändringar mot torrare naturtyper. På längre sikt kan det ske igenväxning med buskar och träd och förlust av naturvärden /Hamrén och Collinder 2010/.

Ett mindre antal våtmarksobjekt har särskilt höga naturvärden och har därför specialstuderats med avseende på ytvattennivåer, vattenbalanser samt behov av vattentillförsel. Dessa våtmarksobjekt, vars lägen visas i figurerna 5-2 och 5-3, har id-numren 6a, 7, 9, 11, 11a c, 14–18, 21c, 22, 23, 49 och 71.



Figur 5-2. Översiktskarta som visar lägen och preliminär naturvärdesklassning för de våtmarksobjekt som ingår i denna studie. För ökad tydlighet är kartredovisningen uppdelad på två delkartor, resterande våtmarksobjekt visas i figur 5-3.

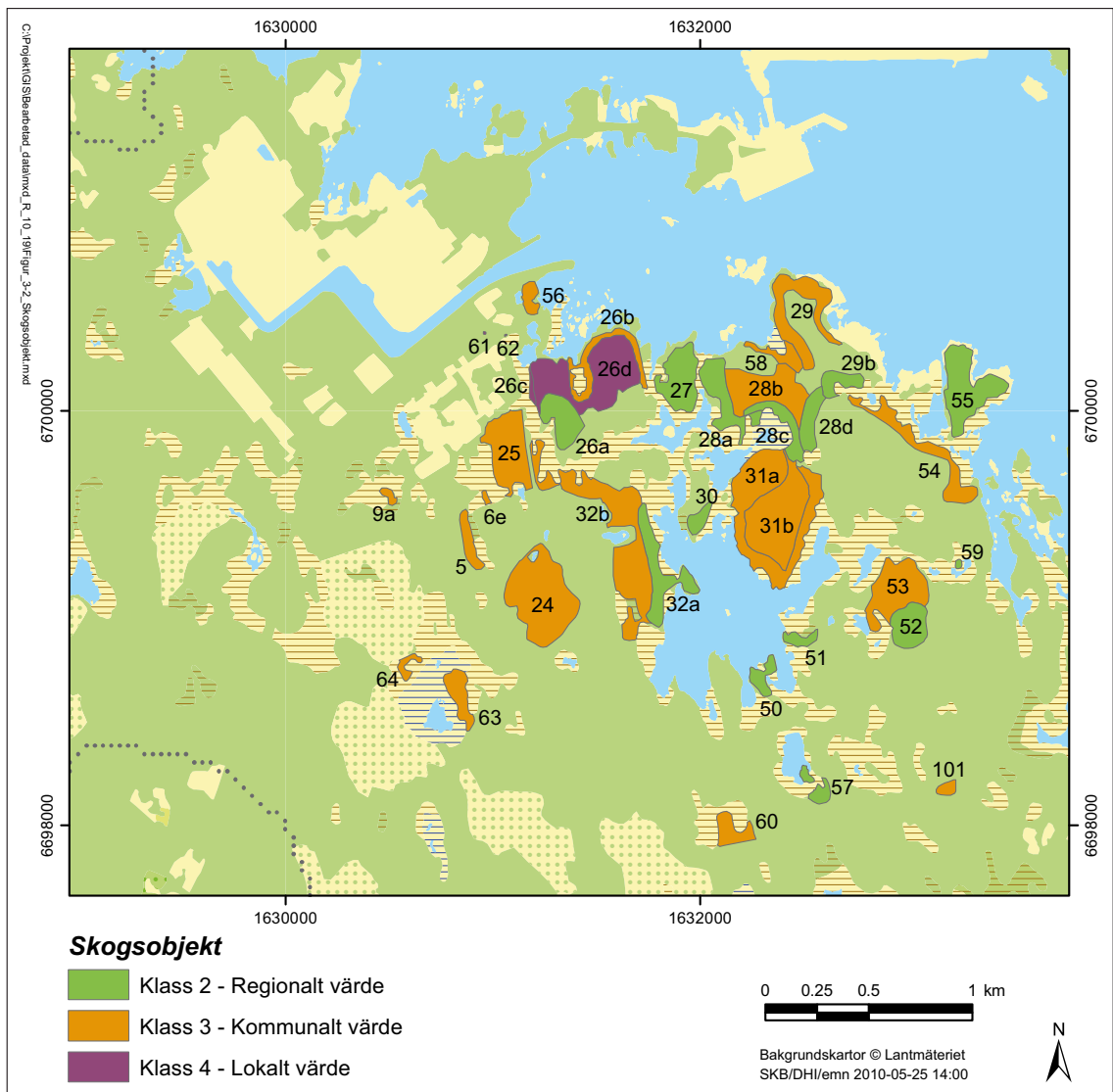


Figur 5-3. Översiktskarta som visar lägen och preliminär naturvärdesklassning för de våtmarksobjekt som ingår i denna studie.

5.2 Skogsobjekt

I figur 5-4 visas lägen samt preliminär naturvärdesklassning /Hamrén och Collinder 2010/ för de skogsobjekt som ingår i denna studie. På motsvarande sätt som för våtmarksobjekten, har skogsobjektens id-nummer, geografiska utsträckning och naturvärdesklass successivt justerats under arbetet med karaktärisering och beskrivning av skogsobjekten och deras naturvärden. Detta innebär att de id-nummer och naturvärden som anges i denna rapport delvis skiljer sig från vad som anges i /Hamrén och Collinder 2010/. Generellt har skogsobjekten lägre naturvärdesklasser än våtmarksobjekten.

Markerna där värdefulla örtrika kalkbarrskogar är belägna domineras av friska och fuktiga förhållanden. Känsligheten hos dessa skogar för en avsänkning av grundvattenytan är liten i jämförelse med rikkärr och kalkgölar. Dock kan torrare förhållanden leda till ett skifte i artsammansättningen /Hamrén och Collinder 2010/.



Figur 5-4. Översiktskarta som visar lägen och preliminär naturvärdesklassning för de skogsobjekt som ingår i denna studie.

6 Objektspecifika resultat

Kapitel 4 fokuserade på grundvattenbortledningens övergripande effekter inom MIKE SHE-modellens modellområde. Detta kapitel beskriver effekterna specifikt för de våtmarks- och skogsobjekt som anges i kapitel 5. I avsnitt 6.1 presenteras vattenbalanser för 15 stycken våtmarksobjekt. I avsnitt 6.2 redovisas resultat från två olika typer av så kallad partikelspårning. Denna syftar till att kvantifiera grundvattenbortledningens effekter på utsträckningen för våtmarksobjektens avrinningsområden samt det vertikala grundvattenflödet i jord och berg.

Avsnitt 6.3 presenterar modellberäknade djup till grundvattenytan för opåverkade förhållanden samt avsänkning av grundvattenytan för påverkade förhållanden och för olika meteorologiska förhållanden. Dessa resultat presenteras för samtliga våtmarks- och skogsobjekt och även för sjöarna Norra Bassängens och Puttans avrinningsområden. Anledningen till att dessa avrinningsområden studeras specifikt är att huvuddelen av Norra Bassängens avrinningsområde är beläget inom påverkansområdet och i stort sett hela Puttans avrinningsområde är beläget inom påverkansområdet. I avsnitt 6-4 redovisas ytvattennivåer och behov av tillförsel av vatten för 21 stycken våtmarksobjekt.

6.1 Vattenbalanser

I tabellerna 6-1 till 6-3 ges en sammanfattande redovisning av vattenbalanserna för 15 stycken våtmarksobjekt. Vattenbalanserna redovisas dels för opåverkade förhållanden, dels för påverkade förhållanden med grundvattenbortledning från slutförvarsanläggningen. Resultaten avser typåret 2006. Beräkningarna för påverkade förhållanden avser det hypotetiska fallet med ett helt öppet förvar och tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.

Figur 6-1 förklarar de olika vattenbalanskomponenterna som redovisas i tabellerna 6-1 till 6-3. Nettonederbörden är definierad som nederbörden minus summan av avdunstningen från ytvatten och snö, interception och snömagasinerings. Avdunstning av markvatten utgörs av summan av avdunstningen från den mättade och omättade zonen samt transpirationen. Samtliga flöden som redovisas i tabellerna 6-1 till 6-3 är nettoflöden, det vill säga flöden i motsatt riktning till de angivna pilarna kan förekomma under året. I figur 6-2 visas lägena för våtmarksobjekten i tabellerna 6-1 till 6-3 tillsammans med grundvattenytans avsänkning för typåret 2006 (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s).

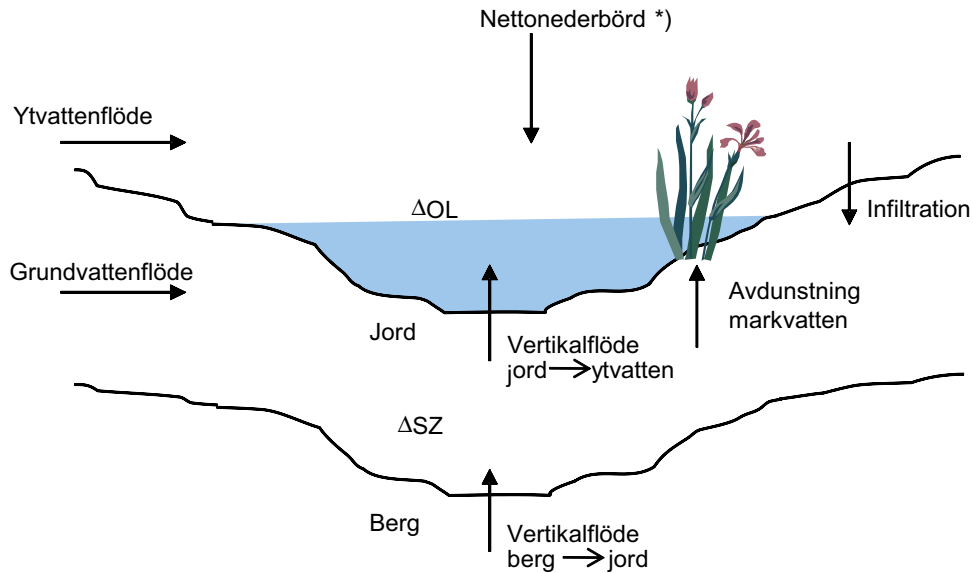
Våtmarksobjekten 11, 11a och 11b är hopslagna och redovisas som ett objekt och benämns i fortsättningen i detta avsnitt enbart som objekt 11. Under opåverkade förhållanden har våtmarksobjekten 6a, 7, 11, 14, 17, 18, 21c och 71 ett grundvatteninflöde och ett uppåtriktat nettoflöde från jordlagren till ytvattnet vilket innebär att dessa objekt är utströmningsområden. Med utströmningsområde menas att grundvatten flödar ur grundvattenzonen till skillnad från den motsatta situationen då vatten flödar till grundvattenzonen (inströmning). För påverkade förhållanden (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s), minskar utströmningen i ovan nämnda objekt förutom i objekt 71 som är opåverkat. En minskad utströmning orsakar i regel ett minskat ytvattenutflöde från objekten. Objekten 7, 14 och 18 saknar möjlighet till ytvattenutflöde. Det beräknade ytvattenutflödet ger därför en periodvis översvämning av områden utanför de definierade objektsytorna. Objekten påverkas i olika stor utsträckning av grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen. Exempelvis minskar det uppåtriktade nettoflödet till ytvattnet med cirka 75 % i objekt 7, medan motsvarande minskning för objekt 14 enbart är 7 %.

I objekten 9, 11c, 15, 16 och 49 har flödet motsatt riktning i jämförelse med ovan nämnda objekt. Dessa våtmarksobjekt utgör således inströmningsområden med ett nedåtriktat nettoflöde från ytvattnet till jordlagren. För påverkade förhållanden ökar inströmningen från dessa objekt, med undantag för objekten 16 och 49 som i stort sett är opåverkade av grundvattenbortledningen från förvaret.

För samtliga objekt (med undantag för objekt 49, långt bort från påverkansområdet) ökar det vertikala flödet från jordlagren ner till berget vid påverkade förhållanden. För objekten 7, 21c, 22 och 23 ökar detta flöde med 200–400 mm/år, vilket förklarar minskningen av grundvattenmagasinet i jordlagren vid dessa objekt. Objekt 9 är det enda objekt där grundvattenmagasinet i jordlagren ökar. Vad gäller ytvattenmagasinen minskar de i hälften av objekten, i de flesta fall dock enbart marginellt.

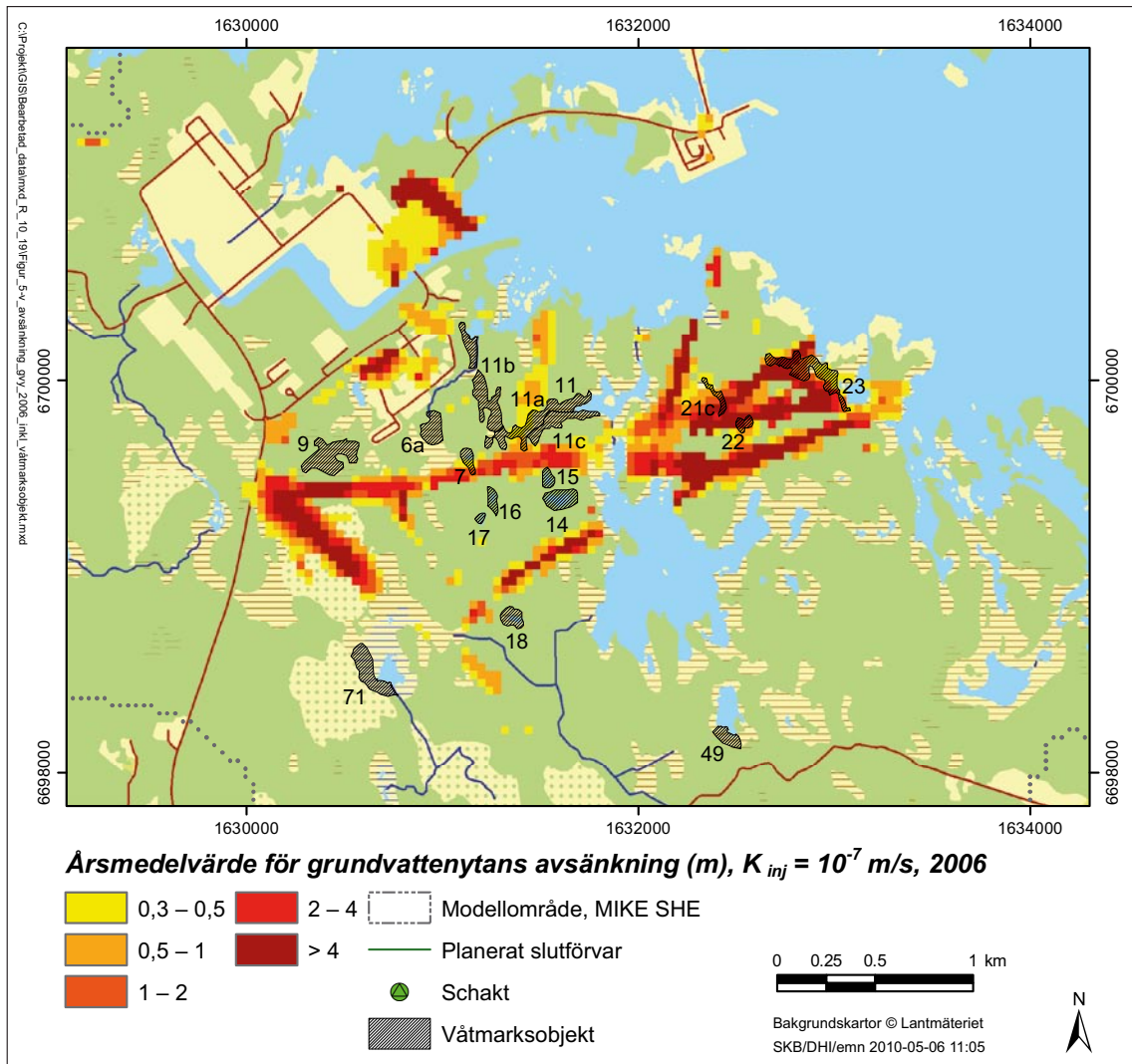
Minskningen är som störst (>10 mm/år) i objekten 7, 14 och 15. I objekt 23 ökar dock denna komponent med 10 mm/år, vilket är en följd av havets fluktuation.

I bilaga 1 redovisas vattenbalanser för samtliga studerade våtmarksobjekt, dels för opåverkade förhållanden (utan förvar), dels för påverkade förhållanden för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.



*) Nettonederbörd = nederbörd - (avdunstning ytvatten + avdunstning snö) - interception - snömagasinering

Figur 6-1. Översiktsbild som förklarar de olika vattenbalanskomponenter som anges i tabellerna 6-1 till 6-3. Delta-termerna (Δ) beskriver magasinförändringen för ytvattnet (OL) respektive grundvattnet (SZ).



Figur 6-2. Beräknat årsmedelvärde av grundvattenytans avsänkning (m) för typåret 2006, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. I bilden visas även våtmarksobjekten vars vattenbalanser finns redovisade i tabellerna 6-1 till 6-3.

Tabell 6-1. Modellberäknade vattenbalanser för typåret 2006 (mm/år) för våtmarksobjekten 6a, 7, 9, 11, 11a, 11b och 11c. Beräkningarna med förvar är gjorda för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. OF = opåverkade förhållanden, MF = med förvar.

Våtmarksobjekt	6a		7		9		11, 11a och 11b		11c	
	OF	MF	OF	MF	OF	MF	OF	MF	OF	MF
Nettonederbörd	448	448	461	461	423	423	451	452	437	438
Infiltration	279	278	323	510	146	153	389	442	483	442
Avdunstning markvatten	299	292	222	220	286	286	312	286	293	286
Magasinering ytvatten	3	3	1	-29	7	3	0	-6	11	3
Magasinering grundvatten	-12	-17	-2	-87	2	21	0	-7	2	1
Ytvatteninflöde	-2 340	-1 659	-1 030	-190	138	157	-864	-688	1 314	1 682
Grundvatteninflöde	2 202	1 573	718	235	-266	-269	725	595	-1 444	-1 805
Vertikalflöde, jord → ytvatten	2 176	1 493	892	209	-408	-425	801	594	-1 256	-1 676
Vertikalflöde, berg → jord	-2	-61	79	-395	0	-2	6	-57	-2	-22

Tabell 6-2. Modellberäknade vattenbalanser för typåret 2006 (mm/år) för våtmarksobjekten 14, 15, 16, 17 och 18. Beräkningarna med förvar är gjorda för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. OF = opåverkade förhållanden, MF = med förvar.

Våtmarksobjekt	14		15		16		17		18	
	OF	MF	OF	MF	OF	MF	OF	MF	OF	MF
Nettonederbörd	314	314	415	417	430	456	447	447	405	406
Infiltration	151	157	281	457	260	264	192	198	207	204
Avdunstning markvatten	137	137	263	220	164	168	288	288	217	215
Magasinering ytvatten	7	-11	7	-14	3	3	4	5	4	3
Magasinering grundvatten	3	0	0	0	1	0	0	0	1	-3
Ytvatteninflöde	-6 369	-5 975	1 751	2 007	4 344	4 379	-1 412	-1 013	-2 072	-1 827
Grundvatteninflöde	6 208	5 843	-1 881	-2 131	-4 579	-4 549	1 259	876	1 900	1 654
Vertikalflöde, jord → ytvatten	6 213	5 808	-1 877	-1 981	-4 511	-4 569	1 160	768	1 877	1 628
Vertikalflöde, berg → jord	-7	-54	-13	-88	-23	-113	-3	-19	-1	-5

Tabell 6-3. Modellberäknade vattenbalanser för typåret 2006 (mm/år) för våtmarksobjekten 21c, 22, 23, 49 och 71. Beräkningarna med förvar är gjorda för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. OF = opåverkade förhållanden, MF = med förvar.

Våtmarksobjekt	21c		22		23		49		71	
	OF	MF	OF	MF	OF	MF	OF	MF	OF	MF
Nettonederbörd	401	447	472	472	456	467	380	380	452	452
Infiltration	49	406	468	472	409	452	45	44	149	142
Avdunstning markvatten	275	271	342	343	269	260	248	248	281	268
Magasinerings ytvatten	8	1	0	0	12	22	7	6	-39	-41
Magasinerings grundvatten	0	-48	5	-25	0	-38	1	1	-1	-1
Ytvatteninflöde	-806	-208	-1	0	-111	112	1 942	1 942	-500	-507
Grundvatteninflöde	695	393	-80	120	-47	-4	-2 064	-2 065	271	272
Vertikalflöde, jord → ytvatten	462	167	-3	0	75	-106	-2 270	-2 271	158	155
Vertikalflöde, berg → jord	-7	-387	-45	-279	-15	-318	0	0	21	12

6.2 Partikelspårning

Två olika typer av partikelspårning har genomförts med MIKE SHE. Syftena med partikelspårningen är att kvantifiera grundvattenbortledningens effekter på utsträckningen för våtmarksobjektens avrinningsområden samt det vertikala grundvattenflödet i jord- och berglager. Partikelspårningen har således gjorts för både opåverkade förhållanden (utan förvar) och påverkade förhållanden med förvar. I det senare fallet är beräkningarna gjorda för ett helt öppet förvar och tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.

I det första fallet (avsnitt 6.2.1) har imaginära ”partiklar” kontinuerligt introducerats i det översta beräkningslagret i takt med infiltrationen under en period på tio år. Detta innebär att det skapas och släpps fler partiklar under perioder med mycket infiltration än under perioder med liten infiltration. Antalet partiklar som når ett objekt kan därför användas som ett mått på grundvattenflödets storlek. Indata för den tioåriga simuleringsperioden har tagits fram genom att det enskilda typåret 2006 har cyklats tio gånger, det vill säga indata (meteorologiska data och havsnivåer) är desamma tio år i följd. Resultaten visar den geografiska utsträckningen på respektive våtmarksobjekts avrinningsområde samt ger ett mått på markavrinningens storlek till respektive våtmarksobjekt.

I det andra fallet (avsnitt 6.2.2) har en partikel introducerats i varje beräkningscell i den mättade zonen. Dessa partiklar följer därefter grundvattenflödet under en period på 100 år, där typåret 2006 cyklats hundra gånger på samma sätt som ovan. Partiklarna har sedan successivt registrerats när de når botten på det översta beräkningslagret vid något av de specificerade våtmarksobjekten. För en detaljerad beskrivning av metodiken för partikelspårning i MIKE SHE, se /Gustafsson et al. 2008/.

6.2.1 Våtmarksobjektens avrinningsområden

I tabell 6-4 redovisas antalet partiklar som under en tioårsperiod registrerats i respektive våtmarksobjekt under opåverkade förhållanden respektive med förvar, då partiklar under perioden kontinuerligt introduceras i det översta beräkningslagret i takt med infiltrationen. Tabellen redovisar även den relativa skillnaden (%) mellan opåverkade och påverkade förhållanden. Liksom i fallet med vattenbalanserna (avsnitt 6.1) är några närliggande våtmarksobjekt hopslagna och utgör därför tillsammans en så kallad registreringszon.

I objekt 2, 7, 21+21c och 22 minskar avrinningen till objekten med mer än 50 % (rödmarkerade i tabell 6-4). I fyra objekt är motsvarande minskning 25–50 % (gulmarkerade) och i ytterligare 14 objekt är minskningen 10–25 % (grönmarkerade). I resterande objekt (39 av totalt 61, förvaret inte inräknat) är antingen minskningen mindre än 10 %, eller så ökar avrinningen.

Antalet partiklar som registreras ger som nämnts ovan ett mått på avrinningens storlek till respektive objekt. Oftast hänger antalet registrerade partiklar ihop med avrinningsområdets storlek för markavrinningen som i sin tur hänger ihop med objektets storlek. Så är dock inte alltid fallet. Detta beror på att våtmarksobjektens geografiska utsträckning inte definierats baserat på deras hydrologi utan på deras naturvärden. I figur 6-3 visas avrinningsområdena för fem objekt för opåverkade och påverkade förhållanden. Man kan notera att det lilla objektet 6a har ett stort avrinningsområde. Detta avrinningsområde är ungefär lika stort som avrinningsområdet för objekt 46a+46b, vilket i sig är dubbelt så stort som objekt 6a. Avrinningen till 6a är dock enbart cirka en tredjedel av avrinningen till objekt 46a+46b (tabell 6-4).

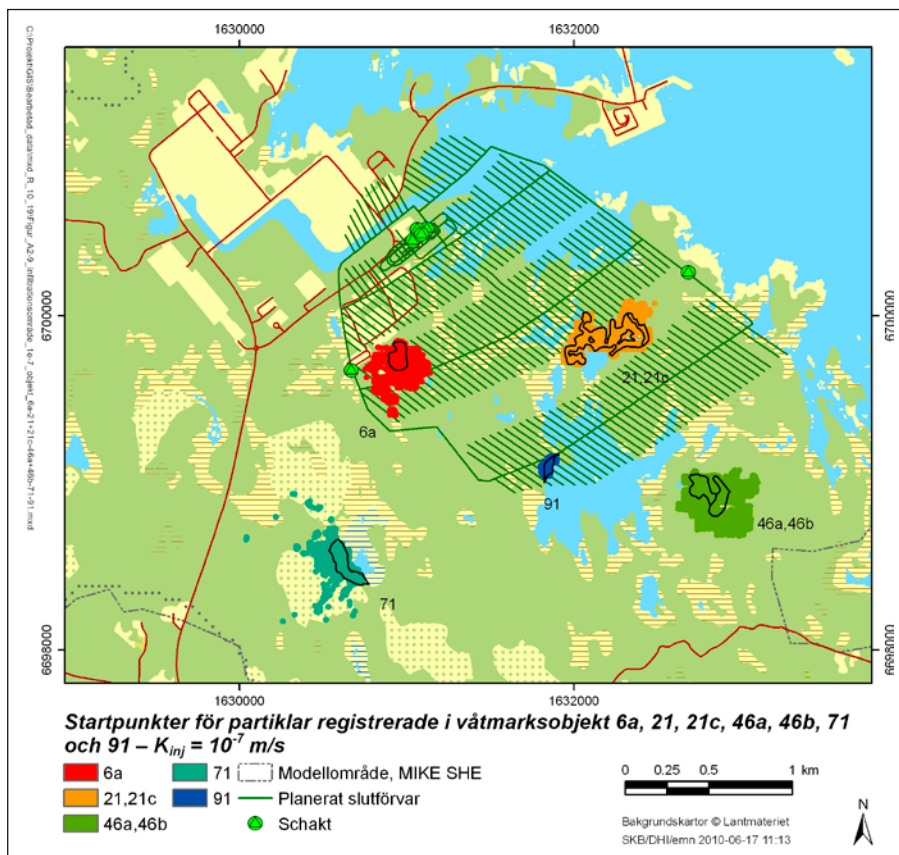
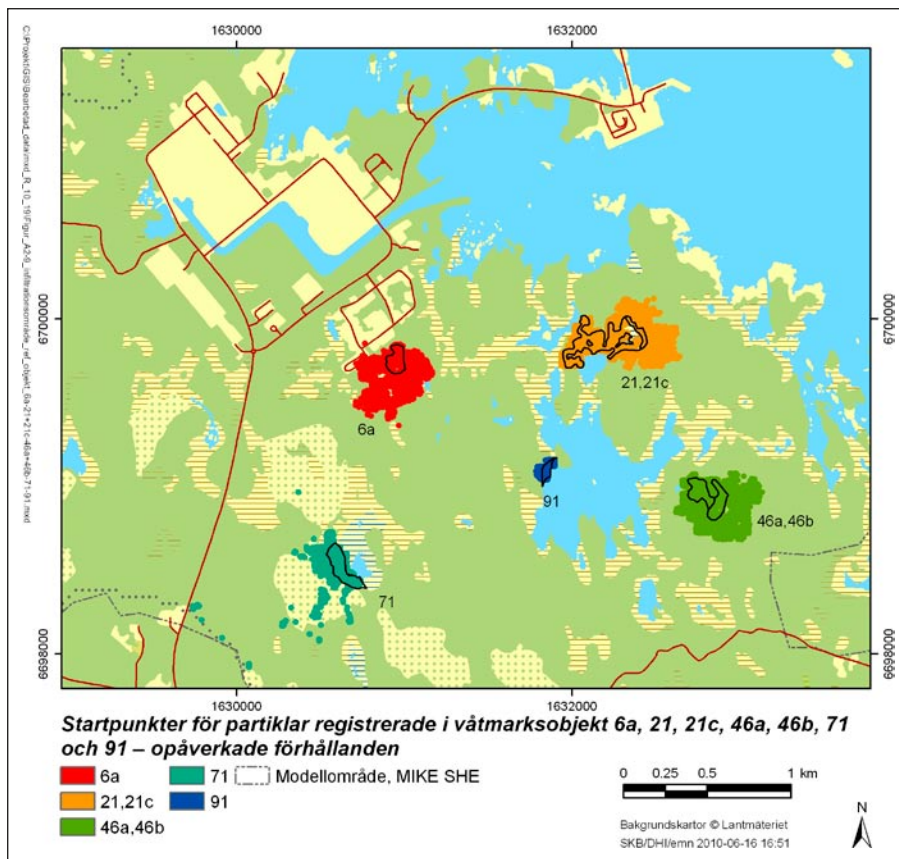
Motsvarande bilder som figur 6-3 finns redovisade i bilaga 2 för samtliga studerade objekt.

6.2.2 Flöden från jord- och berglager

Tabell 6-5 presenterar resultat av partikelspårningen där en partikel släppts i varje beräkningscell i modellen i början av simuleringsperioden och sedan följer grundvattenflödet under en period på 100 år. För varje våtmarksobjekt anger tabellen antalet partiklar som någon gång under simuleringsperioden når fram till våtmarksobjektet, särredovisade för partiklar med startpunkter i något av modellens jord- respektive berglager. Dessa resultat redovisas dels för opåverkade förhållanden, dels för ett helt öppet förvar för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. Notera att jordlagren i modellen är belägna i de två översta beräkningslagren (lager 1 och 2) och att berglagren är belägna i de underliggande beräkningslagren 3–20. Den sista raden i tabell 6-5 redovisar partikelspårningsresultaten för själva slutförvarsanläggningen, det vill säga antalet partiklar som under simuleringsperioden når fram till förvaret och som har sina startpunkter i modellens jord- respektive berglager.

Tabell 6-4. Sammanställning av antalet registrerade partiklar som släpps från en kontinuerlig infiltrationskälla i det översta jordlagret. Resultat anges för utvalda våtmarksobjekt för opåverkade förhållanden och för påverkade förhållanden med ett förvar. Beräkningarna med ett förvar avser ett helt öppet förvar och tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. OF = opåverkade förhållanden, MF = med förvar.

Objekt	OF	MF	Relativ förändring (%)	Objekt	OF	MF	Relativ förändring (%)
1	936	861	-8	46a+46b	48 297	46 507	-4
2	3 377	890	-74	47	597	537	-10
3	17 632	16 301	-8	45+69+69a	9 417	8 826	-6
4	3 731	3 233	-13	48+67+68+80ö	63 576	62 669	-1
6a	17 211	12 740	-26	49+84+85	22 894	22 878	0
6b	7 944	6 807	-14	65	6 335	4 802	-24
6c	4 545	4 807	6	66+92	10 359	9 965	-4
7	3 691	1 587	-57	70	32 568	29 716	-9
8a+8b	29 405	23 994	-18	71	4 021	3 989	-1
9	10 718	10 438	-3	72	12 594	10 092	-20
10+10a	5 732	5 488	-4	73	3 586	2 958	-18
11+11a	26 791	23 738	-11	74+75	30 659	28 573	-7
11b	53 375	46 288	-13	76	34 703	33 883	-2
11c	33 498	27 640	-17	77	15 604	15 729	1
12	3 416	1 934	-43	80V	31 763	31 640	0
13	11 005	9 068	-18	81Ö	2 855	2 771	-3
14	76 883	72 910	-5	81V+103	28 255	26 977	-5
15	7 420	7 631	3	82	10 212	9 968	-2
16	9 936	10 266	3	83+83a	35 629	34 597	-3
17	1 308	898	-31	86	66 620	62 266	-7
18	19 915	18 698	-6	87	22 102	20 908	-5
19	16 749	16 432	-2	88	561	595	6
21+21c	45 098	18 501	-59	89	13 879	14 771	6
22	1 743	851	-51	90	10 995	11 175	2
23	9 518	6 752	-29	91	1 398	1 549	11
33	40 636	39 527	-3	93	18 687	16 783	-10
34	2 290	2 102	-8	94	27 944	27 302	-2
36	932	978	5	95	39 492	36 372	-8
37	5 744	4 937	-14	100	6 624	6 921	4
38	66 394	57 152	-14	102	10 456	10 015	-4
39	92 713	90 714	-2				



Figur 6-3. Modellberäknade avrinningsområden (typåret 2006) för våtmarksobjekten 6a, 21 och 21c, 46a, 46b, 71 och 91. Den övre bilden visar resultat för opåverkade förhållanden utan förvar. Den nedre bilden visar motsvarande resultat för påverkade förhållanden med ett förvar (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s).

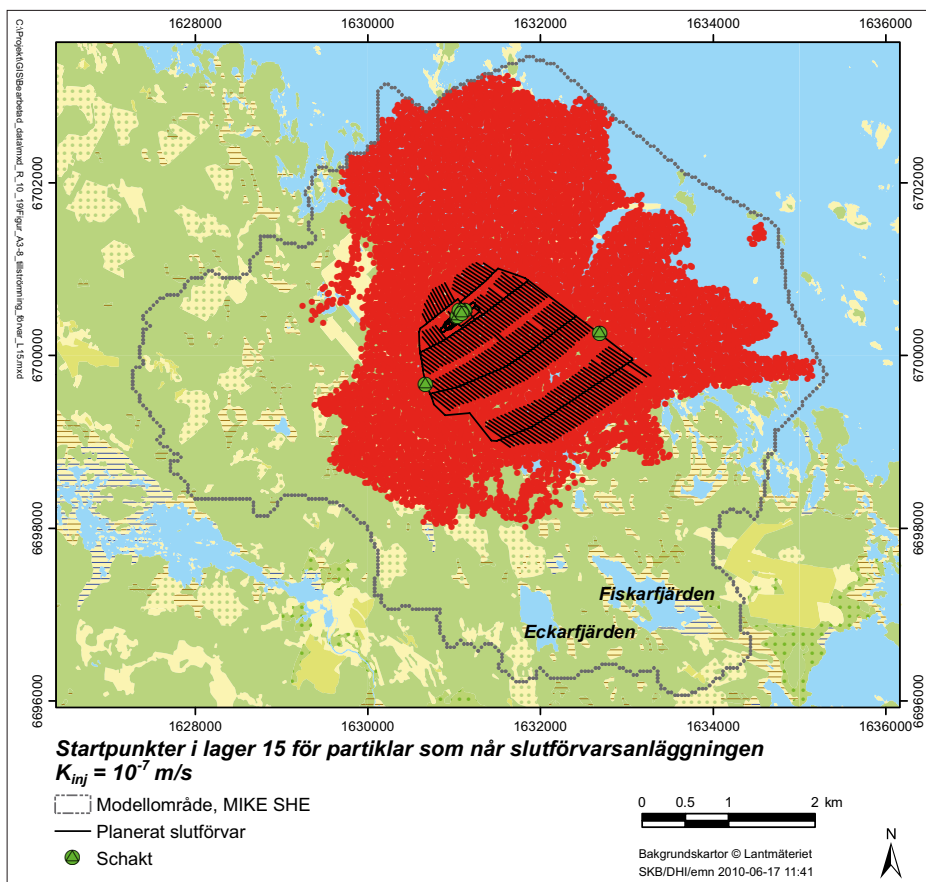
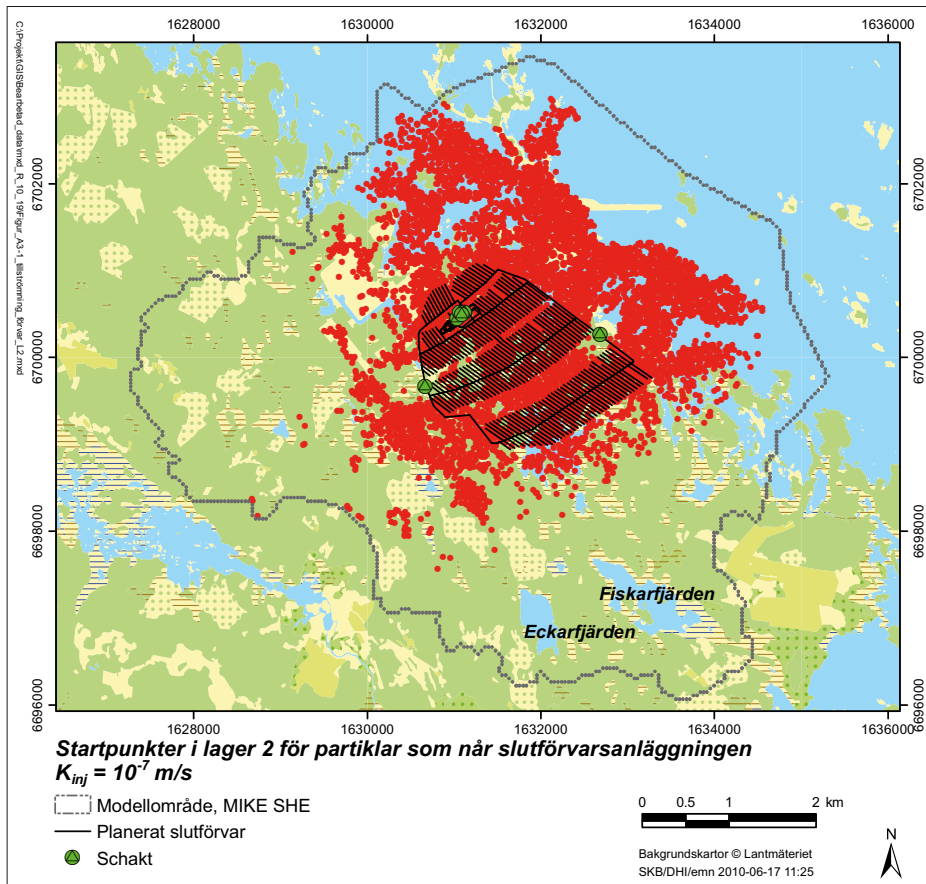
För samtliga våtmarksobjekt har partiklar registrerats som har sina startpunkter i något av modellens jordlager, både för opåverkade och påverkade förhållanden. Vidare är för samtliga våtmarksobjekt antalet registrerade partiklar mindre för påverkade förhållanden jämfört med opåverkade förhållanden, med undantag för våtmarksobjekten 6a, 16, 17, 71, 80V, 94 och 100, för vilka antalet registrerade partiklar är oförändrat eller ökar något.

För opåverkade förhållanden registreras partiklar med sina startpunkter i något av modellens berglager i två tredjedelar av våtmarksobjekten. För påverkade förhållanden är motsvarande andel endast 15 %. Våtmarksobjekt 38 (det största av våtmarksobjekten) är det objekt där flest partiklar med startpunkt i berget registrerats för opåverkade förhållanden. I våtmarksobjekt 39 registrerats flest partiklar för påverkade förhållanden. För både opåverkade och påverkade förhållanden är våtmarksobjekt 93 det objekt där partiklar registrerats som har djupast belägna startpunkter, på nivån 360 m u h för opåverkade förhållanden respektive nivån 110 m u h för påverkade förhållanden.

Totalt har drygt 462 000 partiklar initieellt introducerats (en i varje beräkningscell). Av dessa har efter 100 år 40 % (186 000) registrerats i förvaret. Förvaret nås av partiklar med startpunkter i alla 20 beräkningslager. I figur 6-4 visas startpunkterna i lager 2 och lager 15 (480 m u h) för de partiklar som registrerats i förvaret. Motsvarande kartor för samtliga lager finns redovisade i bilaga 3. I bilaga 3 ges en sammanställning av den procentuella fördelningen av partiklar från respektive beräkningslager redovisade för alla studerade objekt, inklusive förvaret.

Tabell 6-5. Sammanställning av antalet partiklar med startpunkter i jord- respektive berglager som under en 100-årsperiod registrerats vid olika våtmarksobjekt för opåverkade förhållanden (utan förvar) och med förvar. Beräkningarna med förvar avser ett helt öppet förvar och tätningss-fallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. OF = opåverkade förhållanden, MF = med förvar.

Objekt	Antal partiklar med startpunkter i jordlager		Antal partiklar med startpunkter i berglager		Djupaste beräkningslager med startpunkter för partiklar	
	OF	MF	OF	MF	OF	MF
1	10	2	0	0	2	1
2	10	3	0	0	2	1
3	43	31	8	0	3	2
4	29	8	0	0	2	1
6a	78	78	0	0	2	2
6b	91	60	13	0	3	2
6c	5	3	0	0	2	2
7	21	5	11	0	3	2
8a och 8b	115	62	47	0	4	2
9	55	43	9	0	4	2
10 och 10a	65	33	8	0	3	2
11 och 11a	101	47	36	0	3	2
11b	122	62	24	0	3	2
11c	141	59	106	0	4	2
12	23	3	0	0	2	1
13	47	27	16	0	4	2
14	72	44	0	0	2	2
15	9	4	0	0	2	1
16	22	29	0	0	2	2
17	9	10	0	0	2	1
18	78	53	34	0	5	2
19	20	9	0	0	2	2
21+21c	188	93	9	0	3	2
22	8	7	0	0	2	1
23	100	54	33	0	4	1
33	147	120	892	100	11	8
34	15	12	0	0	2	2
36	18	12	0	0	2	2
37	14	10	2	0	3	1
38	784	435	6 998	176	12	4
39	301	288	1 739	431	8	5
46a+46b	115	85	19	4	4	3
47	4	1	2	0	3	1
45+69+69a	83	60	5	0	3	2
48+67+68+80ö	187	177	24	0	4	2
49+84+85	48	46	6	0	3	2
65	43	27	0	0	3	2
66+92	90	63	51	0	8	2
70	92	45	12	0	3	2
71	193	196	2 151	193	11	4
72	57	28	9	0	3	2
73	31	18	13	0	3	2
74+75	110	39	93	0	4	2
76	65	20	74	0	4	2
77	146	95	104	0	4	2
80V	20	25	29	0	4	2
81Ö	14	8	0	0	2	1
81V+103	58	49	91	4	5	3
82	30	25	119	0	11	2
83+83a	15	12	0	0	2	2
86	252	222	195	0	6	2
87	117	57	43	0	4	2
88	5	4	9	0	1	1
89	68	21	64	0	4	2
90	6	3	2	0	3	1
91	7	5	0	0	1	1
93	133	121	1 698	339	13	8
94	67	72	4	0	3	2
95	322	241	613	50	8	4
100	33	34	8	3	4	3
102	67	41	27	0	4	2
Slutförvars-anläggningen	–	7 384	–	179 219	–	20



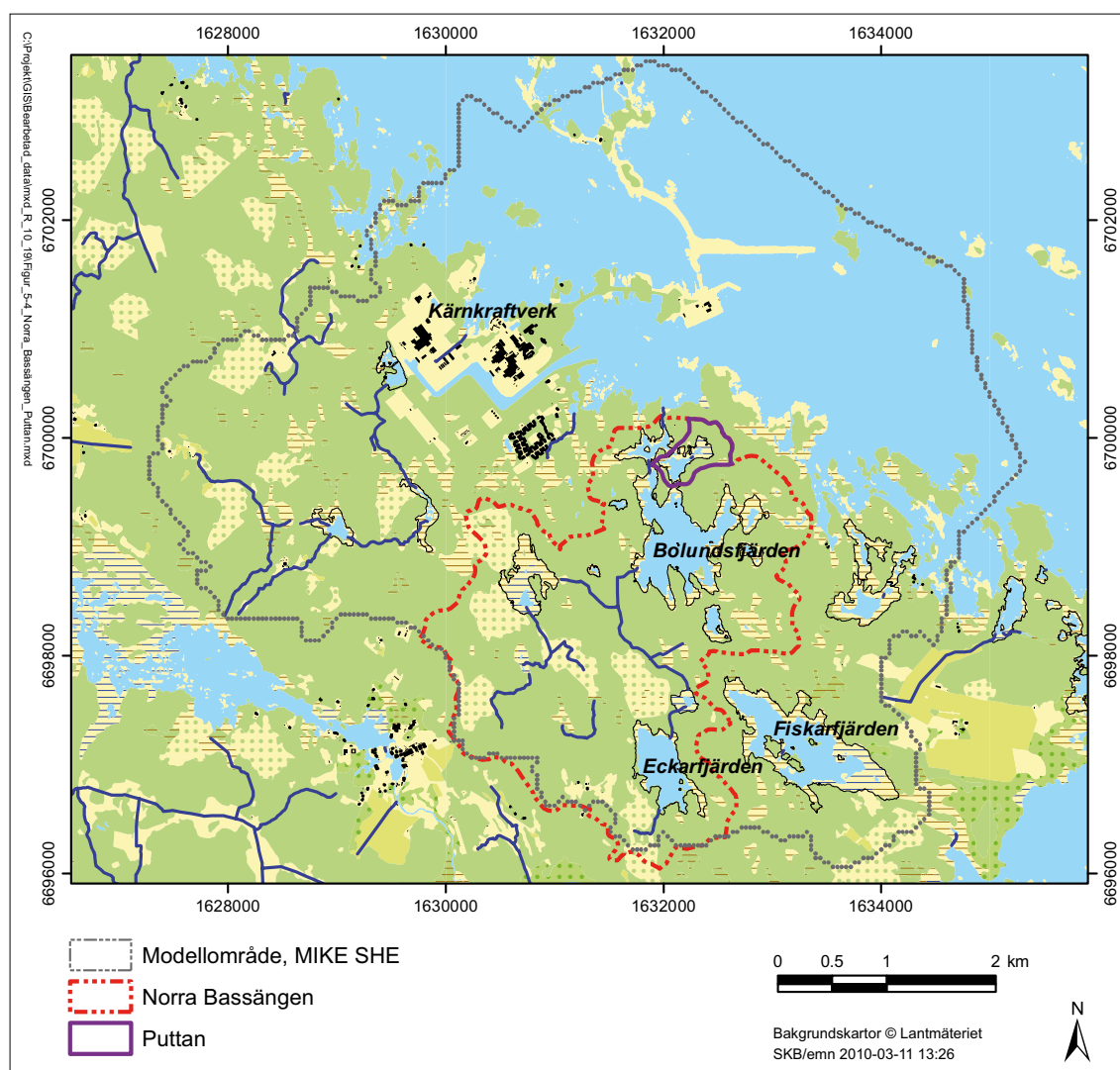
Figur 6-4. Startpunkter för partiklar som släpps i lager 2 (övre bilden) och lager 15 (undre bilden) och som har sina slutpunkter i slutförvarsanläggningen.

6.3 Grundvattennivåer för olika meteorologiska förhållanden

I detta avsnitt presenteras årsmedelvärden av djupet till grundvattenytan för olika meteorologiska förhållanden för samtliga våtmarks- och skogsobjekt som definierats i avsnitten 5-1 och 5-2 samt för två utvalda avrinningsområden. Vidare redovisas även avsänkning till följd av vattenbortledningen från slutförvarsanläggningen (tätningsfall $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s).

6.3.1 Avrinningsområdena för sjöarna Norra Bassängen och Puttan

Medelgrundvattendjupet inom avrinningsområdena för sjöarna Norra Bassängen och Puttan (se figur 6-5), där den senare är ett delavrinningsområde till Norra Bassängens avrinningsområde, har beräknats för typåret 2006, normalåret, första och andra torråret samt första och andra vååret. Nederbördsförhållandena för dessa olika år redovisas i avsnitt 3.1. Resultaten sammanfattas i tabell 6-6 där även avsänkning till följd av grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen redovisas, för ett helt öppet förvar och tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.



Figur 6-5. Översiktsskarta över avrinningsområdena för sjöarna Norra Bassängen och Puttan.

