

Kärnbränsleförvaret i Forsmark

Pilotförsök med vattentillförsel till en våtmark

Kent Werner, EmpTec

Erik Mårtensson, DHI Sverige AB

Sara Nordén, Svensk Kärnbränslehantering AB

Oktober 2014

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co

Box 250, SE-101 24 Stockholm
Phone +46 8 459 84 00



ISSN 1402-3091

SKB R-14-23

ID 1450545

Kärnbränsleförvaret i Forsmark

Pilotförsök med vattentillförsel till en våtmark

Kent Werner, EmpTec

Erik Mårtensson, DHI Sverige AB

Sara Nordén, Svensk Kärnbränslehantering AB

Oktober 2014

Nyckelord: Vattentillförsel, Infiltration, Kalkgöl, Våtmark, Rikkärr, MIKE SHE, AP SFK-10-036.

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

Sammanfattning

Vid eventuell hydrologisk påverkan på värdefulla, grundvattenberoende våtmarker (kalkgölar som omges av rikkärr) i Forsmark, i samband med uppförande och drift av ett slutförvar för använt kärnbränsle, har SKB föreslagit tillförsel av vatten som åtgärd. Åtgärden syftar till att bevara de ekologiska värden som är beroende av utströmmande grundvatten och en grundvattenyta som är belägen nära markytan. Som en förberedande åtgärd har SKB genomfört ett kortvarigt pilotförsök med vattentillförsel till en av de värdefulla våtmarkerna. Pilotförsöket syftar till att skaffa lärdomar, erfarenheter och att undersöka möjligheterna att reglera grund- och ytvattennivåer i Forsmarks våtmarker. Försöket och föreliggande rapport fokuserar således på vattentillförselns hydrologiska aspekter, och utgör ett av underlagen för fortsatta studier kring ekologiska aspekter av permanent vattentillförsel under uppförande och drift.

Inför försöket genomfördes hydrologiska beräkningar med modelleringsverktyget MIKE SHE, som underlag för dimensionering och planering. Inför försöket genomfördes även jordborring, installation av grundvattentrör och sticksondering mellan tillförselplatsen och våtmarken, och geofysiska undersökningar (resistivitetmätningar) gjordes i stråk tvärs våtmarken. Vid spridningsledningen grävdes gropar genom ett lager med glaciallera för att underlätta för vattnet att nå den underliggande moränen.

Under försöket tillfördes vatten (processvatten från FKA:s vattenverk) via en perforerad spridningsledning i en moränssluttning på våtmarkens sydvästra sida. Sammanlagt tillfördes drygt 826 000 liter vatten under nio dygn (19–28 augusti 2013), inledningsvis med ett flöde på 0,5 liter per sekund och som därefter ökades efter tre respektive fyra dygn till 1 respektive 2 liter per sekund. Grund- och ytvattenprover togs för kemisk analys inför, under och efter försöket, och grund- och ytvattennivåer mättes kontinuerligt, både i våtmarken och i andra våtmarker i Forsmarksområdet. Den aktuella perioden var ovanligt torr och kännetecknades av sjunkande grund- och ytvattennivåer i hela området.

Vattennivåmätningarna visar på en tydlig hydrologisk respons på vattentillförseln. Om man beaktar att grund- och ytvattennivåerna sjönk i övriga delar av området, var den hydrologiska responsen (vattennivåhöjningen) i våtmarken cirka 0,2 meter. Initialt motverkade tillförseln den sjunkande trenden i våtmarken. Därefter höjdes grundvattennivån under gölen och ytvattennivån i gölen successivt vid fortsatt tillförsel med stegvis ökat flöde. De vattenkemiska analyserna verifierar att det tillförda vattnet hade fullgod kvalitet. Analyserna ger stöd för hypotesen att det tillförda vattnet nådde moränen i tillförselområdet och följde flödesvägar i moränen mot gölen. Längs dessa flödesvägar fick vattnet en karaktär som i huvudsak motsvarar våtmarkens naturliga grund- och ytvattenkemiska sammansättning.

Efter försöket har MIKE SHE-modellen uppdaterats med data och information som insamlats inför och under försöket. Med den uppdaterade modellen undersöktes olika beräkningsfall för att jämföra modellens överensstämmelse med den hydrologiska respons som uppmättes under försöket. Resultaten visar överlag på en tydlig och realistisk modellberäknad respons. Bäst överensstämmelse erhålls om lagret med glaciallera representeras i ett eget beräkningslager, och om vattnet i modellen tillförs via brunnar som representerar de gropar som grävdes genom glacialleran.

Pilotförsöket visar att det är praktiskt genomförbart att vid behov, med relativt små flöden, reglera grund- och ytvattennivåer i Forsmarks våtmarker. Genomförandet av försöket har gett viktiga erfarenheter och lärdomar. Försöket visar bland annat på vikten av kompletterande fältundersökningar. Försöket visar även på behov av system som under drift endast kräver liten grad av tillsyn och reglering, och som ger stabil vattentillförsel vid både låga och höga flöden.

Abstract

In case of hydrological impact on valuable, groundwater-dependent wetlands (lime ponds surrounded by rich fens) in Forsmark, associated with construction and operation of a final repository for spent nuclear fuel, SKB has proposed water supply as a method to preserve those ecological values that depend on groundwater discharge and a near-surface groundwater table. As a preparatory step, SKB has conducted a short water-supply pilot test at one of the valuable wetlands. The objectives of the pilot test are to learn, gain experiences and to investigate the possibilities to regulate ground- and surface-water levels in the wetlands of Forsmark. Hence, the test and the present report are focused on the hydrological aspects of the water supply, and they provide a basis for continued studies on ecological aspects of permanent water supply during construction and operation.

Prior to the test, hydrological calculations were performed using the MIKE SHE modelling tool, for dimensioning and planning purposes. Soil drilling, installation of groundwater-monitoring wells and manual soil probing were also performed prior to the test, in the area between the supply site and the wetland, and geophysical investigations (resistivity measurements) were done along transects across the wetland. Pits were dug through a glacial-clay layer at the supply pipe, in order to facilitate hydraulic contact with the underlying till.

During the test, the water (process water from FKA's waterworks) was supplied through a perforated supply pipe in a till slope on the south-western side of the wetland. In total, some 826,000 litres of water were supplied during the nine-day test (August 19–28, 2013), initially using a flow rate of 0.5 litres per second. The flow rate was increased after three and four days, respectively, to 1 and subsequently 2 litres per second. Groundwater and surface water were sampled for chemical analysis prior to, during and after the test. Moreover, ground- and surface-water levels were continuously monitored, both in the wetland and in other wetlands in the Forsmark area. The relevant period was unusually dry and characterised by declining ground- and surface-water levels in the whole area.

The water-level monitoring shows a clear hydrological response to the water supply. Taking the declining ground- and surface-water levels in other parts of the area into account, the hydrological response (the water-level increase) in the wetland was c. 0.2 metres. Initially, the supply counteracted the declining trend in the wetland. Subsequently, the groundwater level below the pond and the surface-water level in the pond were gradually raised in response to the continued supply at stepwise higher flow rates. The chemical water analyses verify that the supplied water was of adequate quality. The analyses support the hypothesis that the supplied water reached the till at the supply site and followed flow paths in the till towards the pond. Along these flow paths, the water attained a character that mainly corresponds to the natural ground- and surface-water composition of the wetland.

After the test, the MIKE SHE model was updated using data and information gathered prior to and during the test. Using the updated model, different calculation cases were examined to compare the match to the measured hydrological response during the test. Overall, the results show a clear and realistic model-calculated response. The best match is obtained if the glacial-clay layer is represented in a separate calculation layer, and if the water in the model is supplied through wells that represent the pits dug through the glacial clay.

The pilot test demonstrates that if required, it is practically feasible to regulate ground- and surface-water levels in the wetlands of Forsmark using relatively small flow rates. The performance of the test has provided important experiences and lessons learnt. For instance, the test shows the importance of supplementary field investigations. Moreover, the test demonstrates the need for systems that during operation require minor supervision and regulation, and that provide stable water supply both at small and large flow rates.

Innehåll

1	Bakgrund och syfte	7
2	Förberedelser	9
2.1	Val av vattenkälla, våtmark och läge vid våtmark	9
2.1.1	Val av vattenkälla	9
2.1.2	Val av våtmark och läge vid våtmark	9
2.2	Kompletterande fältundersökningar och installationer	11
2.2.1	Inledning	11
2.2.2	Borrningar och installation av grundvattenrör	11
2.2.3	Geofysiska undersökningar	13
2.3	Dimensionering och tekniska lösningar för vattentillförsel och flödesmätning	16
2.3.1	Dimensionering och förväntad hydrologisk respons	16
2.3.2	Tekniska lösningar för vattentillförsel och flödesmätning	19
2.4	Program för flödesreglering, mätning och provtagning	20
2.5	Testkörning och gropgrävning	22
3	Genomförande	23
4	Resultat	25
4.1	Flöden och tillförda vattenvolymer	25
4.2	Hydrologiska responser	26
4.3	Resultat från de vattenkemiska analyserna	29
5	Uppföljande MIKE SHE-modellering	31
5.1	Bakgrund	31
5.2	Uppdatering av lokal MIKE SHE-modell	31
5.2.1	Justering av gölens batymetri och utlopp i modellen	31
5.2.2	Uppdatering av jordlagermodellen i MIKE SHE	32
5.3	Modellering av försöket med vattentillförsel	32
6	Utvärdering och slutsatser	37
	Referenser	39
Bilaga 1	Resultat från vattenkemiska analyser	41