Tabell 6-6. Medelgrundvattendjup (m u my) för avrinningsområdena Norra Bassängen och Puttan under opåverkade förhållanden och avsänkning (m) till följd av grundvattenbortledningen från förvaret för sjöarna, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s, för olika meteorologiska förhållanden.

År Period	2006 jan–dec		Normalår sep–aug		Torrår 1 sep–aug		Torrår 2 sep–aug		Vårår 1 sep–aug		Vårår 2 sep–aug	
Avrinningsområde	Grundvattendjup	Avsänkning	Grundvattendjup	Avsänkning	Grundvattendjup	Avsänkning	Grundvattendjup	Avsänkning	Grundvattendjup	Avsänkning	Grundvattendjup	Avsänkning
Norra Bassängen	0,93	0,29	0,72	0,20	1,05	0,16	1,41	0,70	0,57	0,06	0,45	0,08
Puttan	0,81	3,18	0,62	2,28	0,93	1,64	1,30	6,79	0,46	0,59	0,35	0,93

För opåverkade förhållanden är det stora skillnader mellan de olika meteorologiska åren vad gäller medeldjupet till grundvattenytan. Som väntat är det modellberäknade medeldjupet till grundvattenytan störst under torråren och minst under våtåren. För både Norra Bassängens och Puttans avrinningsområden är det cirka 0,5 m skillnad i medeldjupet till grundvattenytan om man jämför det första våt- respektive torråret. Enligt modellberäkningarna ger grundvattenbortledningen upphov till en avsänkning av grundvattenytan inom Puttans avrinningsområde som i medel är större än 2 m både för typåret 2006, normalåret och det andra torråret. Figur 4-6 illustrerar grundvattenbortledningens effekter på grundvattenytans läge inom avrinningsområdet för normalåret.

Inom Puttans avrinningsområde har flera vertikala deformationszoner identifierats i berget (se /Mårtensson och Gustafsson 2010/), ovan vilka grundvattenytan sänks av till följd av grundvattenbortledningen. Inom Norra Bassängens avrinningsområde (med en storlek på cirka 8,5 km²), är avsänkningen av grundvattenytan mindre. Grundvattenbortledningen ger här upphov till en avsänkning med ett årsmedelvärde större än 0,3 m endast under det andra torråret.

6.3.2 Våtmarksobjekt

Medelgrundvattendjupet under opåverkade förhållanden varierar kraftigt mellan de utvalda våtmarksobjekten och även inom samma objekt för olika meteorologiska förhållanden. För våtmarksobjekt 22 skiljer det exempelvis över en halvmeter i opåverkat grundvattendjup mellan det första torr- respektive våtåret. Även avsänkningen till följd av grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen varierar mycket mellan olika objekt och år.

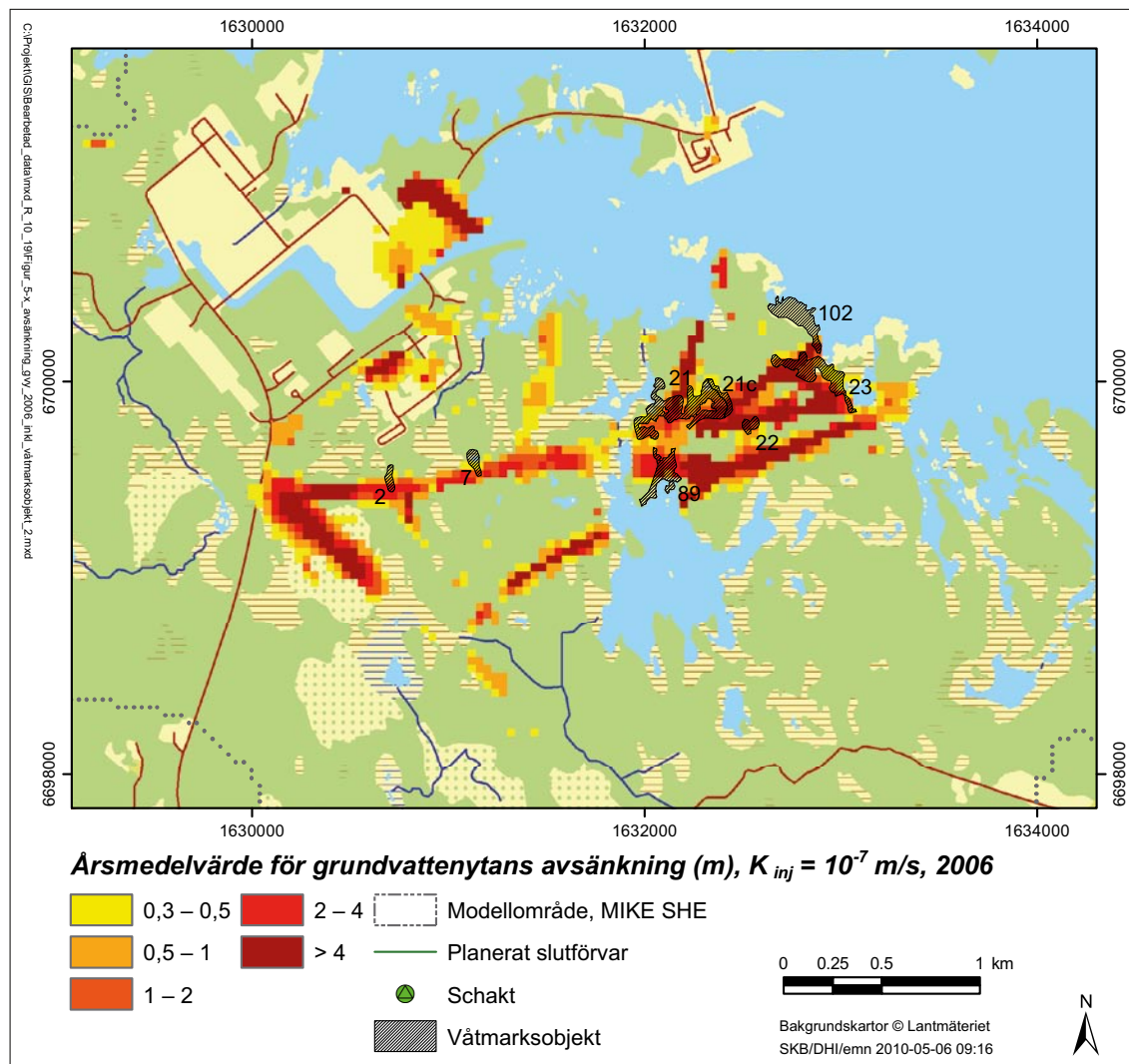
I tabell 6-7 sammanfattas antalet våtmarksobjekt med olika intervall för avsänkningen av grundvattenytan. I tabell 6-8 redovisas medelgrundvattendjupet under opåverkade förhållanden och avsänkningen till följd av ett öppet förvar för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. Resultaten i båda tabellerna avser typåret 2006, normalåret, första och andra torråret samt första och andra våtåret. Alla år är utvärderade för perioden september–augusti förutom kalenderåret 2006. Observera att redovisade grundvattendjup och avsänkningar i tabell 6-8 är medelvärden för hela våtmarksobjekt och kan variera inom enskilda objekt.

Enligt tabell 6-7 är avsänkningen störst under det andra torråret då mer än en tredjedel av alla objekt sänks av mer än 0,3 m. I totalt 13 objekt (21 %) överstiger avsänkningen 0,1 m under normalåret. Motsvarande siffra för typåret 2006 är 17 objekt (28 %), för det andra torråret 38 objekt (62 %) och för det andra våtåret 8 objekt (13 %).

I tabell 6-8 är alla värden där avsänkningen överstiger 0,3 m gulmarkerade. I våtmarksobjekten 22, 23 och 102 överstiger avsänkningen 0,3 m för samtliga utvärderade år. Med båda våtåren borträknade gäller detta för ytterligare fyra objekt, nummer 2, 7, 21+21c och 89. I figur 6-6 visas lägena för dessa våtmarksobjekt, det vill säga de objekt där avsänkningen överstiger 0,3 m förutom under de båda våtåren, tillsammans med grundvattenytans medelavsänkning för typåret 2006 (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s). Våtmarksobjekten är belägna inom påverkansområdet, förutom objekt 102 som till största delen befinner sig utanför påverkansområdet. En stor avsänkning (> 10 m) i objektets södra del innebär dock att medelavsänkningen för hela objektet är större än 0,3 m.

Tabell 6-7. Sammanställning av antalet våtmarksobjekt inom olika intervall för avsänkning av grundvattenytan, där avsänkning är beräknad för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. Sammanställningen är uppdelad på olika meteorologiska år (typåret 2006, ett normalår samt ett första och andra torr- respektive våtår).

År Period	2006 jan–dec	Normalår sep–aug	Torrår 1 sep–aug	Torrår 2 sep–aug	Våtår 1 sep–aug	Våtår 2 sep–aug
Avsänkning (m)						
< 0,1	44	48	44	23	55	53
0,1–0,3	10	6	10	15	3	5
> 0,3	7	7	7	23	3	3



Figur 6-6. Beräknat årsmedelvärde av grundvattenytans avsänkning (m) för typåret 2006, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. I bilden visas även våtmarksobjekten med avsänkning som överstiger 0,3 m för samtliga meteorologiska förhållanden förutom de båda våtåren.

Tabell 6-8. Medelgrundvattendjup (m u my) för utvalda våtmarksobjekt under opåverkade förhållanden och avsänkning (m) till följd av ett öppet förvar, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s, för olika meteorologiska förhållanden. Gulmarkerade avsänkingsvärden överstiger 0,3 m.

År	2006		Normalår		Torrår 1		Torrår 2		Vårår 1		Vårår 2	
Period	jan–dec		sep–aug		sep–aug		sep–aug		sep–aug		sep–aug	
Objekt	Grundvattendjup	Avsänkning	Grundvattendjup	Avsänkning	Grundvattendjup	Avsänkning	Grundvattendjup	Avsänkning	Grundvattendjup	Avsänkning	Grundvattendjup	Avsänkning
1	0,60	0,05	0,40	0,02	0,60	0,08	0,80	0,34	0,29	0,02	0,20	0,03
2	0,56	1,65	0,33	0,62	0,63	0,96	1,14	4,41	0,21	0,11	0,11	0,16
3	0,34	0,01	0,21	0,02	0,32	0,02	0,46	0,10	0,16	0,01	0,10	0,01
4	0,53	0,29	0,29	0,17	0,43	0,27	0,63	2,25	0,20	0,03	0,13	0,04
6a	0,51	0,08	0,32	0,09	0,46	0,08	0,58	0,26	0,26	0,03	0,14	0,07
6b	0,74	0,05	0,52	0,05	0,67	0,07	0,83	0,35	0,43	0,02	0,34	0,02
6c	0,53	-0,05	0,32	-0,12	0,57	0,01	0,67	0,03	0,18	0,00	0,09	0,00
7	0,68	0,67	0,48	0,31	0,61	0,54	0,82	2,75	0,39	0,08	0,32	0,10
8a, 8b	0,22	0,05	0,06	0,03	0,14	0,05	0,28	0,39	0,01	0,01	-0,03	0,01
9	0,07	0,02	-0,07	0,03	0,02	0,03	0,14	0,12	-0,12	0,01	-0,16	0,01
10, 10a	1,13	0,04	0,97	0,04	1,19	0,05	1,37	0,17	0,85	0,02	0,75	0,03
11, 11a	0,74	0,18	0,69	0,08	0,83	0,12	0,98	0,74	0,62	0,03	0,54	0,03
11b	0,43	0,06	0,30	0,04	0,46	0,09	0,65	0,38	0,23	0,03	0,17	0,03
11c	0,38	0,04	0,27	0,03	0,39	0,06	0,52	0,33	0,19	0,02	0,14	0,02
12	0,34	0,07	0,21	0,10	0,47	0,15	0,54	0,25	0,08	0,05	-0,05	0,06
13	0,46	0,09	0,26	0,04	0,56	0,08	0,68	0,24	0,15	0,05	0,08	0,06
14	-0,20	0,01	-0,30	0,02	-0,22	0,06	-0,09	0,19	-0,37	0,01	-0,41	0,01
15	0,25	0,06	0,03	0,06	0,24	0,24	0,68	0,63	-0,03	0,01	-0,12	0,00
16	0,06	0,02	-0,05	0,03	0,02	0,05	0,11	0,20	-0,08	0,02	-0,10	0,02
17	0,54	0,02	0,13	0,03	0,24	0,01	0,33	0,15	0,05	0,03	-0,02	0,02
18	-0,02	0,02	-0,08	0,01	-0,03	0,02	0,00	0,04	-0,11	0,01	-0,13	0,01
19	0,18	0,16	0,25	0,09	0,29	0,04	0,32	0,24	0,24	0,01	0,21	0,02
21, 21c	-0,03	2,71	-0,08	1,84	-0,01	0,99	0,08	5,56	-0,12	0,10	-0,15	0,19
22	1,21	4,90	0,93	3,41	1,34	2,86	1,73	10,46	0,77	1,01	0,65	1,66
23	0,62	3,59	0,60	2,79	0,81	2,61	0,97	6,80	0,54	0,89	0,44	1,16
33	-0,17	-0,01	-0,27	-0,01	-0,15	0,00	-0,09	0,00	-0,33	0,00	-0,37	0,00
34	1,16	0,09	0,94	0,09	1,25	0,08	1,44	0,14	0,82	0,04	0,73	0,05
36	0,82	0,09	0,59	-0,02	0,85	0,18	1,07	0,44	0,51	0,03	0,41	0,03
37	0,64	0,04	0,42	0,05	0,63	0,11	0,89	0,63	0,30	0,05	0,24	0,04
38	0,15	0,09	0,03	0,06	0,17	0,05	0,30	0,44	-0,05	0,02	-0,10	0,03
71	0,04	0,01	-0,06	0,01	0,07	0,01	0,14	-0,04	-0,13	0,01	-0,17	0,01
39	-0,08	0,00	-0,16	0,00	-0,01	0,01	0,13	-0,02	-0,25	0,00	-0,31	0,00
45, 69, 69a	0,55	0,00	0,42	0,01	0,54	0,00	0,69	0,00	0,37	0,00	0,31	0,00
65	0,47	0,00	0,31	0,02	0,43	0,01	0,74	0,04	0,24	0,00	0,18	0,01
46a, 46b	-0,04	0,00	-0,11	0,00	-0,03	0,01	0,03	0,01	-0,14	0,00	-0,18	0,00
47	1,21	0,01	0,90	0,07	1,18	0,02	1,71	0,17	0,66	0,02	0,50	0,03
48, 67, 68, 80Ö	0,43	-0,01	0,30	0,01	0,43	0,00	0,55	0,00	0,24	0,00	0,14	0,00
49, 84, 85	-0,47	0,00	-0,53	0,01	-0,49	0,00	-0,43	0,01	-0,56	0,00	-0,59	0,00
86	0,28	0,02	0,22	0,00	0,37	0,01	0,49	0,00	0,15	0,01	0,09	0,01
87	0,30	0,13	0,23	0,10	0,39	0,07	0,51	0,20	0,15	0,03	0,10	0,04
88	0,58	-0,05	0,49	-0,24	0,80	0,04	1,05	0,04	0,31	0,02	0,20	0,01
89	0,51	1,33	0,45	0,70	0,61	0,59	0,75	3,54	0,35	0,19	0,29	0,27
90	0,53	0,21	0,36	0,17	0,63	0,12	0,84	0,27	0,24	0,06	0,16	0,10
91	0,93	0,03	0,72	0,02	0,96	0,05	1,17	0,08	0,60	0,02	0,51	0,02

66, 92	0,56	0,01	0,51	0,00	0,71	0,01	0,78	0,01	0,41	0,01	0,34	0,01
93	0,88	-0,03	0,73	-0,03	0,96	0,01	1,14	-0,02	0,62	0,00	0,49	0,00
94	0,02	-0,02	-0,17	0,00	-0,08	0,00	-0,02	0,00	-0,20	0,00	-0,23	0,00
95	0,26	0,10	0,05	0,03	0,21	0,11	0,41	0,47	-0,01	0,01	-0,07	0,01
70	0,09	0,02	-0,02	0,02	0,03	0,01	0,10	0,06	-0,08	0,00	-0,11	0,00
72	0,61	0,10	0,33	0,13	0,48	0,16	0,73	1,11	0,26	0,02	0,21	0,01
73	0,44	0,12	0,40	0,08	0,45	0,06	0,48	0,25	0,37	0,03	0,33	0,03
74, 75	0,51	0,28	0,41	0,15	0,64	0,16	0,82	1,10	0,30	0,05	0,22	0,06
76	0,30	0,12	0,19	0,08	0,38	0,08	0,46	0,44	0,08	0,03	0,03	0,03
77	0,60	0,06	0,51	0,03	0,63	0,06	0,74	0,30	0,41	0,02	0,34	0,03
80v	0,18	0,00	0,10	0,01	0,17	0,00	0,23	0,00	0,04	0,01	0,01	0,01
81Ö	1,09	-0,01	0,80	0,04	1,06	0,01	1,66	0,08	0,61	0,01	0,47	0,02
81V, 103	0,54	0,01	0,38	0,00	0,59	0,00	0,65	0,01	0,27	0,01	0,18	0,01
82	0,28	0,01	0,18	0,02	0,39	0,01	0,57	-0,02	0,08	0,01	0,02	0,01
83, 83a	-0,16	0,02	-0,20	0,02	-0,05	0,01	0,03	0,04	-0,29	0,01	-0,33	0,01
100	0,13	-0,02	0,08	0,00	0,12	0,00	0,21	-0,07	0,05	0,00	0,03	0,00
102	0,68	0,65	0,55	0,54	0,74	0,52	0,95	1,01	0,44	0,30	0,36	0,39

6.3.3 Skogsobjekt

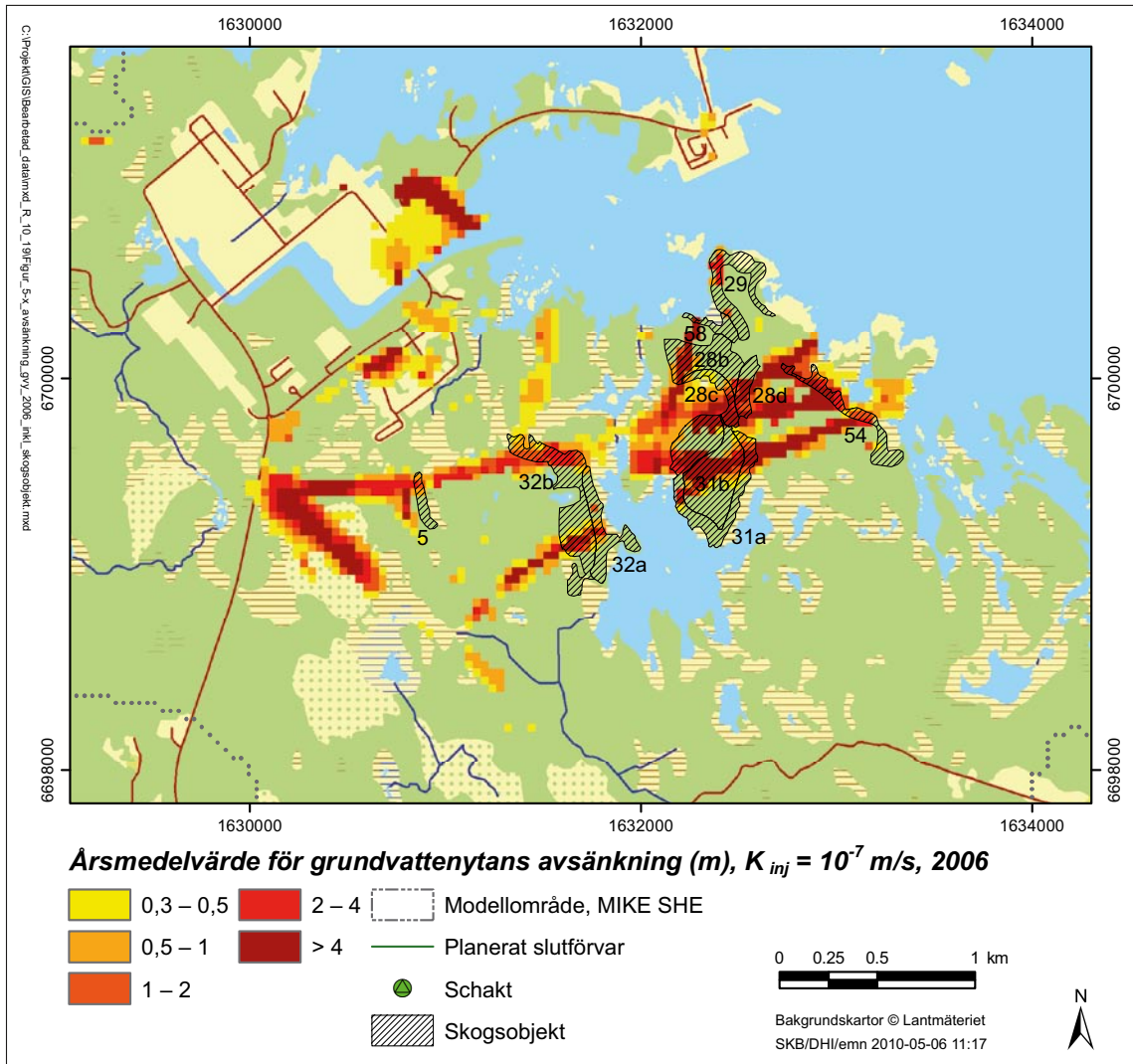
Precis som för våtmarksobjekten skiljer sig det opåverkade djupet till grundvattenytan och avsänkningen till följd av slutförvarsanläggningen mellan de utvalda skogsobjekten och inom samma objekt mellan olika meteorologiska förhållanden. I tabell 6-9 sammanfattas antalet skogsobjekt med olika intervall för avsänkningen av grundvattenytan. I tabell 6-10 visas medelgrundvattendjupet under opåverkade förhållanden och avsänkningen för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. Resultaten i båda tabellerna avser typåret 2006, normalåret, första och andra torråret samt första och andra våtåret för 37 utvalda skogsobjekt. Normalåret är utvärderat för växtperioden, som här definieras som perioden april-oktober. Övriga år är utvärderade för perioden september-augusti förutom kalenderåret 2006. Observera att redovisade grundvattendjup och avsänkningar är medelvärden för hela skogsobjekt och kan variera inom enskilda objekt.

Enligt tabell 6-9 är avsänkningen störst under det andra torråret då grundvattenytan i nästan två tredjedelar av alla objekt sänks av mer än 0,3 m. I totalt 20 objekt (54 %) överstiger avsänkningen 0,1 m under normalåret. Motsvarande siffra för år 2006 är 21 objekt (57 %), för det andra torråret 26 objekt (70 %) och för det andra våtåret 16 objekt (43 %).

I tabell 6-10 är alla värden där avsänkningen överstiger 0,3 m markerade med gult. I skogsobjekten 28b, 28c, 28d, 31a, 31b, 54 och 58 överstiger avsänkningen 0,3 m under samtliga utvärderade år. Med båda våtåren borträknade gäller detta för ytterligare fem objekt, med id-numren 5, 28a, 29, 32a och 32b. I figur 6-7 visas lägena för dessa skogsobjekt, det vill säga de objekt där avsänkningen överstiger 0,3 m förutom under de båda våtåren, tillsammans med grundvattenytans medelavsänkning för typåret 2006 (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s). Skogsobjekten är samtliga belägna inom påverkansområdet eller i dess direkta närhet.

Tabell 6-9. Sammanställning av antalet skogsobjekt inom olika avsänkingsintervall för olika meteorologiska förhållanden, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.

År Period	2006 jan–dec	Normalår apr–okt	Torrår 1 sep–aug	Torrår 2 sep–aug	Våtår 1 sep–aug	Våtår 2 sep–aug
Avsänkning (m)						
< 0,1	16	17	14	11	21	21
0,1–0,3	7	8	10	3	9	8
> 0,3	14	12	13	23	7	8



Figur 6-7. Beräknat årsmedelvärde av grundvattenytans avsänkning (m) för typåret 2006, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. I bilden visas även skogsobjekt med en avsänkning som överstiger 0,3 m för samtliga meteorologiska förhållanden förutom de båda våtåren.

Tabell 6-10. Medelgrundvattendjup (m u my) för utvalda skogsobjekt under opåverkade förhållanden och avsänkning (m) till följd av ett helt öppet förvar, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s, för olika meteorologiska förhållanden. Gulmarkerade avsänkingsvärden överstiger 0,3 m.

År Period	2006 jan–dec		Normalår apr–okt		Torrår 1 sep–aug		Torrår 2 sep–aug		Vårår 1 sep–aug		Vårår 2 sep–aug	
	Grundvattendjup	Avsänkning	Grundvattendjup	Avsänkning (m)	Grundvattendjup	Avsänkning	Grundvattendjup	Avsänkning	Grundvattendjup	Avsänkning	Grundvattendjup	Avsänkning
Objekt												
5	1,33	0,64	1,25	0,38	1,41	0,40	1,93	2,94	0,81	0,13	0,66	0,16
6e	-0,02	-0,02	-0,09	0,01	-0,08	0,00	0,04	0,00	-0,12	0,00	-0,12	0,00
9a	0,10	0,04	0,07	0,05	0,13	0,08	0,25	0,21	0,00	0,04	-0,04	0,04
24	1,14	0,39	1,12	0,15	1,27	0,19	1,75	1,27	0,72	0,07	0,58	0,09
25	1,25	0,08	1,17	0,08	1,30	0,14	1,67	0,41	0,77	0,07	0,64	0,06
26a	0,99	0,15	0,89	0,14	0,97	0,24	1,37	0,71	0,50	0,07	0,39	0,06
26b	1,12	0,22	1,09	0,15	1,14	0,20	1,41	0,79	0,71	0,08	0,60	0,07
26c	0,71	0,09	0,61	0,01	0,58	0,09	0,66	0,30	0,27	0,03	0,18	0,03
26d	1,59	0,24	1,52	0,13	1,74	0,17	2,25	0,77	1,01	0,12	0,84	0,11
27	1,38	0,06	1,34	0,09	1,45	0,07	1,80	0,19	0,90	0,03	0,77	0,04
28a	1,30	1,34	1,24	0,90	1,39	0,76	1,88	3,64	0,83	0,25	0,70	0,43
28b	1,74	3,06	1,57	2,23	1,89	2,10	2,71	6,59	1,05	1,08	0,84	1,49
28c	1,03	3,76	1,03	2,03	1,16	1,85	1,53	8,26	0,69	0,48	0,57	0,89
28d	1,69	6,04	1,66	4,46	1,90	3,74	2,44	10,21	1,14	1,76	0,97	2,69
29	1,23	0,48	1,18	0,31	1,31	0,34	1,83	1,56	0,72	0,13	0,58	0,17
29b	1,42	0,26	1,42	0,22	1,58	0,27	2,03	0,34	0,97	0,24	0,83	0,26
30	1,48	0,77	1,59	0,26	1,71	0,32	1,93	1,45	1,12	0,14	0,98	0,19
31a	1,66	2,12	1,59	1,11	1,83	1,09	2,41	4,86	1,09	0,40	0,92	0,60
31b	1,98	3,14	1,85	1,71	2,16	1,58	2,88	6,40	1,27	0,61	1,03	0,98
32a	1,66	0,57	1,58	0,32	1,74	0,36	2,14	1,77	1,07	0,16	0,94	0,22
32b	1,46	1,06	1,41	0,49	1,55	0,60	1,90	3,54	0,91	0,20	0,77	0,28
50	0,53	0,01	0,64	0,01	0,64	0,01	0,73	0,03	0,39	0,01	0,34	0,01
51	1,01	0,00	1,12	0,04	1,03	0,01	1,37	0,08	0,66	0,01	0,54	0,02
52	1,33	0,01	1,39	0,02	1,52	0,03	1,84	0,04	0,93	0,04	0,78	0,04
53	1,18	0,00	1,07	0,06	1,16	0,01	1,67	0,08	0,64	0,01	0,50	0,02
54	1,22	2,35	1,18	1,26	1,27	1,37	1,62	4,71	0,76	0,47	0,63	0,68
55	1,21	0,13	1,16	0,12	1,29	0,12	1,77	0,37	0,73	0,06	0,59	0,07
56	1,11	0,05	1,07	0,06	1,02	0,16	1,05	0,22	0,68	0,14	0,60	0,11
57	-0,39	0,00	-0,43	0,00	-0,43	0,00	-0,37	0,01	-0,48	0,00	-0,50	0,00
58	1,21	1,59	1,07	1,49	1,14	1,31	1,53	2,32	0,72	0,81	0,59	0,97
59	0,46	0,00	0,69	-0,02	0,56	-0,02	0,49	-0,01	0,61	-0,01	0,62	-0,01
60	1,04	0,00	0,97	0,03	1,04	0,01	1,30	0,00	0,58	0,01	0,46	0,01
61	-0,46	0,13	-0,43	0,06	-0,38	0,14	-0,26	0,68	-0,52	0,03	-0,55	0,04
62	1,62	0,12	1,59	0,14	1,77	0,13	2,10	0,38	1,18	0,05	1,07	0,06
63	0,71	0,01	0,60	0,05	0,60	0,01	0,65	-0,04	0,30	0,02	0,23	0,02
64	0,89	0,02	1,03	0,02	1,07	0,01	1,25	-0,02	0,75	0,01	0,65	0,02
101	1,52	0,01	1,34	0,09	1,69	0,09	2,65	0,08	0,84	0,05	0,66	0,04

6.4 Ytvattennivåer och behov av vattentillförsel

Detta avsnitt presenterar slutförvarsanläggningens effekter på ytvattendjupet i utvalda våtmarksobjekt. Vidare redovisas även det beräknade behovet av vattentillförsel till objekten för att bibehålla opåverkade ytvattendjup. Tabell 6-11 redovisar modellberäknade årsmedelvärden för ytvattendjupet (m) för typåret 2006 för opåverkade förhållanden i respektive våtmarksobjekt (notera att vissa objekt liksom tidigare slagits ihop). Utgående från samma typår redovisar tabellen vidare modellberäknad absolut och relativ sänkning av ytvattendjupets årsmedelvärde i våtmarksobjekten till följd av grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen, där beräkningarna avser ett helt öppet förvar och tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. De ytvattendjup som anges i tabell 6-11 avser medelvärden över hela objektytan för respektive objekt.

Tabell 6-11 anger även den modellberäknade tillförseln av vatten som krävs för att i fallet med ett helt öppet förvar upprätthålla den grundvattennivå som beräknats för opåverkade förhållanden. Vattenbehovet har beräknats genom att grundvattentrycket inom respektive våtmarksobjekt har låsts till de tidsvarierande tryck som räknats fram för opåverkade förhållanden. Utgående från den opåverkade tidsserien för varje våtmarksobjekt har därefter MIKE SHE räknat ut den vattentillförsel som krävs för att bibehålla en identiskt tidsserie i fallet med ett öppet förvar. Det bör observeras att vattentillförseln i modellen sker över hela objektytan, vilket inte är möjligt att genomföra i praktiken. I ett verkligt fall skulle vatten tillföras till en våtmark via till exempel ett perkolationsmagasin (ett dike fyllt med grovkornigt material) eller via en eller flera infiltrationsbrunnar i kanten på våtmarken.

Objekten i tabell 6-11 är indelade i intervall efter den relativa avsänkningen. För rödmarkerade våtmarksobjekt överstiger avsänkningen 50 %, för gulmarkerade våtmarksobjekt är avsänkningen 25–50 % och för grönmärade våtmarksobjekt är avsänkningen 10–25 %. Vattenbehovet för respektive våtmarksobjekt redovisas i form av medelvärden för typåret 2006. Enligt tabellen är det modellberäknade vattenbehovet störst (i medel över 1 l/s) för våtmarksobjekten 11c, 21c och 23. För några våtmarksobjekt (6a, 14, 16, 18 och 22) kan man notera ett visst vattenbehov, trots att grundvattenbortledningen endast ger upphov till en liten minskning av ytvattendjupet. För dessa våtmarksobjekt är vattenbehovet förknippat med en sänkning av grundvattentrycket i jordlagren under våtmarken.

I figurerna 6-8 till 6-11 redovisas medelvärden för det modellberäknade vattenbehovet per månad under typåret 2006 för ett urval våtmarksobjekt. Figurerna visar på ett negativt vattenbehov under vissa månader, vilket i praktiken skulle innebära att vatten skulle behöva pumpas bort från våtmarken. Orsaken till de negativa vattenbehoven är att modellen på konstgjord väg försöker återställa den naturliga fluktuationen i ett stort system. Tidsserierna i figurerna 6-8 till 6-11 skall därför användas med viss försiktighet och indikerar snarare det totala behovet under året och ungefär när på året behovet är som störst.

Medelflödena i tabell 6-11 kan användas för att bedöma det totala årliga vattenbehovet medan figurerna 6-8 till 6-11 visar när på året behoven uppstår. Behoven är som minst under sommarmånaderna och tidig höst (juni–september) och störst under vår- och höstmånaderna. Under våren och hösten då nederbörden är som högst är avsänkningen relativt opåverkade förhållanden som störst. Då är också behoven av vattentillförsel för att bibehålla de naturliga säsongsvariationerna som störst.

Tabell 6-12 redovisar årsmedelvärde för modellberäknat ytvattendjup (m) i respektive våtmarksobjekt för ett meteorologiskt normalår, samt för ett första och andra torr- respektive våtår. Tabellen redovisar även den absoluta (m) och relativa (%) minskningen av ytvattendjupet för påverkade förhållanden. Liksom tidigare avser det senare fallet med ett helt öppet förvar och tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.

Enligt tabellen är det stora skillnader på opåverkade ytvattendjup om man jämför de olika våtmarksobjekten, från någon enstaka centimeter för till exempel våtmarksobjekten 7, 17, 22 och 23 upp till över en halvmeter i våtmarksobjekt 49. Det är även skillnader mellan ytvattendjupen för olika meteorologiska förhållanden. Det skiljer exempelvis en faktor två mellan normalåret och det första torråret i våtmarksobjekten 11c, 38 och 71. Våtmarksobjekt 22, där ytvattendjupet är mindre än 0,01 m som ett medel över hela objektytan för de studerade meteorologiska åren, torrläggas i modellen helt under de båda torråren. Generellt ger grundvattenbortledningen en större effekt på ytvattendjupen under torråren än våtåren.

I tabell 6-12 är objekten indelade på samma sätt som i tabell 6-11, det vill säga enligt intervall för den relativa sänkningen. Den relativa sänkningen ökar mellan normalåret och torråren, med störst sänkning under det andra torråret. I 8 av 21 objekt överstiger den relativa avsänkningen 10 % under

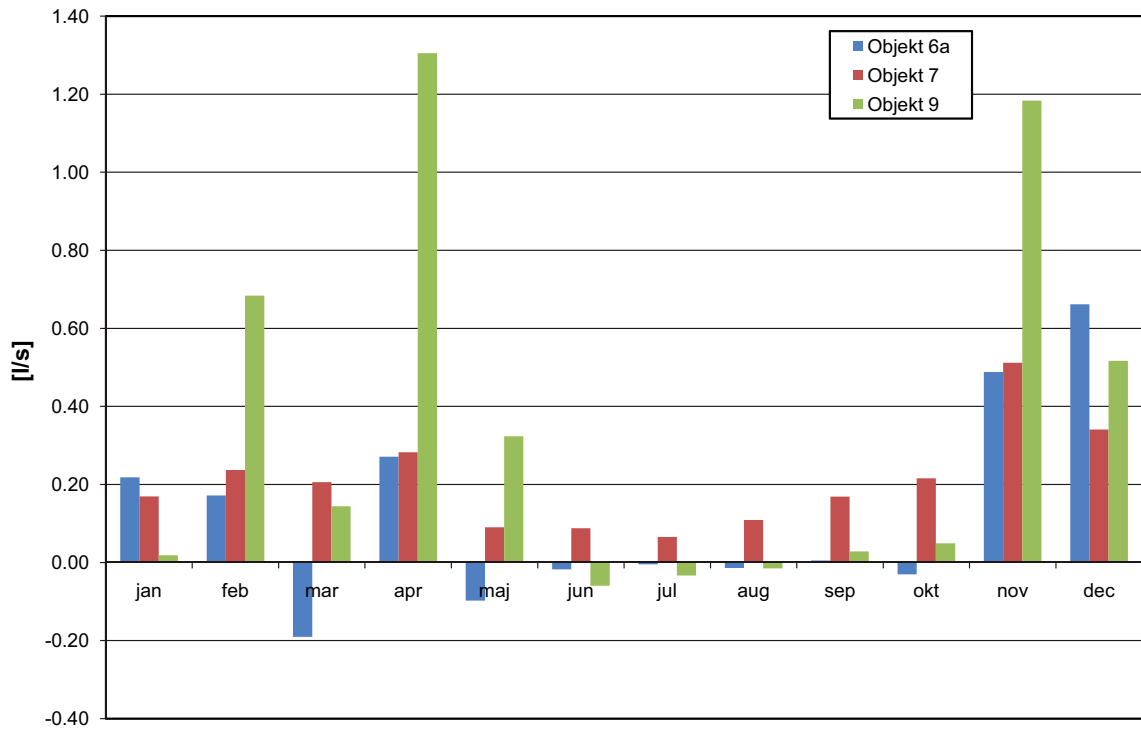
normalåret. Motsvarande siffra för första torråret är 12 av 21 (objekt 22 inräknat som är torr även för opåverkade förhållanden) och för första våtåret 3 av 21 objekt. Under andra torråret torrläggs i princip objekten 15, 21c och 23 helt. Man kan notera att den relativa sänkningen ökar mellan det första och andra våtåret för objekten 21c, 22 och 23. Detta beror på att det första våtåret inte föregås av ett initieringsår och således ökar sänkningen successivt under första året och är inte fullt utvecklad förrän under andra våtåret. Samma mönster syns i tabell 6-8 där djupet till grundvattenytan och dess avsänkning anges för hela objektsytan för respektive objekt.

I figurerna 6-12 till 6-15 redovisas modellberäknade tidsserier på ytvattendjup i våtmarksobjekt 8a (sjön Tjärnpussen) för opåverkade förhållanden respektive påverkade förhållanden (ett helt öppet förvar och tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s). Tidsserien är hämtad från den djupaste delen av objektet. Tidsserier redovisas för typåret 2006 (figur 6-12), normalåret (figur 6-13) samt för det första torr- respektive våtåret (figurerna 6-14 och 6-15). Observera att typåret 2006 avser kalenderåret och övriga år avser perioden september–augusti. I figurerna 6-13 till 6-15 kan man för opåverkade förhållanden tydligt se inverkan av de justerade månaderna (juli och oktober–december, se avsnitt 3.1). Under dessa månader är skillnaden i ytvattendjup som störst mellan normal-, torr- och våtåren. Som redan konstaterats är skillnaderna i ytvattendjup mellan opåverkade och påverkade förhållanden störst under torråret och minst under våtåret. I figur 6-12 syns inverkan av den extremt torra sommaren under 2006. Under denna period sjunker ytvattendjupet från 0,4 m till 0,1 m mellan juni och augusti.

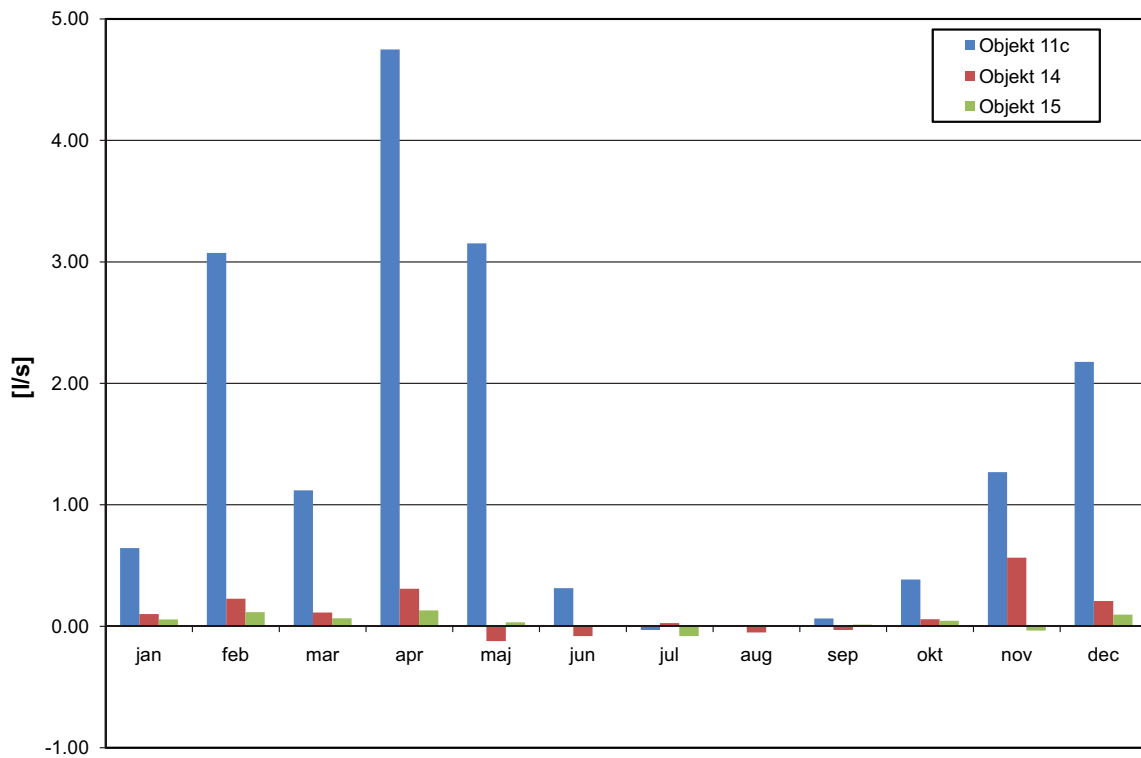
I bilaga 4 redovisas modellberäknade tidsserier för typåret 2006 för samtliga studerade objekt.

Tabell 6-11. Modellberäknade medelvärden på ytvattendjup (m) för utvalda våtmarksobjekt (typåret 2006) för opåverkade förhållanden, samt absolut (m) och relativ (%) sänkning av ytvattendjupet till följd av grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s). I tabellen anges även behov av vattentillförsel (i mm/år samt l/s) för att bibehålla opåverkade nivåer. Rödmarkeringar avser en relativ sänkning på över 50 %, gulmarkeringar 25–50 % och grönmarkeringar 10–25 %.

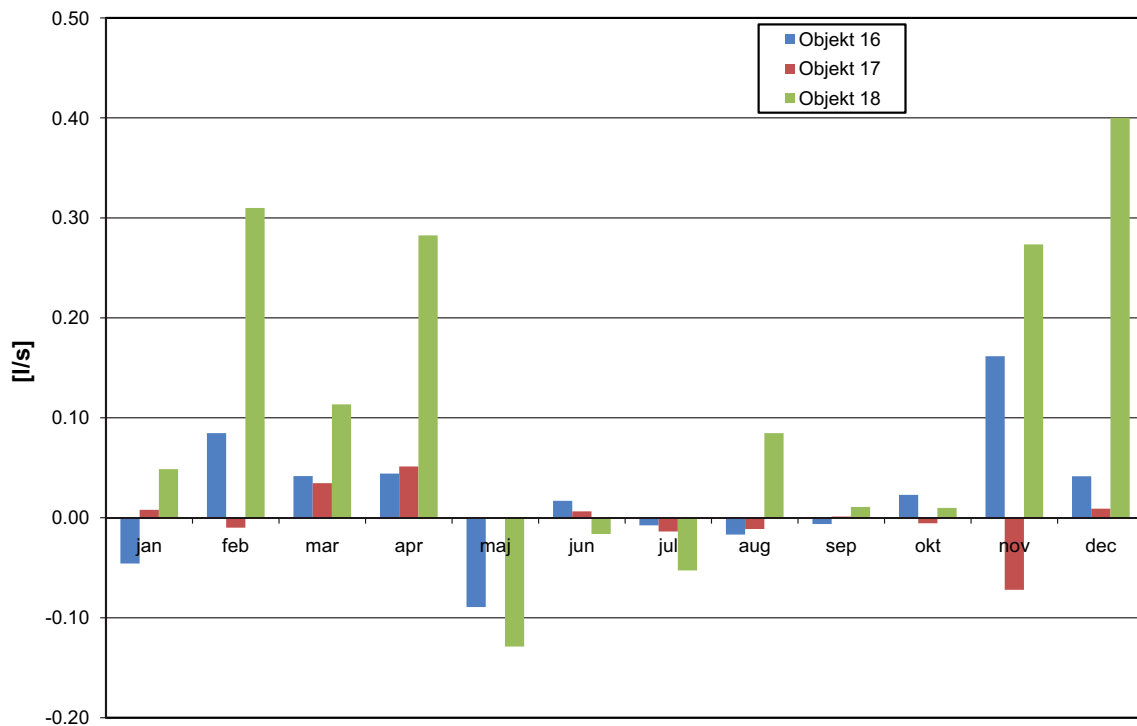
Objekt	Antal 40·40 m ² ber. celler	Storlek (m ²)	Ytvattendjup (m), opåverkade förhållanden	Absolut (relativ) sänkning	Vattenbehov (mm/år)	Vattenbehov (l/s)
6a	10	16 000	0,05	0,00 (2 %)	252	0,13
7	5	8 000	0,02	0,01 (48 %)	1 027	0,26
8a	15	24 000	0,10	0,00 (5 %)	–	–
8b	4	6 400	0,15	0,01 (5 %)	–	–
9	19	30 400	0,15	0,01 (4 %)	358	0,35
11, 11a, 11b	34	54 400	0,09	0,01 (6 %)	–	–
11c	13	20 800	0,07	0,01 (14 %)	2 160	1,42
14	9	14 400	0,50	0,01 (2 %)	245	0,11
15	3	4 800	0,06	0,01 (12 %)	244	0,04
16	3	4 800	0,20	0,00 (0 %)	132	0,02
17	2	3 200	0,00	0,00 (17 %)	0	0,00
18	7	11 200	0,17	0,00 (1 %)	320	0,11
21c	6	9 600	0,31	0,30 (95 %)	8 995	2,74
22	4	6 400	0,00	0,00 (33 %)	2 086	0,42
23	29	46 400	0,03	0,02 (63 %)	1 168	1,72
38	103	164 800	0,09	0,01 (15 %)	–	–
71	13	20 800	0,10	0,01 (12 %)	–	–
39	41	65 600	0,23	0,00 (0 %)	–	–
46a	10	16 000	0,13	0,00 (1 %)	–	–
46b	9	14 400	0,36	0,00 (0 %)	–	–
49	15	24 000	0,56	0,00 (0 %)	–	–



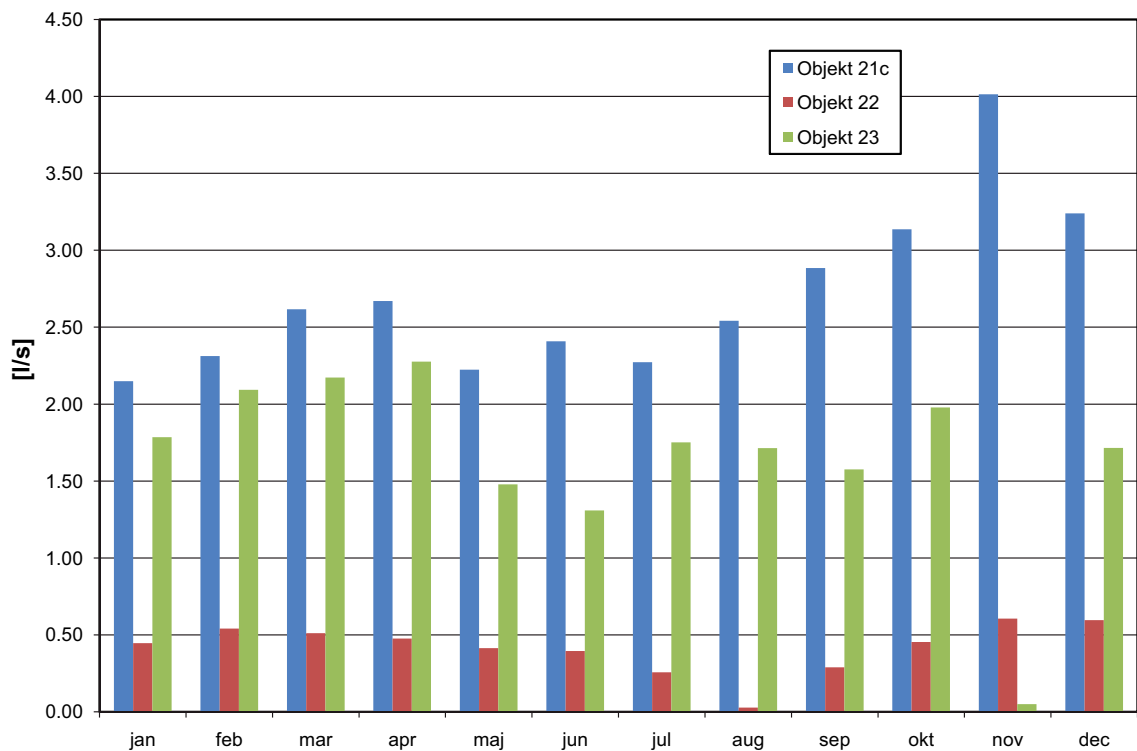
Figur 6-8. Medelvärde av vattenbehovet (l/s) per månad under 2006 för våtmarksobjekten 6a, 7 och 9.



Figur 6-9. Medelvärde av vattenbehovet (l/s) per månad under 2006 för våtmarksobjekten 11c, 14 och 15.



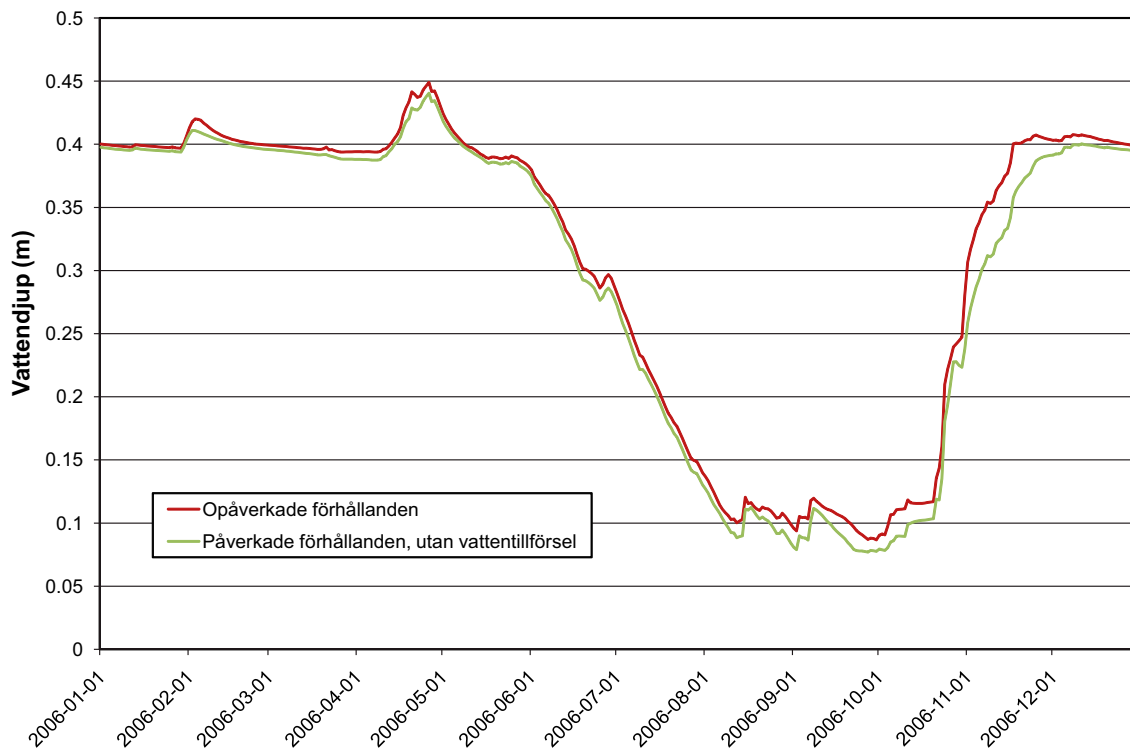
Figur 6-10. Medelvärde av vattenbehovet (l/s) per månad under 2006 för våtmarksobjekten 16, 17 och 18.



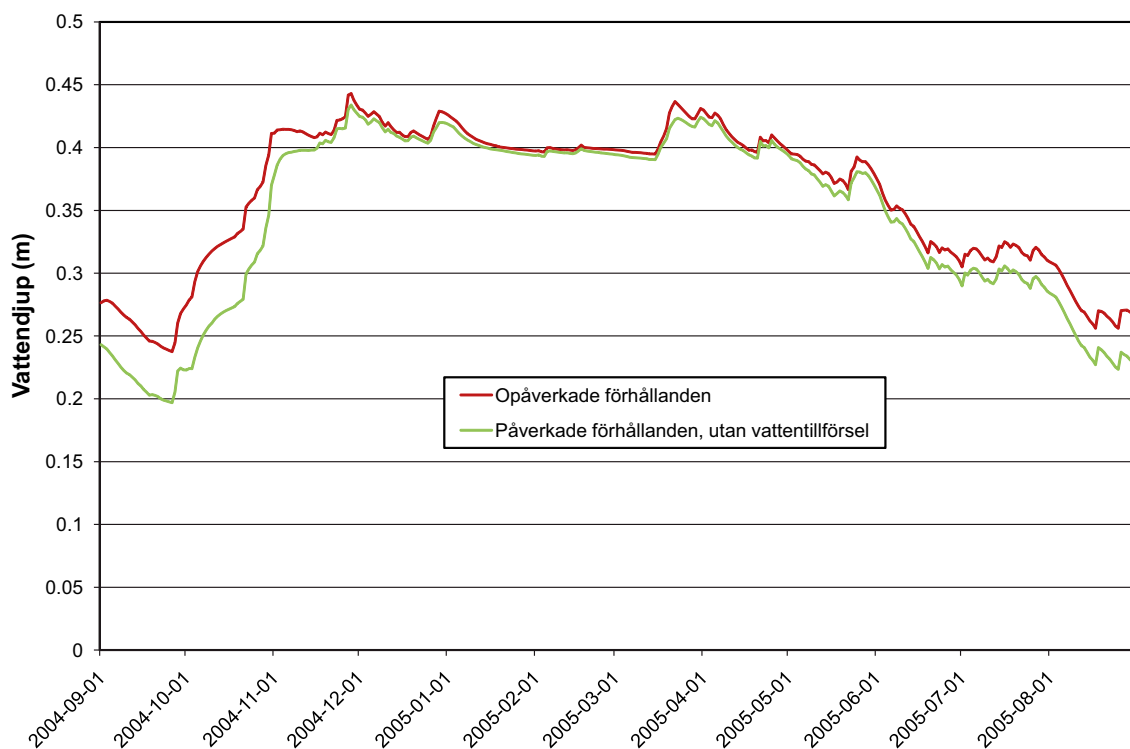
Figur 6-11. Medelvärde av vattenbehovet (l/s) per månad under 2006 för våtmarksobjekten 21c, 22 och 23.

Tabell 6-12. Modellberäknade medelvärden på ytvattendjup (m) för utvalda våtmarksobjekt under opåverkade förhållanden, samt absolut (m) och relativ (%) sänkning till följd av grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s) för olika meteorologiska förhållanden. Rödmarkeringar avser en relativ sänkning på över 50 %, gulmarkeringar 25–50 % och grönmarkeringar 10–25 %.

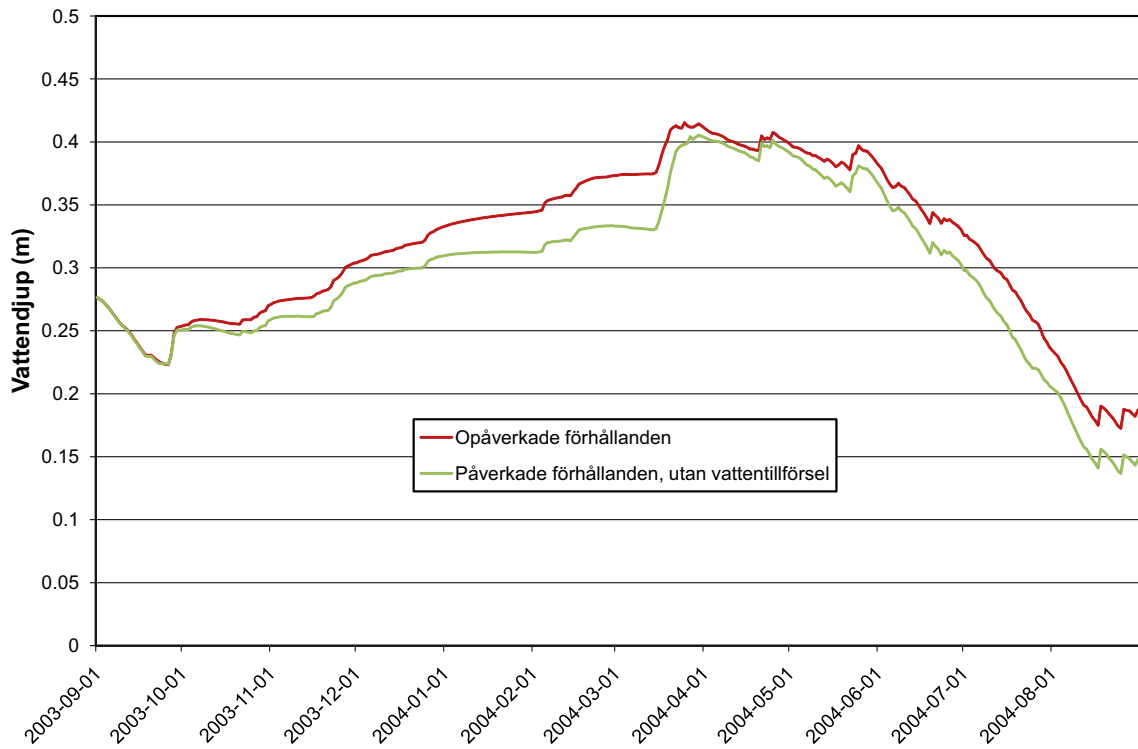
Våtmarksobjekt	Normalår Ytvattendjup (m), utan förvar	Torrår 1		Torrår 2		Våtår 1		Våtår 2		
		Absolut (relativ) sänkning	Ytvattendjup (m), utan förvar	Absolut (relativ) sänkning	Ytvattendjup (m), utan förvar	Absolut (relativ) sänkning	Ytvattendjup (m), utan förvar	Absolut (relativ) sänkning	Ytvattendjup (m), utan förvar	Absolut (relativ) sänkning
6a	0,06	0,00 (2 %)	0,05	0,00 (5 %)	0,04	0,01 (15 %)	0,06	0,00 (2 %)	0,06	0,00 (2 %)
7	0,03	0,01 (37 %)	0,02	0,02 (92 %)	0,01	0,01 (95 %)	0,03	0,00 (3 %)	0,03	0,00 (3 %)
8a	0,13	0,01 (7 %)	0,11	0,01 (11 %)	0,06	0,04 (67 %)	0,14	0,00 (2 %)	0,15	0,00 (2 %)
8b	0,19	0,02 (8 %)	0,15	0,02 (12 %)	0,09	0,05 (63 %)	0,22	0,00 (2 %)	0,24	0,01 (2 %)
9	0,18	0,01 (5 %)	0,15	0,01 (8 %)	0,11	0,03 (32 %)	0,20	0,00 (2 %)	0,22	0,01 (3 %)
11, 11a, 11b	0,11	0,00 (4 %)	0,08	0,02 (19 %)	0,05	0,04 (75 %)	0,12	0,00 (2 %)	0,13	0,00 (2 %)
11c	0,08	0,01 (11 %)	0,04	0,01 (21 %)	0,02	0,01 (68 %)	0,11	0,01 (5 %)	0,12	0,01 (5 %)
14	0,54	0,01 (1 %)	0,50	0,04 (7 %)	0,42	0,12 (29 %)	0,56	0,00 (0 %)	0,58	0,00 (0 %)
15	0,07	0,00 (7 %)	0,04	0,03 (65 %)	0,00	0,00 (100 %)	0,09	0,00 (2 %)	0,10	0,00 (2 %)
16	0,22	0,01 (3 %)	0,19	0,01 (6 %)	0,17	0,03 (16 %)	0,24	0,00 (1 %)	0,25	0,00 (1 %)
17	0,01	0,00 (15 %)	0,00	0,00 (34 %)	0,00	0,00 (50 %)	0,01	0,00 (11 %)	0,01	0,00 (9 %)
18	0,18	0,00 (1 %)	0,17	0,00 (2 %)	0,16	0,01 (8 %)	0,20	0,00 (0 %)	0,20	0,00 (1 %)
21c	0,35	0,33 (94 %)	0,32	0,22 (70 %)	0,23	0,22 (96 %)	0,37	0,08 (21 %)	0,38	0,13 (35 %)
22	0,00	0,00 (30 %)	0,00	0,00 (0 %)	0,00	0,00 (0 %)	0,00	0,00 (5 %)	0,00	0,00 (24 %)
23	0,03	0,01 (41 %)	0,03	0,01 (50 %)	0,02	0,02 (95 %)	0,03	0,00 (12 %)	0,03	0,03 (95 %)
38	0,12	0,02 (13 %)	0,05	0,01 (19 %)	0,03	0,01 (34 %)	0,17	0,01 (7 %)	0,20	0,01 (7 %)
71	0,12	0,01 (10 %)	0,04	0,01 (17 %)	0,01	0,00 (1 %)	0,19	0,01 (6 %)	0,22	0,01 (6 %)
39	0,25	0,00 (1 %)	0,17	0,00 (3 %)	0,12	0,00 (1 %)	0,31	0,00 (1 %)	0,34	0,00 (1 %)
46a	0,16	0,00 (2 %)	0,13	0,00 (2 %)	0,11	0,01 (9 %)	0,17	0,00 (0 %)	0,18	0,00 (0 %)
46b	0,39	0,00 (1 %)	0,36	0,00 (1 %)	0,31	0,02 (5 %)	0,41	0,00 (0 %)	0,42	0,00 (0 %)
49	0,60	0,00 (0 %)	0,57	0,00 (0 %)	0,52	0,01 (2 %)	0,63	0,00 (0 %)	0,64	0,00 (0 %)



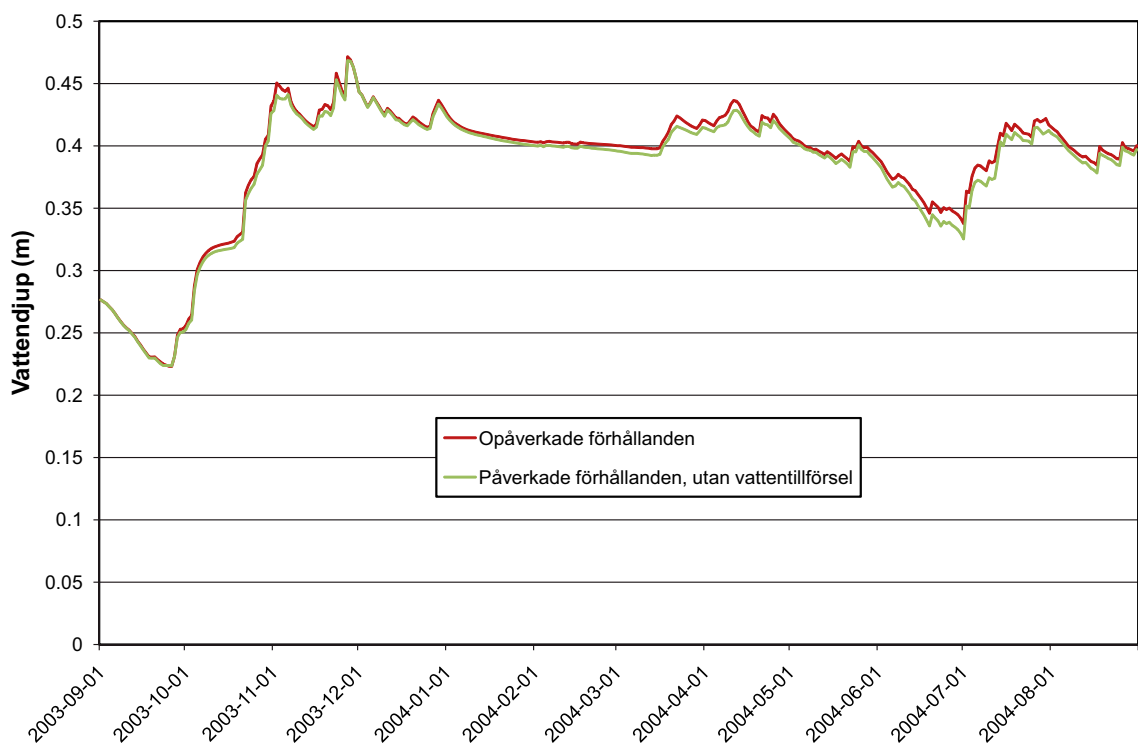
Figur 6-12. Ytvattendjup i djupaste delen av våtmarksobjekt 8a (sjön Tjärnpussen) för opåverkade förhållanden och med ett öppet förvar ($K_{inj} = 10^{-7}$ m/s) under typåret 2006.



Figur 6-13. Ytvattendjup i djupaste delen av våtmarksobjekt 8a (sjön Tjärnpussen) för opåverkade förhållanden och med ett öppet förvar ($K_{inj} = 10^{-7}$ m/s) under normalåret.



Figur 6-14. Ytvattendjup i djupaste delen av våtmarksobjekt 8a (sjön Tjärnpussen) för opåverkade förhållanden och med ett öppet förvar ($K_{inj} = 10^{-7}$ m/s) under det första torråret.



Figur 6-15. Ytvattendjup i djupaste delen av våtmarksobjekt 8a (sjön Tjärnpussen) för opåverkade förhållanden och med ett öppet förvar ($K_{inj} = 10^{-7}$ m/s) under det första våtåret.

7 Sammanfattning av resultat

7.1 Grundvattenytans avsänkning och trycksänkningar i berget

Grundvattenytans avsänkning till följd av grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen uppvisar stora variationer under året. Störst avsänkning under typåret 2006 sker under vintermånaderna november till februari då påverkansområdets storlek, för en avsänkning större än 0,3 m, överstiger 2 km². Påverkansområdets storlek är nästan hälften så stort under sommarmånaderna juni till augusti.

Resultat från simuleringar med en nederbörd motsvarande ett normalår, beräknad utifrån nederbördsdata från referensnormalperioden 1961–1990, visar att årsmedelvärdet av djupet till grundvattenytan är något mindre under normalåret än under typåret 2006. Årsmedelvärdet av påverkansområdets storlek (för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s) minskar med 36 % jämfört med typåret 2006, och har under normalåret en storlek på strax över 1 km². Under ett torrår, motsvarande en nederbörd med en återkomsttid på 100 år, är avsänkningen större än under normalåret och typåret 2006. Avsänkningen är mindre under ett våtår med samma återkomsttid (100 år). Detta kan förklaras av att inläckaget till förvaret är relativt konstant sett över hela året, vilket betyder att påverkansområdet under ett torrår blir större för att ”upprätthålla” samma inläckage som under ett våtår. Medelpåverkansområdet för det andra av två på varandra följande torra år, med det första året som initieringsår, är tre gånger så stort som motsvarande våtår.

Grundvattenytans avsänkning får även inverkan på växternas transpiration. I de områden där avsänkningen är som störst, nära de vertikala deformationszonerna, minskar den totala transpirationen med 1–5 % och upp till 50 % i enstaka beräkningsceller. Särskilt stor är den relativa minskningen av transpirationen i området norr om Bolundsfjärden runt sjön Puttan.

Med en beskrivning av befintligt SFR i modellverktyget MOUSE, där vattengenomsläppligheten i den injekterade zonen kalibrerats till $K_{inj, SFR} = 10^{-8}$ m/s, uppnås ett inläckage till SFR på 6,7 l/s. Det kan jämföras med ett uppmätt inläckage på cirka 6 l/s och ett tidigare MIKE SHE-beräknat inläckage på 3,6 l/s /Gustafsson et al. 2009/. I det senare fallet beskrivs SFR i MIKE SHE som ett antal beräkningsceller med en intern tryckrand. Avsänkningen av grundvattenytan, med naturliga förhållanden utan SFR som referens, är koncentrerad till några mindre områden norr om Bolundsfjärden, nordost om kärnkraftsverket och på SFR-piren. Trycksänkningen på nivån 50 m u h når MIKE SHE-modellens modellrand i nordost. Med ett utbyggt SFR, $K_{inj, SFR} = 10^{-8}$ m/s, ökar påverkansområdet med 5 % jämfört med befintligt SFR och omfattar ett område på 0,18 km². Påverkansområdet blir sex gånger större, jämfört med naturliga förhållanden utan SFR, om även slutförvarsanläggningen (ett helt öppet förvar och tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s) inkluderas i beräkningen.

Effekten av hårdgjorda ytor har studerats i ett utströmningsområde inom slutförvarsanläggningens planerade driftsområde ovan mark. Resultaten visar att grundvattenytan stiger under opåverkade förhållanden (utan förvaret) om man enbart beaktar att infiltrationen och avdunstningen är noll inom de hårdgjorda ytorna. I det studerade utströmningsområdet blir det således större effekt på grundvattenytan av att avdunstningen sätts till noll än av att infiltrationen sätts till noll. Med ett helt öppet förvar och för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-8}$ m/s blir effekten den motsatta i områdena med minst grundvattenutströmning, det vill säga grundvattenytan sjunker.

7.2 Påverkan på specifika våtmarks- och skogsobjekt

Grundvattenbortledningen från slutförvarsanläggningen förändrar den totala vattenbalansen för ett antal av de studerade våtmarksobjekten. Generellt visar resultaten att utströmningsområdena försvagas medan inströmningsområden förstärks. Det vertikala nettoflödet från jordlager till ytvatten minskar och kompenseras av ett minskat ytvattenutflöde. Detta innebär att ytvattenmagasinen förblir relativt oförändrade i de flesta våtmarksobjekten. På motsvarande sätt ökar det vertikala flödet från ytvattnet till jordlagren i de våtmarker där det sker ett ökat ytvatteninflöde till följd av grundvattenbortledningen från förvaret. I samtliga studerade objekt, förutom i objekten 49 och 71, ökar det vertikala nettoflödet från jord till berg. I objekten 7, 21c, 22 och 23 leder detta till att grundvattenmagasinen i jordlagren minskar väsentligt. Störst relativ effekt på ytvattenmagasinen kan noteras för objekten 7, 14 och 15.

Markavrinningen samt det vertikala grundvattenflödet från jord- och berglager till våtmarksobjekten påverkas i olika stor utsträckning av förvaret. Antalet registrerade partiklar i respektive objekt, då partiklar kontinuerligt introducerats i det översta jordlagret i takt med infiltrationen under 10 år, minskar med mer än 50 % i objekten 2, 7, 21+21c och 22. I 20 % av objekten sker dock en ökning vilket tyder på att avrinningen till dessa objekt ökar vilket också de objektspecifika vattenbalanserna visar.

Då en partikel initieellt introduceras i varje beräkningscell i MIKE SHE har efter 100 år partiklar, med startpunkt i något berglager, registrerats i två tredjedelar av våtmarksobjekten. Motsvarande andel med ett öppet förvar är endast 15 %. Dessa resultat är också i linje med vattenbalanserna, som visar att det vertikala nettoflödet från jord till berg ökar markant då slutförvarsanläggningen inkluderas. Generellt har våtmarksobjekten sin huvudsakliga tillrinning från jordlagren och få objekt har någon tillrinning från berglagren av betydelse. Detta stärker den konceptuella bilden av ett ytligt flödes-system i jordlagren med många lokala in- och utströmningsområden.

Även mycket små avsänkningar av grundvattenytan (> 0,1 m) i våtmarkerna kan leda till vegetationsförändringar mot torrare naturtyper. Skogsobjekten är inte lika känsliga för en avsänkning av grundvattenytan. Under ett normalår är medelavsänkningen av grundvattenytan större än 0,1 m i en femtedel av de studerade våtmarksobjekten. Motsvarande siffra för skogsobjekten är 54 %. Under torra förhållanden är andelen påverkade objekt högre medan den är lägre under blöta förhållanden. I våtmarksobjekten 2, 7, 21+21c, 22, 23, 89 och 102 överstiger medelavsänkningen 0,3 m under fler år än det andra av två på varandra följande torrår. Motsvarande resultat ses för skogsobjekten 5, 24, 28a-d, 29, 30, 31a-b, 32a-b, 54 och 58. Grundvattendjupen är framtagna som medelvärden för hela objektytor, vilket innebär att djupen inom objekten kan variera.

Behovet av vattentillförsel har beräknats med MIKE SHE för ett antal våtmarksobjekt. Resultaten visar att vattenbehovet, som ett medelvärde under år 2006, är störst i objekten 11c, 21c och 23 och överstiger i dessa objekt 1 l/s. Under våren och hösten, då nederbörden är som högst, är effekterna av grundvattenbortledningen från förvarsanläggningen som störst och därför även behoven av vattentillförsel. I ett antal våtmarksobjekt är vattenbehovet sammankopplat med en trycksänkning i jordlagren under våtmarken och ytvattendjupet är i de fallen oförändrad. Ytvattendjupen varierar kraftigt mellan objekten, från några få centimeter upp till en halvmetr under opåverkade förhållanden. Den absoluta avsänkningen är störst i objekt 21c, som också har det största vattenbehovet på nästan 3 l/s.

8 Referenser

Bosson E, Sassner M, Gustafsson L-G, 2008. Numerical modelling of surface hydrology and near-surface hydrogeology at Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Brunberg A-K, Carlsson T, Blomqvist P, Brydsten L, Strömberg M, 2004. Forsmark site investigation. Identification of catchments, lake-related drainage parameters and lake habitats. SKB P-04-25, Svensk Kärnbränslehantering AB. (Reviderad december 2007)

DHI Software, 2008a. MIKE SHE – User Manual. DHI Water, Environment & Health, Hørsholm, Denmark.

DHI Software, 2008b. MOUSE PIPE FLOW – Reference Manual. DHI Water, Environment & Health, Hørsholm, Denmark.

Follin S, Hartley L, Jackson P, Roberts D, Marsic N, 2008. Hydrogeological conceptual model development and numerical modelling using CONNECTFLOW, Forsmark modelling stage 2.3. SKB R-08-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Graham D N, Butts M B, 2005. Flexible, integrated watershed modelling with MIKE SHE. In: Watershed Models (eds. V P Singh and D K Frevert), pp. 245–272. CRC Press.

Gustafsson L-G, Sassner M, Bosson E, 2008. Numerical modelling of solute transport at Forsmark with MIKE SHE. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-106, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Gustafsson L-G, Gustafsson A-M, Aneljung M, Sabel U, 2009. Effects on surface hydrology and near-surface hydrogeology of an open repository in Forsmark. Results of modelling with MIKE SHE. SKB R-08-121, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Hamrén U, Collinder P, 2010. Vattenverksamhet i Forsmark. Ekologisk fältinventering, naturvärdesklassificering samt beskrivning av skogsproduktionsmark. SKB R-10-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Hamrén U, Collinder P, Allmér J, 2010. Bortledning av grundvatten från slutförvarsanläggningen i Forsmark – beskrivning av konsekvenser för naturvärden och skogsproduktion. SKB R-10-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Johansson P-O, 2008. Description of surface hydrology and near-surface hydrogeology at Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

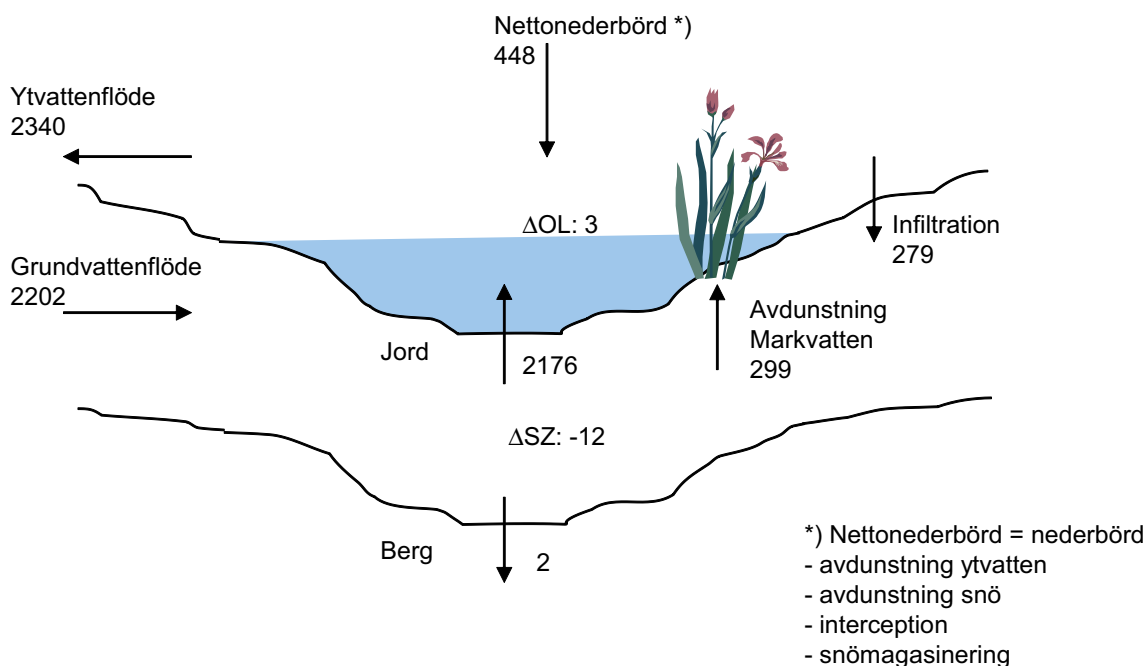
Mårtensson E, Gustafsson L-G, 2010. Hydrological and hydrogeological effects of an open repository in Forsmark. Final MIKE SHE flow modelling results for the Environmental Impact Assessment. SKB R-10-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2008. Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SKB TR-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

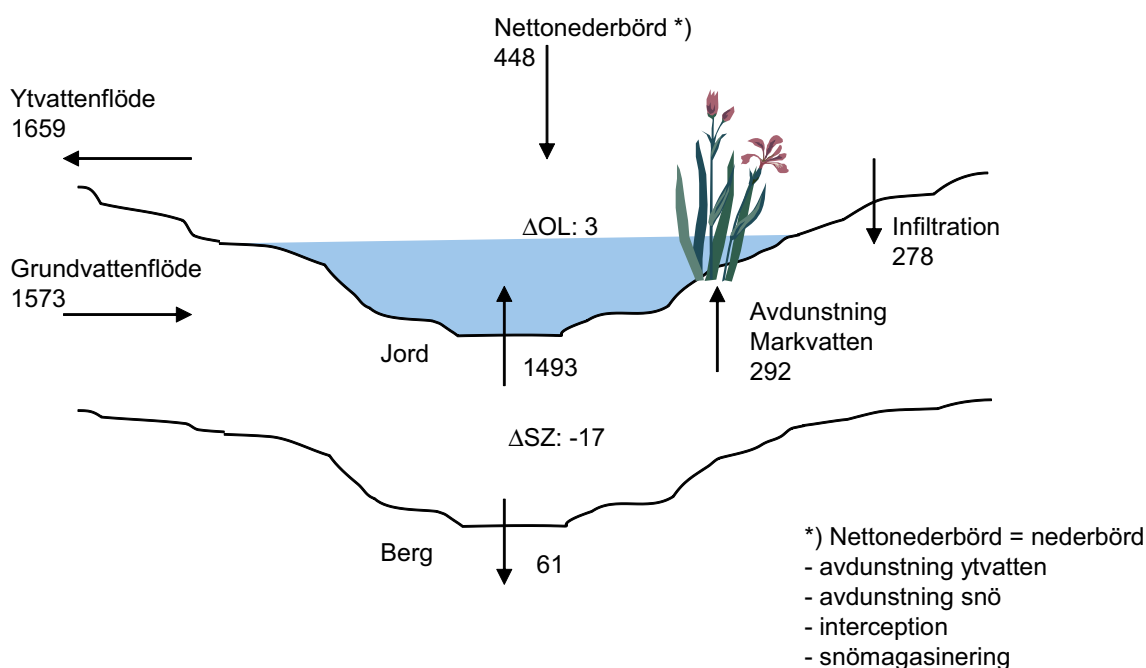
Werner K, Hamrén U, Collinder P, 2010. Vattenverksamhet i Forsmark (del I). Bortledning av grundvatten från slutförvarsanläggningen för använt kärnbränsle. SKB R-10-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Vattenbalanser för våtmarksobjekt

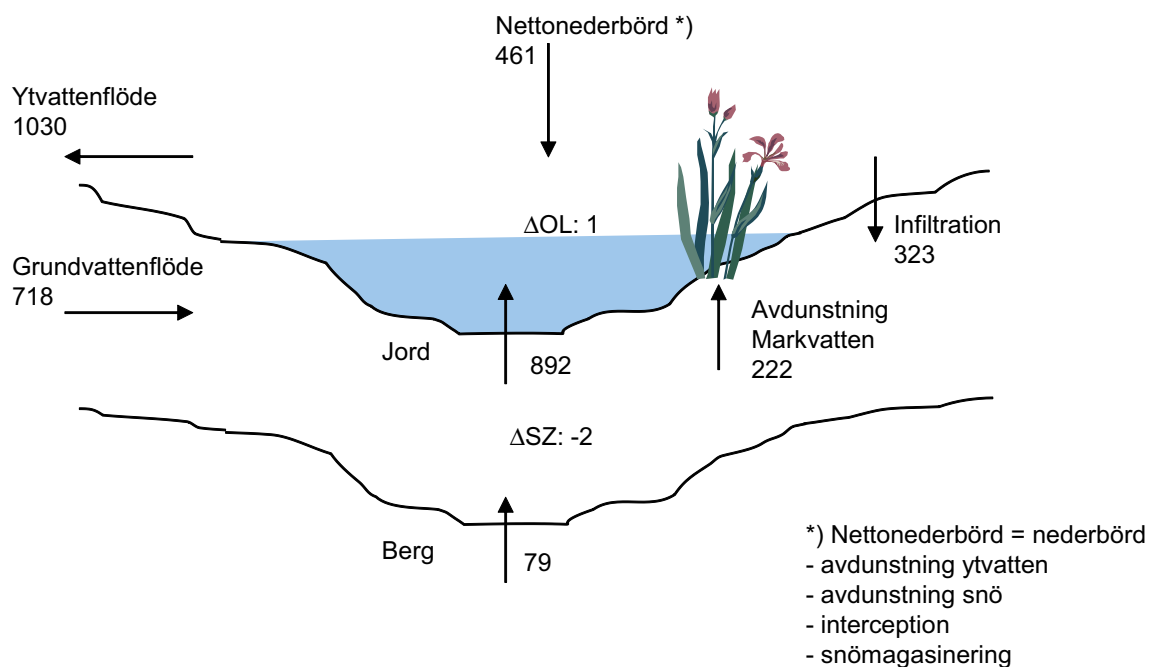
Figurerna A1-1 till A1-30 presenterar modellberäknade vattenbalanser för 15 olika våtmarksobjekt under opåverkade förhållanden och med ett helt öppet förvar. Modellberäkningarna är gjorda för typåret 2006. I fallet med förvar är beräkningarna gjorda för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. De flöden som anges i figurerna sammanfattas i tabellerna 6-1 till 6-3 i avsnitt 6.1.



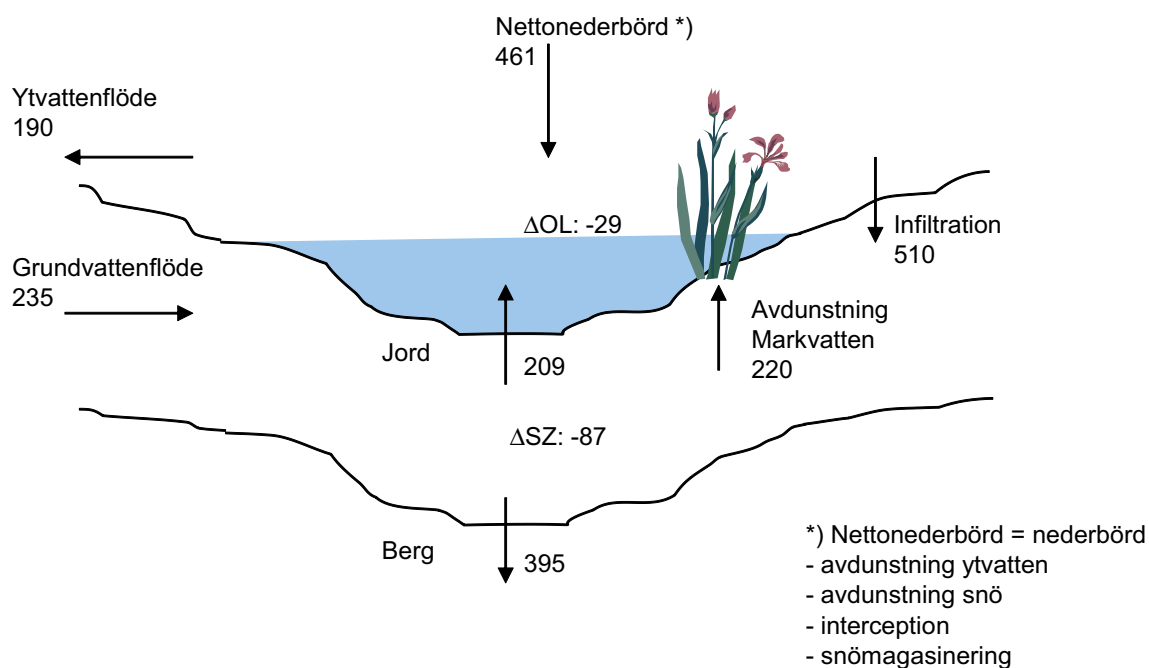
Figur A1-1. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 6a för opåverkade förhållanden.



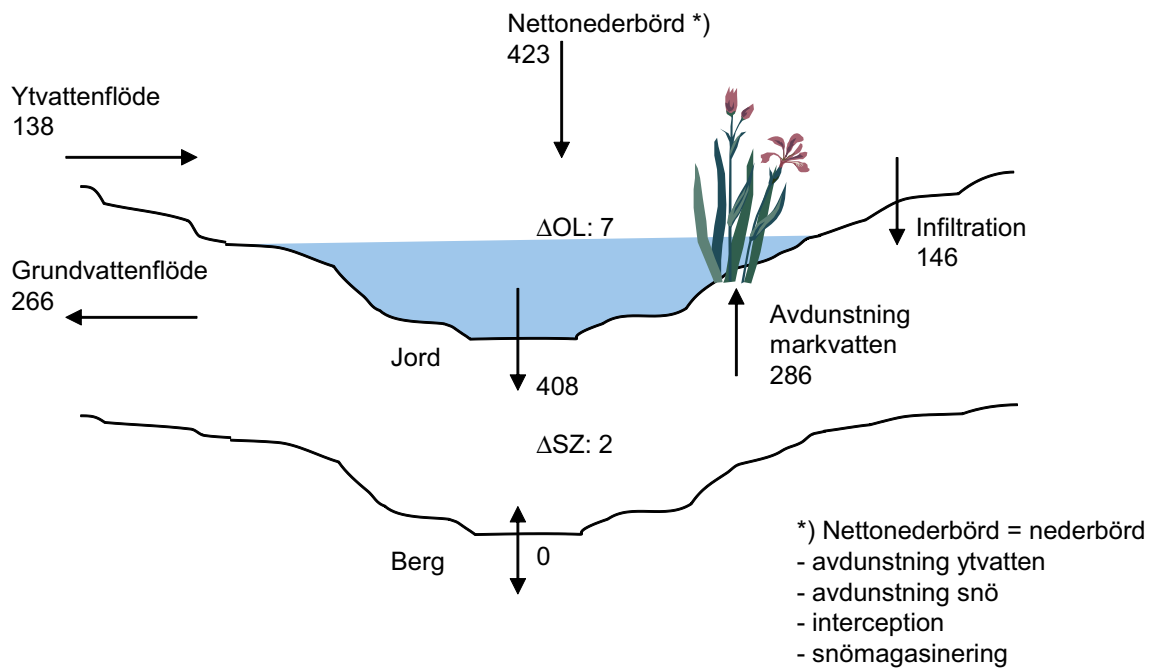
Figur A1-2. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 6a med öppet förvar, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.



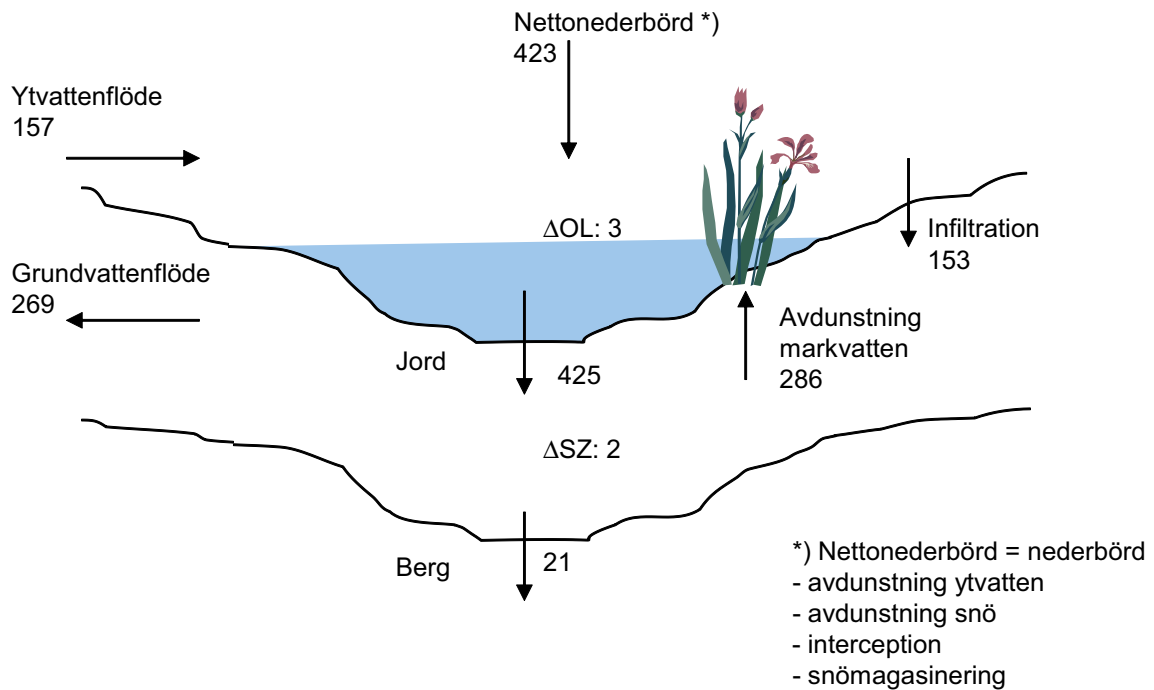
Figur A1-3. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 7 för opåverkade förhållanden.



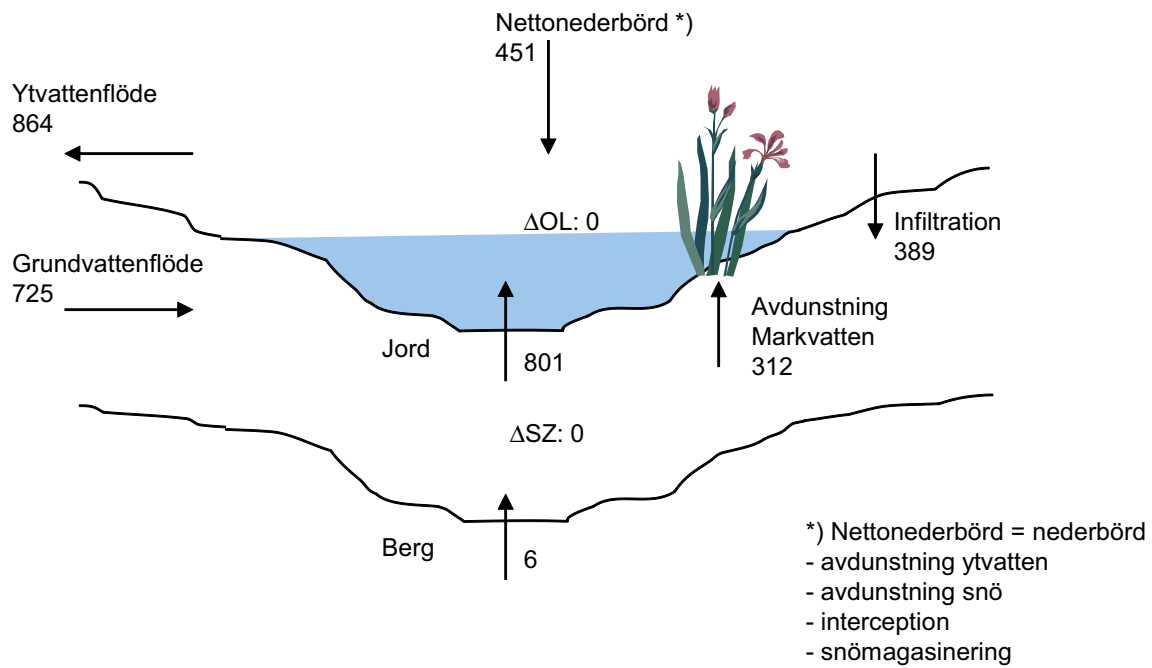
Figur A1-4. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 7 med öppet förvar, $K_{ijj} = 10^{-7}$ m/s.



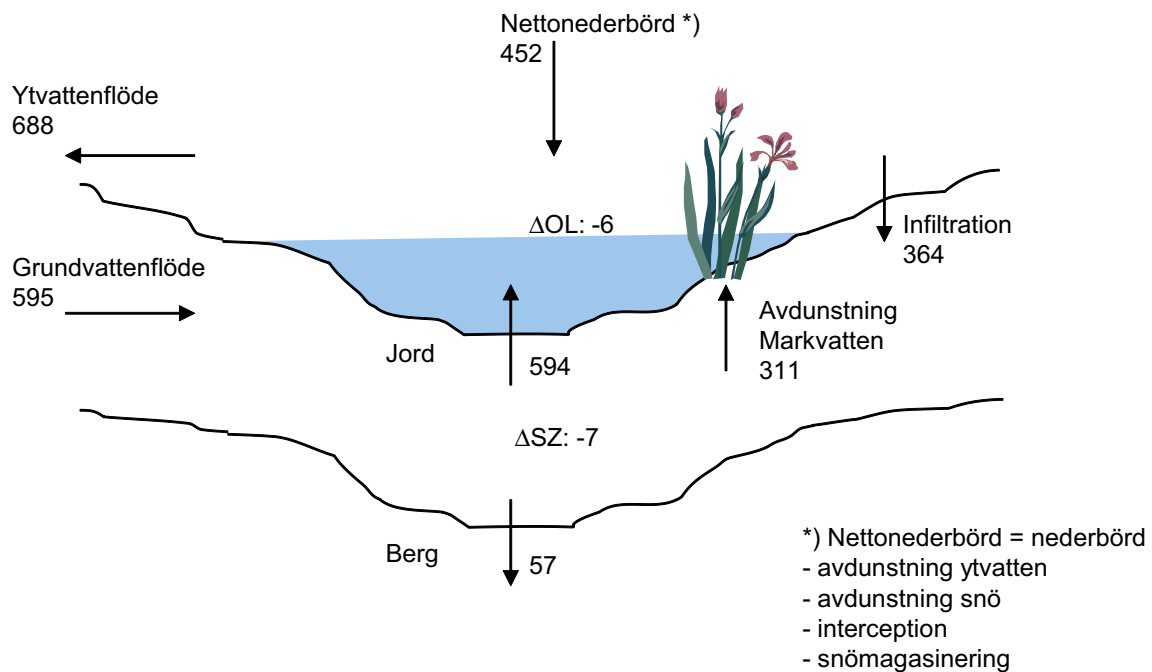
Figur A1-5. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 9 för opåverkade förhållanden.