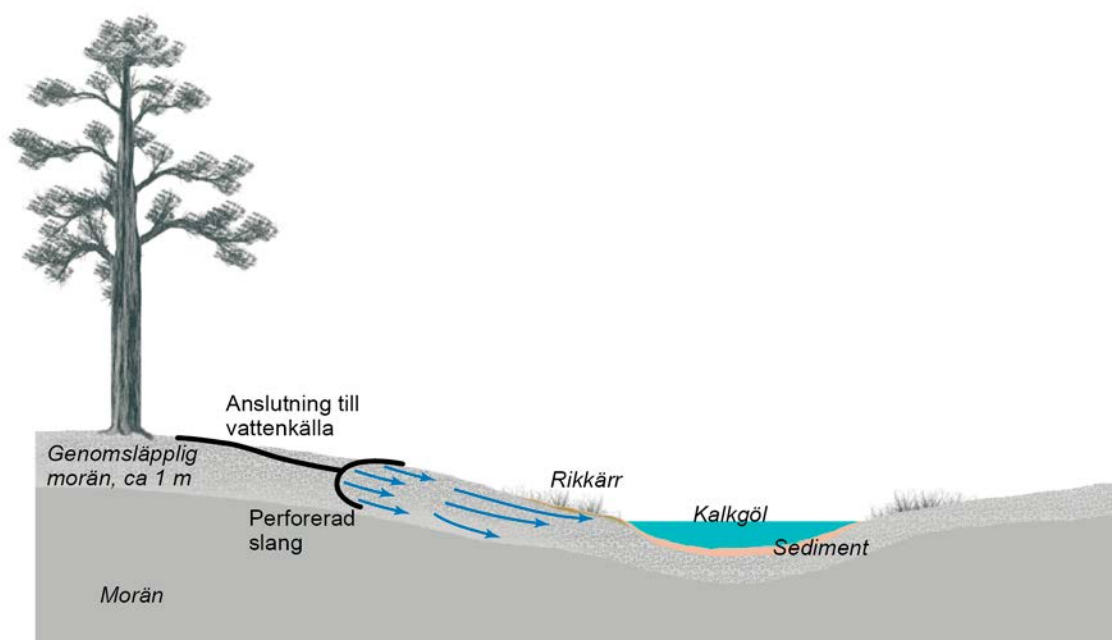
1 Bakgrund och syfte

SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) planerar ett slutförvar för använt kärnbränsle på cirka 500 meters djup i Forsmark i Östhammars kommun. Hydrologisk modellering visar att de hydrologiska förhållandena i ett antal värdefulla, grundvattenberoende våtmarker (kalkgölar som omges av rikkärr) kan påverkas av grundvattenbortledningen från slutförvarets undermarksdelar under uppförande och drift (Werner et al. 2010). Dessa slutsatser gäller för ett hypotetiskt beräkningsfall med ett helt öppet slutförvar och mycket begränsad berginjektering (Mårtensson och Gustafsson 2010). Som en åtgärd mot sådan påverkan, om den mot förmodan skulle uppstå, föreslår SKB i miljökonsekvensbeskrivningen att vatten vid behov tillförs våtmarkerna för att bevara deras ekologiska värden under uppförande och drift (SKB 2011). Den tänkta principen visas i figur 1-1, där vatten tillförs fastmark vid sidan om våtmarken och flödar genom den övre delen av moränen mot våtmarkens rikkärr och kalkgöl. Åtgärden syftar till att bevara de ekologiska värden som är beroende av utströmmande grundvatten och en grundvattenyta som är belägen nära markytan.

I dagsläget finns det mycket begränsade erfarenheter rörande tillförsel av vatten till den aktuella typen av våtmarker. Därför har SKB, som en förberedande åtgärd och i enlighet med principskissen i figur 1-1, genomfört ett pilotförsök med tillförsel av vatten till en av de värdefulla våtmarkerna i Forsmark. Pilotförsöket syftar till att skaffa erfarenheter, dra lärdomar och demonstrera att grund- och ytvattennivåer i våtmarker vid behov går att reglera. Försöket och föreliggande rapport fokuserar således på den kortvariga vattentillförselns hydrologiska aspekter, och utgör ett av underlagen för fortsatta studier kring ekologiska aspekter av permanent vattentillförsel under uppförande och drift.

Pilotförsöket har bedrivits som ett sammanhållet projekt som innehåller de olika moment som kan bli aktuella vid eventuell permanent vattentillförsel under uppförande och drift. Dessa moment inkluderar förstudier, undersökningar och installationer i fält, tekniska lösningar för vattentillförsel, flödesreglering och mätningar samt genomförande och utvärdering. Detta dokument ger en redogörelse för pilotförsöket och dess resultat. Pilotförsöket förbereddes och genomfördes i enlighet med aktivitetsplan AP SFK 10-036 (SKB-internt styrdokument), med betydande praktiska insatser från Bert-Ove Vidmark och Folke Eriksson (SKB) samt Mats Kastberg från Korsbron Åkeri AB.

I rapporten används koordinatsystemet RT 90 2,5 gon V/0:15 i plan (X, Y) och RHB 70 i höjd (Z).



Figur 1-1. Principskiss som visar vattentillförsel till en våtmark med rikkärr och kalkgöl. I pilotförsöket tillfördes vattnet i fastmark vid sidan om våtmarken, via en perforerad spridningsledning (se även figur 2-2).

2 Förberedelser

2.1 Val av vattenkälla, våtmark och läge vid våtmark

2.1.1 Val av vattenkälla

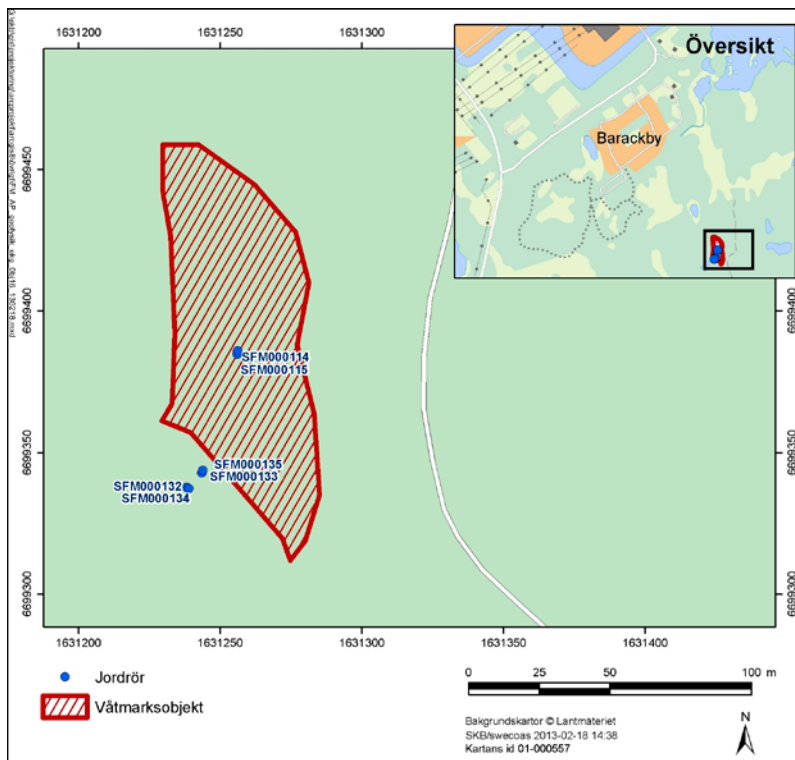
Inför val av vattenkälla för försöket inventerades olika alternativ i området, såsom råvatten från sjön Bruksdammen, vatten från FKA:s (Forsmarks Kraftgrupp AB) vattenverk, grundvatten från borrhål samt ytvatten från lokala sjöar och bäckar. Som krav uppställdes att det vatten som tillförs under försöket inte ska innehålla några föroreningar, och dess sammansättning ska även i övrigt vara lämpligt att tillföra en våtmark för att inte orsaka negativ ekologisk påverkan. Exempel på viktiga vattenparametrar bedömdes vara pH, kloridhalt, alkalinitet och innehåll av näringsämnen samt järn och mangan. Som underlag för de vattenkemiska bedömningarna användes bland annat resultat från analyser av ytvatten från ett antal våtmarker i området (Qvarfordt et al. 2010, 2011, 2014), inklusive den våtmark som sedermera valdes ut för försöket (se avsnitt 2.1.2).