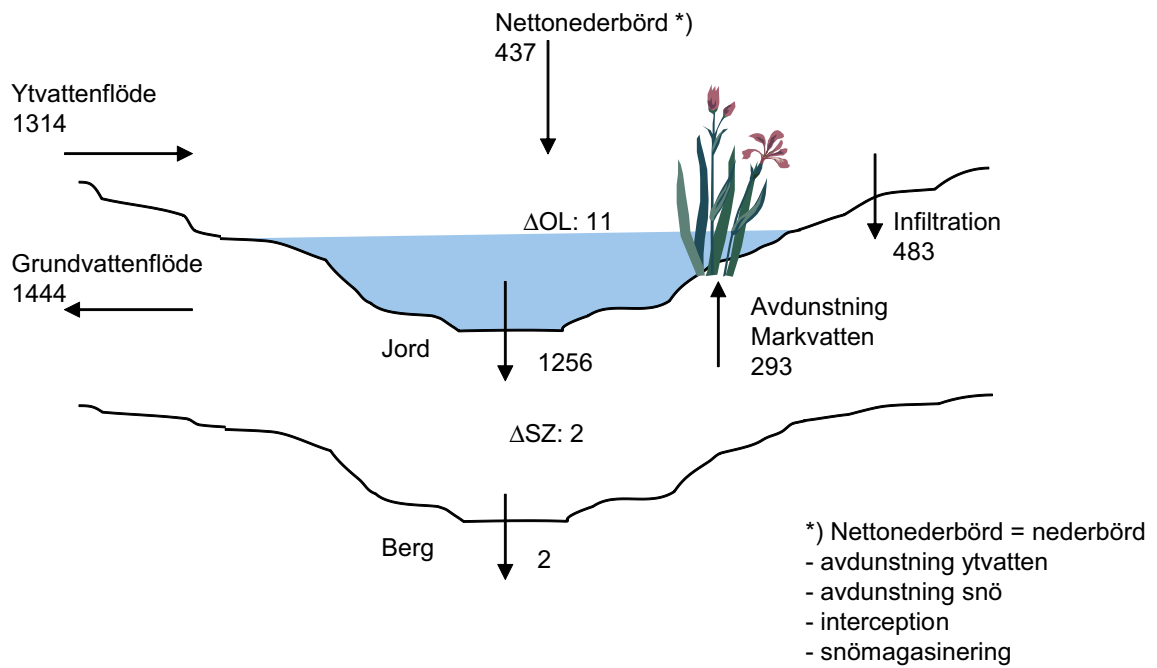
Figur A1-6. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 9 med öppet förvar, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.



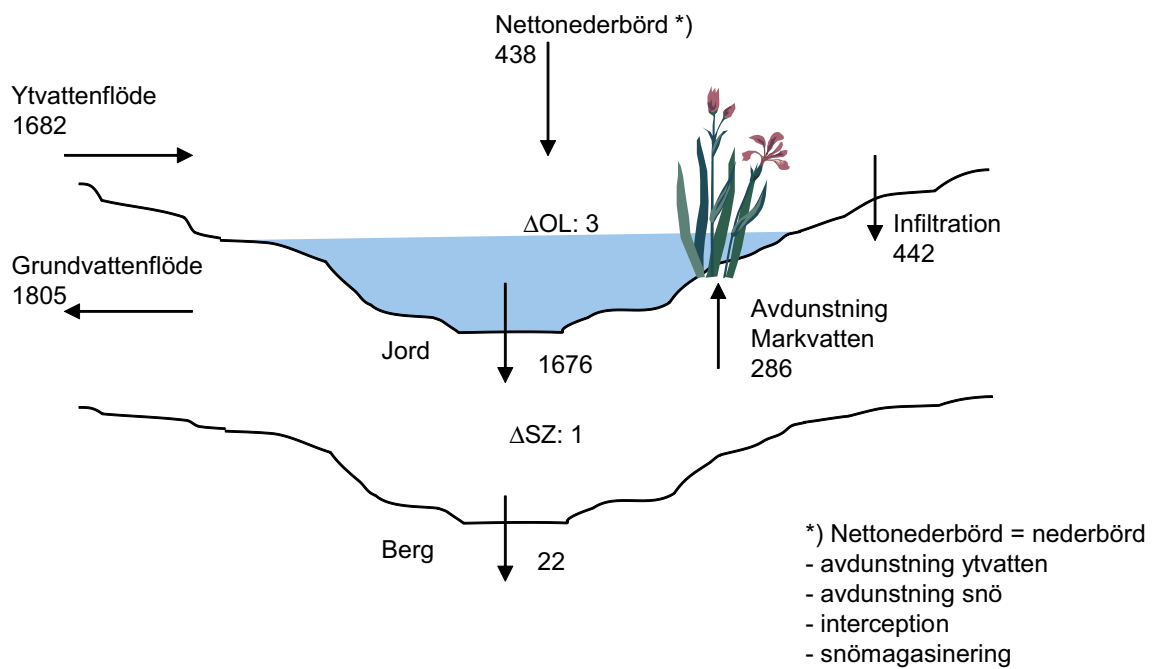
Figur A1-7. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 11+11a+11b för opåverkade förhållanden.



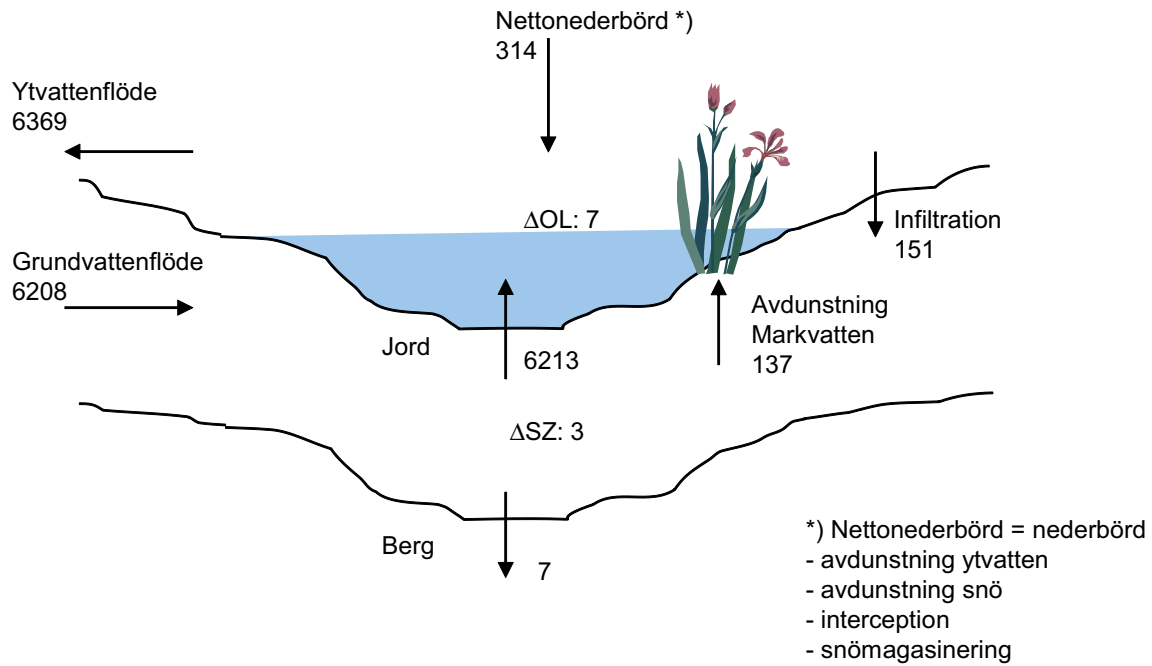
Figur A1-8. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 11+11a+11b med öppet förvar, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.



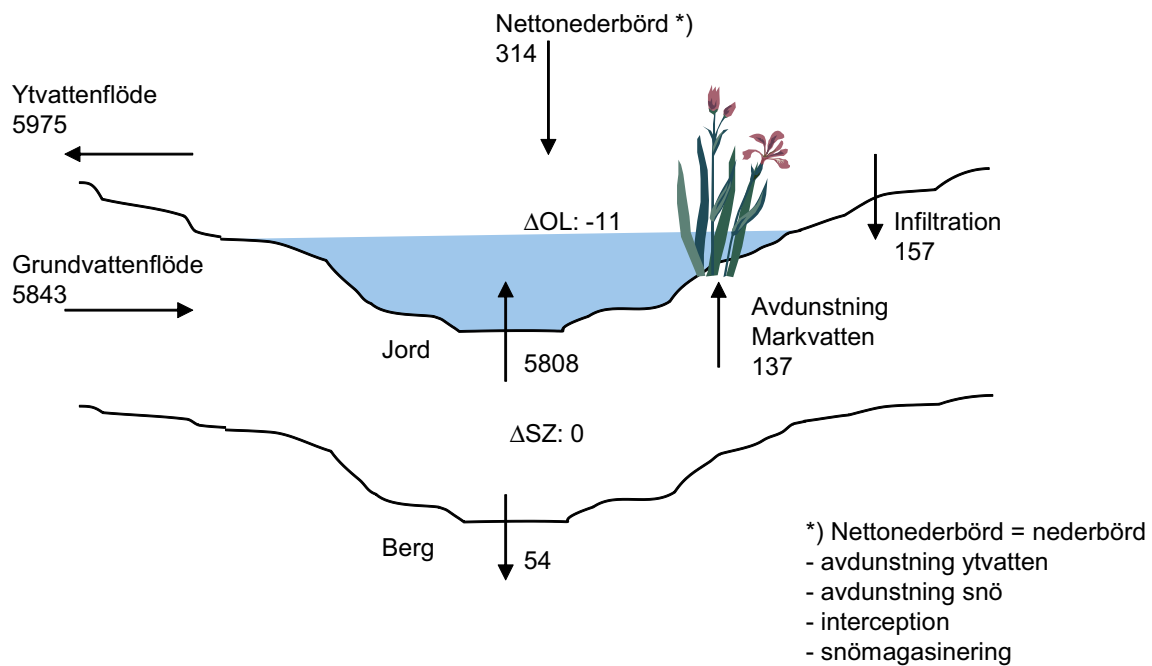
Figur A1-9. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 11c för opåverkade förhållanden.



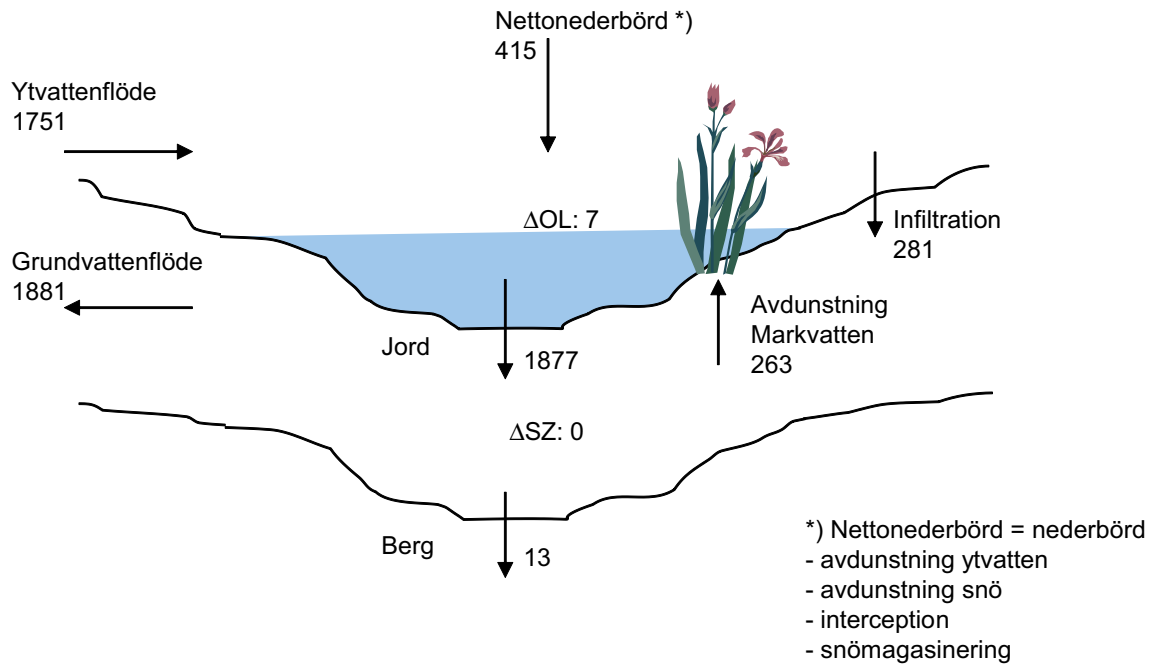
Figur A1-10. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 11c med öppet förvar, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.



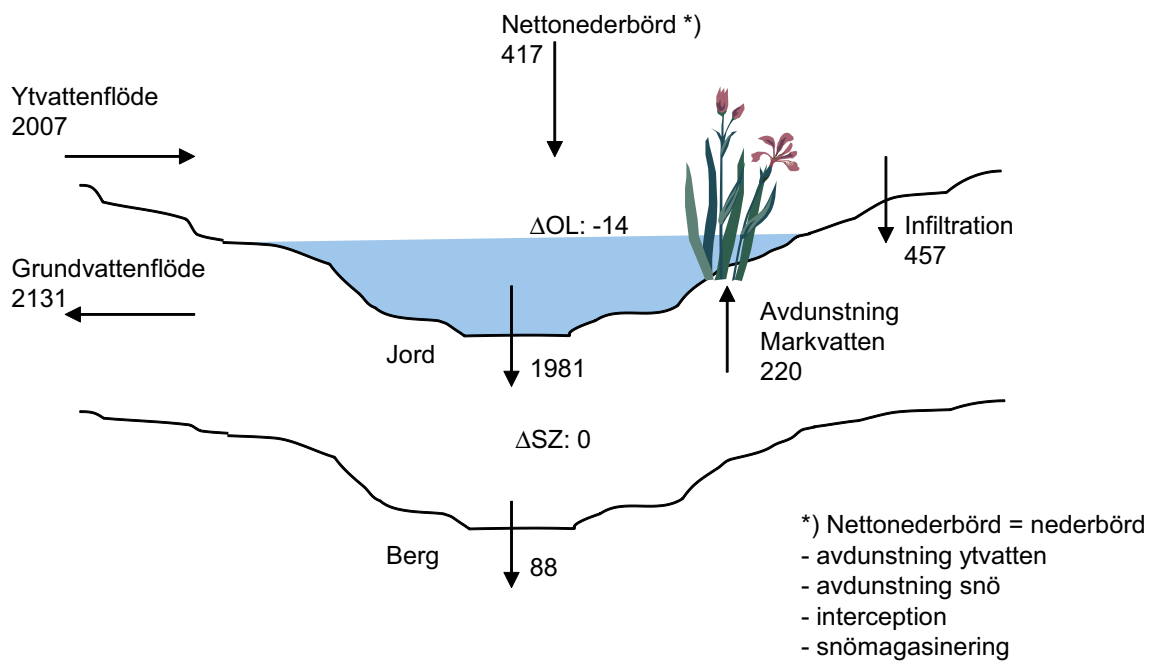
Figur A1-11. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 14 för opåverkade förhållanden.



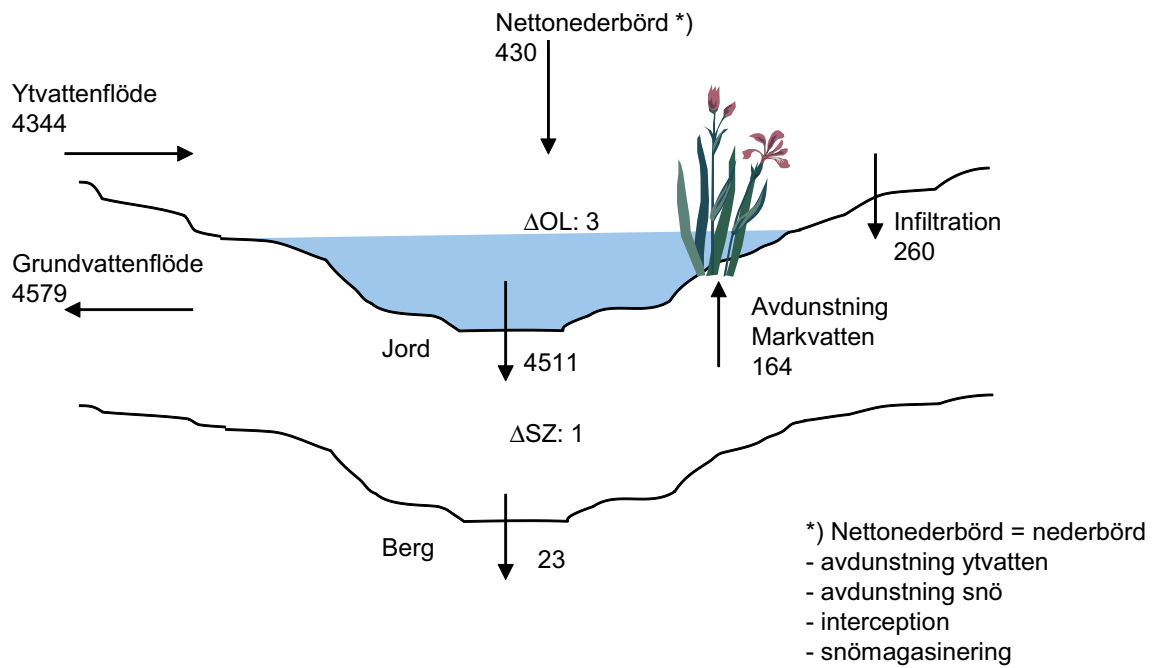
Figur A1-12. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 14 med öppet förvar; $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.



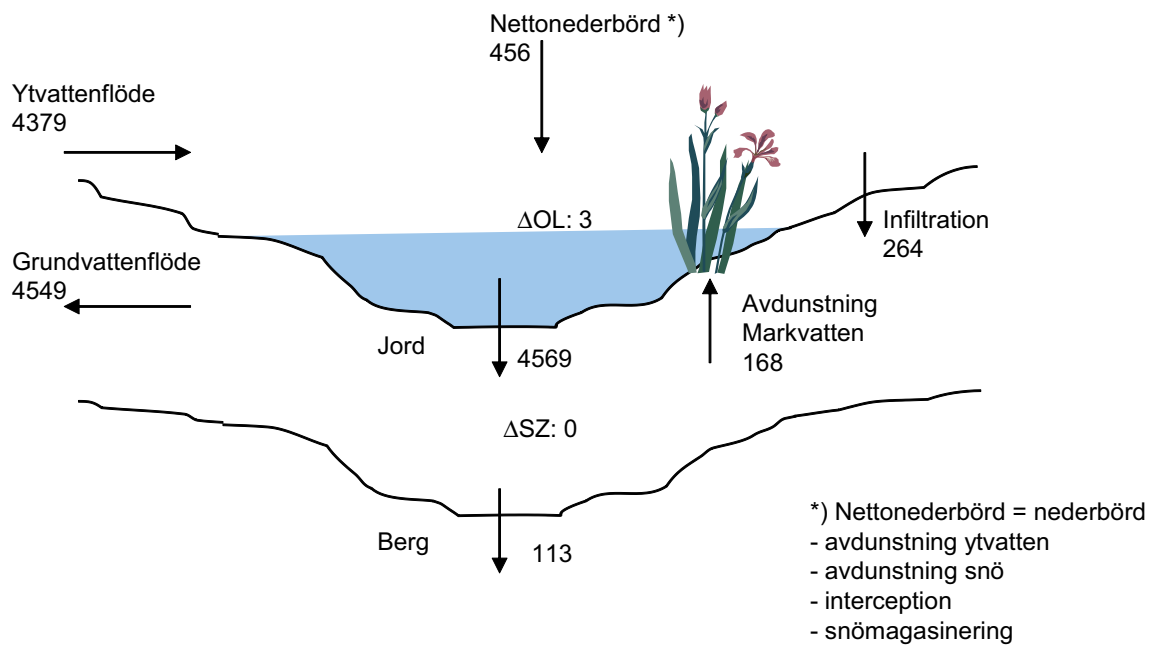
Figur A1-13. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 15 för opåverkade förhållanden.



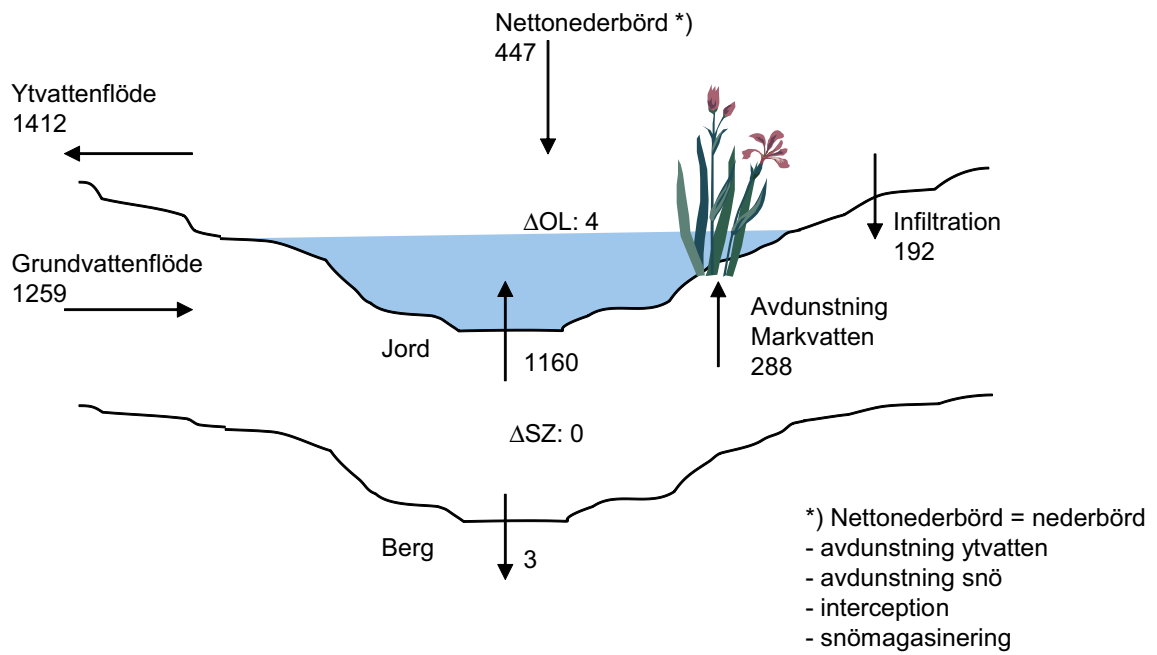
Figur A1-14. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 15 med öppet förvar, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.



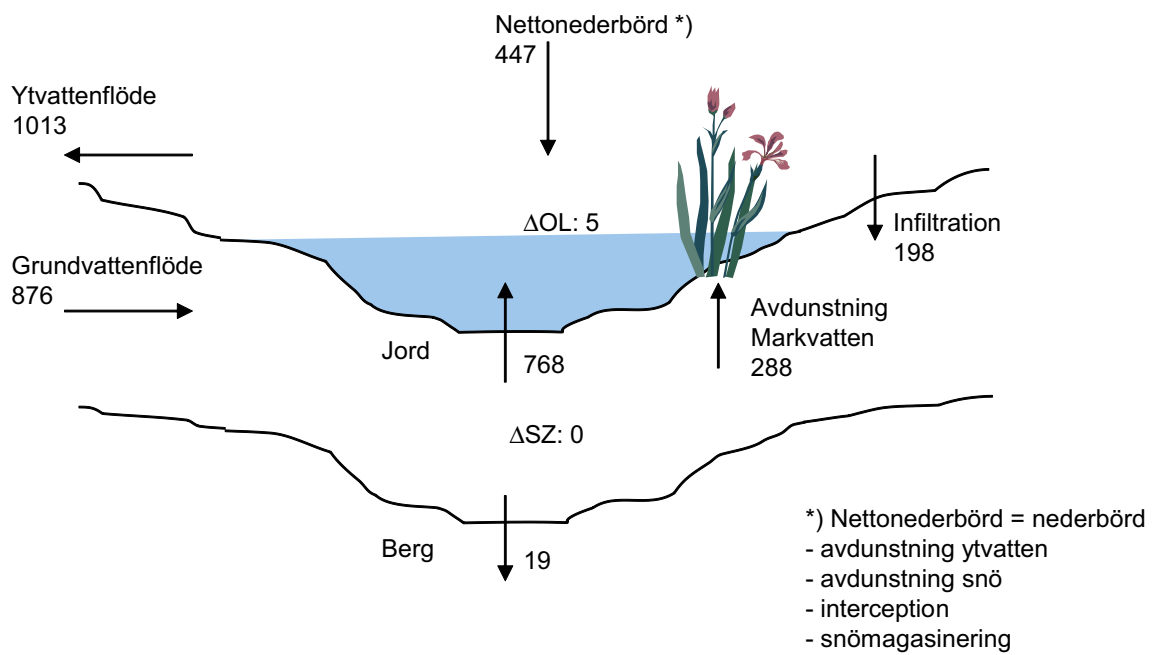
Figur A1-15. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 16 för opåverkade förhållanden.



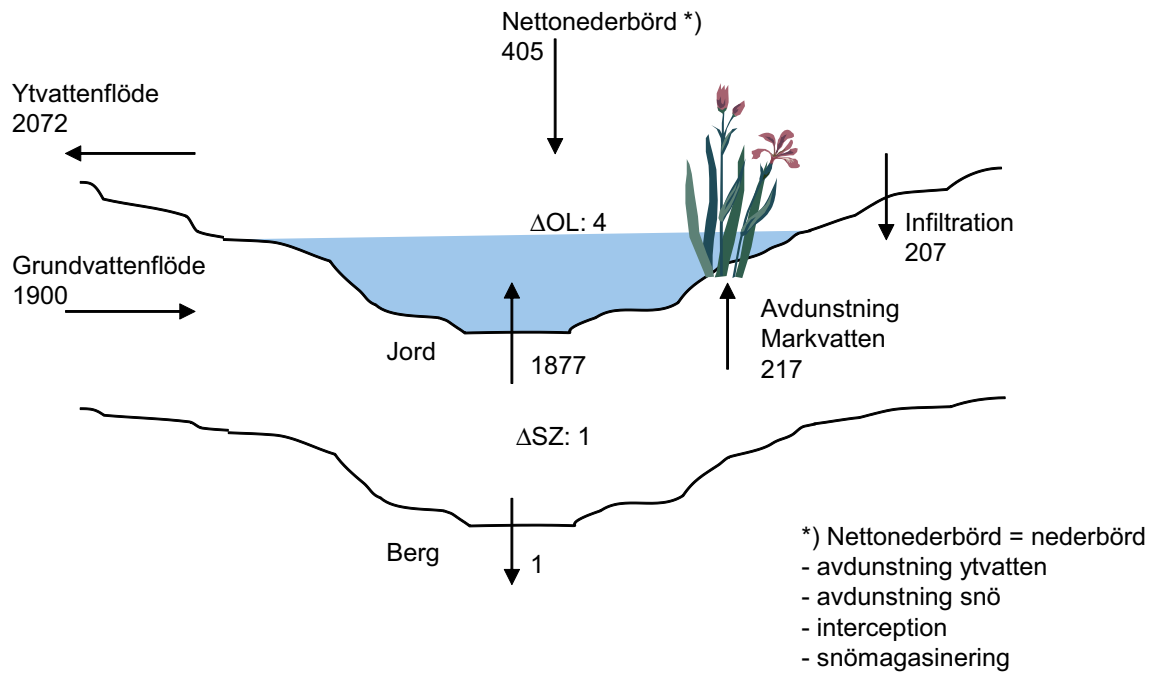
Figur A1-16. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 16 med öppet förvar, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.



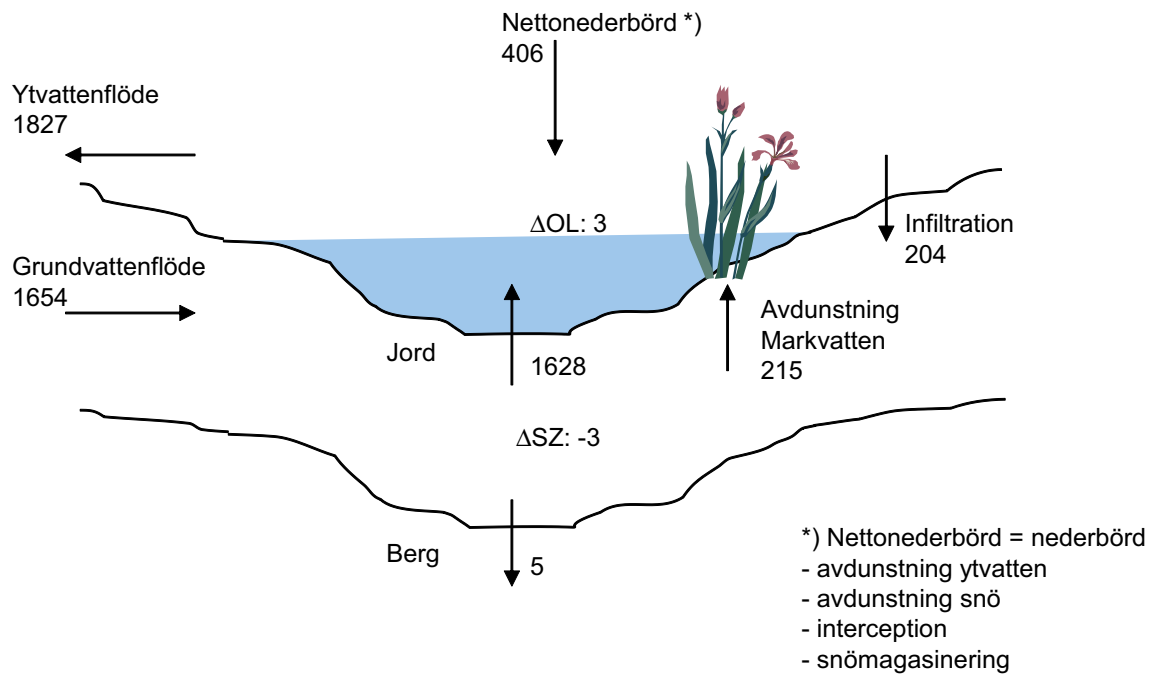
Figur A1-17. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 17 för opåverkade förhållanden.



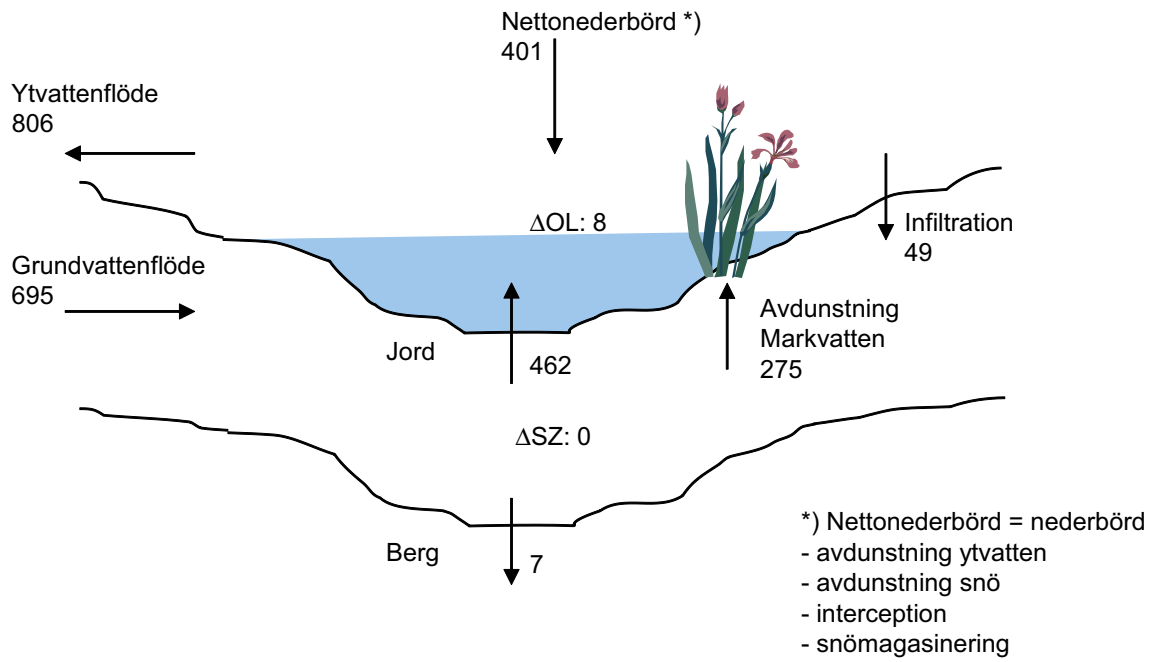
Figur A1-18. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 17 med öppet förvar, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.



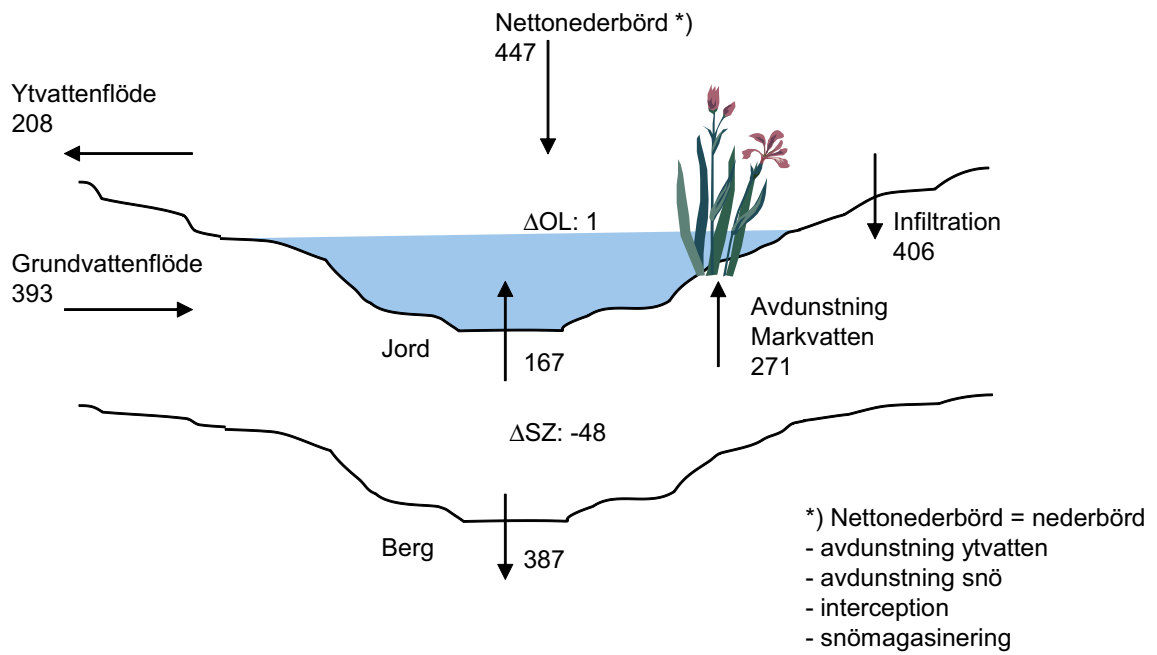
Figur A1-19. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 18 för opåverkade förhållanden.



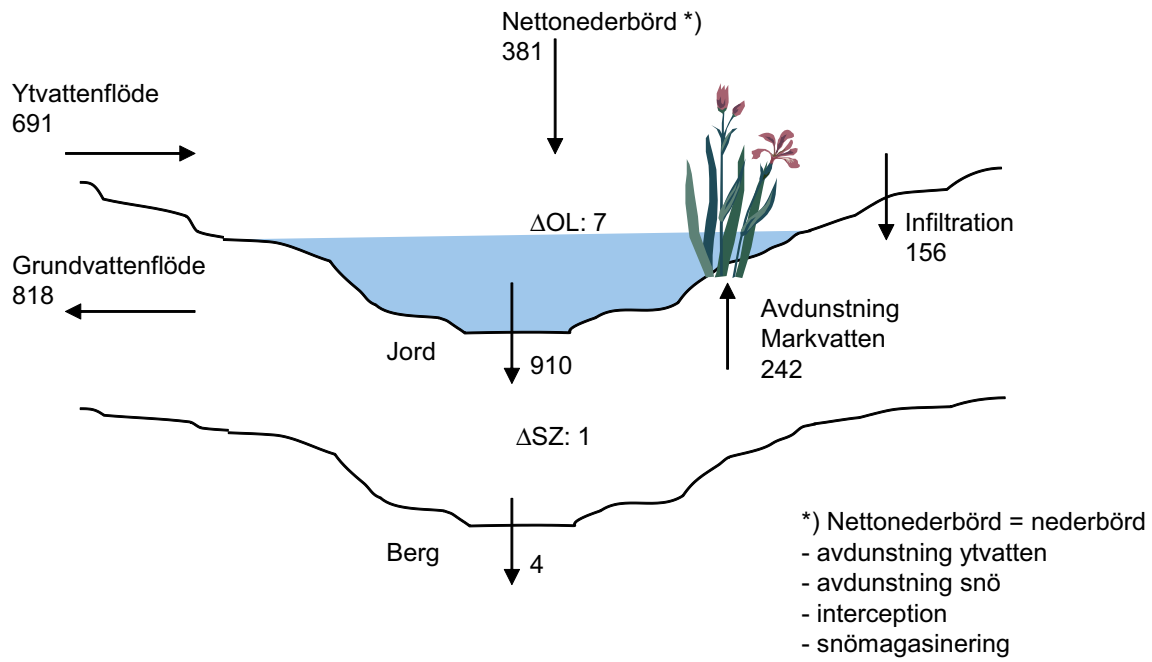
Figur A1-20. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 18 med öppet förvar, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.



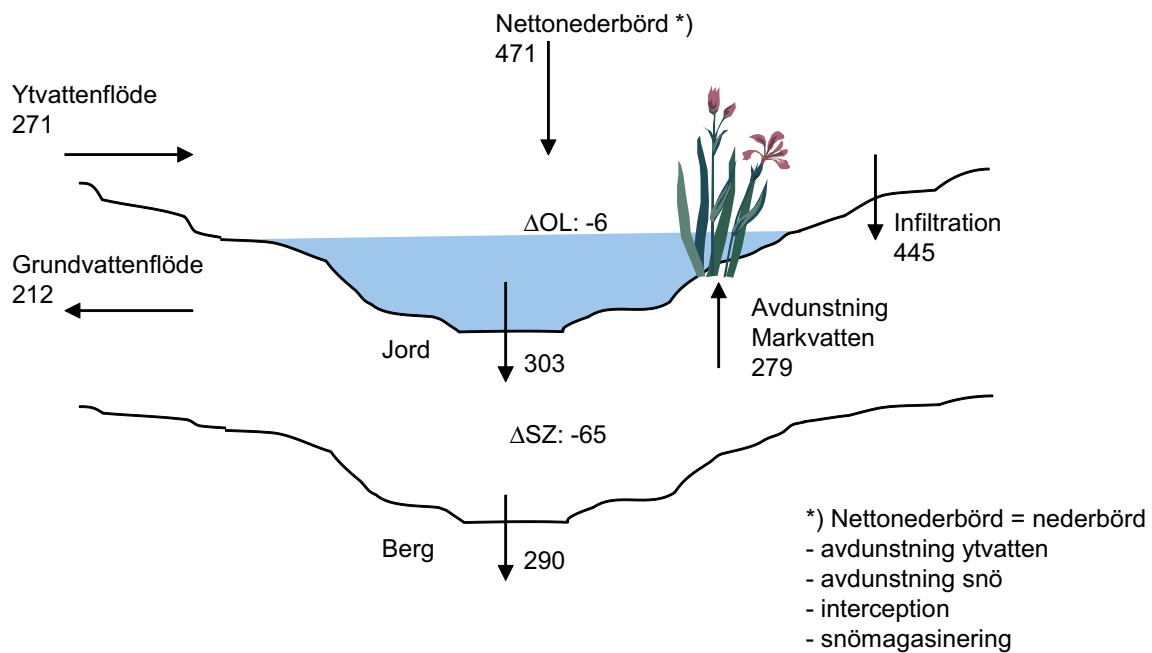
Figur A1-21. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 21c för opåverkade förhållanden.



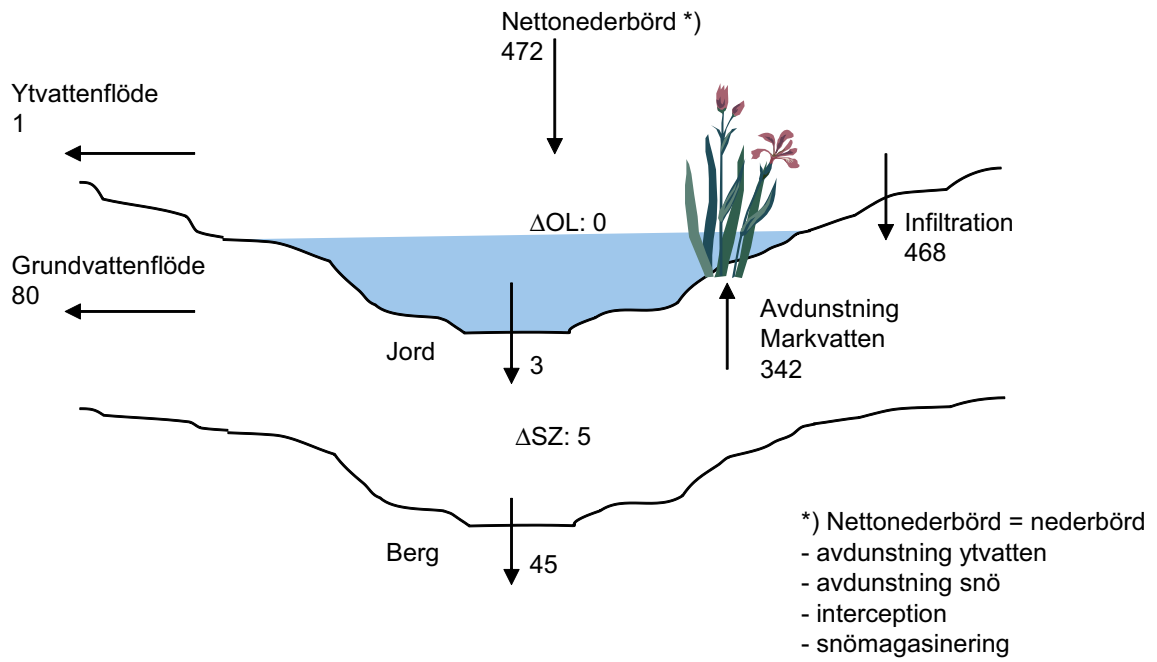
Figur A1-22. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 21c med öppet förvar, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.



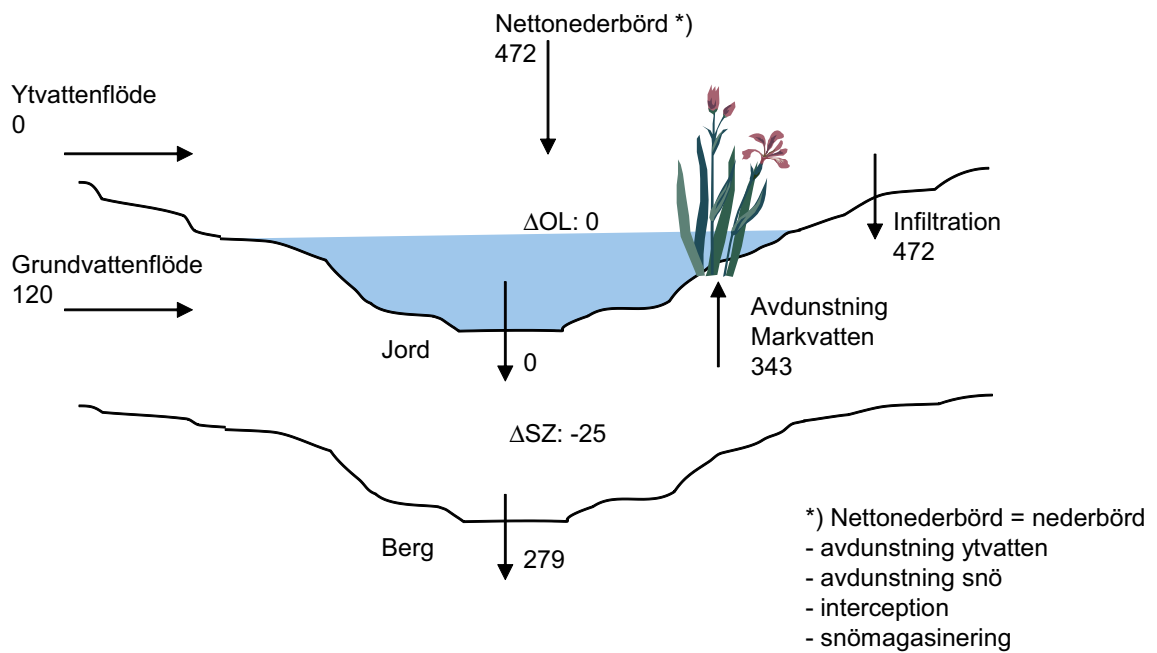
Figur A1-23. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 22 för opåverkade förhållanden.



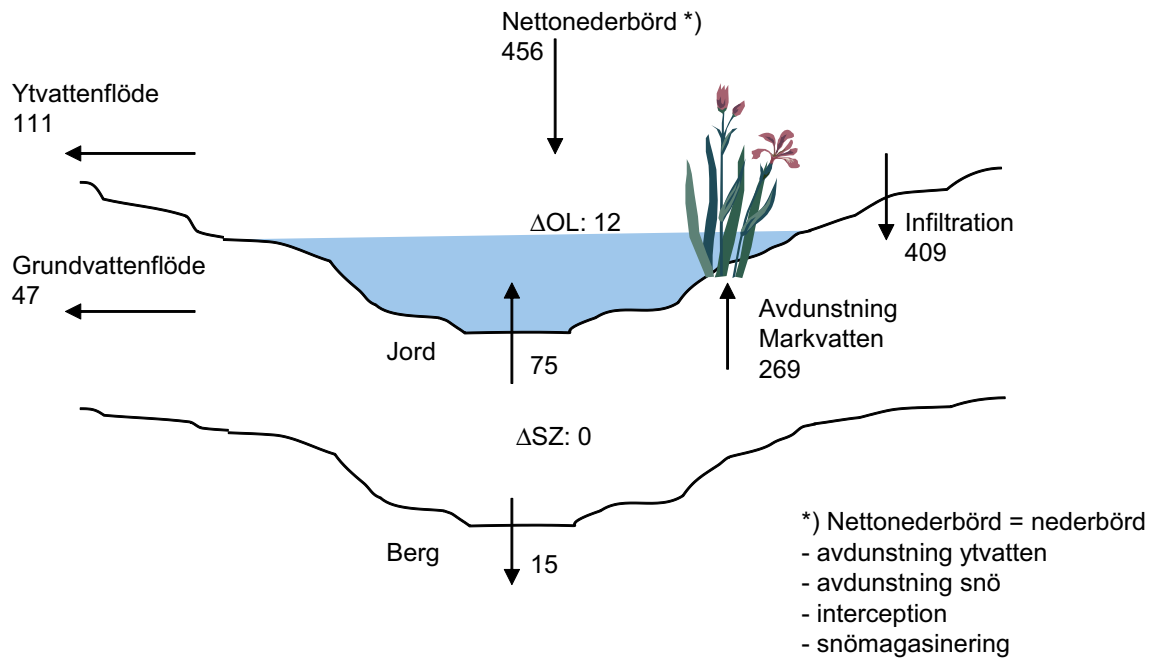
Figur A1-24. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 22 med öppet förvar, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.



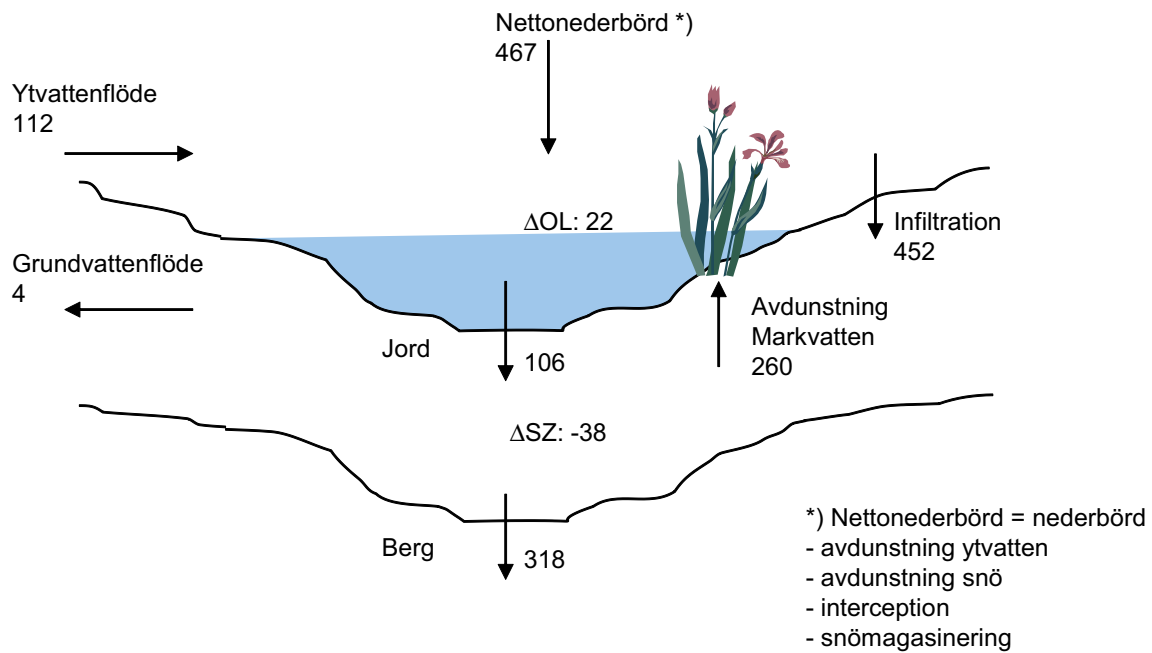
Figur A1-25. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 23 för opåverkade förhållanden.



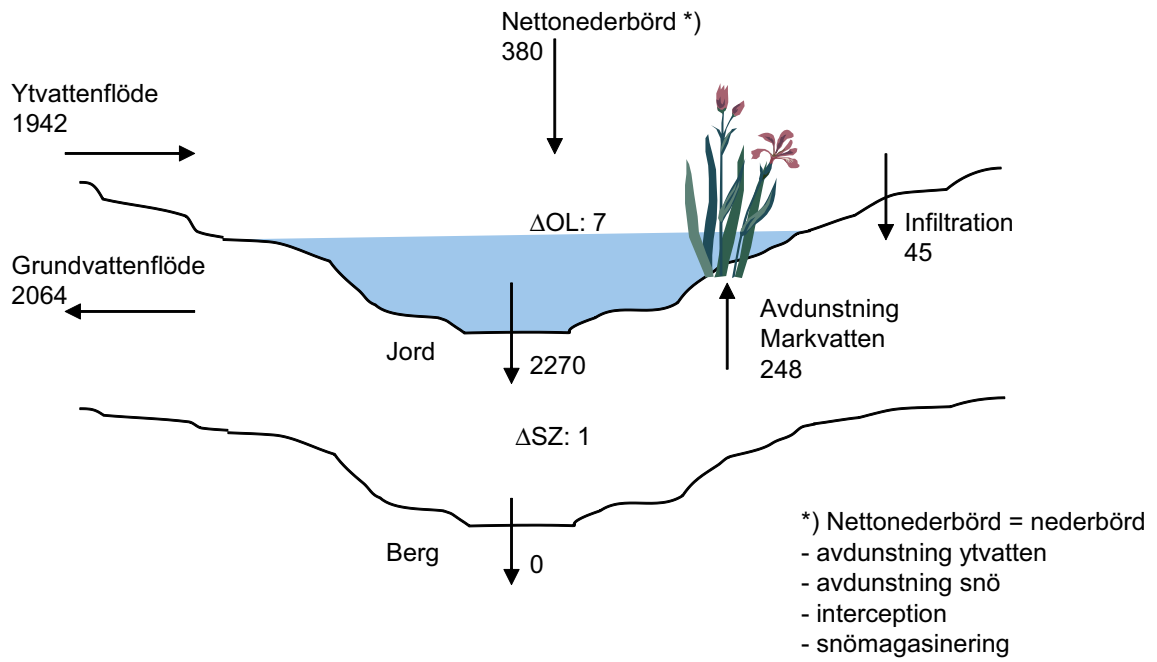
Figur A1-26. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 23 med öppet förvar, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.



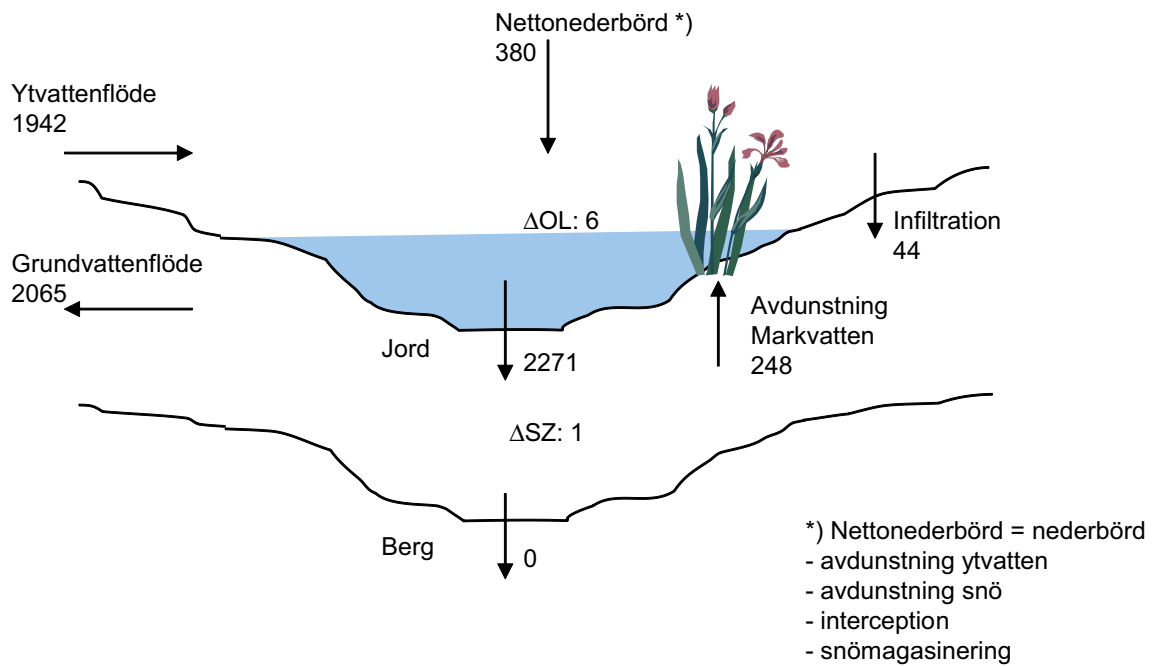
Figur A1-27. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 49 för opåverkade förhållanden.



Figur A1-28. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 49 med öppet förvar, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.



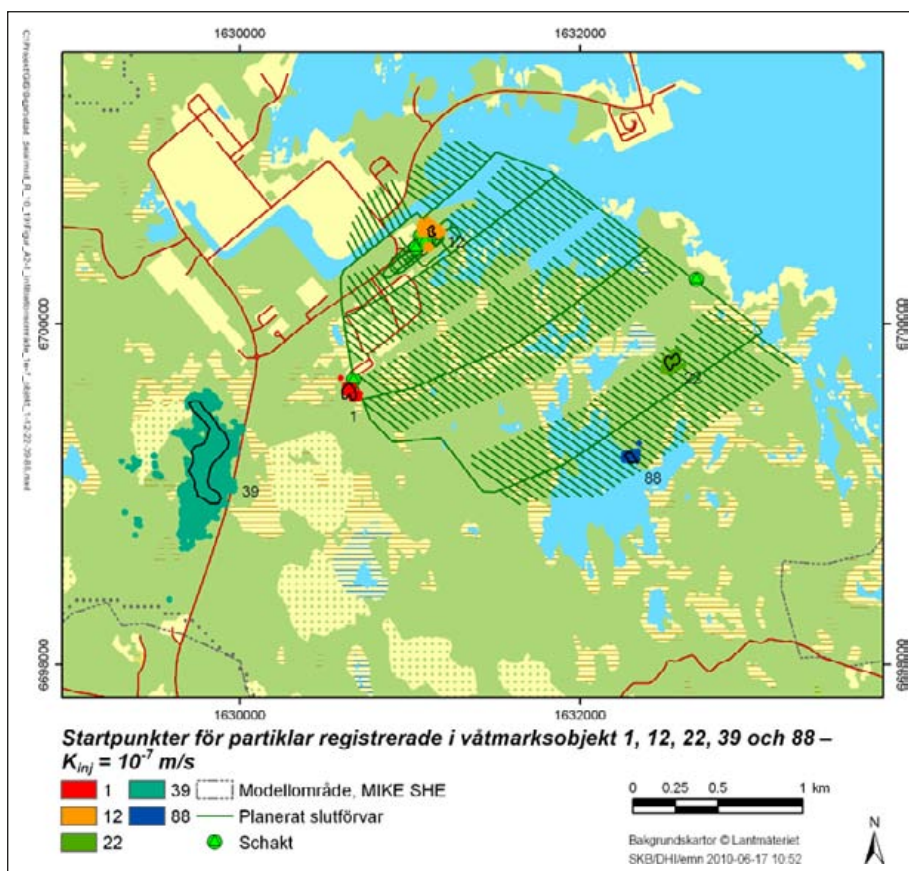
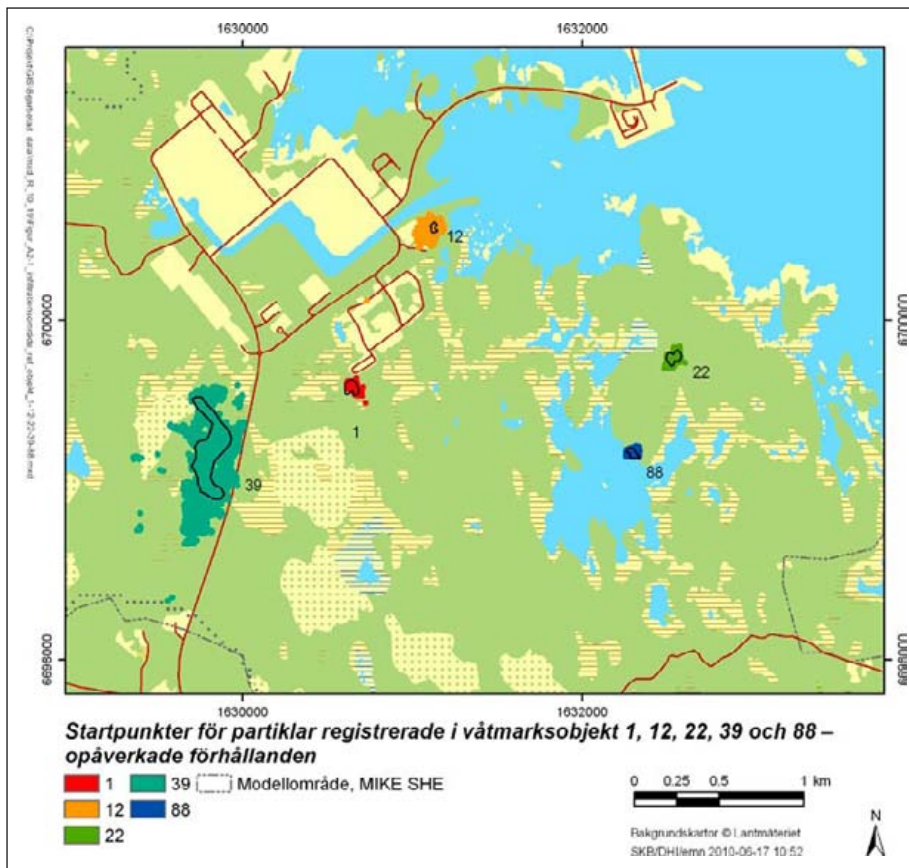
Figur A1-29. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 71 för opåverkade förhållanden.



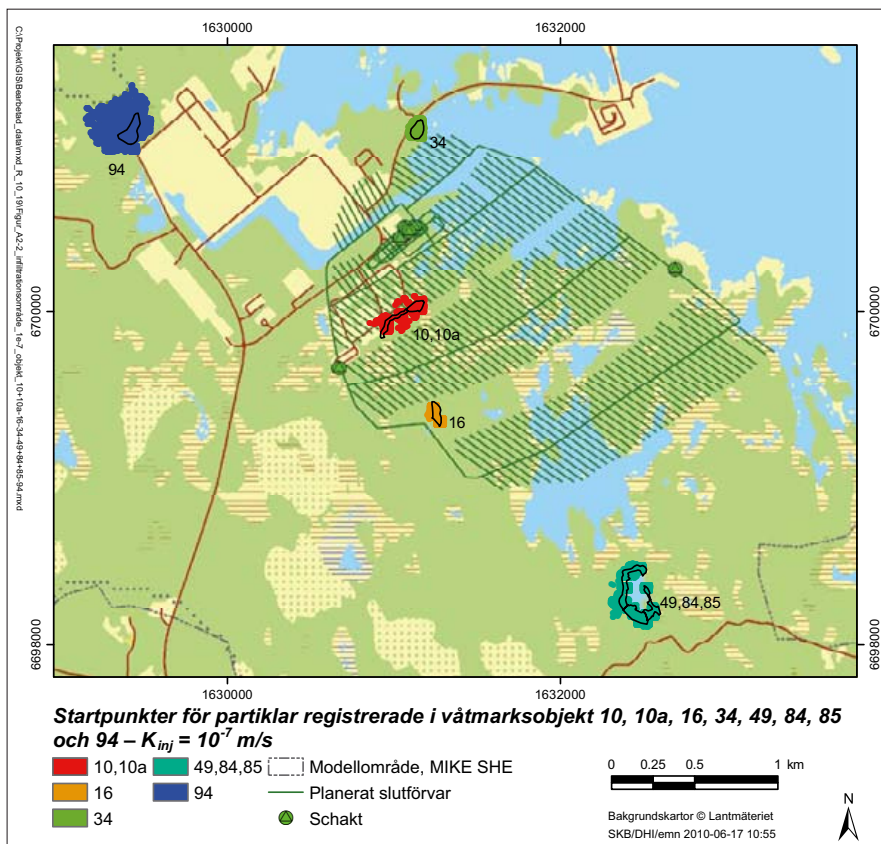
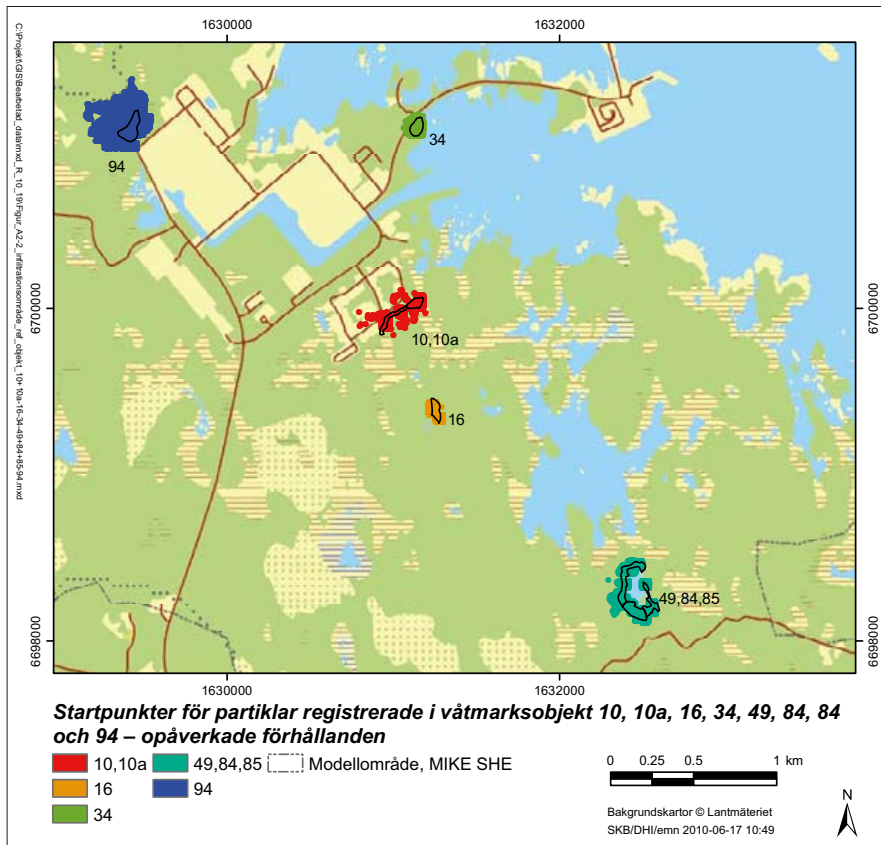
Figur A1-30. Modellberäknad vattenbalans för våtmarksobjekt 71 med öppet förvar, $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.

Avrinningsområden

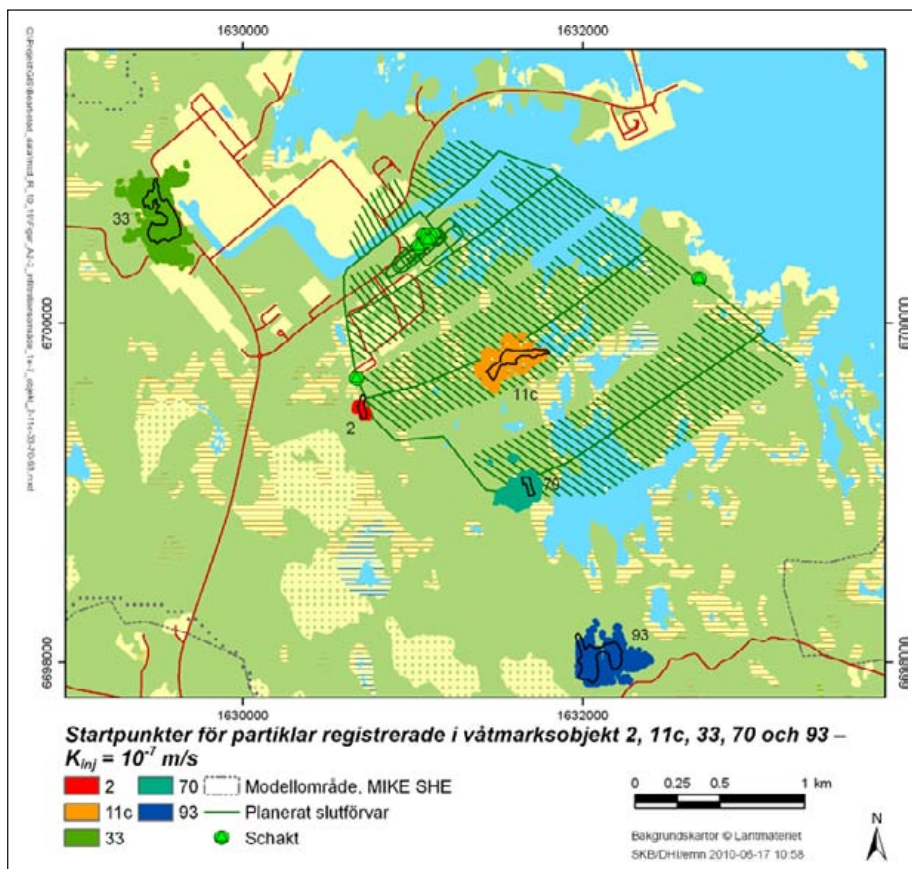
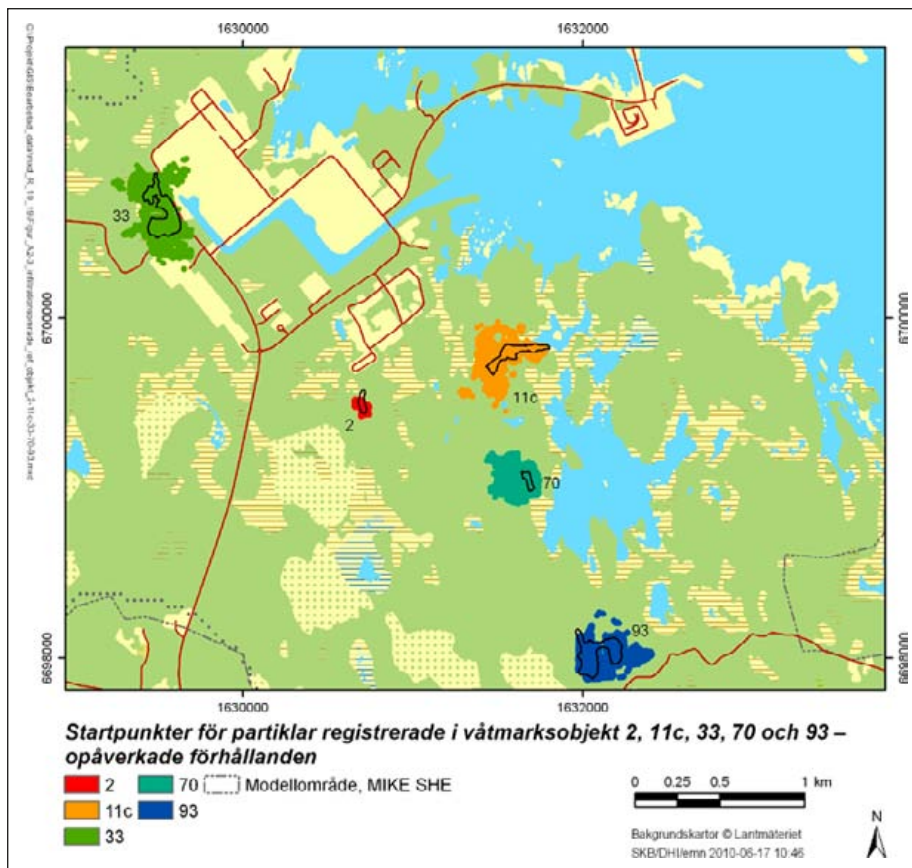
Figurerna A2-1 till A2-12 visar modellberäknade avrinningsområden för olika våtmarksobjekt under opåverkade förhållanden och med ett helt öppet förvar. Modellberäkningarna är gjorda för typåret 2006. I fallet med förvar är beräkningarna gjorda för tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. Resultaten presenteras även i tabell 6-4 i avsnitt 6.2.



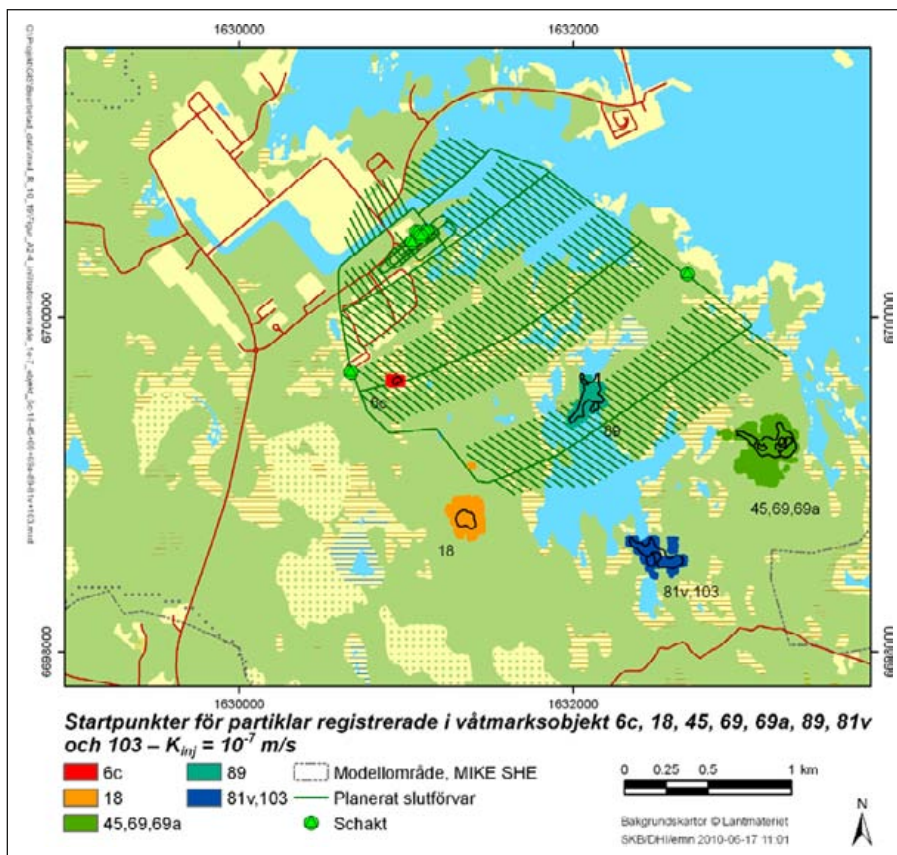
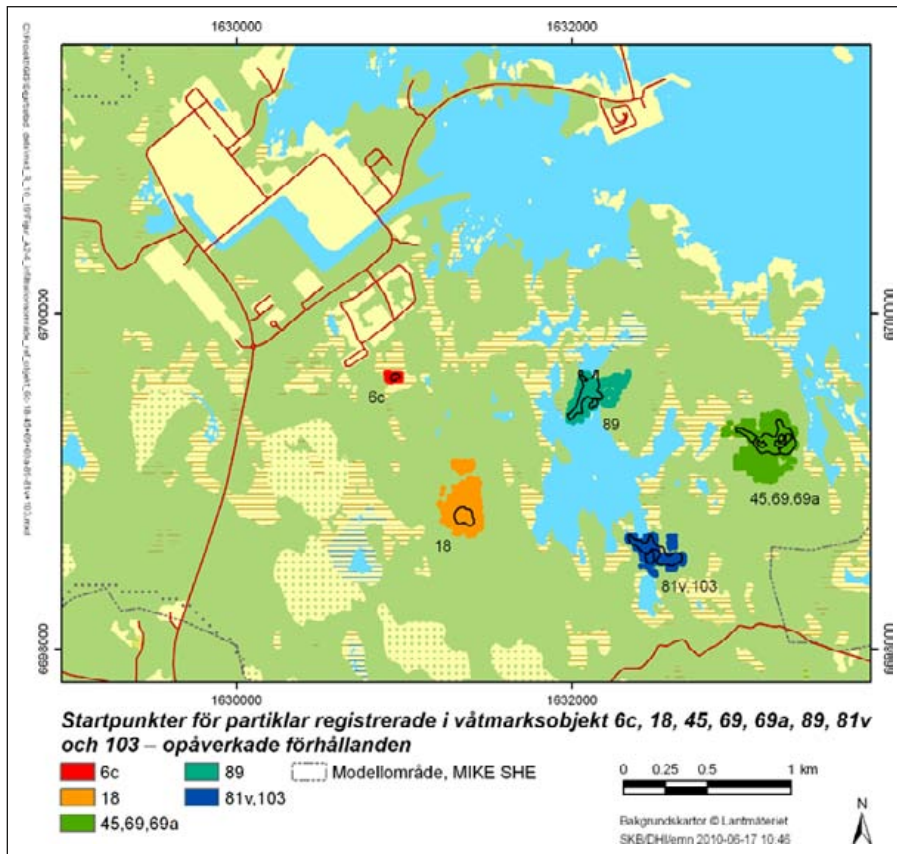
Figur A2-1. Modellberäknade avrinningsområden (typåret 2006) för våtmarksobjekten 1, 12, 22, 39, samt 88. Den övre bilden visar resultat för opåverkade förhållanden utan förvar. Den nedre bilden visar motsvarande resultat för påverkade förhållanden med förvar (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7} \text{ m/s}$).



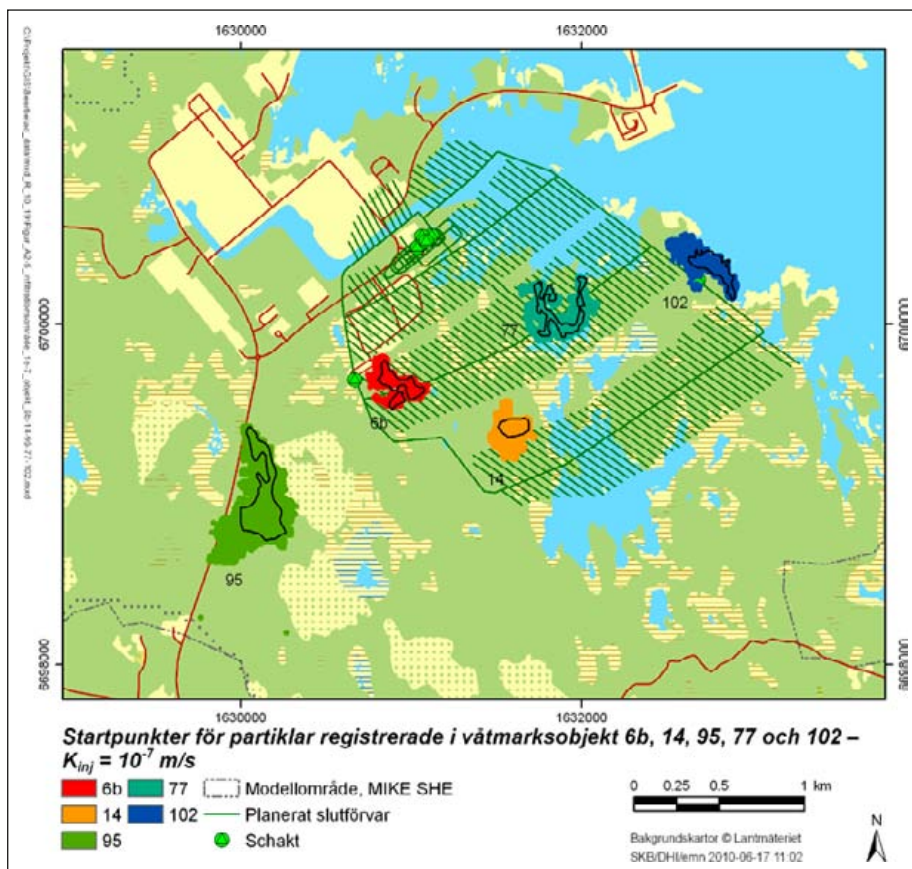
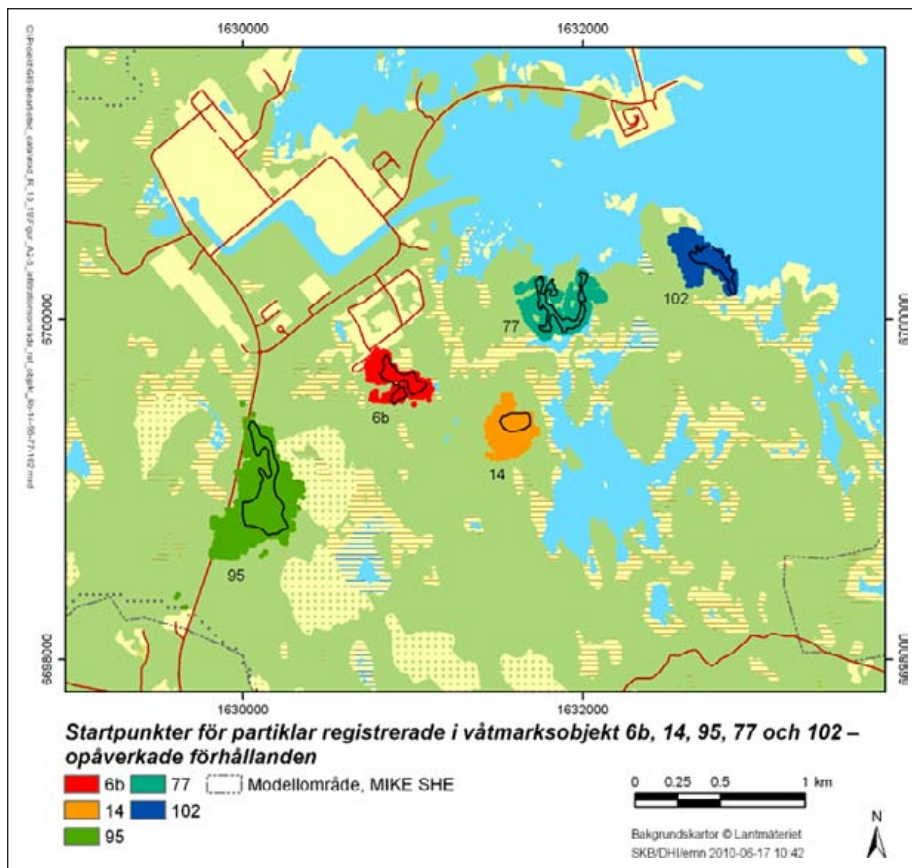
Figur A2-2. Modellberäknade avrinningsområden (typåret 2006) för våtmarksobjekten 10 och 10a, 16, 34, 49 och 84 och 85, samt 94. Den övre bilden visar resultat för opåverkade förhållanden utan förvar. Den nedre bilden visar motsvarande resultat för påverkade förhållanden med förvar (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7} \text{ m/s}$).



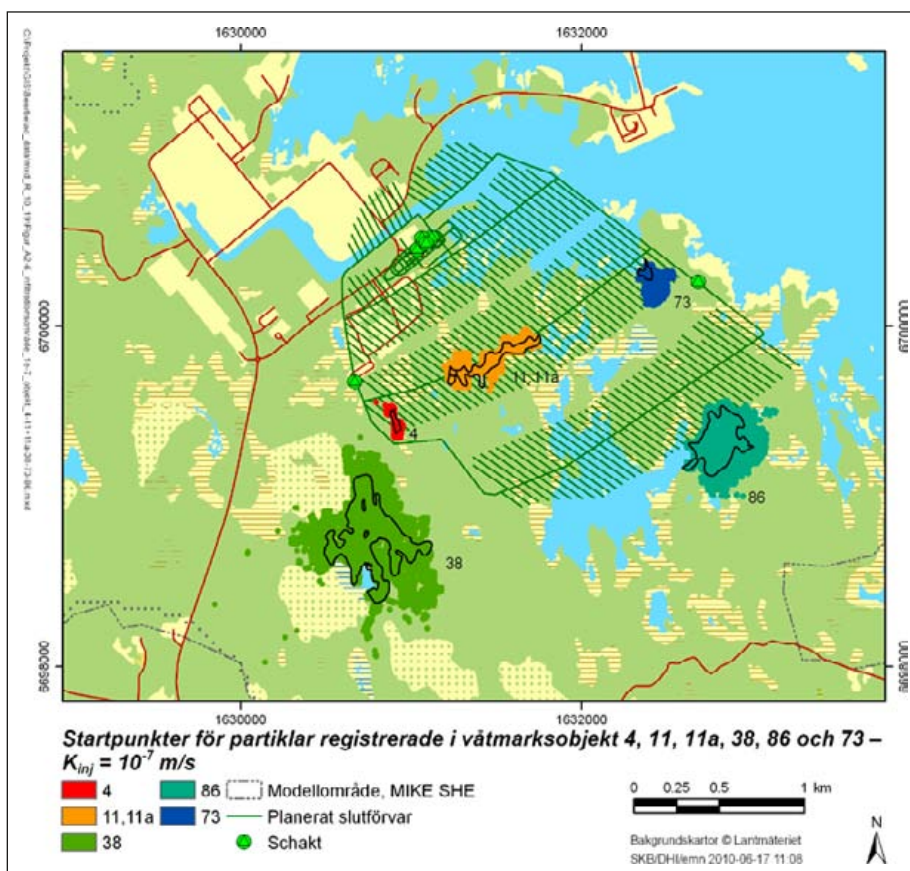
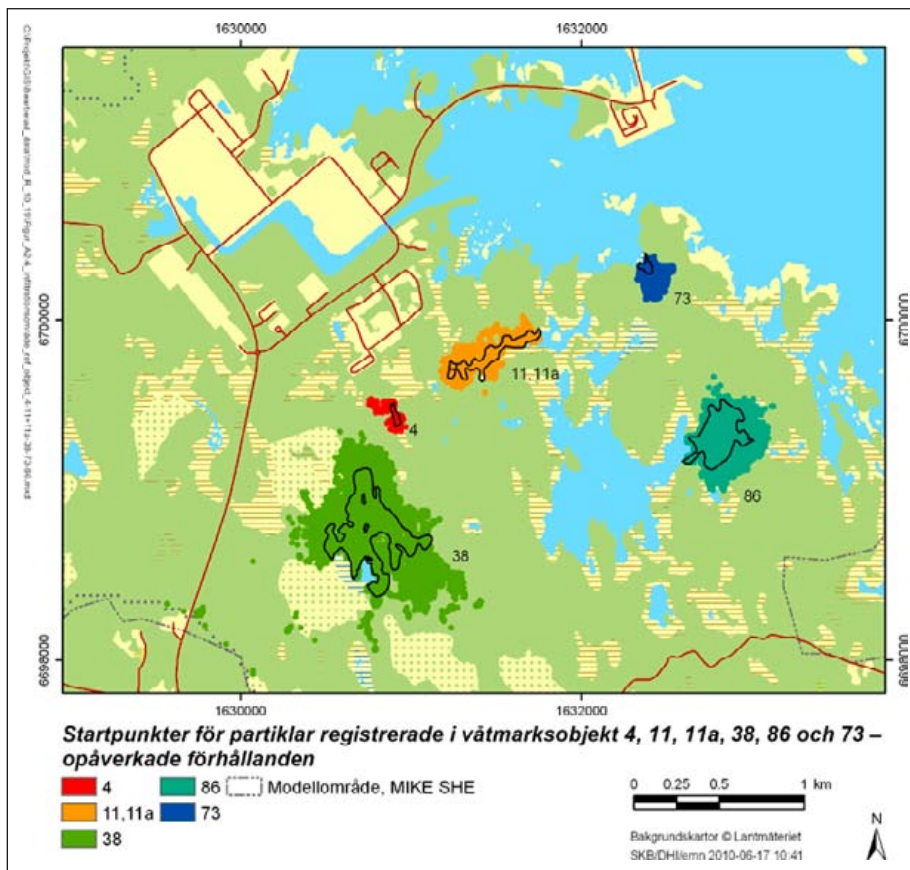
Figur A2-3. Modellberäknade avrinningsområden (typåret 2006) för våtmarksobjekten 2, 11c, 33, 70, samt 93. Den övre bilden visar resultat för opåverkade förhållanden utan förvar. Den nedre bilden visar motsvarande resultat för påverkade förhållanden med förvar (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s).



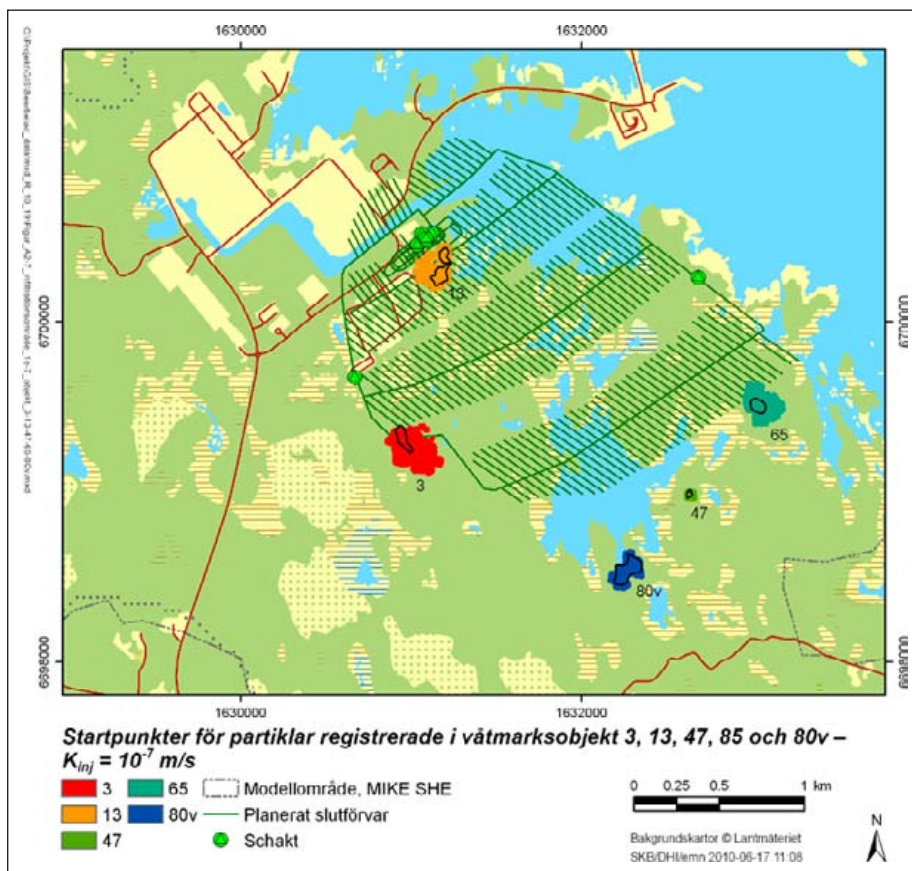
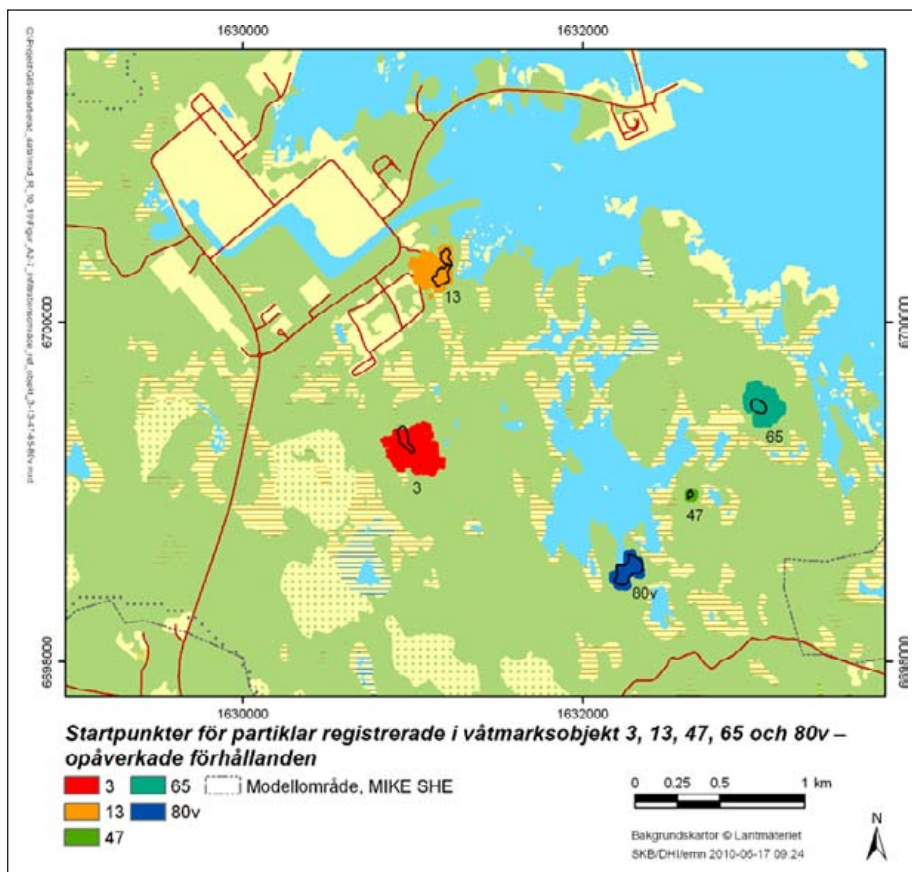
Figur A2-4. Modellberäknade avrinningsområden (typåret 2006) för våtmarksobjekten 6c, 18, 45 och 69 och 69a, 89, samt 81v och 103. Den övre bilden visar resultat för opåverkade förhållanden utan förvar. Den nedre bilden visar motsvarande resultat för påverkade förhållanden med förvar (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s).



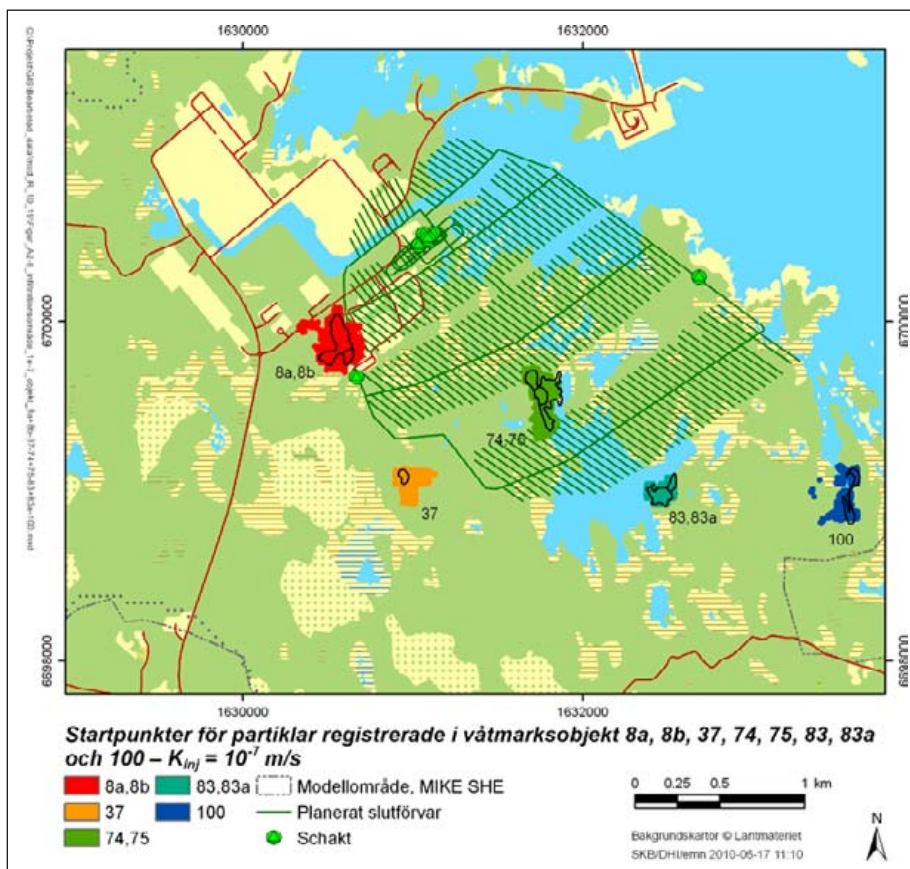
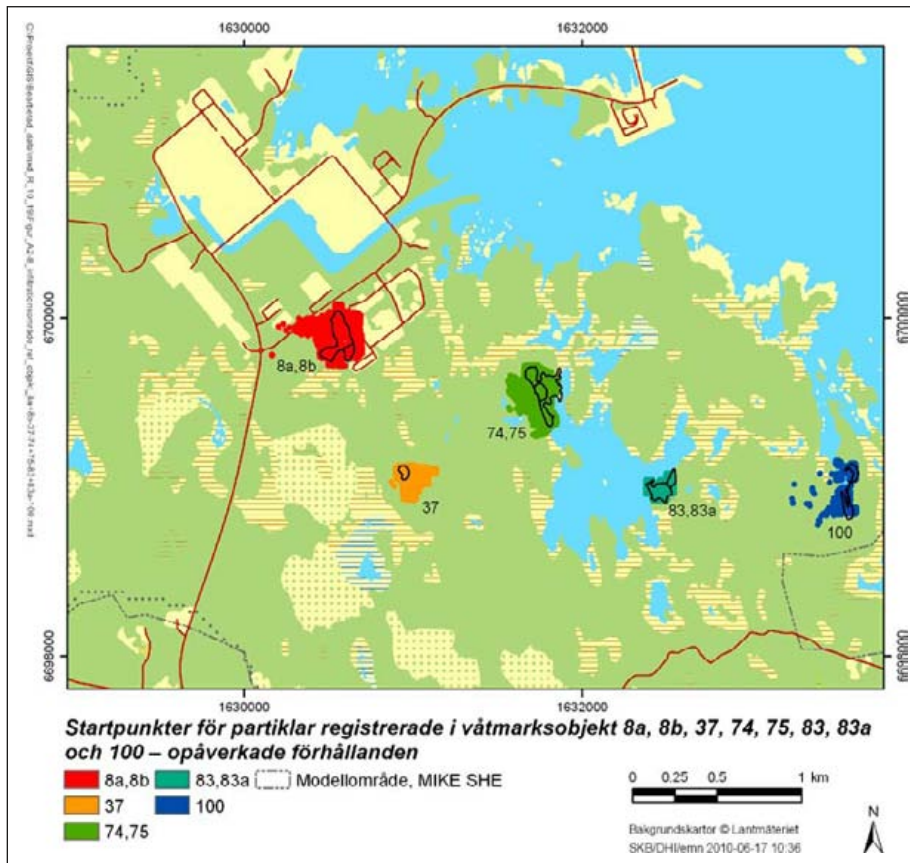
Figur A2-5. Modellberäknade avrinningsområden (typåret 2006) för våtmarksobjekten 6b, 14, 77, 95, samt 102. Den övre bilden visar resultat för opåverkade förhållanden utan förvar. Den nedre bilden visar motsvarande resultat för påverkade förhållanden med förvar (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7} \text{ m/s}$).