I samråd med FKA beslutades att som vattenkälla använda det ”processvatten” som framställs vid deras vattenverk av råvatten från sjön Bruksdammen (FKA 2005). Processvattnet genomgår samma rening och behandling som det dricksvatten som också produceras (fällning med aluminiumsulfat, flotation och snabbsandfilter, pH-justering med lut (natriumhydroxid), med undantag för att processvattnet inte genomgår kolfiltrering och får en lägre dos klor (med natriumhypoklorit). De regelbundna vattenkemiska analyser som görs på processvattnet visar att det håller mycket hög kvalitet och är invändningsfritt som vattenkälla för pilotförsöket. Innan processvattnet distribueras lagras det i två lågreservoarer (reservoarer på lägre trycknivå än ledningsnätet), vilket i kombination med övervakningen av alla processteg innebär att det är en obetydlig risk att olämpligt vatten skulle ha tillförts våtmarken under försöket.

2.1.2 Val av våtmark och läge vid våtmark

Kandidater för pilotförsöket var någon av de fem våtmarker som enligt miljökonsekvensbeskrivningen för slutförvaret kan bli aktuella för permanent vattentillförsel. Dessa våtmarker har höga naturvärden och de kan komma att påverkas hydrologiskt av grundvattenbortledningen (SKB 2011). Våtmarkerna, som sedan ett antal år är föremål för omfattande hydrologisk, kemisk och ekologisk monitoring, består av kalkgölar som omges av rikkärr, tillhörande Natura 2000-naturtyperna Kalkrika oligomesotrofa vatten med bentiska kransalger (naturtyp 3140) respektive Rikkärr (naturtyp 7230). Dessa naturtyper är beroende av utströmmande grundvatten och att grundvattenytan är nära markytan. Eftersom de är jämförbara ur både ekologisk och hydrologisk synpunkt, ger ett pilotförsök i någon av dem relevanta erfarenheter för eventuell permanent vattentillförsel även i övriga aktuella våtmarker under uppförande och drift av slutförvaret. Bland kandidatvåtmarkerna gjordes en avvägning för att finna den som skulle ge största möjliga nytta med ett relativt avgränsat och kortvarigt pilotförsök. Dessa avvägningar omfattade faktorer såsom lokala topografiska, kvartärgeologiska och hydrologiska förhållanden, avstånd och tillgänglighet från farbar väg för fältarbeten, installationer och ledningsdragning samt ekologiska värden i våtmarkens omgivning.

Som utgångspunkt planerades vattentillförseln ske via en perforerad, cirka 20 m lång ledning på markytan. Specifikt eftersöktes därför en moränslutning där vattentillförsel och mätinstallationer kunde anordnas utan mer omfattande röjning av träd och block. Vidare sågs det som en fördel med en relativt okomplicerad jordlagerföljd vid tillförselplatsen, och att försöket gjordes vid en våtmark som har begränsad eller ingen hydrologisk kontakt med angränsande våtmarker samt närhet till farbar väg och vald vattenkälla (FKA:s processvattenledning). Slutligen skulle tillförselplatsen vara så nåbar som möjligt utan att påverka områden med höga naturvärden. Utifrån dessa bedömningskriterier valdes bland de fem kandidaterna den våtmark som i miljökonsekvensbeskrivningen (SKB 2011) betecknas ”våtmarksobjekt 16”, se figur 2-1. Om inte annat nämns, är det denna våtmark som avses och beskrivs i denna rapport. Utifrån inventering i fält konstaterades att vattentillförseln lämpligast skulle genomföras i en relativt blockfri moränslutning på våtmarkens sydvästra sida, strax sydväst om de grundvattenrör som betecknas SFM000132 och -134 i den övre bilden i figur 2-1.



Figur 2-1. Övre bilden: Läge för den valda våtmarken i Forsmark. Tillförseln skedde på våtmarkens sydvästra sida, strax sydväst om de grundvattenrör som betecknas SFM000132 och -134. Nedre bilden: Fotografi på den aktuella våtmarken under pågående vattentillförsel. I bilden syns grundvattenröret SFM000114 och pegelröret SFM000115, som installerades våren 2009, och den flytbrygga som används vid tillsyn och kontroll.

Inför försöket stakades en transportväg till tillförselplatsen från närmsta farbara väg, via ett skogsområde utan betydande naturvärden. Vidare lämnades i juni 2012 en anmälan till Länsstyrelsen Uppsala om samråd enligt miljöbalken samt en ansökan om dispens från terrängkörningslagen och terrängkörningsförordningen.