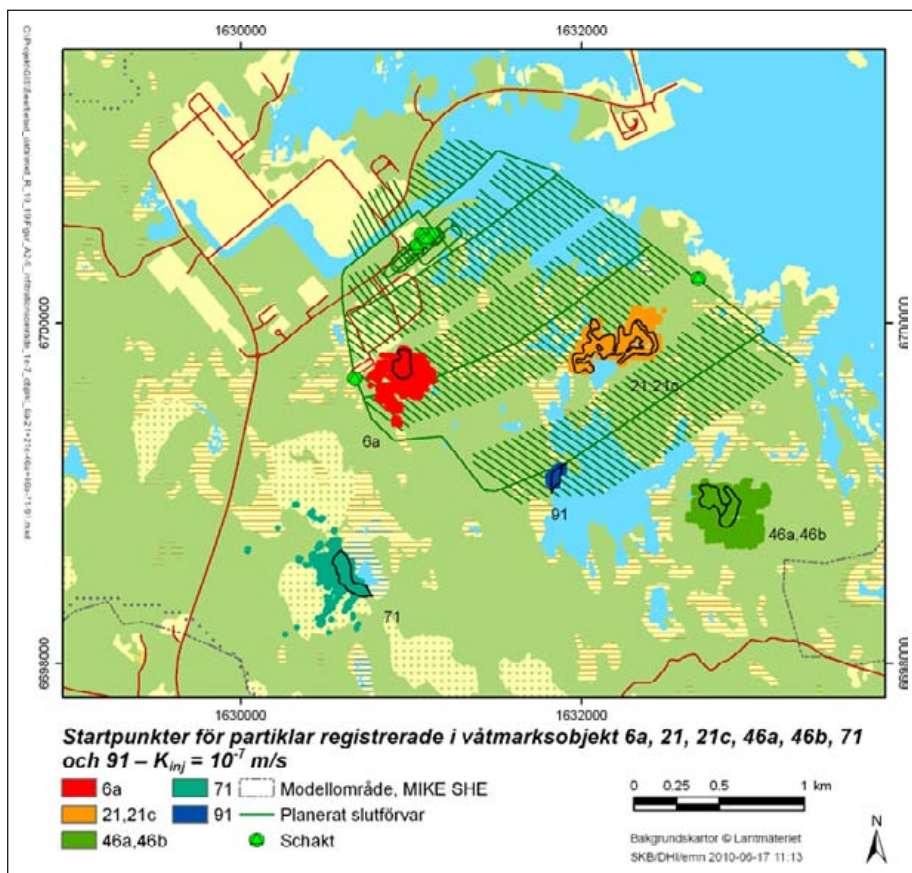
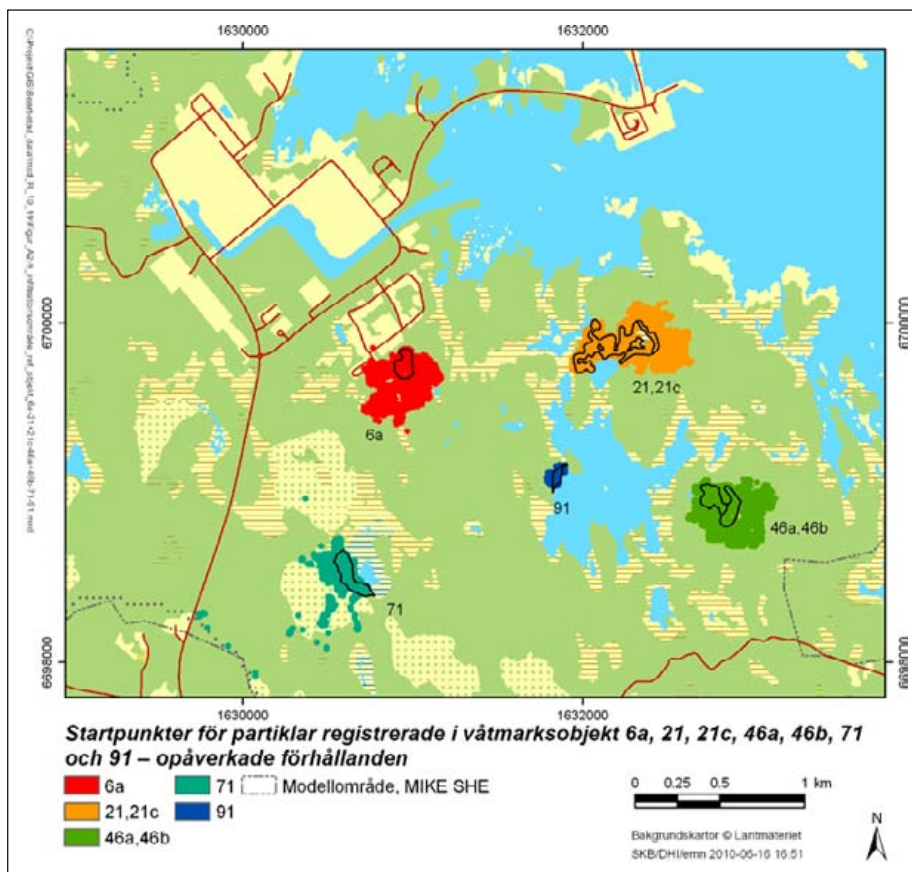
Figur A2-6. Modellberäknade avrinningsområden (typåret 2006) för våtmarksobjekten 4, 11 och 11a, 38, 73, samt 86. Den övre bilden visar resultat för opåverkade förhållanden utan förvar. Den nedre bilden visar motsvarande resultat för påverkade förhållanden med förvar (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s).



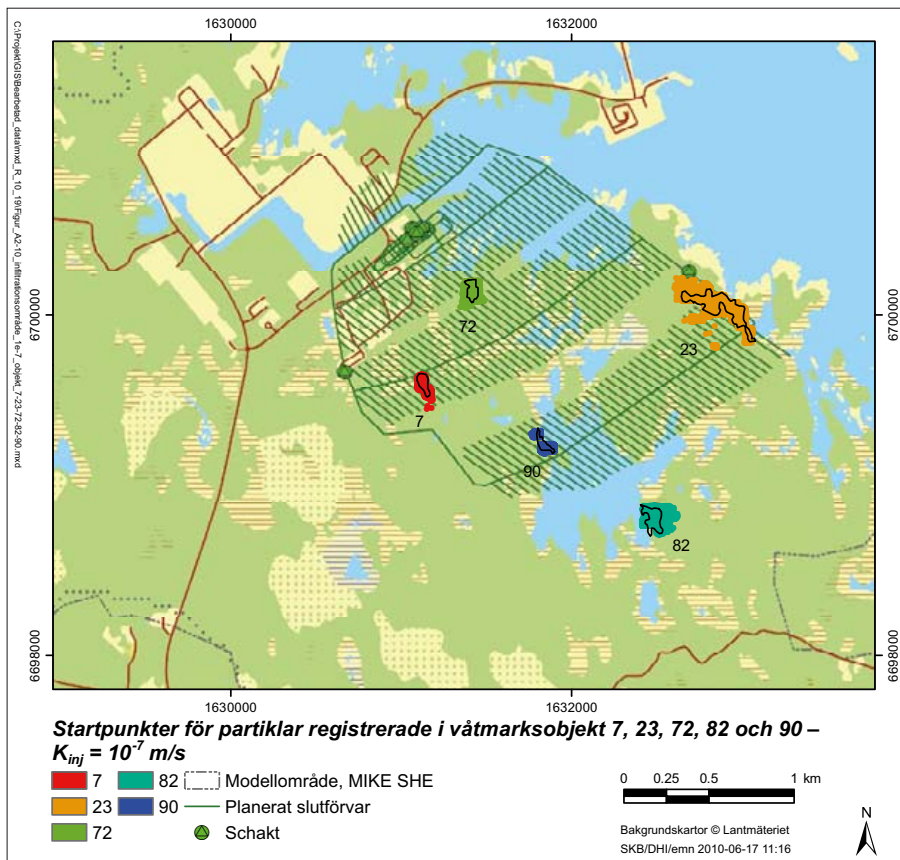
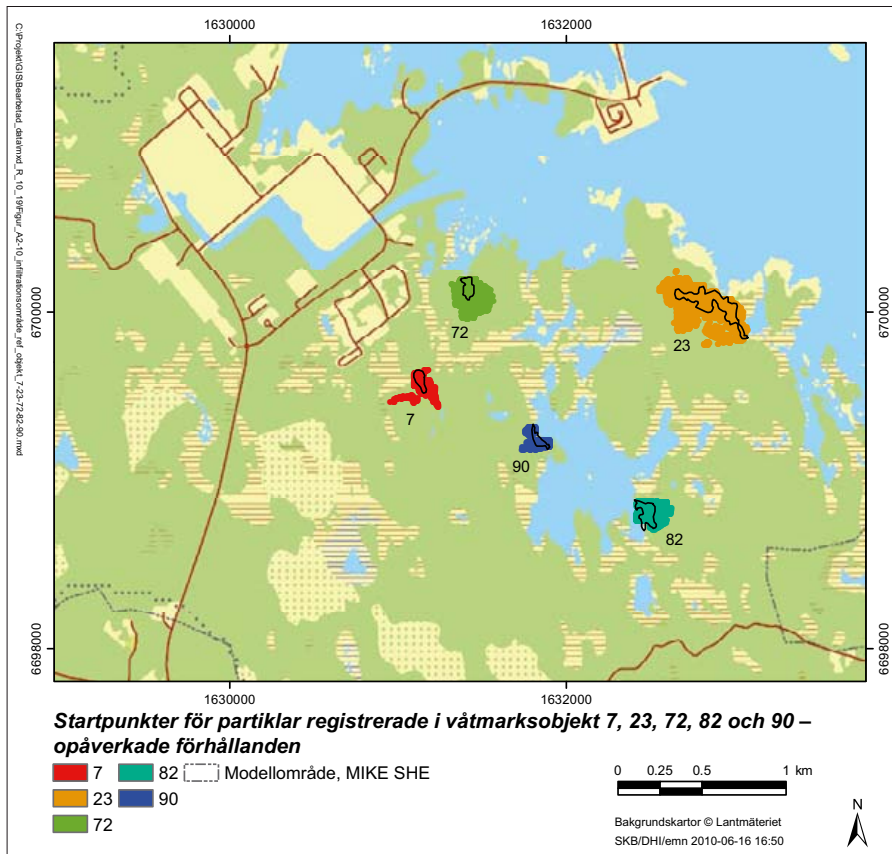
Figur A2-7. Modellberäknade avrinningsområden (typåret 2006) för våtmarksobjekten 3, 13, 47, 65, samt 80v. Den övre bilden visar resultat för opåverkade förhållanden utan förvar. Den nedre bilden visar motsvarande resultat för påverkade förhållanden med förvar (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7} \text{ m/s}$).



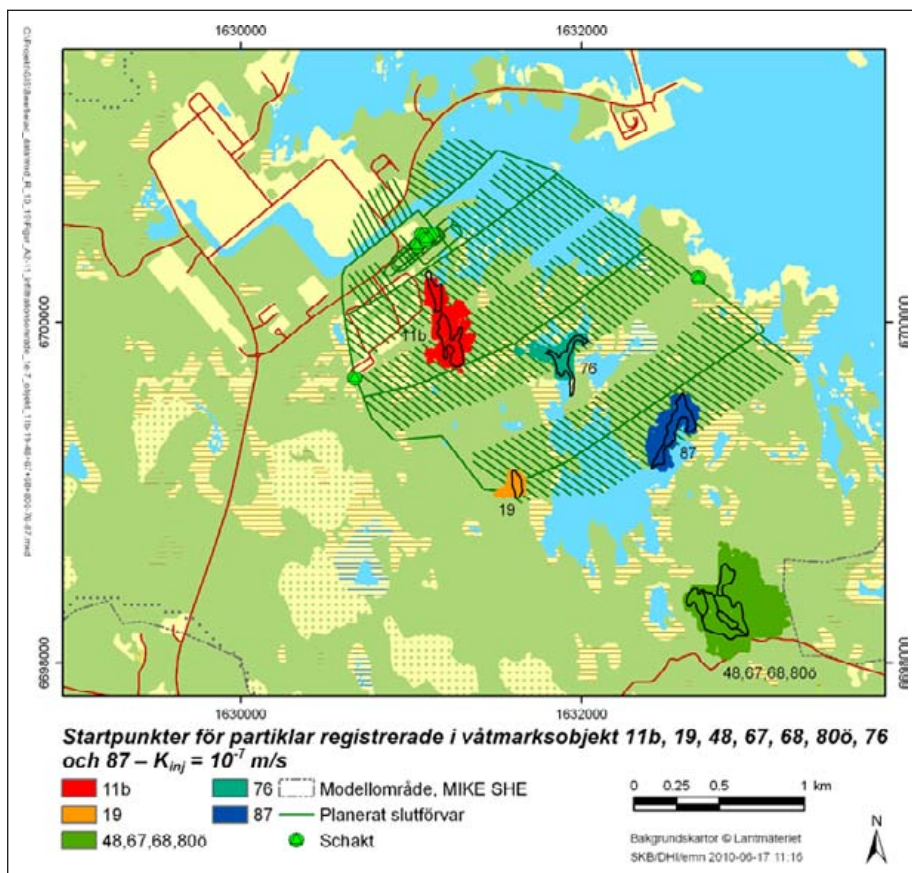
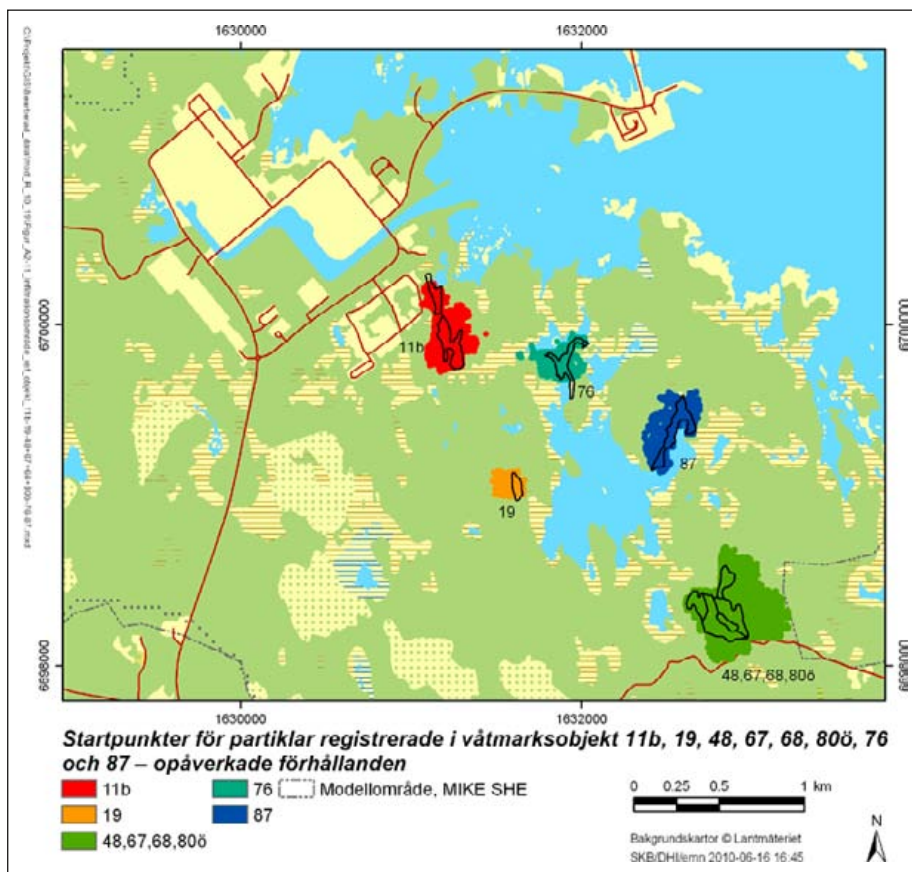
Figur A2-8. Modellberäknade avrinningsområden (typåret 2006) för våtmarksobjekten 8a och 8b, 37, 74 och 75, 83 och 83a, samt 100. Den övre bilden visar resultat för opåverkade förhållanden utan förvar. Den nedre bilden visar motsvarande resultat för påverkade förhållanden med förvar (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s).



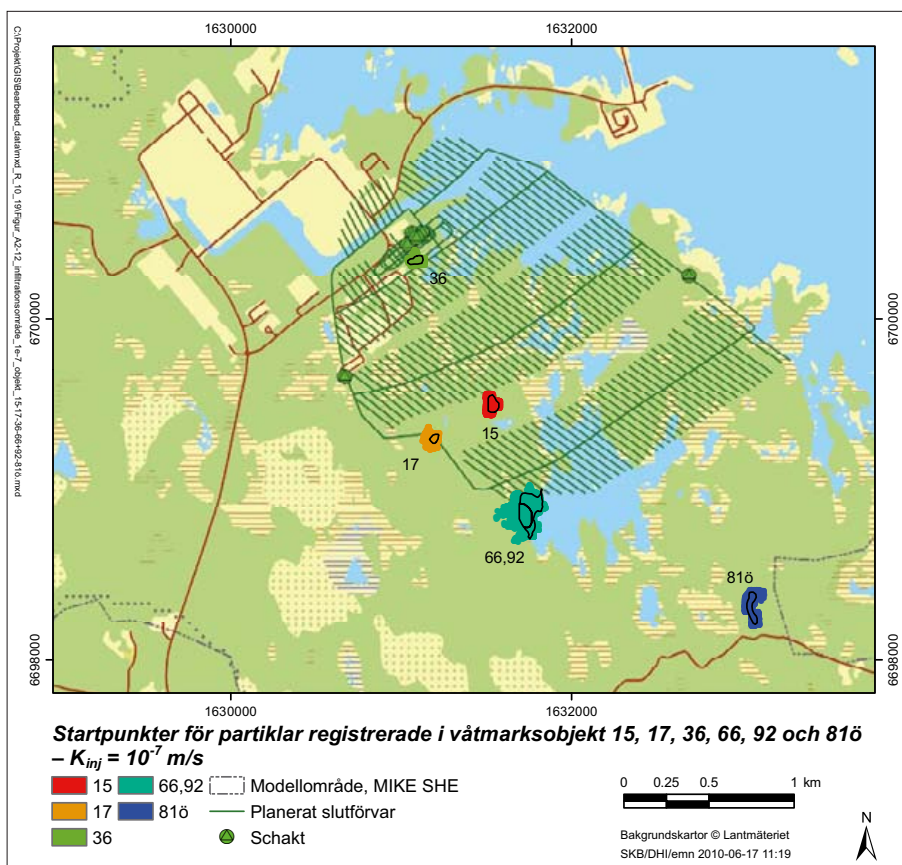
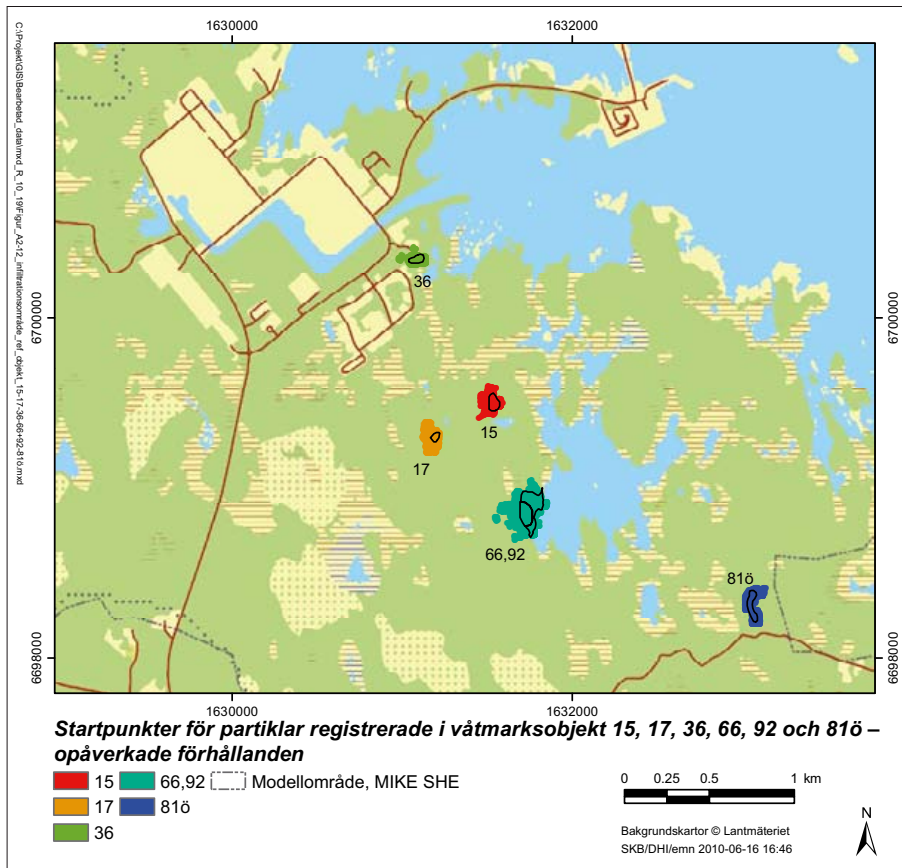
Figur A2-9. Modellberäknade avrinningsområden (typåret 2006) för våtmarksobjekten 6a, 21 och 21c, 46a och 46b, 71, samt 91. Den övre bilden visar resultat för opåverkade förhållanden utan förvar. Den nedre bilden visar motsvarande resultat för påverkade förhållanden med förvar (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s).



Figur A2-10. Modellberäknade avrinningsområden (typåret 2006) för våtmarksobjekten 7, 23, 72, 82, samt 90. Den övre bilden visar resultat för opåverkade förhållanden utan förvar. Den nedre bilden visar motsvarande resultat för påverkade förhållanden med förvar (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7} \text{ m/s}$).



Figur A2-11. Modellberäknade avrinningsområden (typåret 2006) för våtmarksobjekten 11b, 19, 48 och 67 och 68 och 80ö, 76, samt 87. Den övre bilden visar resultat för opåverkade förhållanden utan förvar. Den nedre bilden visar motsvarande resultat för påverkade förhållanden med förvar (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7} \text{ m/s}$).



Figur A2-12. Modellberäknade avrinningsområden (typåret 2006) för våtmarksobjekten 15, 17, 36, 66 och 92, samt 81ö. Den övre bilden visar resultat för opåverkade förhållanden utan förvar. Den nedre bilden visar motsvarande resultat för påverkade förhållanden med förvar (tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s).

Vertikalt flöde i jord- och berglager

I tabellerna A3-1 och A3-2 redovisas den procentuella fördelningen mellan beräkningslagren för de partiklar som når varje enskilt våtmarksobjekt. Resultaten för respektive våtmarksobjekt är sammanfattade i tabell 6-5 i rapporten. I figurerna A3-1 till A3-10 visas startpunkten i respektive beräkningslager (lager 1–20) för de partiklar som når slutförvarsanläggningen. Beräkningarna avser ett helt öppet förvar och tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s.

Tabell A3-1. Resultat av partikelspårning från jordlager (lager 1–2) och berglager (lager 3–20) till utvalda våtmarksobjekt för opåverkade förhållanden. Resultaten avser % av det totala antalet partiklar.

Objekt	1	2	3	4	6a	6b	6c	7	8a, 8b	9	10, 10a	11, 11a	11b	11c
Lager 1	60	80	45	45	67	44	60	28	38	56	27	36	45	23
Lager 2	40	20	39	55	33	43	40	38	29	30	62	38	39	34
Lager 3	0	0	16	0	0	13	0	34	15	9	11	26	16	43
Lager 4	0	0	0	0	0	0	0	0	13	5	0	0	0	0
Lager 5	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0
Lager 6–20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totalt antal partiklar per objekt	10	10	51	29	78	104	5	32	170	64	73	137	146	247

Tabell A3-1. Forts.

Objekt	12	13	14	15	16	17	18	19	21, 21c	22	23	33	34	36
Lager 1	57	41	58	71	91	78	38	45	49	100	43	7	53	39
Lager 2	43	33	42	29	9	22	32	55	46	0	32	7	47	61
Lager 3	0	22	0	0	0	0	21	0	5	0	22	7	0	0
Lager 4	0	3	0	0	0	0	9	0	0	0	3	7	0	0
Lager 5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	5	0	0
Lager 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0
Lager 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0
Lager 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0
Lager 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0
Lager 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0
Lager 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
Lager 12–20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totalt antal partiklar per objekt	23	63	72	7	22	9	112	20	197	8	133	1 039	15	18

Tabell A3-1. Forts.

Objekt	37	38	39	46a, 46b	47	45, 69, 69a	48, 67, 68, 80ö	49, 84, 85	65	66, 92	70	71	72	73
Lager 1	50	5	7	59	33	59	54	37	51	18	52	3	42	43
Lager 2	38	5	8	27	33	35	35	52	49	45	37	6	44	27
Lager 3	13	7	15	10	33	6	9	11	0	22	12	10	14	30
Lager 4	0	10	22	4	0	0	2	0	0	5	0	13	0	0
Lager 5	0	13	23	0	0	0	0	0	0	1	0	16	0	0
Lager 6	0	14	17	0	0	0	0	0	0	3	0	20	0	0
Lager 7	0	14	7	0	0	0	0	0	0	3	0	17	0	0
Lager 8	0	13	1	0	0	0	0	0	0	3	0	12	0	0
Lager 9	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0
Lager 10	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Lager 11	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lager 12–20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totalt antal partiklar per objekt	16	7 782	2 040	134	6	88	211	54	43	141	104	2 344	66	44

Tabell A3-1. Forts.

Objekt	74, 75	76	77	80V	81Ö	81V, 103	82	83, 83a	86	87	88	89	90	91
Lager 1	20	13	24	24	79	14	13	67	30	28	100	20	50	100
Lager 2	34	34	34	16	21	25	7	33	27	46	0	32	25	0
Lager 3	36	44	34	31	0	21	1	0	25	26	0	29	25	0
Lager 4	10	9	8	29	0	22	3	0	16	1	0	20	0	0
Lager 5	0	0	0	0	0	18	7	0	2	0	0	0	0	0
Lager 6	0	0	0	0	0	0	12	0	1	0	0	0	0	0
Lager 7	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0
Lager 8	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0
Lager 9	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0
Lager 10	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0
Lager 11	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0
Lager 12–20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totalt antal partiklar per objekt	203	139	250	49	14	149	149	15	447	160	5	132	8	7

Tabell A3-1. Forts.

Objekt	93	94	95	100	102
Lager 1	3	73	17	37	40
Lager 2	4	21	17	44	31
Lager 3	3	6	18	15	26
Lager 4	4	0	22	5	3
Lager 5	9	0	12	0	0
Lager 6	11	0	6	0	0
Lager 7	14	0	7	0	0
Lager 8	14	0	1	0	0
Lager 9	13	0	0	0	0
Lager 10	13	0	0	0	0
Lager 11	6	0	0	0	0
Lager 12	4	0	0	0	0
Lager 13–20	0	0	0	0	0
Totalt antal partiklar per objekt	1 831	71	935	41	94

Tabell A3-2. Resultat av partikelspårning från jordlager (lager 1–2) och berglager (lager 3–20) till utvalda våtmarksobjekt för påverkade förhållanden, avseende ett helt öppet förvar och tätningsfallet $K_{inj} = 10^{-7}$ m/s. Resultaten avser % av det totala antalet partiklar.

Objekt	1	2	3	4	6a	6b	6c	7	8a, 8b	9	10, 10a	11, 11a	11b	11c
Lager 1	100	100	74	100	67	62	100	80	81	86	52	87	84	51
Lager 2	0	0	26	0	33	38	0	20	19	14	48	13	16	49
Lager 3–20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totalt antal partiklar per objekt	2	3	31	8	78	60	3	5	62	43	33	47	62	59

Tabell A3-2. Forts.

Objekt	12	13	14	15	16	17	18	19	21, 21c	22	23	33	34	36
Lager 1	100	93	84	100	86	100	66	78	72	100	100	32	75	42
Lager 2	0	7	16	0	14	0	34	22	28	0	0	22	25	58
Lager 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0
Lager 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0
Lager 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0
Lager 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0
Lager 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0
Lager 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Lager 9–20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totalt antal partiklar per objekt	3	27	44	4	29	10	53	9	93	7	54	220	12	12

Tabell A3-2. Forts.

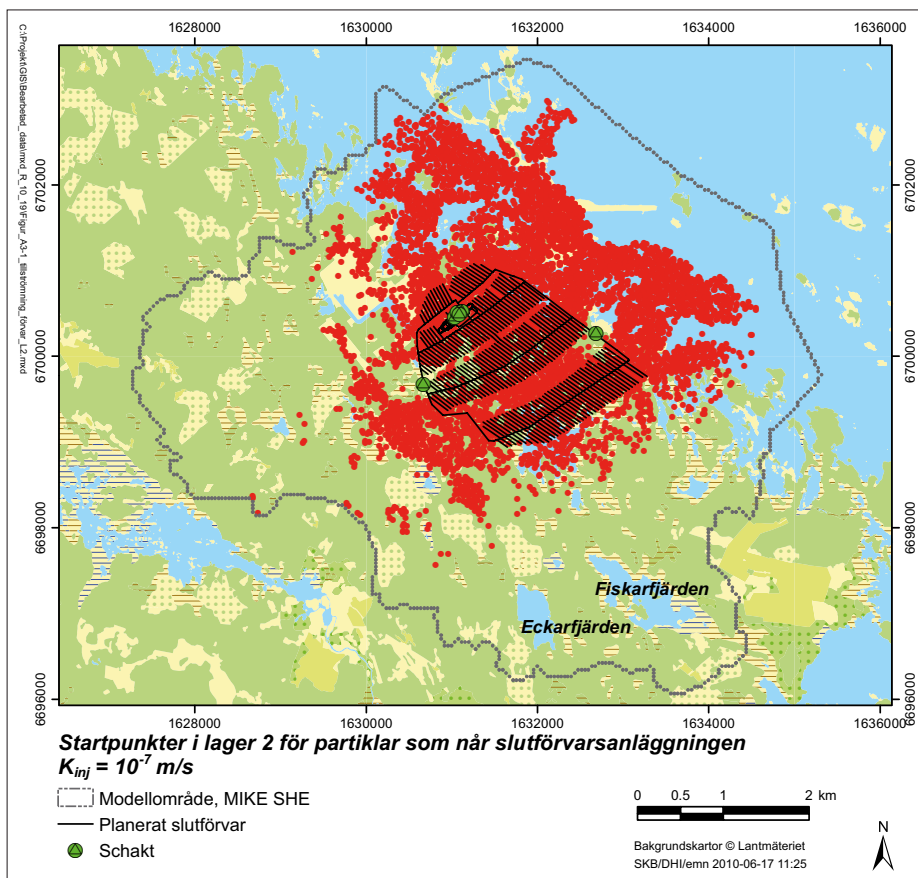
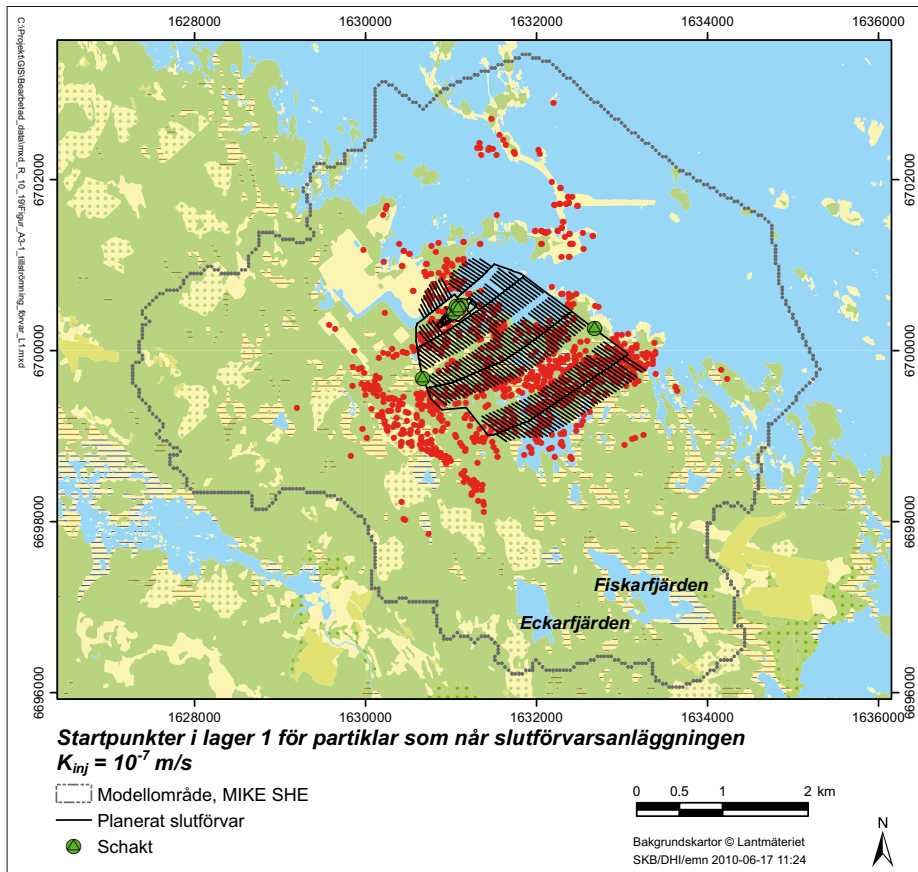
Objekt	37	38	39	46a, 46b	47	45, 69, 69a	48, 67, 68, 80ö	49, 84, 85	65	66, 92	70	71	72	73
Lager 1	100	43	21	83	100	87	69	41	78	46	62	15	78	89
Lager 2	0	28	19	12	0	13	31	59	22	54	38	35	22	11
Lager 3	0	21	28	4	0	0	0	0	0	0	0	38	0	0
Lager 4	0	8	25	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0
Lager 5	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lager 6–20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totalt antal partiklar per objekt	10	611	719	89	1	60	177	46	27	63	45	389	18	18

Tabell A3-2. Forts.

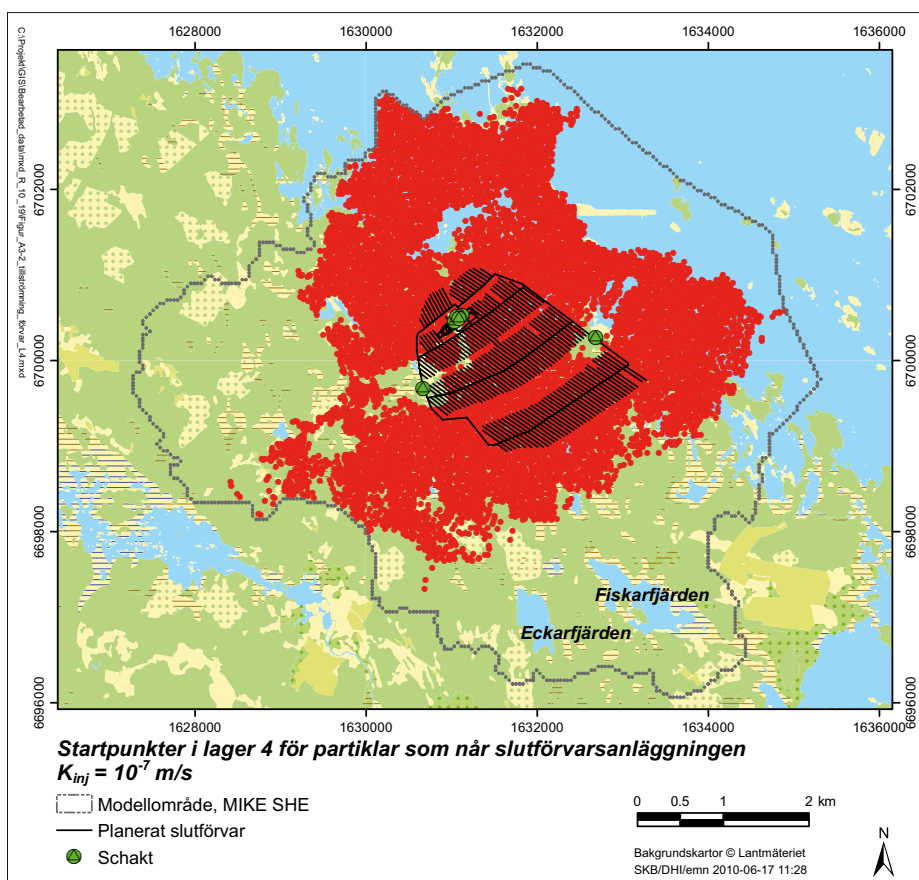
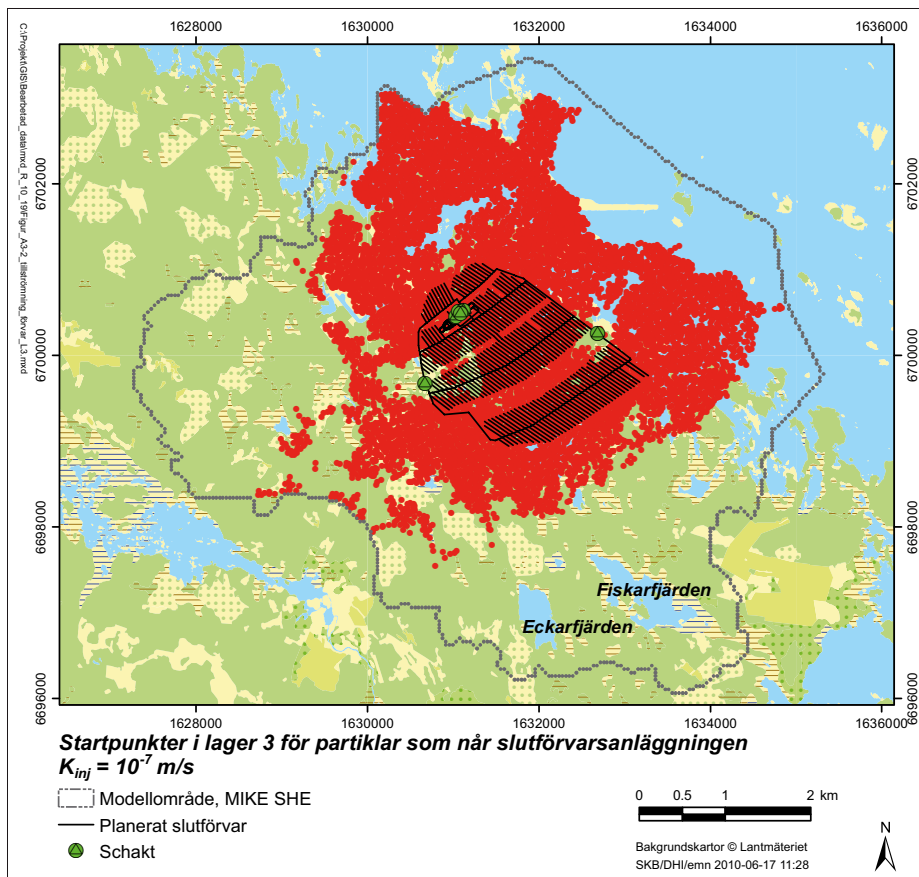
Objekt	74, 75	76	77	80V	81Ö	81V, 103	82	83, 83a	86	87	88	89	90	91
Lager 1	72	85	51	56	100	43	72	83	67	58	100	76	100	100
Lager 2	28	15	49	44	0	49	28	17	33	42	0	24	0	0
Lager 3	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0
Lager 4–20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totalt antal partiklar per objekt	39	20	95	25	8	53	25	12	222	57	4	21	3	5

Tabell A3-2. Forts. I tabellen anges även partikelspårningsresultat för slutförvarsanläggningen.

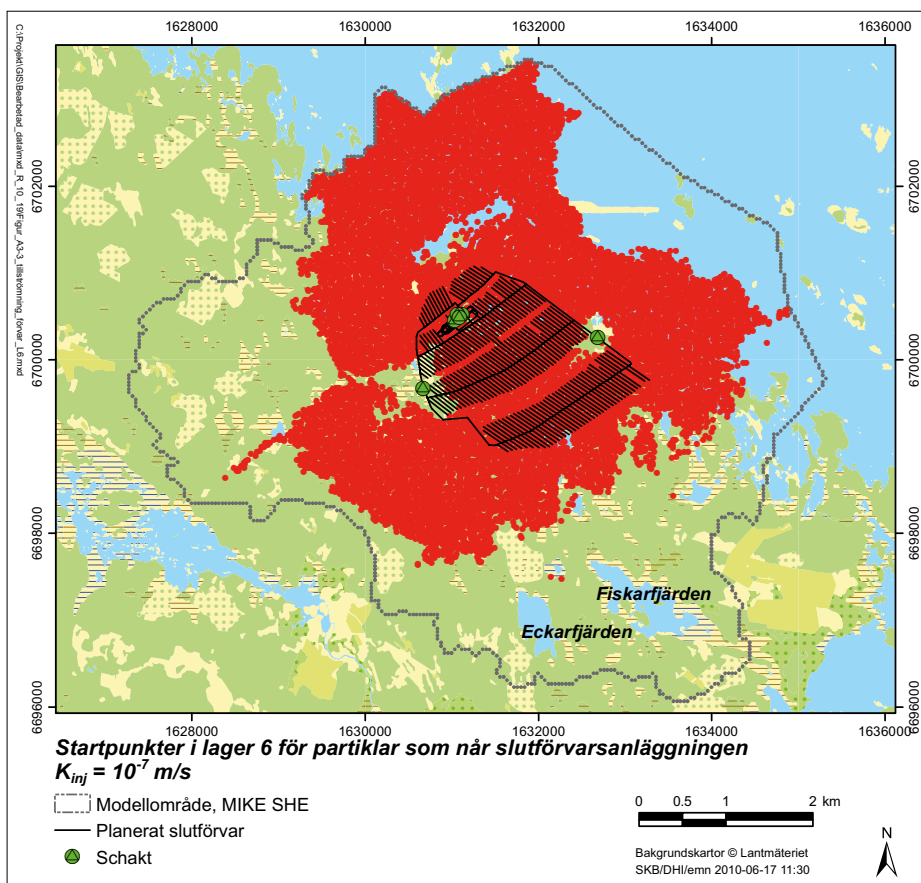
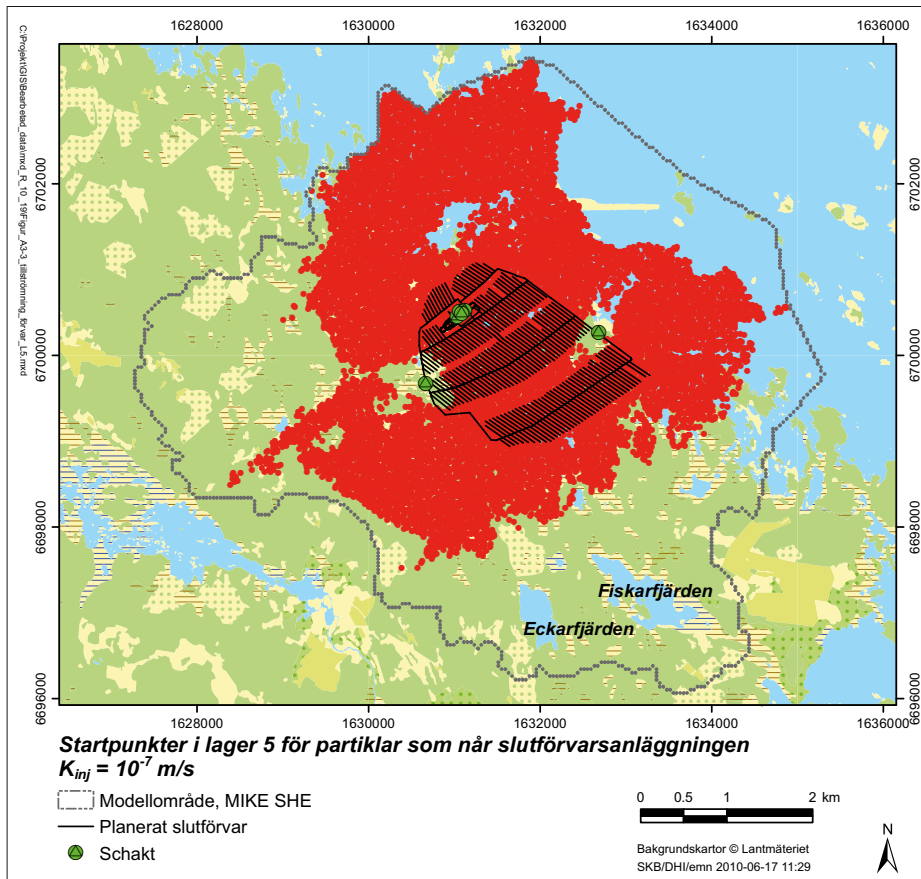
Objekt	93	94	95	100	102	Slutförvarsanläggningen
Lager 1	13	67	46	49	95	1
Lager 2	13	33	37	43	5	3
Lager 3	11	0	10	8	0	5
Lager 4	15	0	7	0	0	6
Lager 5	17	0	0	0	0	6
Lager 6	18	0	0	0	0	6
Lager 7	9	0	0	0	0	6
Lager 8	3	0	0	0	0	6
Lager 9	0	0	0	0	0	6
Lager 10	0	0	0	0	0	6
Lager 11	0	0	0	0	0	6
Lager 12	0	0	0	0	0	6
Lager 13	0	0	0	0	0	6
Lager 14	0	0	0	0	0	5
Lager 15	0	0	0	0	0	6
Lager 16	0	0	0	0	0	5
Lager 17	0	0	0	0	0	5
Lager 18	0	0	0	0	0	4
Lager 19	0	0	0	0	0	4
Lager 20	0	0	0	0	0	3
Totalt antal partiklar per objekt	460	72	291	37	41	186 603



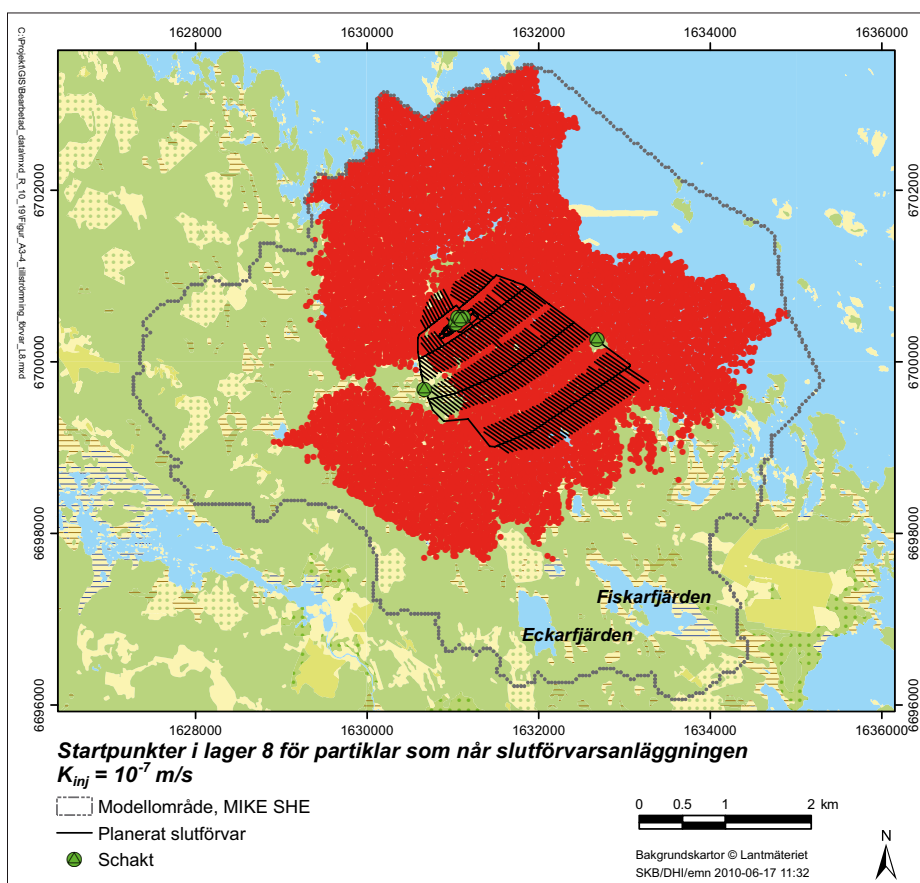
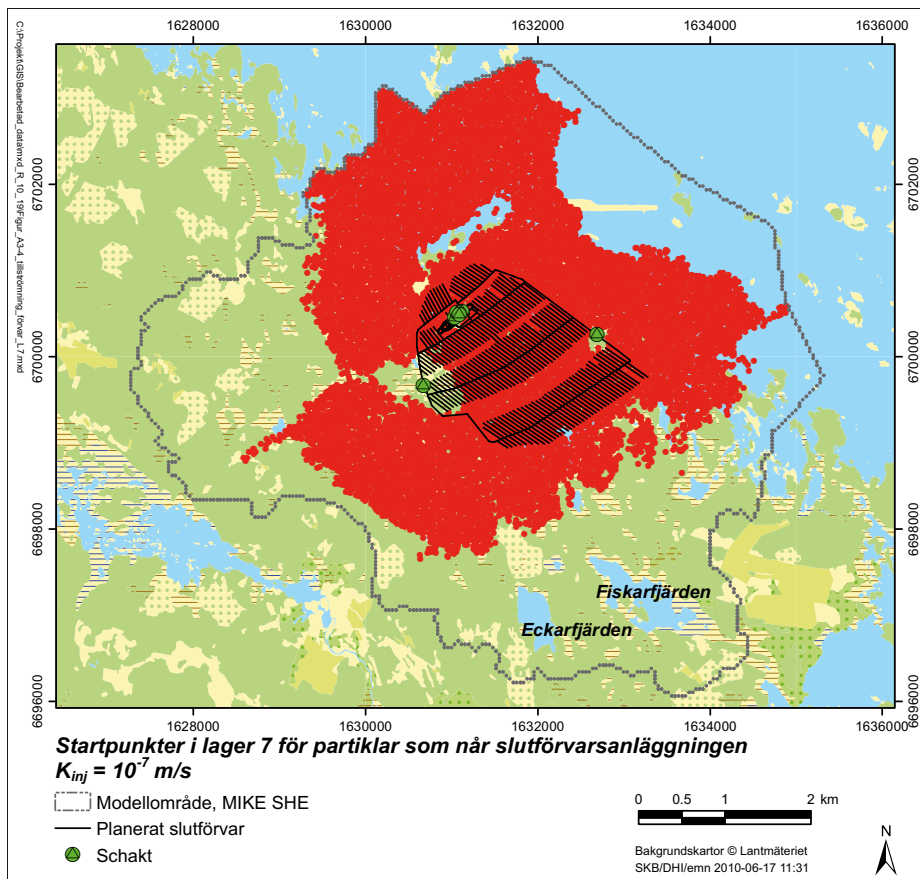
Figur A3-1. Startpunkter för partiklar som släpps i lager 1 (övre bilden) och lager 2 (undre bilden) och har sina slutpunkter i slutförvarsanläggningen.



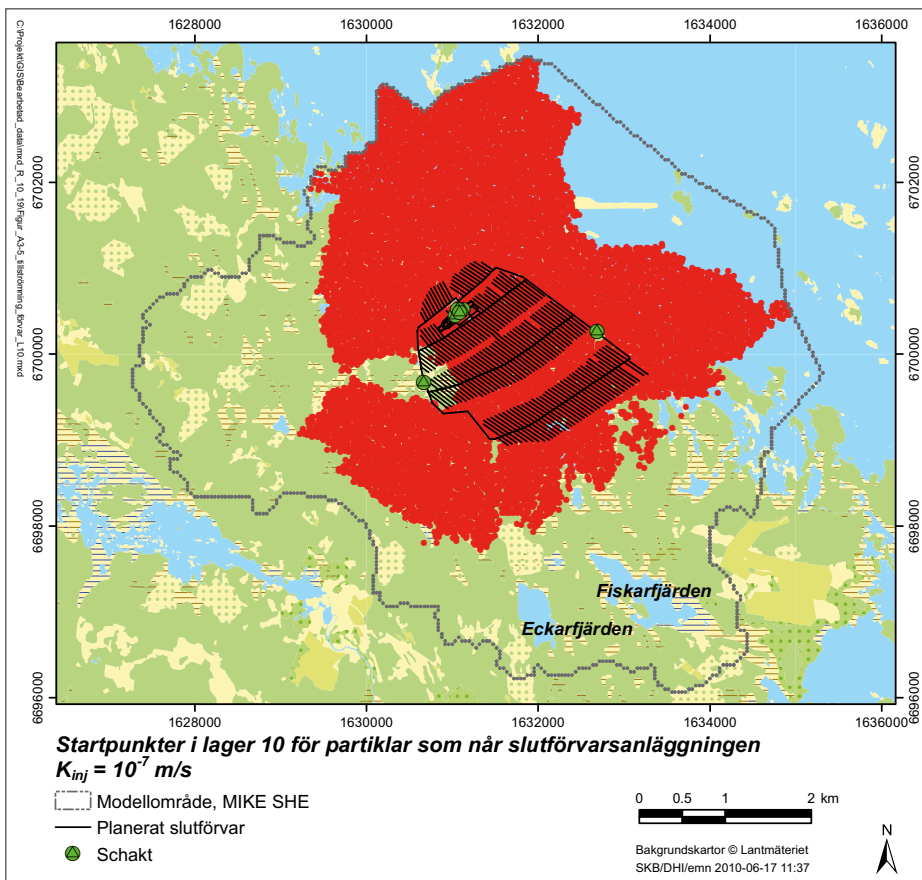
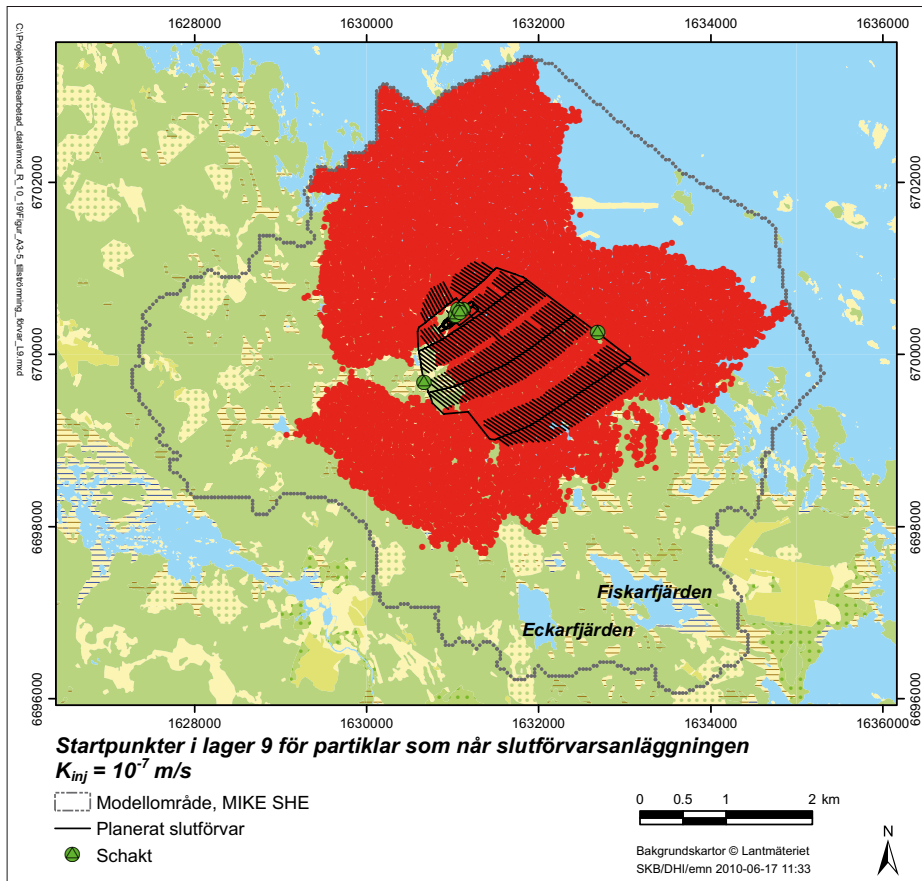
Figur A3-2. Startpunkter för partiklar som släpps i lager 3 (övre bilden) och lager 4 (undre bilden) och som har sina slutpunkter i slutförvarsanläggningen.



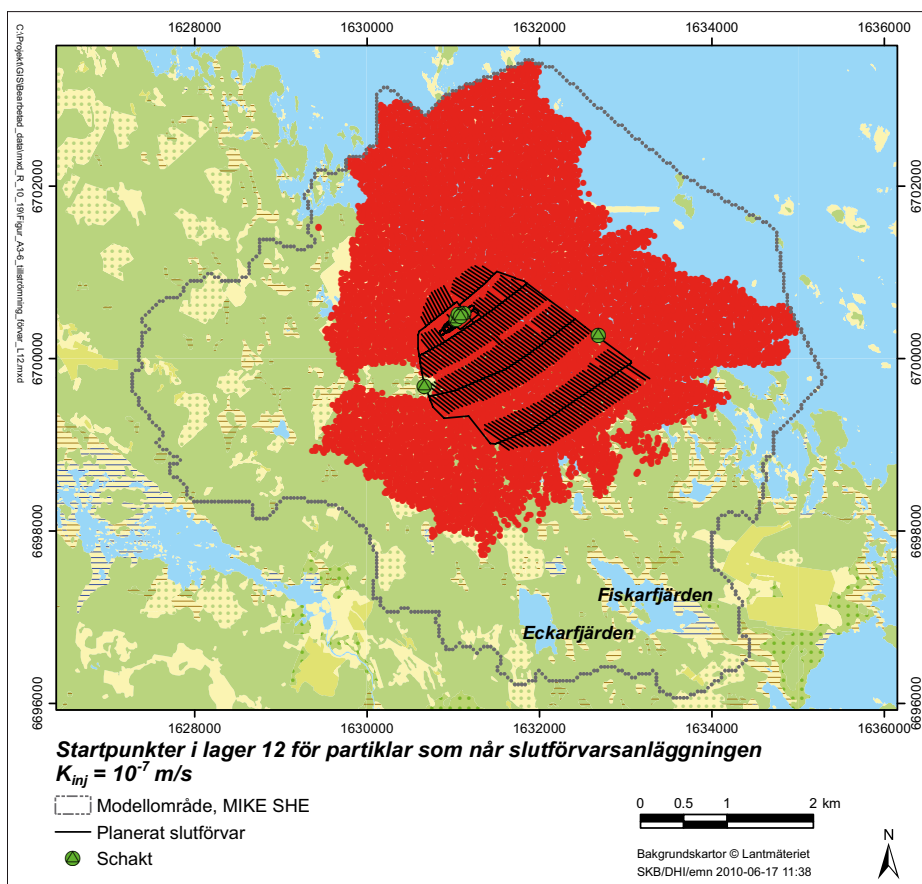
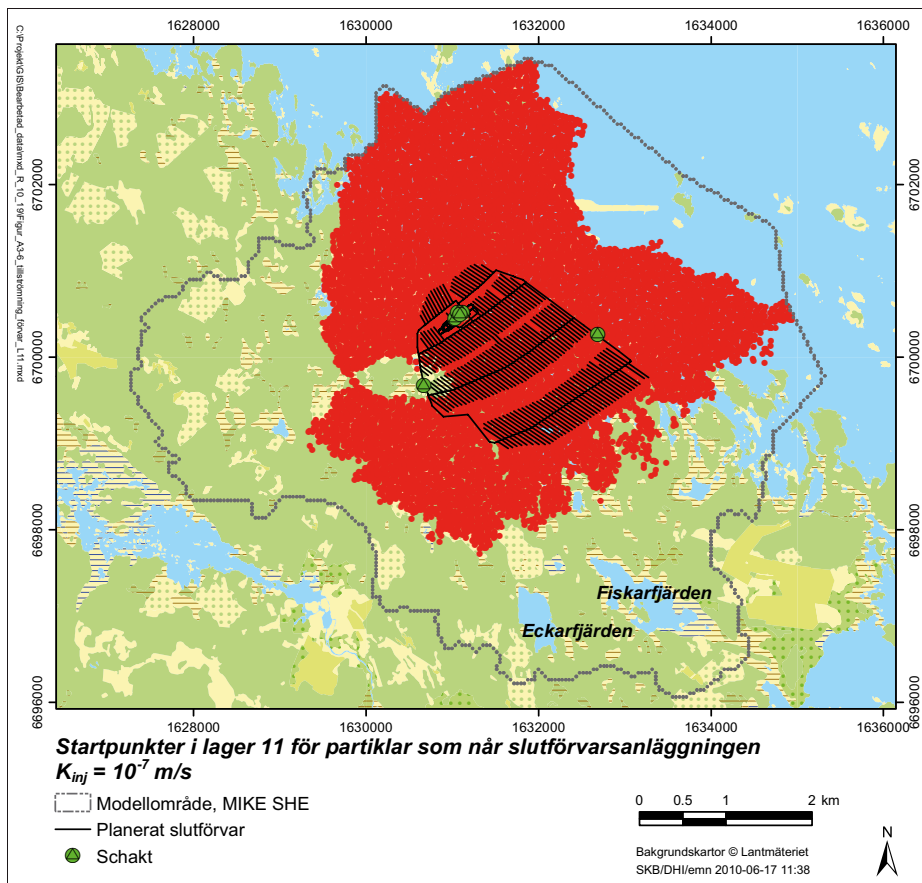
Figur A3-3. Startpunkter för partiklar som släpps i lager 5 (övre bilden) och lager 6 (undre bilden) och har sina slutpunkter i slutförvarsanläggningen.



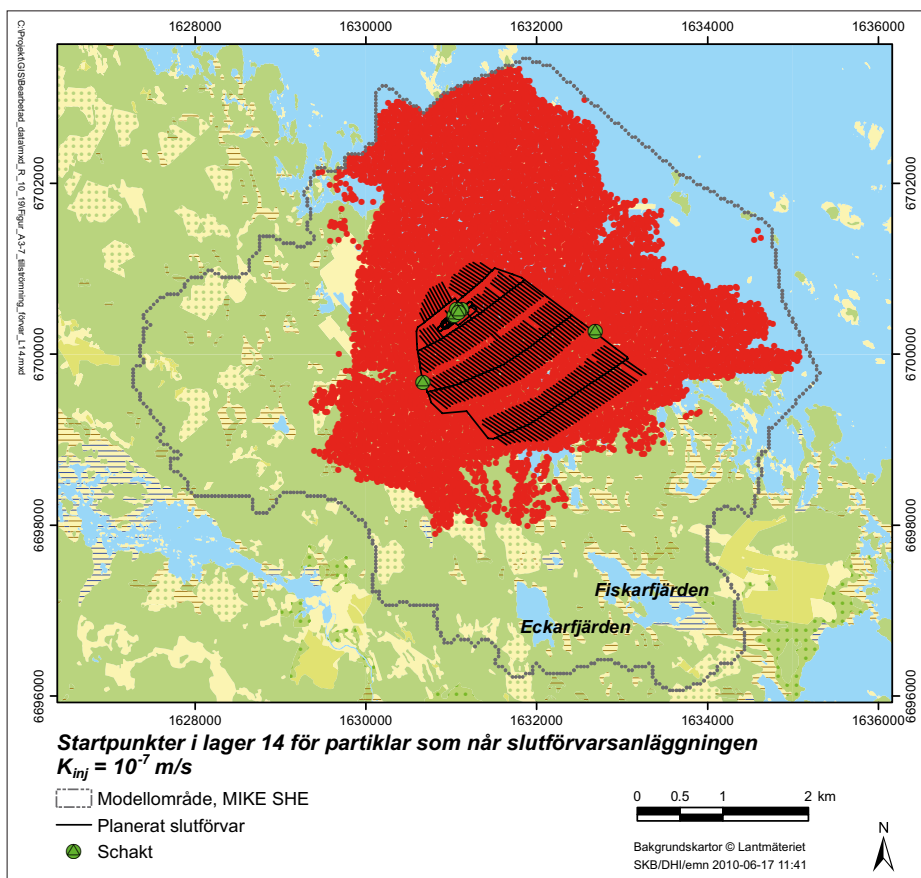
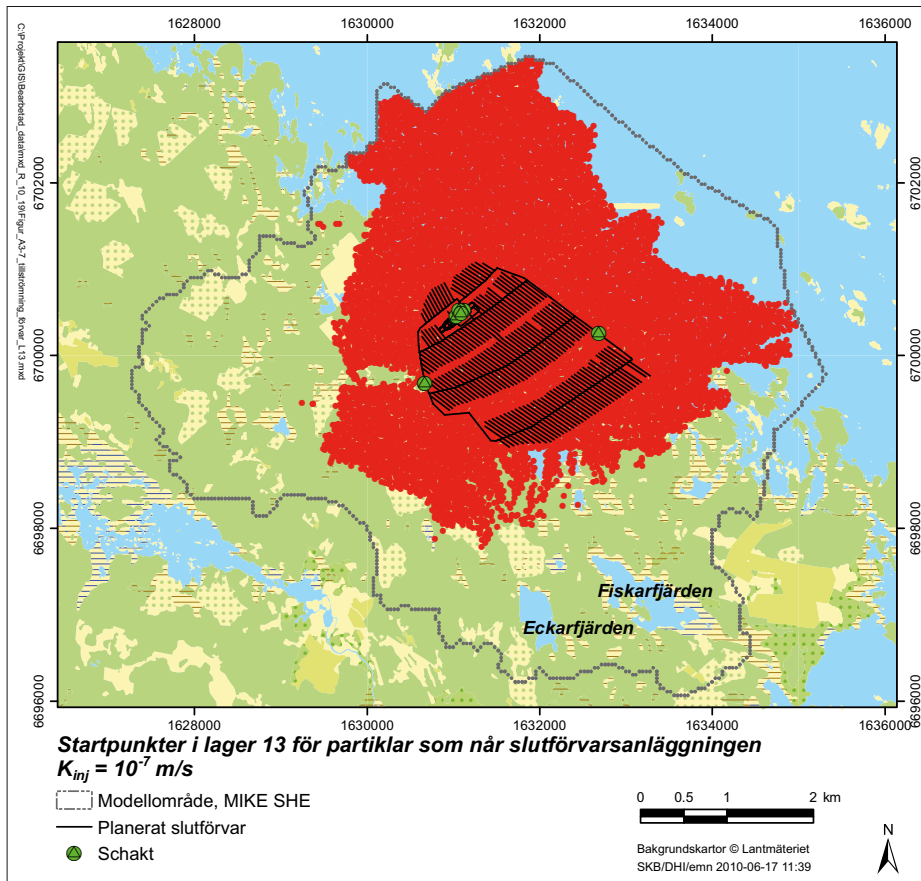
Figur A3-4. Startpunkter för partiklar som släpps i lager 7 (övre bilden) och lager 8 (undre bilden) och som har sina slutpunkter i slutförvarsanläggningen.



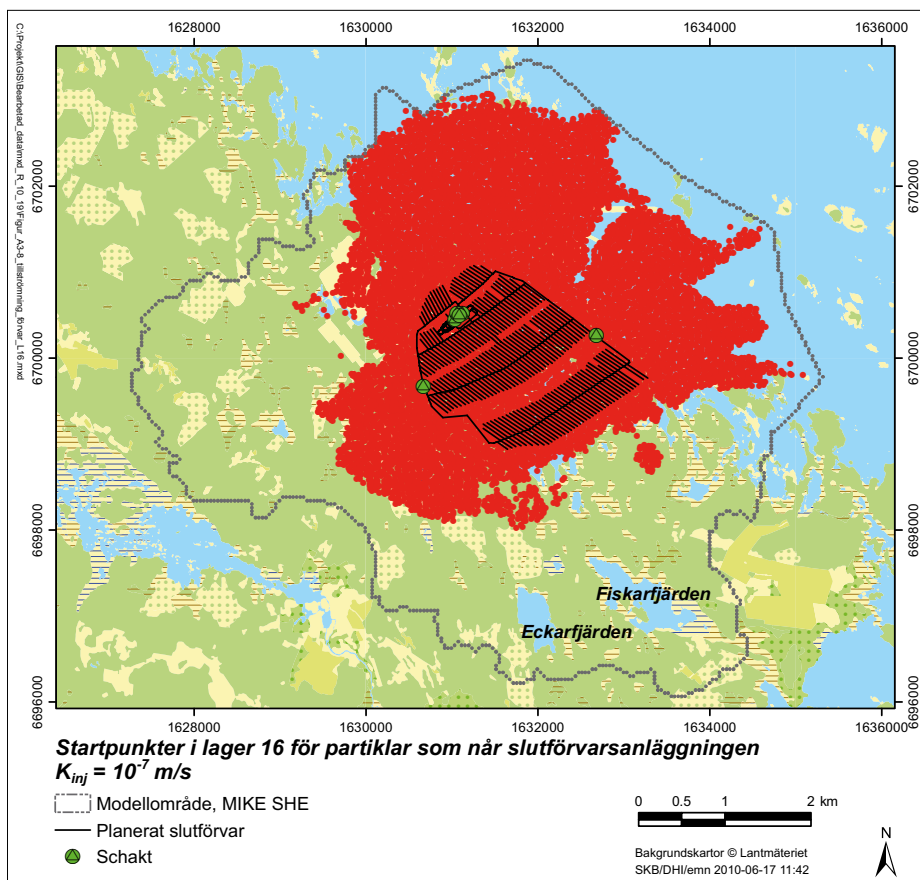
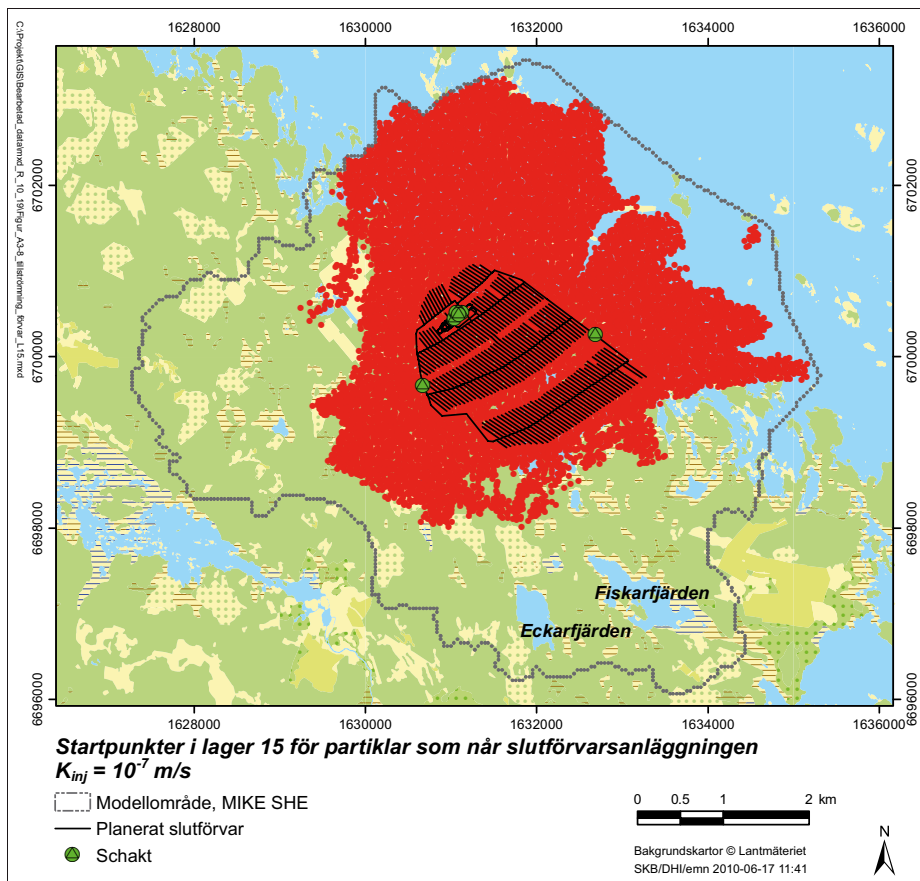
Figur A3-5. Startpunkter för partiklar som släpps i lager 9 (övre bilden) och lager 10 (undre bilden) och som har sina slutpunkter i slutförvarsanläggningen.



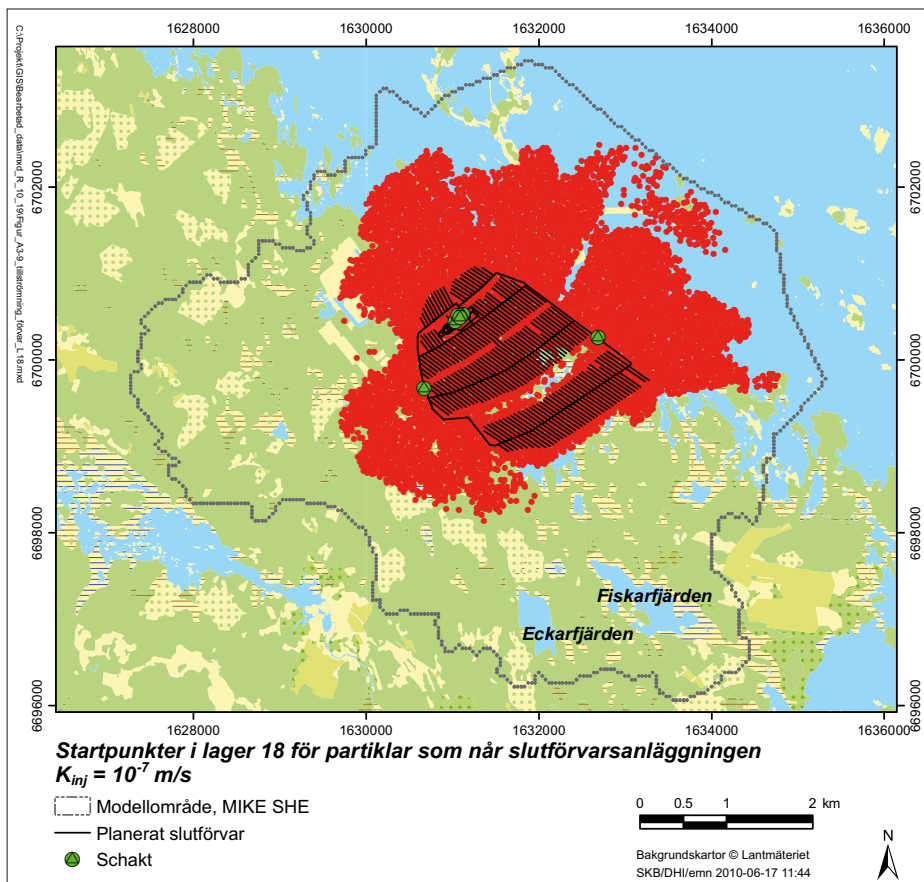
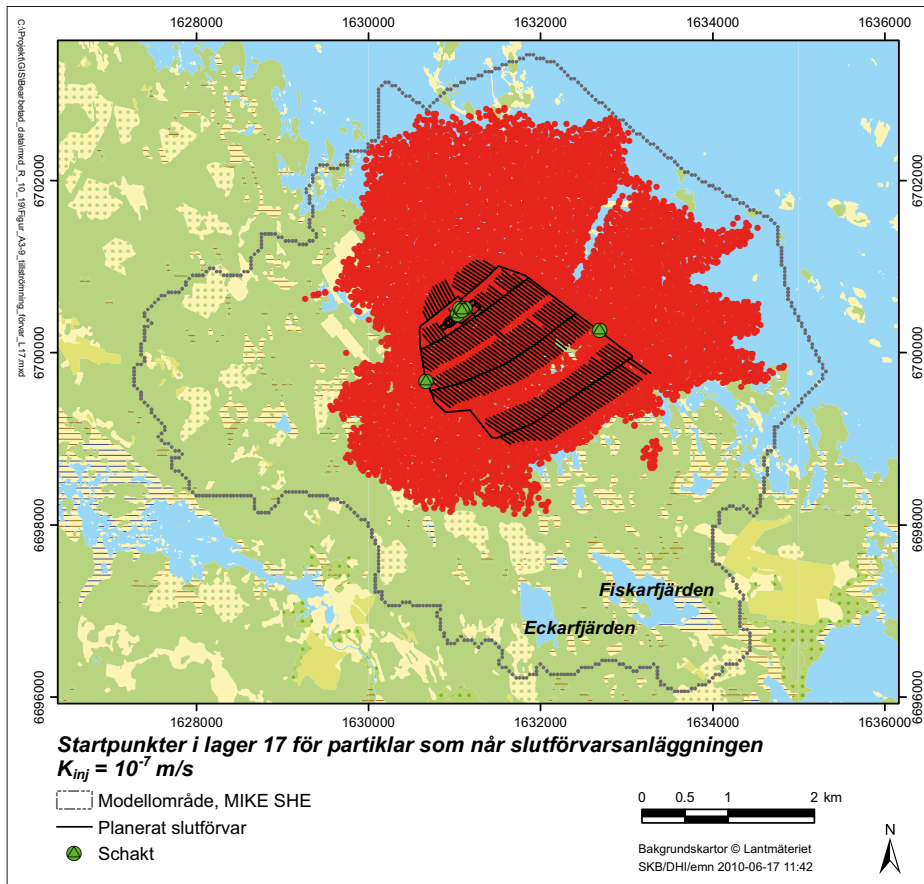
Figur A3-6. Startpunkter för partiklar som släpps i lager 11 (övre bilden) och lager 12 (undre bilden) och som har sina slutpunkter i slutförvarsanläggningen.



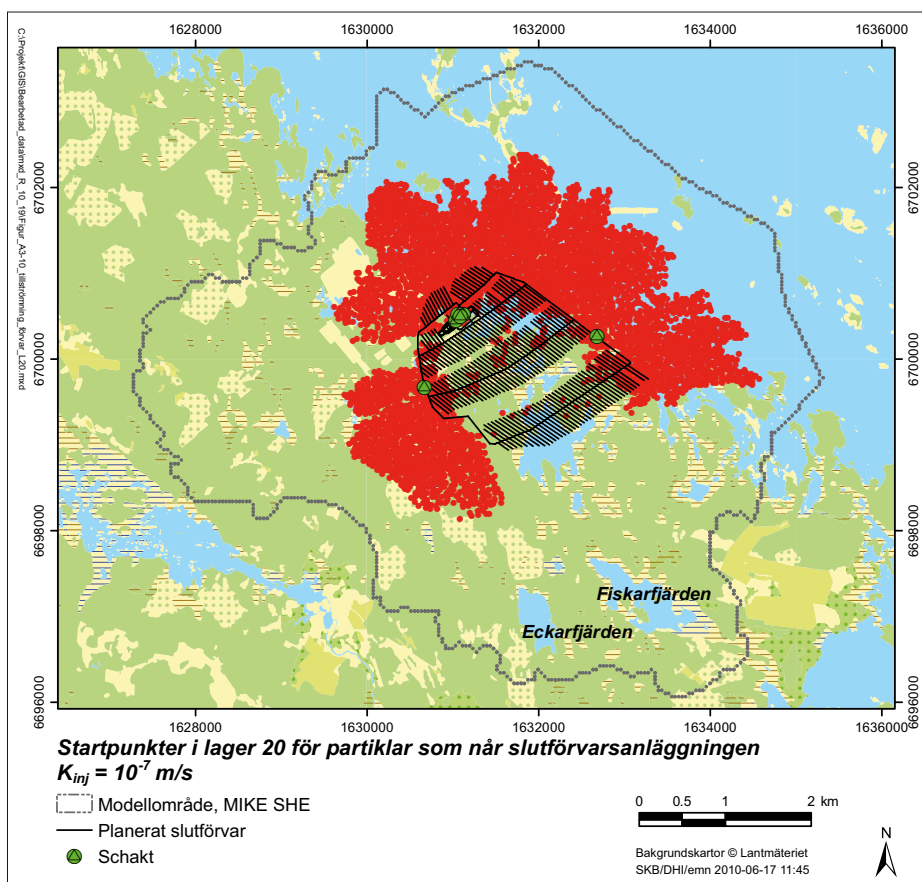
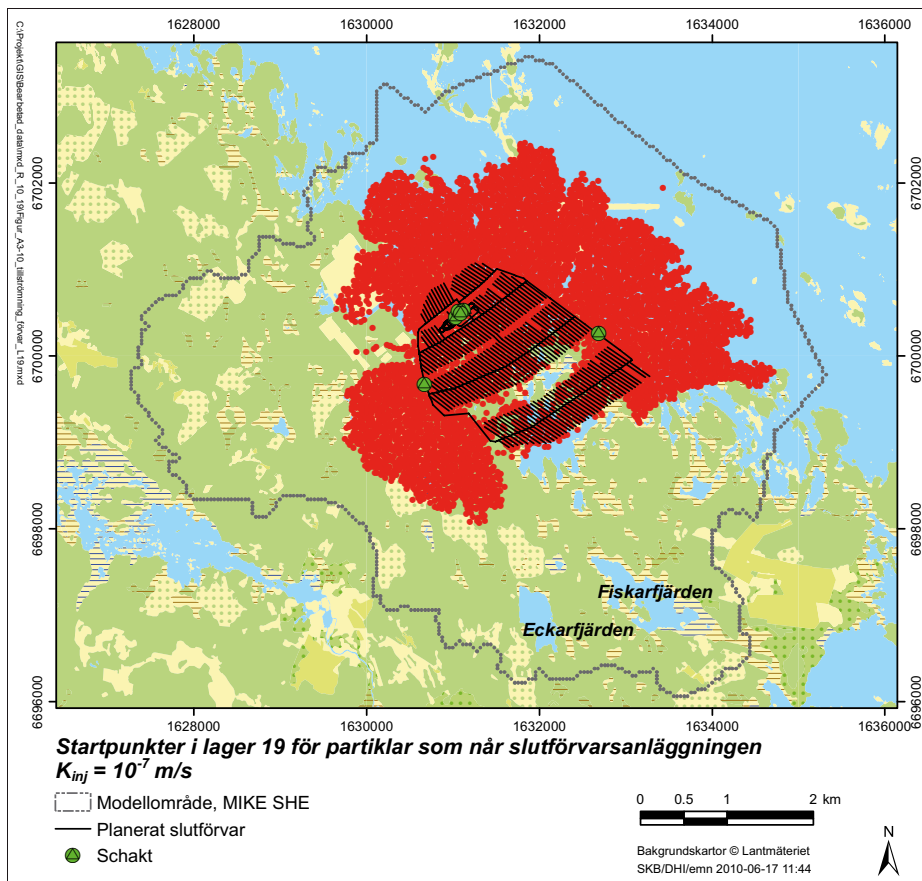
Figur A3-7. Startpunkter för partiklar som släpps i lager 13 (övre bilden) och lager 14 (undre bilden) och som har sina slutpunkter i slutförvarsanläggningen.



Figur A3-8. Startpunkter för partiklar som släpps i lager 15 (övre bilden) och lager 16 (undre bilden) och som har sina slutpunkter i slutförvarsanläggningen.



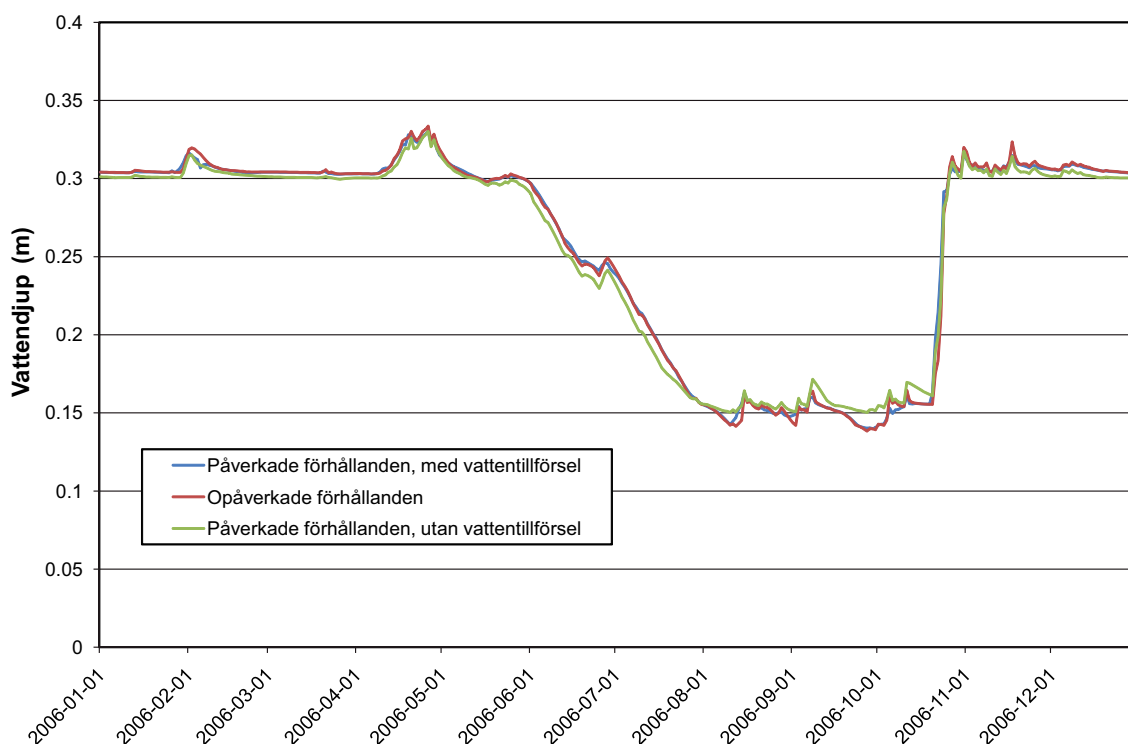
Figur A3-9. Startpunkter för partiklar som släpps i lager 17 (övre bilden) och lager 18 (undre bilden) och som har sina slutförvar i slutförvarsanläggningen.



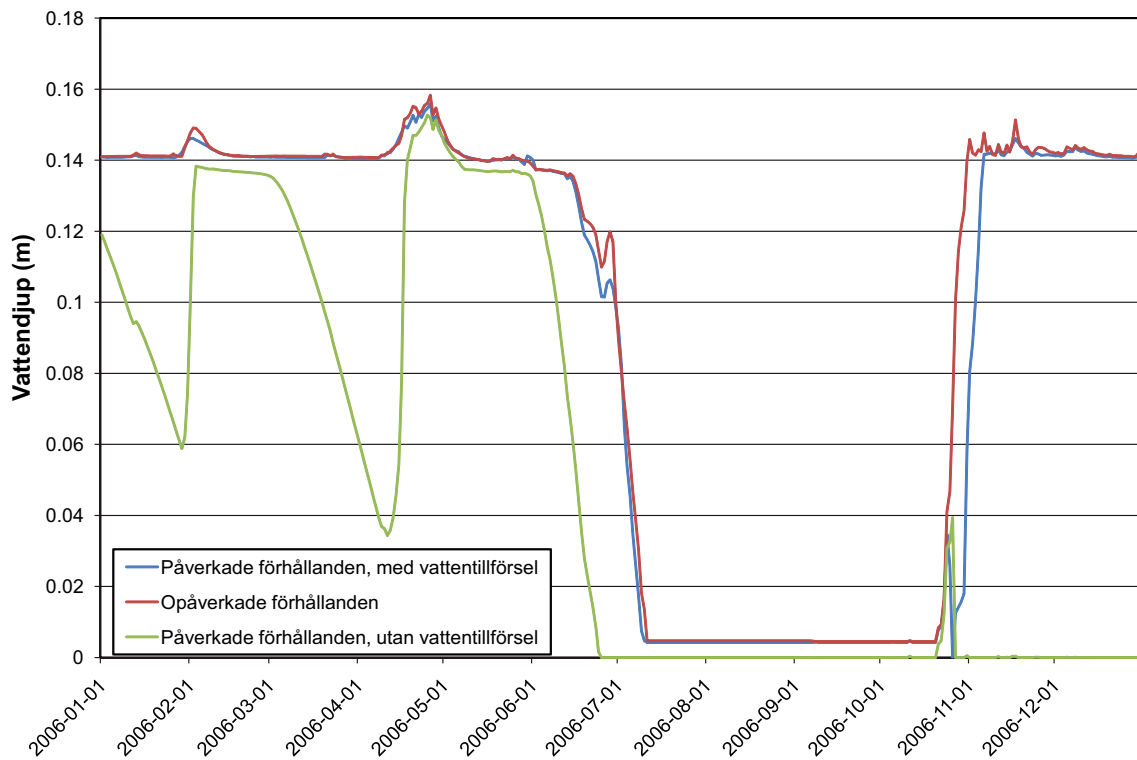
Figur A3-10. Startpunkter för partiklar som släpps i lager 19 (övre bilden) och lager 20 (undre bilden) och som har sina slutpunkter i slutförvarsanläggningen.

Modellberäknade ytvattendjup

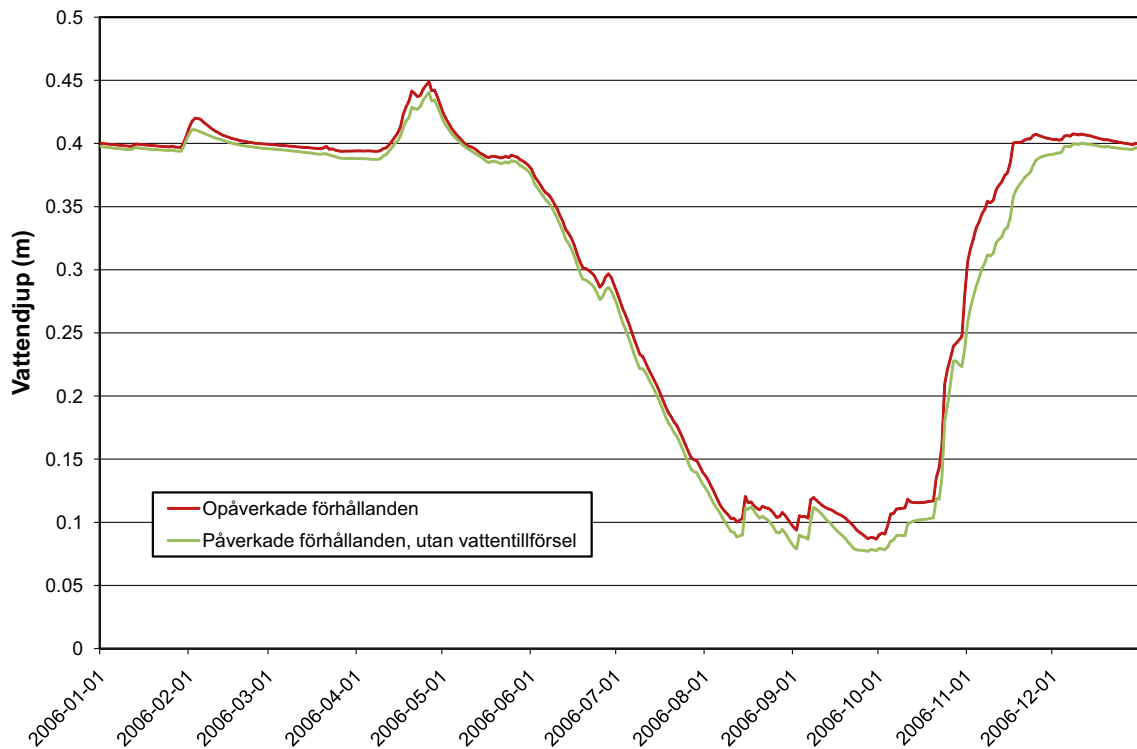
Figurerna A4-1 till A4-21 redovisar tidsserier för modellberäknade ytvattendjup i ett antal utvalda våtmarksobjekt. Tidsserierna avser typåret 2006 och redovisas för opåverkade förhållanden (utan slutförvarsanläggningen), för situationen med ett helt öppet förvar utan vattentillförsel och för samma situation med vattentillförsel, för de objekt där vattentillförsel beaktats. Ytvattendjupen är tagna från den djupaste delen av objekten.



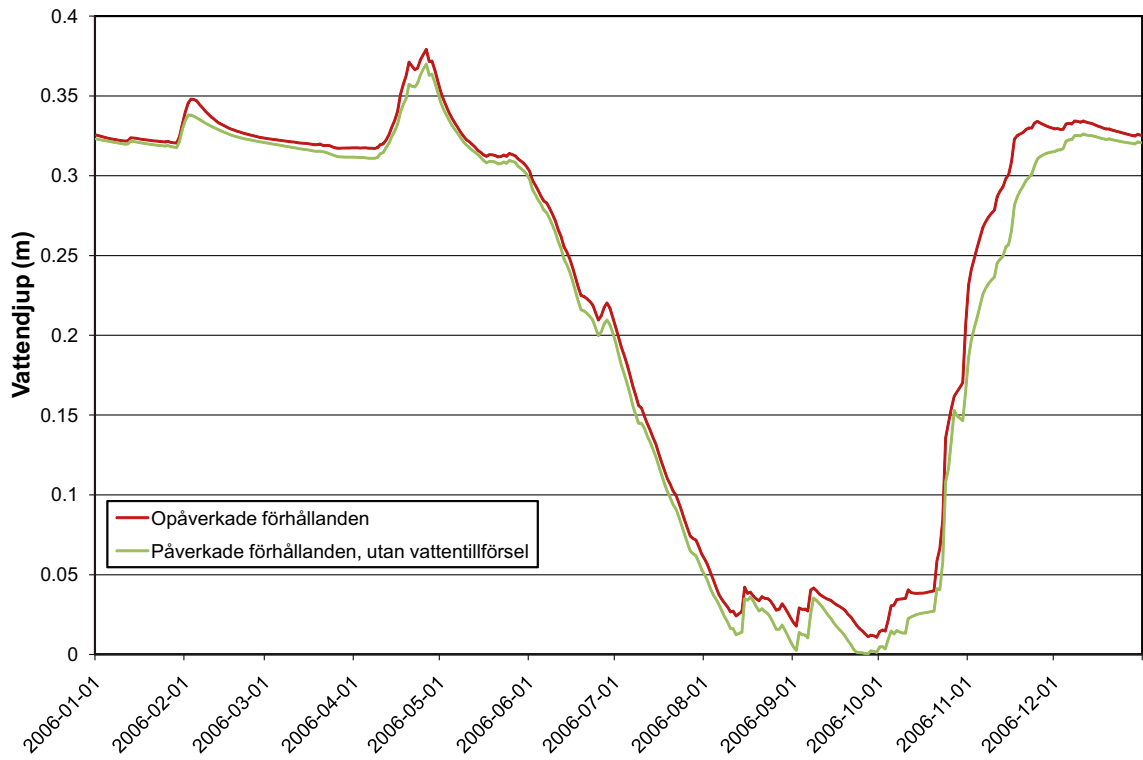
Figur A4-1. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 6a.