Den valda våtmarken utgörs av en cirka 50 m lång, 25 m bred och 0,5 m djup kalkgöl som omges av rikkärr, ungskog och sumpskog. Våtmarken hyser både gölgroda och gulyxne (Hamrén och Collinder 2010). Jordlagren i våtmarken utgörs av morän som överlagras av lergyttja. Tidigare sticksondering och borrhning (Sohlenius och Hedenström 2009, Werner et al. 2009) hade påvisat att det i kärrområdena utanför gölen ställvis finns postglacial sand och glaciärra mellan lergyttjan och moränen, inklusive ett mer sammanhängande område i våtmarkens sydöstra del. Områdena kring våtmarken bedömdes huvudsakligen sakna postglaciala sediment och glaciärra.

2.2 Kompletterande fältundersökningar och installationer

2.2.1 Inledning

Som utgångspunkt för planeringen av pilotförsöket vid den valda våtmarken fanns tillgång till SKB:s platsundersökningar och platsbeskrivning, inklusive topografiska data, jordartskarta och jordlagermodell (Lindborg 2008). Det fanns även tillgång till viss lokal information om jordlagerföljd från sticksondering (Sohlenius och Hedenström 2009), borring (Werner et al. 2009) samt kontinuerliga grund- och ytvattennivådata sedan april 2009 från ett grundvattenrör i morän under gölen i våtmarken och ett pegelrör i gölen.

I syfte att ta fram ett mer detaljerat underlag för planering, genomförande och uppföljning av försöket genomfördes vid våtmarken ett antal kompletterande fältundersökningar och installationer, som beskrivs i nedanstående avsnitt. Bland annat fanns det från tidigare sticksondering indikationer på ställvis förekomst av glaciallera ovan moränen i och kring våtmarken. Förekomst av glaciallera vid tillförselplatsen skulle kunna minska möjligheterna för det tillförda vattnet att nå moränen som avsett (se figur 1-1), varför detta behövde undersökas närmare.

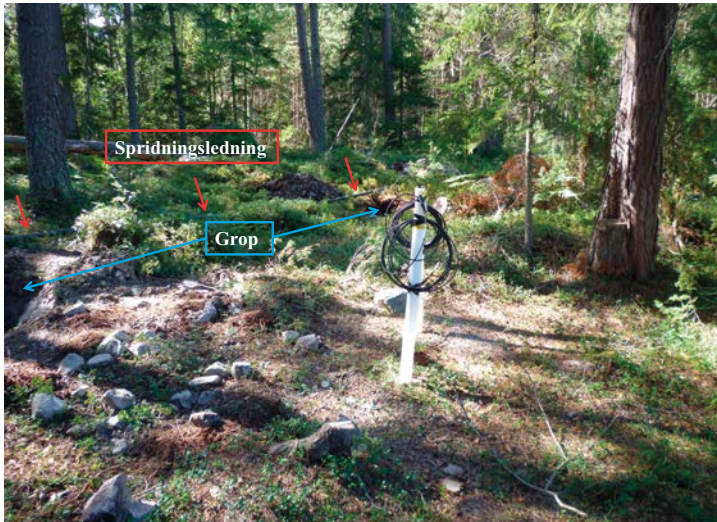
2.2.2 Borringar och installation av grundvattenrör

I området mellan den tilltänkta tillförselplatsen och det rikkärr som omger gölen genomfördes jordborring, -provtagning samt installation av fyra grundvattenrör (SFM000132–135; se figur 2-2) med lätt borrhandsvagn den 17–18 september 2012 (SKBdoc 1366471). Inför borringen snitslades den 5 september en lämplig transportväg mellan farbar väg genom skogen och borrhandsplatsen. Undersökningarna syftade till att erhålla lokal information från tillförselplatsen rörande jordlagerföljd samt jordlagrens hydrauliska egenskaper och kalkhalt. Speciellt var det viktigt att undersöka kalkhalten i moränen vid tillförselplatsen, eftersom syftet var att det tillförda vattnet längs flödesvägarna i moränen skulle uppnå hög kalkhalt innan det strömmade ut i gölen. Grundvattenrören installerades för att möjliggöra grundvattennivåmätning samt vattenprovtagning i en transekt mellan tillförselplatsen och våtmarken.

De jordlager som påträffades vid borringarna framgår av tabell 2-1. Ursprungligen planerades att borra två borrhål och installera två grundvattenrör. I samband med att borringarna inleddes påträffades ett lager med brungrå, rostfläckig glaciallera med siltskikt ovan moränen, varför beslut fattades om att borra totalt fyra borrhål och installera två parvisa grundvattenrör cirka 5 m respektive 15 m från spridningsledningens planerade läge. Som framgår av tabell 2-1 påträffades sådan glaciallera (mäktighet 0,4–0,6 m) i tre av de fyra borrhålen. I dessa fyra borrhål installerades två grundvattenrör ytligt (SFM000134 och -135), med intagsdelen ovan glacialleran, och SFM000132 och -133 installerades med intagsdelen på större djup (i SFM000133 under glacialleran), se tabell 2-2.

Tabell 2-1. Jordlagerföljd vid lägena för grundvattenrören SFM000132–135 (SKBdoc 1366471). Jordartsbeteckningarna följer det beteckningssystem som anges i bilaga C i IEG (2010). m u my = meter under markytan.

Id	Djup (m u my)	Jordart
SFM000132	0,0–0,4	Fyllning/Brun grusig mulljord, delvis krossat material.
	0,4–0,5	Fyllning/Brunt mullhaltigt sandigt grus med växtdelar, delvis krossat material.
	0,5–0,7	Grått grus delvis krossat material, troligtvis genomborrat block.
	0,7–1,9	Grått sandigt siltigt grus, delvis krossat material, oljelukt.
	1,9–2,8	Grå sandig siltig grusmorän.
SFM000133	0,0–0,3	Fyllning/Brun grusig siltig mulljord.
	0,3–0,9	Brungrå rostfläckig lera med siltskikt.
	0,9–1,5	Grå sandig grusig siltig morän.
	1,5–2,0	Grå grusig sandig siltig morän.
SFM000134	0,3–0,7	Brungrå rostfläckig lera med siltskikt.
	0,7–1,1	Grå sandig siltig grusmorän.
SFM000135	0,4–1,0	Brungrå rostfläckig lera med siltskikt.
	1,0–1,3	Grå sandig siltig grusmorän.



Figur 2-2. Övre bilden: Grundvattenrören SFM000132–135. SFM000132 (djupt installerat) och -134 (ytligt installerat) är till vänster respektive till höger närmast i bilden. SFM000135 (ytligt installerat) är längst bort i bilden, närmast våtmarken, och SFM000133 (djupt installerat) är hitom -135. Rakt fram bakom träden finns ett rikkärr mellan tillförselplatsen och gölen, som är belägen längre bort bakom träden i bildens vänstra del. Nedre bilden: Grundvattenrören SFM000132, -134 och en del av den perforerade spridningsledningen (röda pilar) som användes för vattentillförseln. Strax hitom spridningsledningen syns ett par av de gropar (blåa pilar) som inför genomförandet grävdes genom glacialleran för att få direktkontakt med moränen.

Ett så kallat CRS-försök (eng. Constant Rate of Strain; ödometerförsök med konstant deformationshastighet) genomfördes på ett prov av glacialleran från borrhningen av SFM000133 (0,3–0,9 m u my) för att bedöma dess hydrauliska konduktivitet. Försöket påvisade att glacialleran är mycket tät, med en hydraulisk konduktivitet på cirka 10^{-9} m/s (SKBdoc 1366471). Vidare gjordes kornstorleksanalys på två moränprov från två olika djup vid borrhningen av SFM000133 (0,9–1,5 samt 1,5–2,0 m u my). Utifrån analyserna har moränen vid tillförselplatsen en hydraulisk konduktivitet på cirka 10^{-8} – 10^{-6} m/s, med en något högre konduktivitet för den grusiga moränen (1,5–2,0 m u my) jämfört med den sandiga moränen (0,9–1,5 m u my). Kemiska analyser visar att både glacialleran och moränen har en hög CaCO_3 -halt, cirka 35 % respektive 25 %, vilket är typiskt för Forsmarksområdet (Hedenström och Sohlenius 2008).

De installerade grundvattenrören (tabell 2-2) är av PEH-typ, med en inre diameter på 0,054 m och en yttre diameter på 0,063 m. Rörens slitsade intagsdel har en längd på 0,9 m, en inre diameter på 0,040 m och en yttre diameter på 0,050 m. Under filterdelen finns en 0,1 m lång sumpdel. Rören mättes in och avvägdes i oktober 2012 (SKBdoc 1395324). Ny avvägning genomfördes i juni, augusti och september 2013 (SKBdoc 1417299). Enligt avvägningen har rören sjunkit 5–9 mm under perioden mellan avvägningarna.

Tabell 2-2. Data på grundvattenrören SFM000132–135. Rören mättes in och avvägdes i oktober 2012 (SKBdoc 1395324). Z-koordinater inom parenteser visar nivå på röröverkant (rök) enligt förnyad avvägning 2013 (SKBdoc 1417299). m ö my = meter över markytan, m u my = meter under markytan.

Beteckning	X (Northing)	Y (Easting)	Z (rök)	Total rörlängd (m)	Rörlängd (m ö my)	Filter (m u my)
SFM000132	6699337,572	1631238,204	3,916 (3,909)	3,10 (filter 2,10–3,00 m u r ö k)	0,98	1,12–2,02
SFM000133	6699342,663	1631243,570	3,569 (3,560)	3,10 (filter 2,10–3,00 m u r ö k)	1,02	1,08–1,98
SFM000134	6699337,246	1631238,957	3,905 (3,900)	2,10 (filter 1,10–2,00 m u r ö k)	1,02	0,08–0,98
SFM000135	6699343,573	1631243,924	3,517 (3,511)	2,10 (filter 1,10–2,00 m u r ö k)	0,99	0,11–1,01

2.2.3 Geofysiska undersökningar

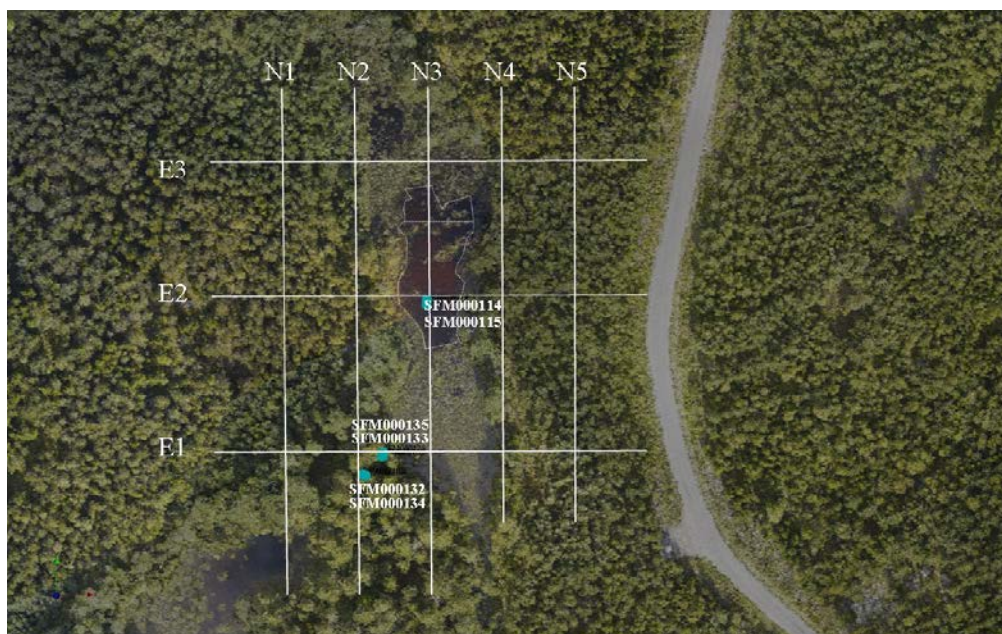
Jordborringarna (avsnitt 2.2.2) påvisade förekomst av glaciallera vid den tilltänkta tillförselplatsen, men också att detta lager inte var sammanhängande. I november 2012 gjordes därför kompletterande sticksondering och provgrovsgrävning vid och kring det aktuella området, i syfte att närmare undersöka glaciallerans utbredning (figur 2-3). Glaciallera återfanns i vissa men inte alla de undersökta punkterna. Det var dock svårt att med sticksond och spade penetrera det grusiga och steniga övre lagret (se tabell 2-1), vilket försämrade möjligheterna att med sondering och gropgrävning påvisa eventuell förekomst av glaciallera. Dessa omständigheter pekade på behovet av en geofysisk undersökning, för att få en mer heltäckande bild av glaciallerans utbredning och mäktighet i det aktuella området.