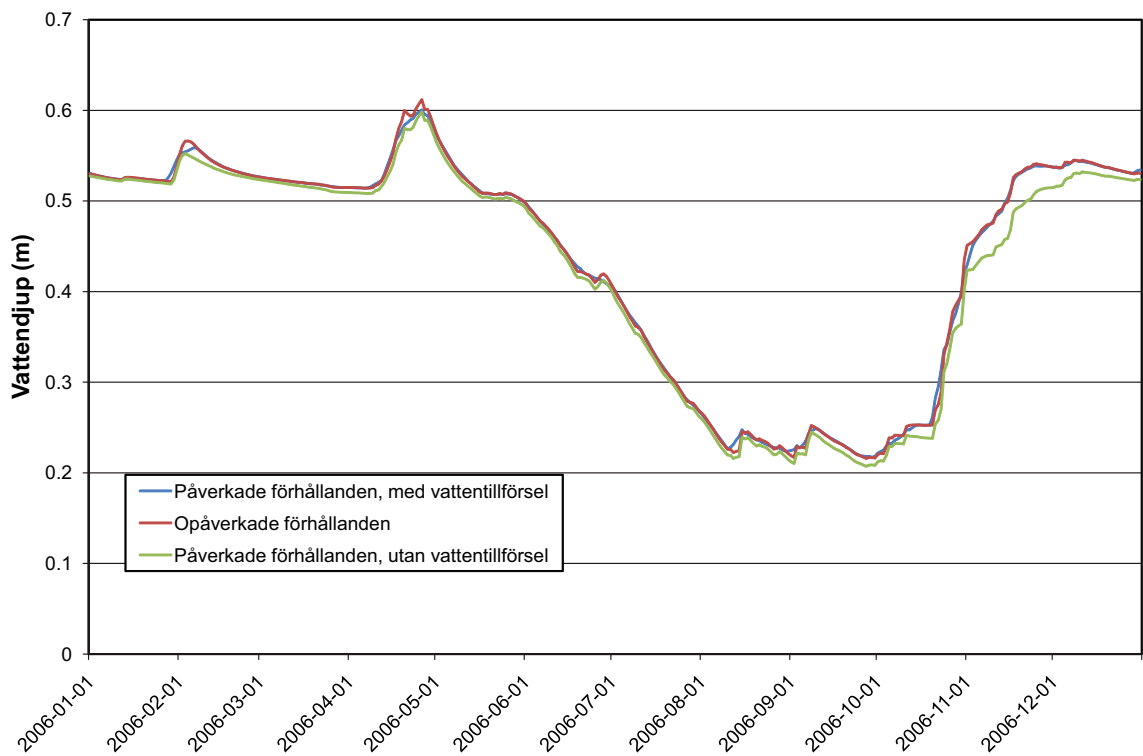
Figur A4-2. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 7.



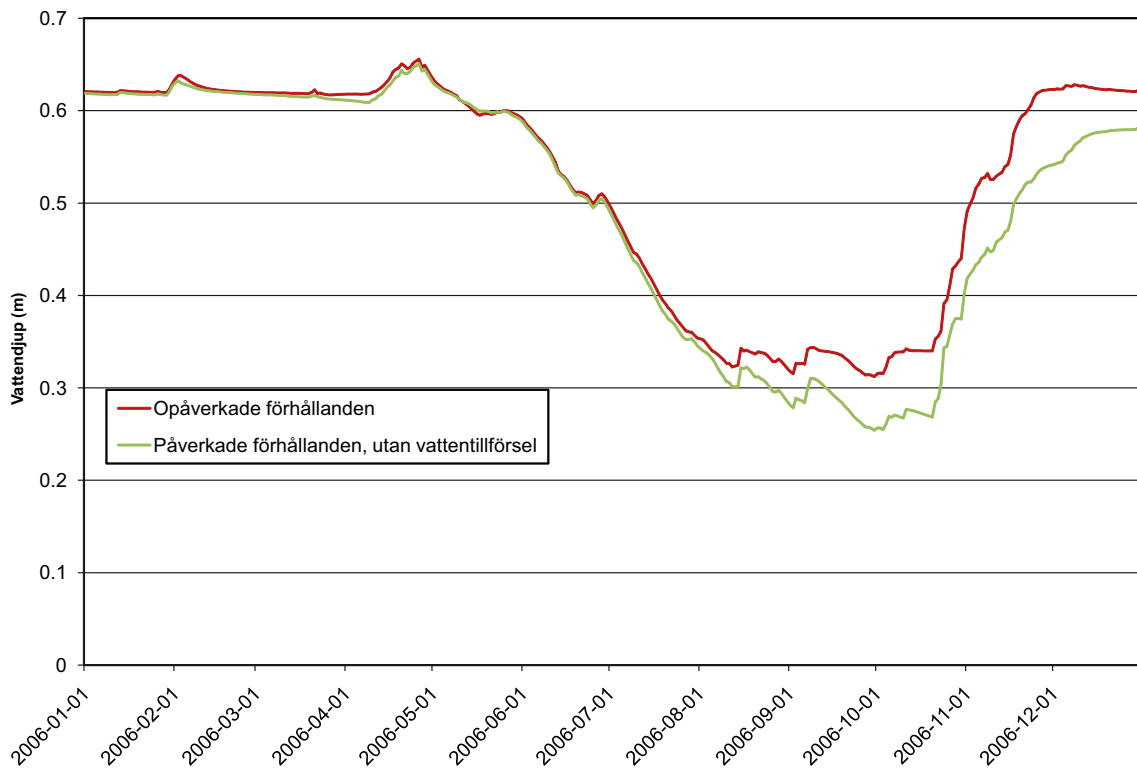
Figur A4-3. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 8a.



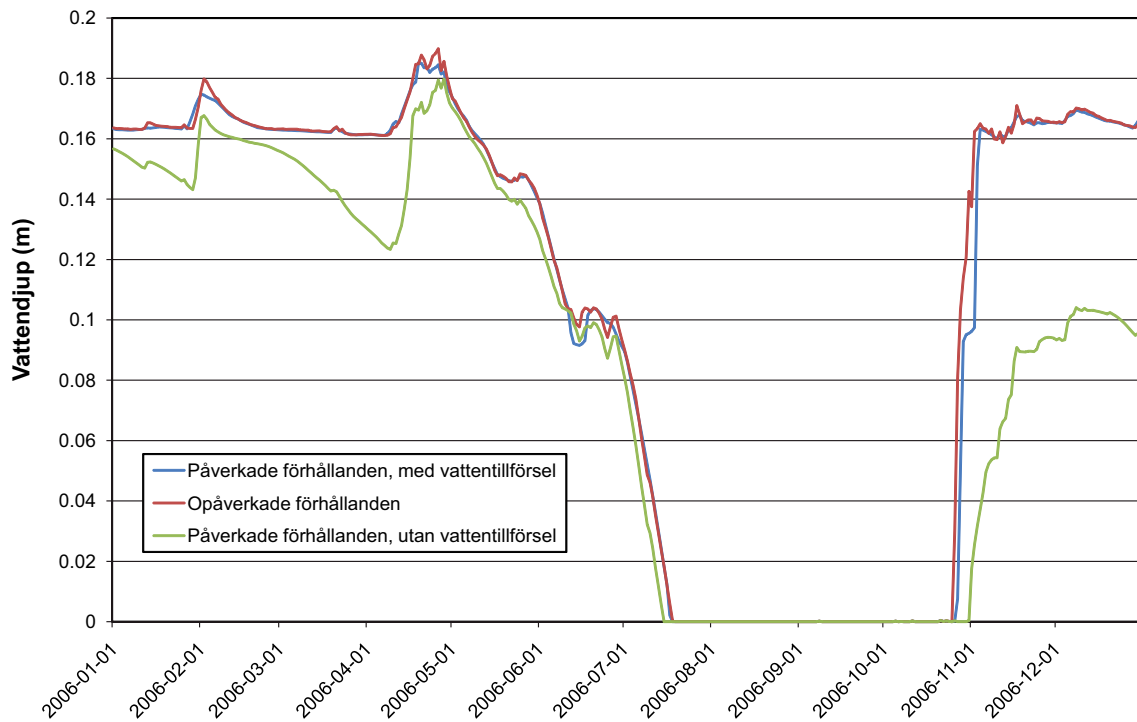
Figur A4-4. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 8b.



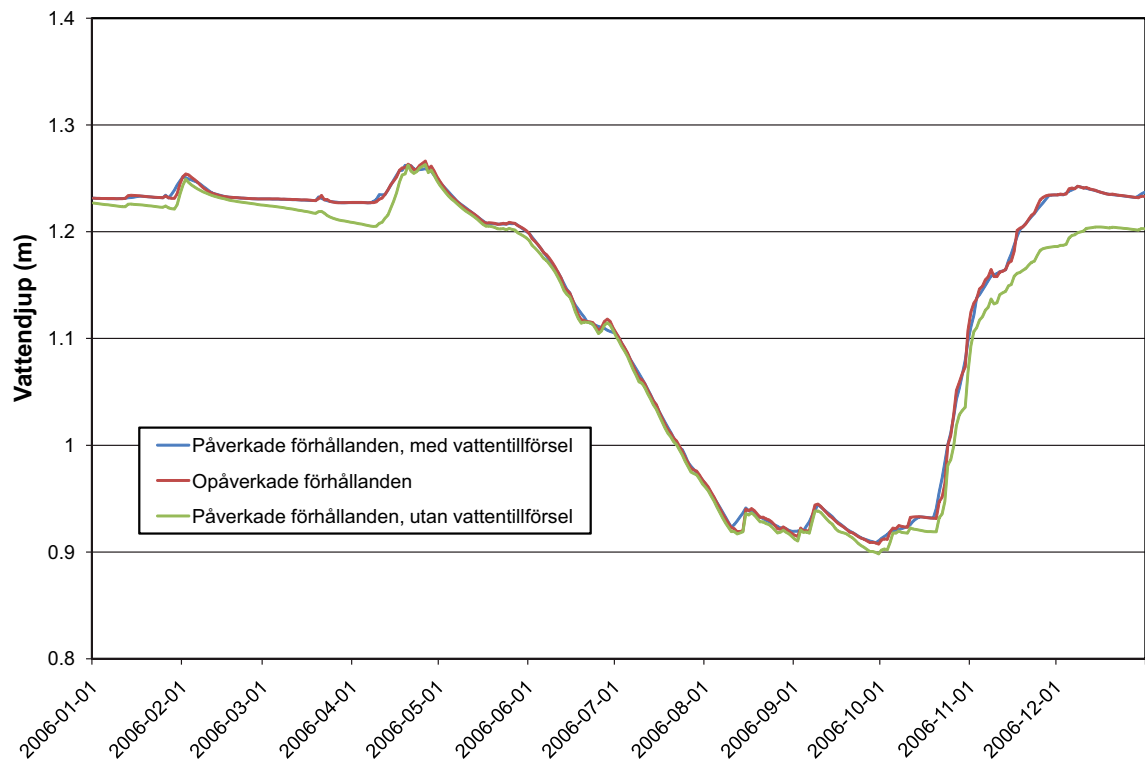
Figur A4-5. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 9.



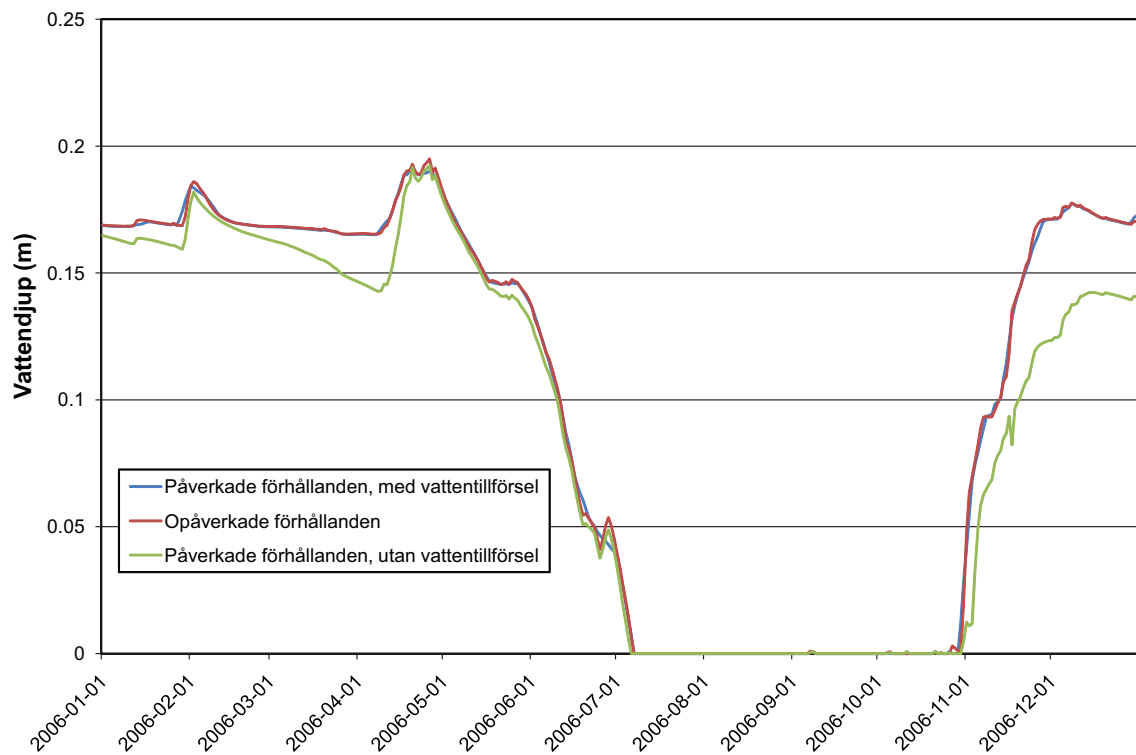
Figur A4-6. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 11+11a+11b.



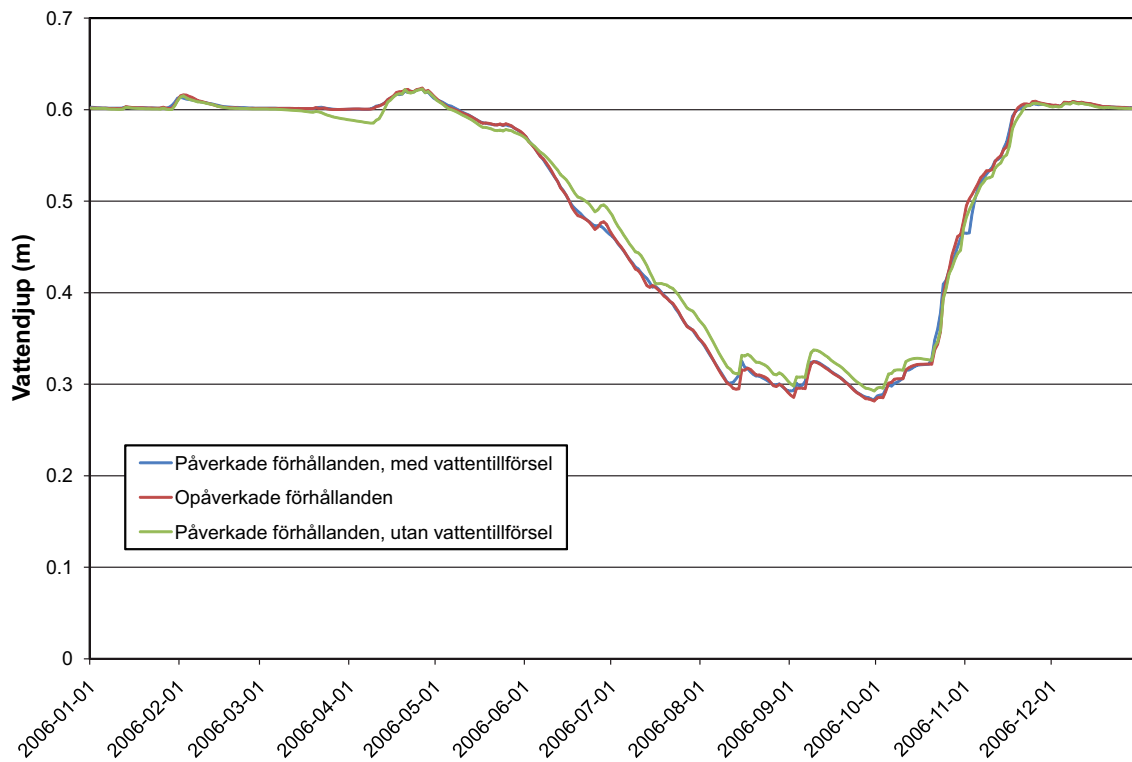
Figur A4-7. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 11c.



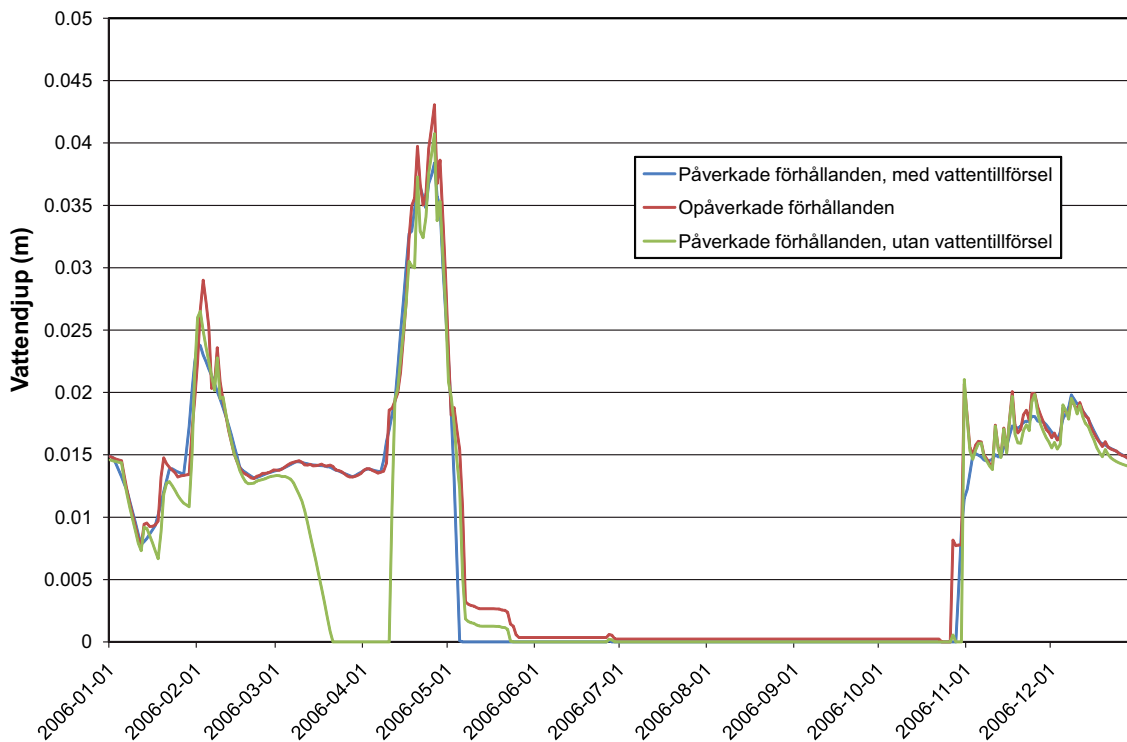
Figur A4-8. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 14.



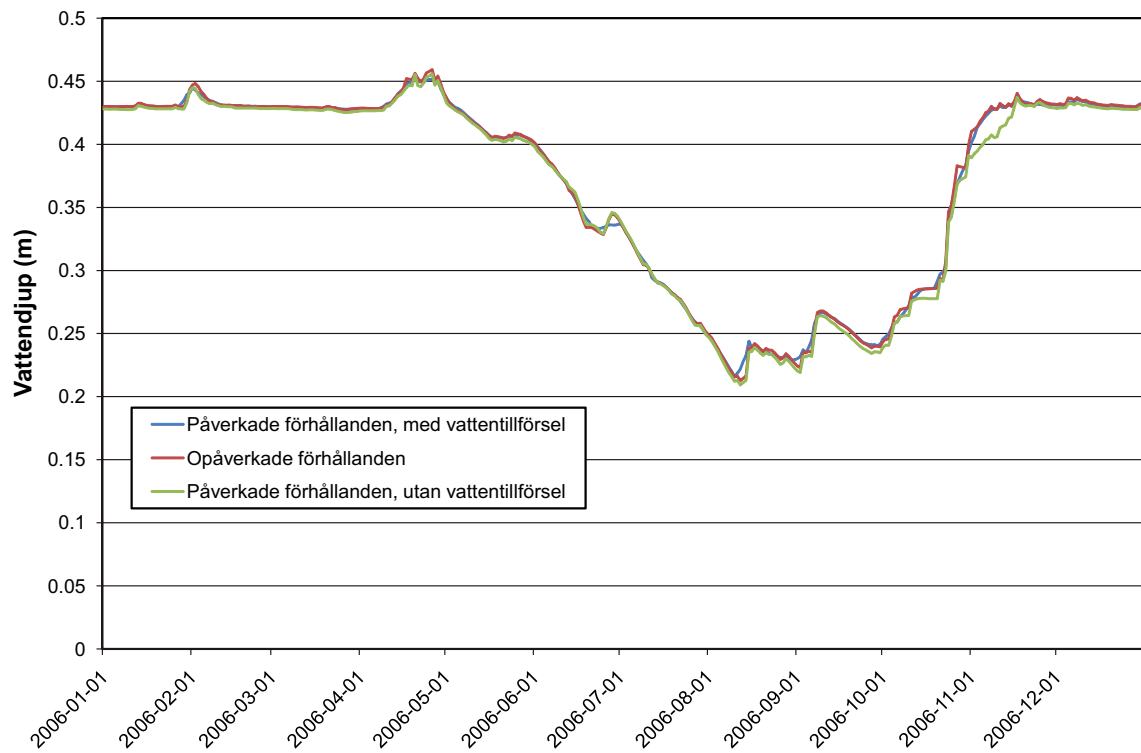
Figur A4-9. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 15.



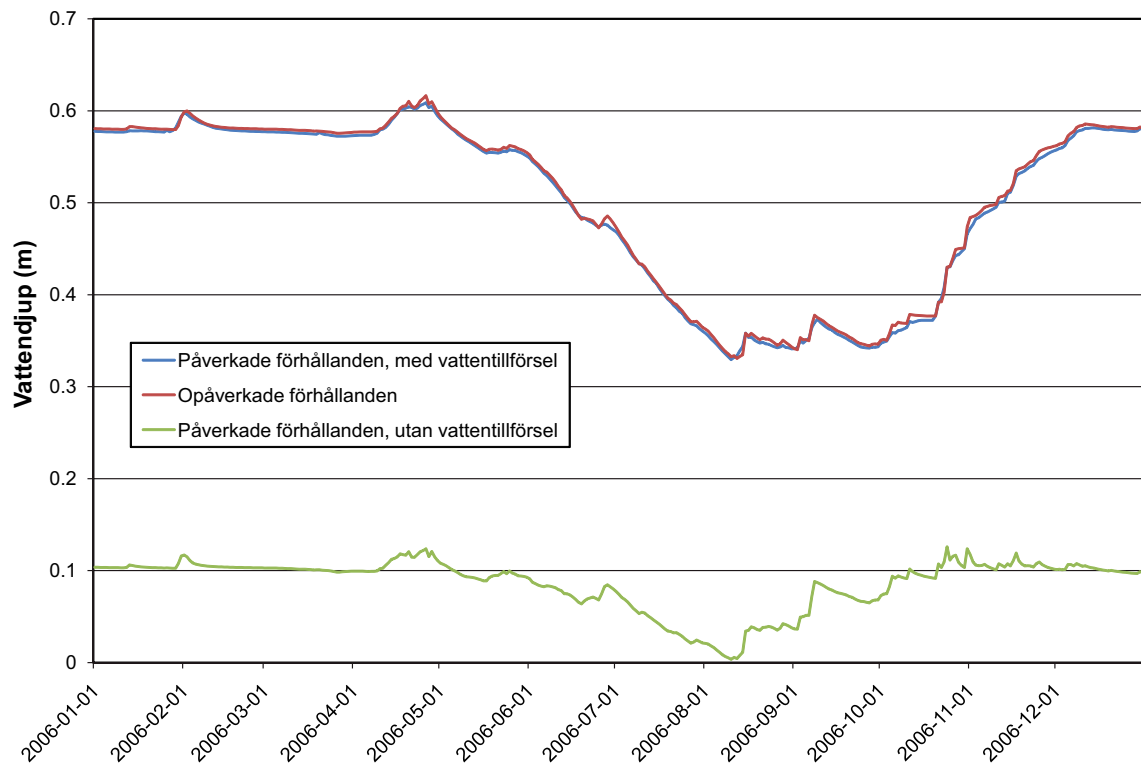
Figur A4-10. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 16.



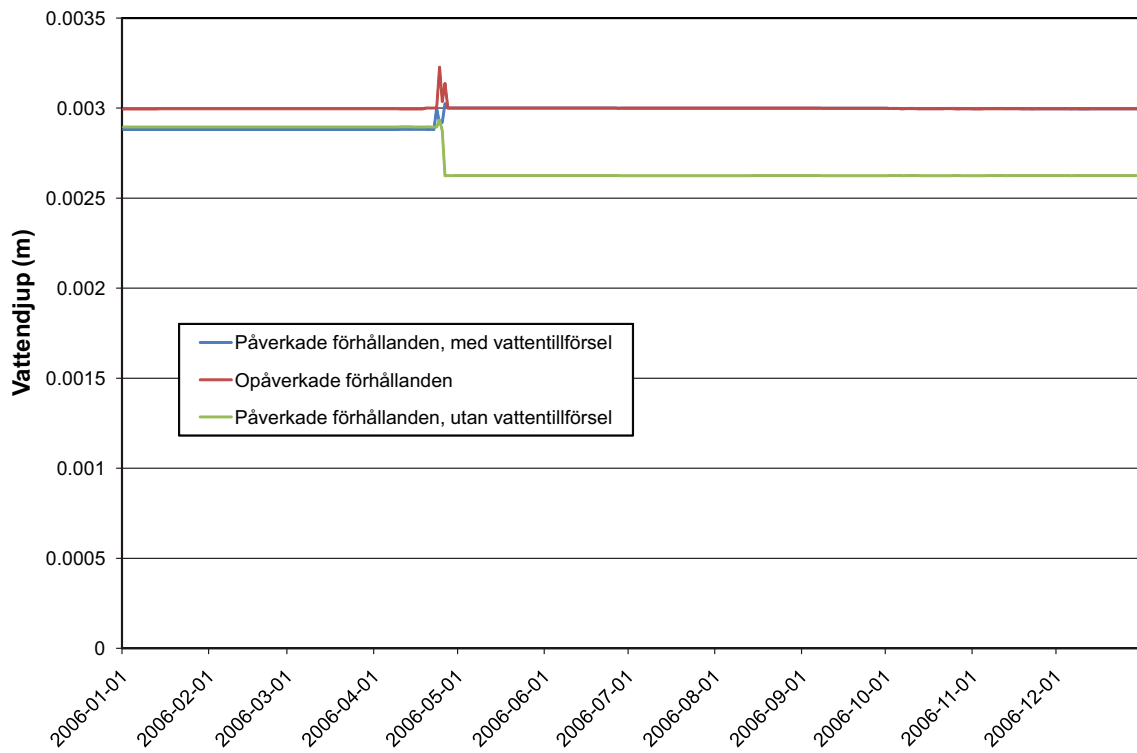
Figur A4-11. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 17.



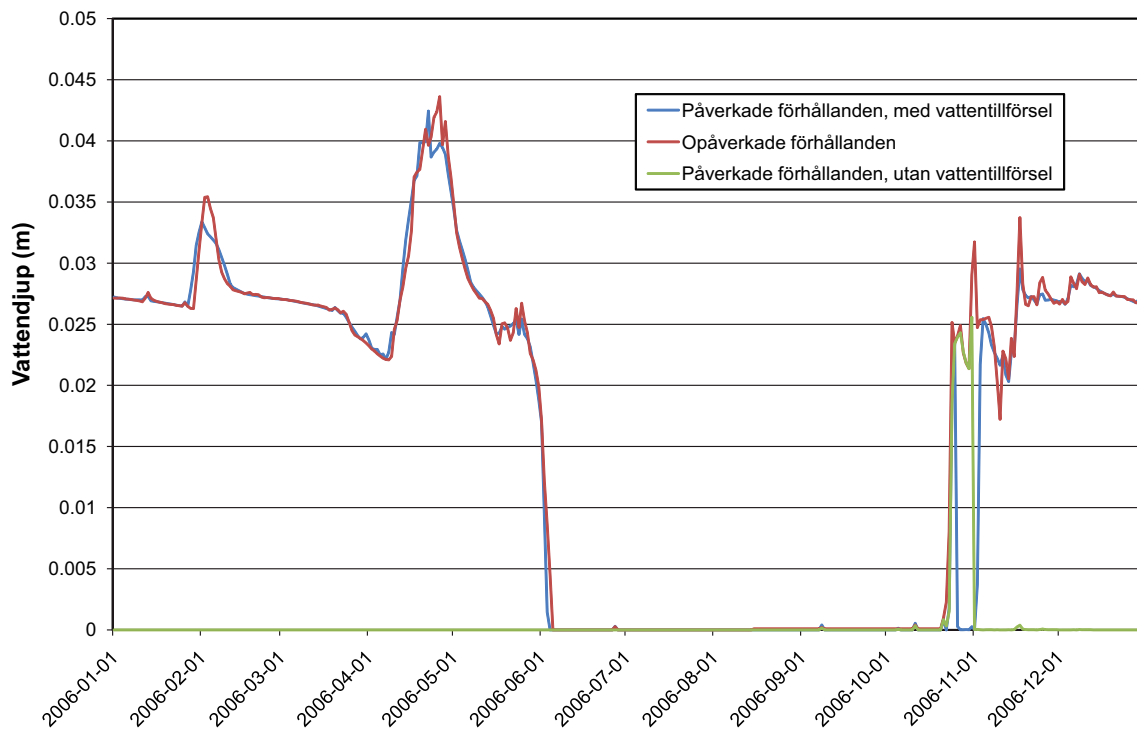
Figur A4-12. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 18.



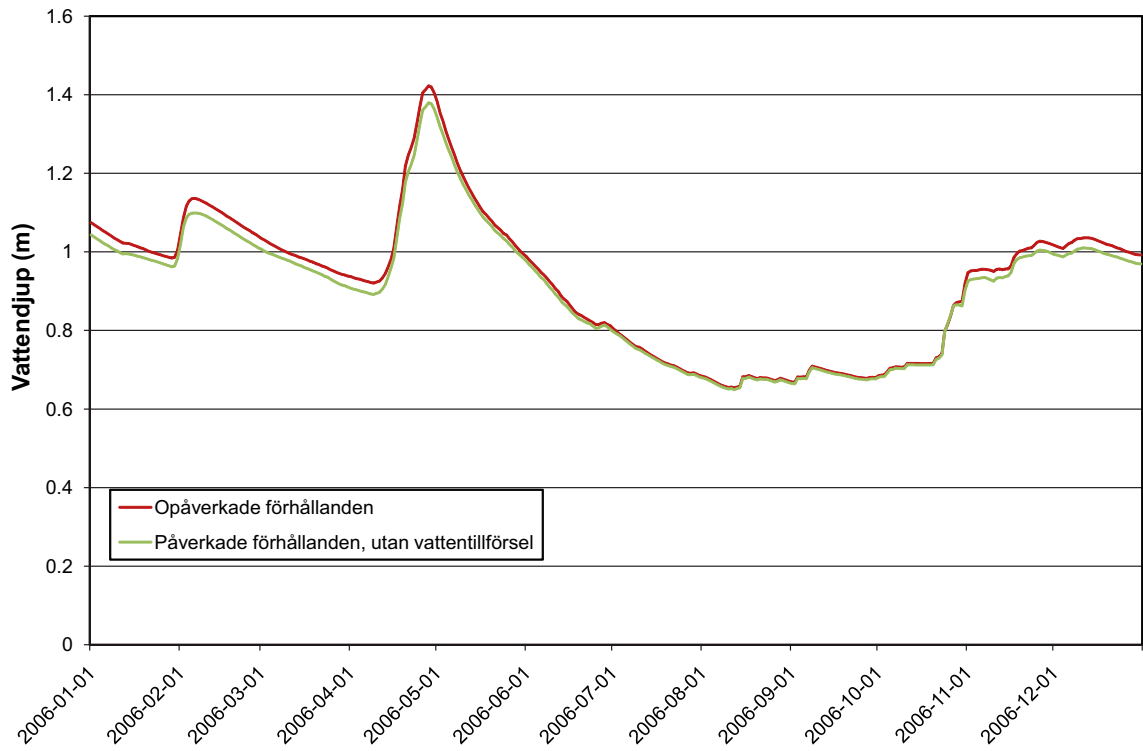
Figur A4-13. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 21c.



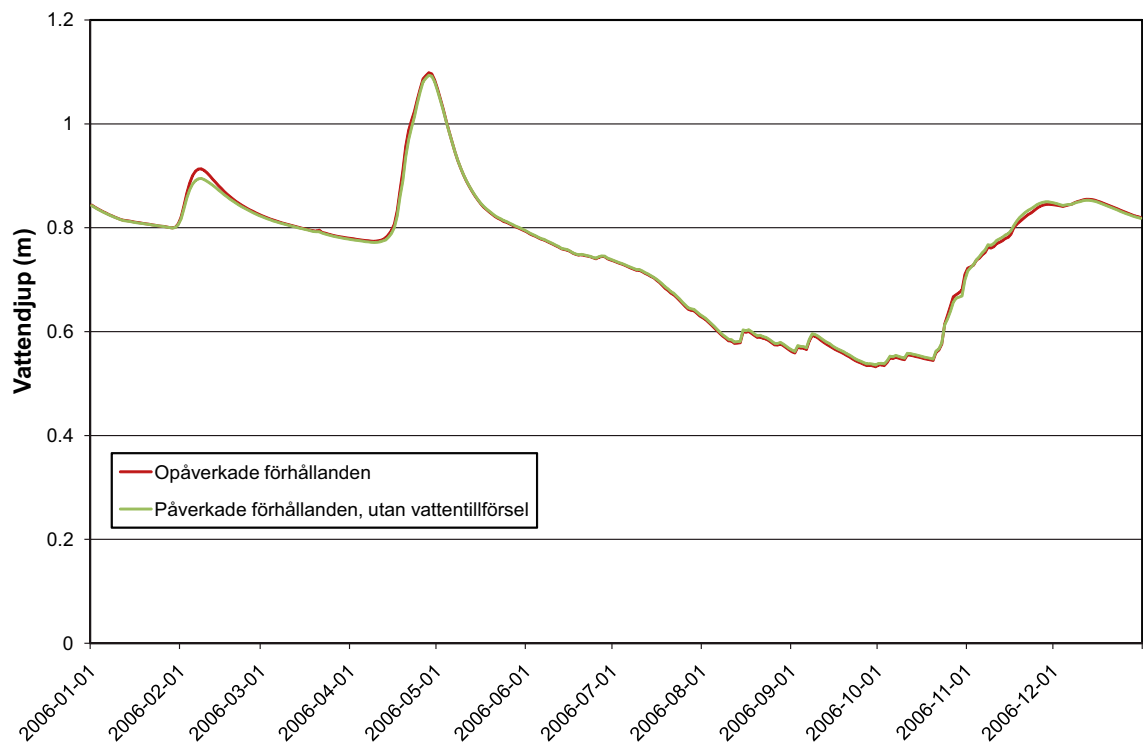
Figur A4-14. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 22.



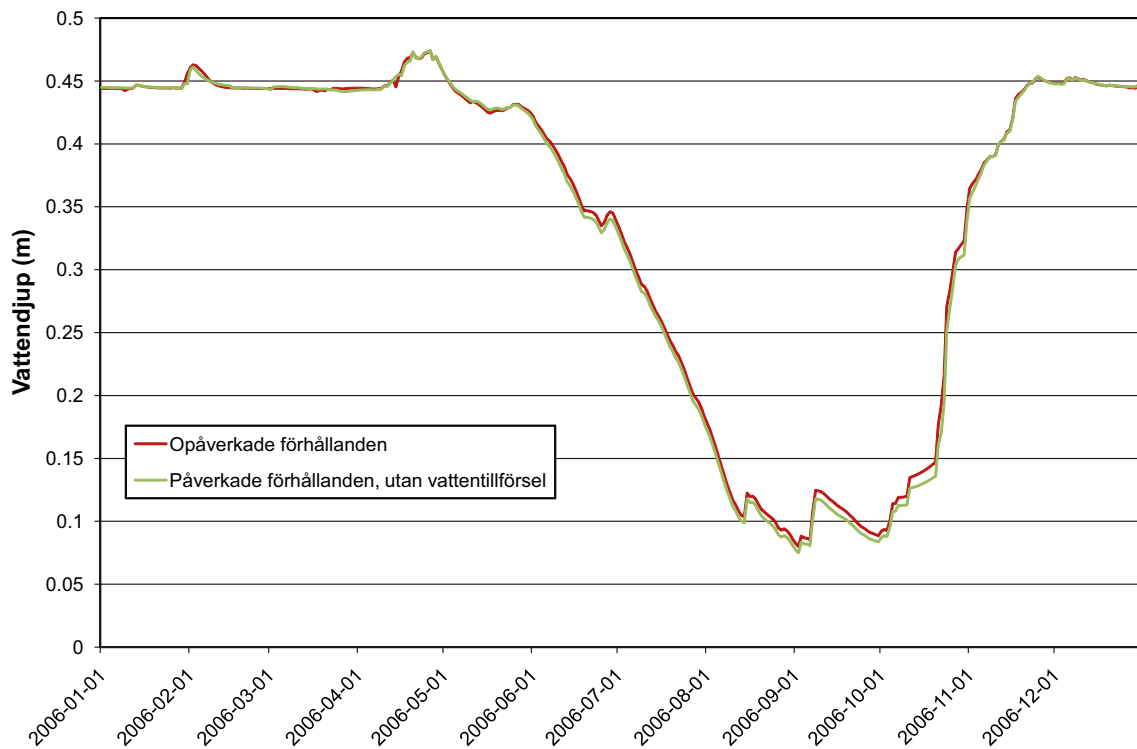
Figur A4-15. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 23.



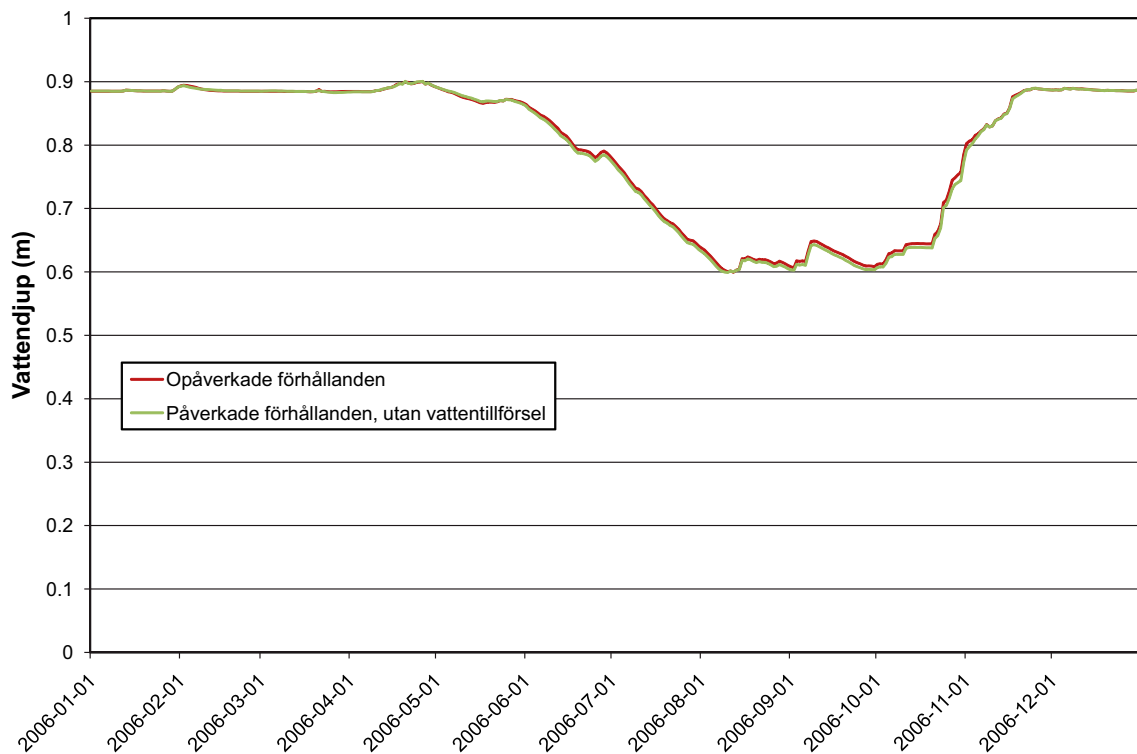
Figur A4-16. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 38.



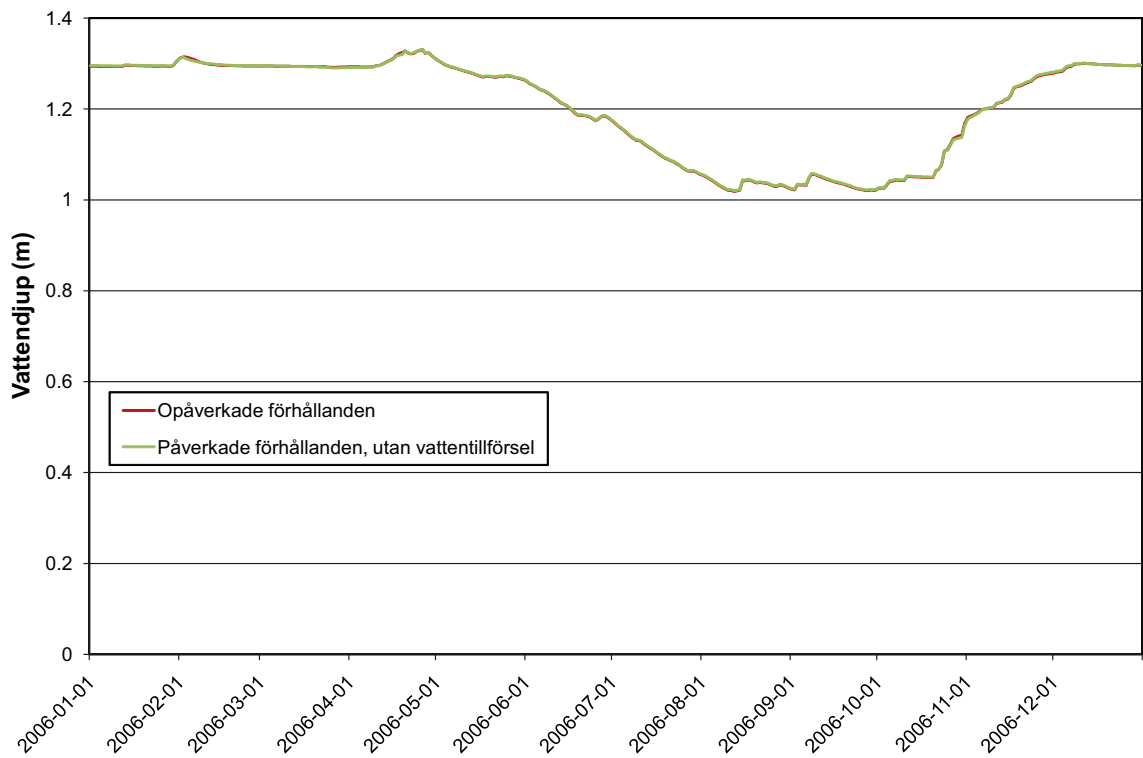
Figur A4-17. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 39.



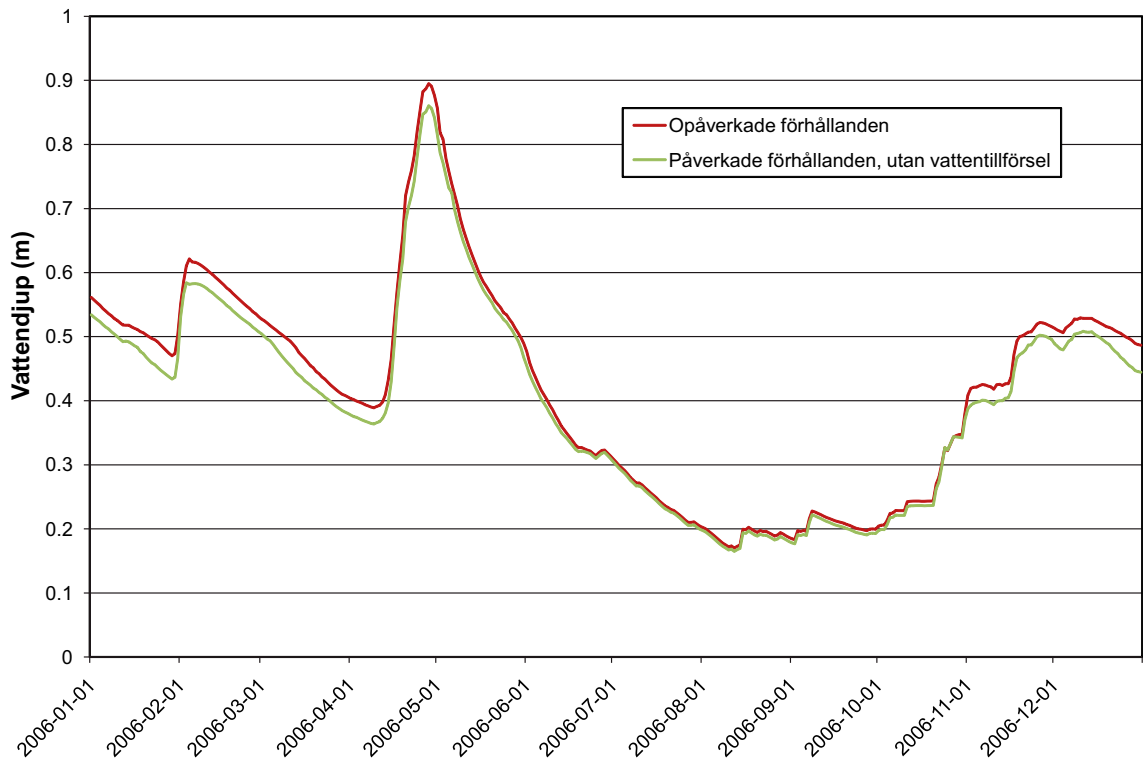
Figur A4-18. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 46a.



Figur A4-19. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 46b.



Figur A4-20. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 49.



Figur A4-21. Modellberäknade ytvattendjup i våtmarksobjekt 71.