Utifrån en utredning om lämpliga geofysiska metoder såsom markradar (Jol 2009) samt slingram och resistivitetsmätningar (Nabighian 1991), valdes den senare metoden för de geofysiska undersökningarna. Förutom att få fram information om områdets jordlagerföljd, lerbeförekomster och djup till berg, sågs det också som viktigt att undersökningen gav erfarenheter om metodens tillämpbarhet i en typ av våtmarksmiljö som är vanlig förekommande i Forsmark. Vid resistivitetsmätningar alstras ett elektriskt potentialfält i marken genom att sända ut likström via strömelektroder. Den elektriska potentialen, som mäts med potentialelektroder, är hög vid hög resistivitet och låg vid låg resistivitet. Genom kännedom om olika jordarters resistivitet (ohm/m), kan uppmätta resistivitetsvariationer i plan och djup tolkas för att bygga upp en modell av det undersökta områdets jordlagerföljd, inklusive lerbeförekomster.

Mätningarna genomfördes i maj 2013 i tre öst–västliga (E1–E3) och fem nord-sydliga (N1–N5) 120–140 m långa transekter tvärs våtmarken (Mattsson 2013), se figur 2-4. Vid mätningarna, som genomfördes med ett multielektroinstrument, användes ett elektrodavstånd på 1 m. Under rådande förhållanden erhålls därmed information om jordlagerföljd, lerbeförekomster och djup till berg ned till maximalt 10 m under markytan. Elektrodavståndet 1 m innebär vidare att tolkade jordlagermäktigheter som är mindre än 1–2 m kan betraktas som osäkra (Mattsson 2013).



Figur 2-3. Provgrovsgrävning gjordes i november 2012 för att närmare undersöka glaciallerans utbredning vid den tilltänkta tillförselplatsen. Grundvattenrören SFM000132 och -134 syns till höger i bilden.



Figur 2-4. Flygbild över våtmarken som visar lägena för de åtta transekter där resistivetsmätningar genomfördes. Bilden visar även lägena för de sex grundvatten- och pegelrören SFM000114, -115 och SFM000132–135, från vilka information om jordlagerföljd användes som stöd vid tolkningen av mätningarna.

Längs transekterna E1 och N2, som båda passerar området där grundvattenrören SFM000132–135 är installerade, mättes förutom resistivitet även IP (inducerad polarisation). Vid IP-mätningar mäts markens förmåga att fungera som kondensator genom mätning av potentialens avtagande efter att strömmen brutits. Syftet med IP-mätningarna var att undersöka om de i den aktuella miljön kan ge kompletterande information om glaciallerans utbredning och mäktighet, eftersom leror kan ha en tydlig IP-effekt. I det aktuella fallet var de IP-data som erhöles från mätningarna dock inte entydiga, och gav därför endast begränsat med kompletterade information (Mattsson 2013).

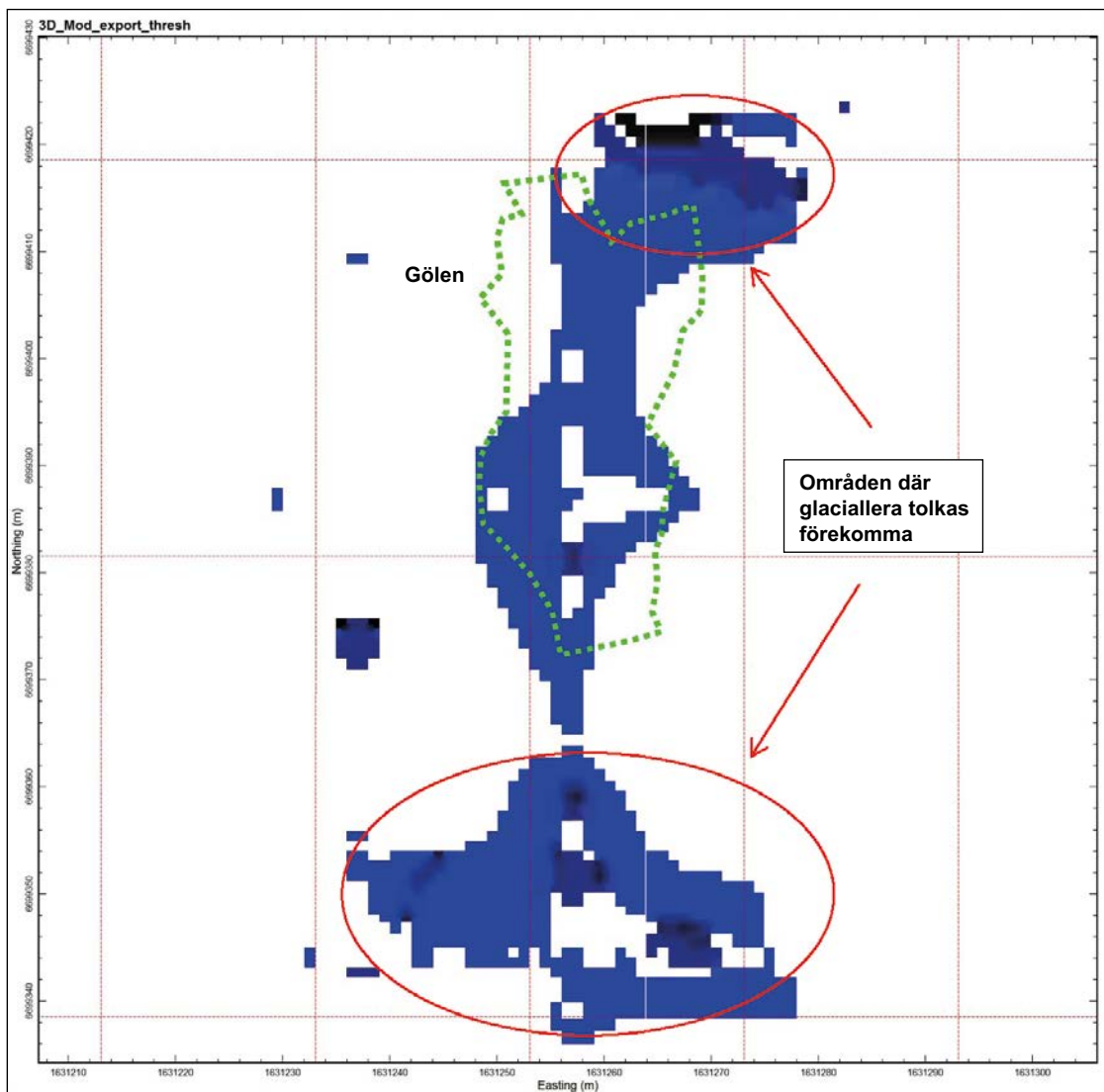
Glaciallera, gyttja och ytvatten har i regel överlappande resistivitetsintervall (e.g. Lowrie 1997). För att förbättra möjligheterna att särskilja glaciallera från gyttja och ytvatten vid tolkningen av resistivetsmätningarna gjordes även resistivets- och IP-mätningar direkt på sex stycken jordprover med glaciallera, som togs från den grop som grävdes vid tillförelplatsen i juni 2013 (se figur 2-5 och avsnitt 2.5). Dessa mätningar visar på en medelresistivitet för de sex proverna på 88 ± 7 ohm/m. Vidare visar mätningar av ytvattnets elektriska konduktivitet (som är omvänt proportionell mot resistiviteten) i gölen på en resistivitet som är cirka 40 ohm/m (e.g. Qvarfordt et al. 2010, 2011, 2014). Dessa kompletterande mätningar var viktiga för att med större säkerhet kunna identifiera våtmarkens förekomster av glaciallera. De närliggande resistivetsvärdena pekar dock på de svårigheter som fanns vid tolkningen av fältmätningarna.

Resistivetsmätningarna var generellt av god kvalitet, och vid den efterföljande tolkningen av dem användes information om jordlagerföljd från borrhning och installation av de grundvatten- och pegelrör som finns i och kring våtmarken. Enligt tolkningen av respektive mätningstransekt förekommer glaciallera i områdena norr och söder om gölen, men möjligen endast ställvis i övrigt. De transektpartier som passerar genom gölen bedöms som svårtolkade med avseende på glaciallera, på grund av överlappande resistivetsintervall för glaciallera, gyttja och ytvatten.

Baserat på resistivetsmätningarna gjordes även en 3-dimensionell tolkning, där resistivetsintervallet 80–140 ohm/m antogs motsvara volymer med glaciallera. I nämnda intervall baseras den lägre gränsen på de resistivetsmätningar som gjordes direkt på jordprover med glaciallera, medan den övre gränsen är erfarenhetsbaserad (Mattsson 2013). Enligt den 3-dimensionella tolkningen förekommer glaciallera, med en mäktighet på maximalt 1 m, främst i två separata lågområden utanför gölen i våtmarkens norra (cirka 200 m²) respektive södra del (cirka 800 m²), se figur 2-6. Denna tolkning av glaciallerans utbredning är inte entydig (Mattsson 2013). Tolkningen är dock kvartärgeologiskt rimlig, och det finns heller ingen annan information som indikerar att glaciallera förekommer under gölen.



Figur 2-5. Närbild på glaciallera från den grop som grävdes vid tillförelplatsen i juni 2013.



Figur 2-6. Områden (röda ringar) med tolkad förekomst av glaciallera från resistivitetmätningarna. Gölens ungefärliga utsträckning är markerad med gröna, streckade linjer. Blåa färger representerar resistivitetvärden i intervallet 80–140 ohm/m (Mattsson 2013).

Resistivitetmätningarna tydde alltså på att den tilltänkta tillförselplatsen endast angränsade till ett av de områden där glaciärrer främst förekommer (det södra området), och att dess mäktighet där inte avviker på något markant sätt från de mäktigheter som konstaterats vid borrhningarna (avsnitt 2.2.2). Utifrån detta fattades beslut om att behålla det sedan tidigare planerade läget för tillförseln, och att gropar skulle grävas omedelbart nedströms spridningsledningen för att underlätta den hydrauliska kontakten med moränen.

De geofysiska undersökningarna hade således stort värde för den fortsatta planeringen av vattentillförselns genomförande. Undersökningarna visar att den valda metoden är tillämpbar i den aktuella typen av våtmarksmiljö. Den bör därför användas som underlag för planering av eventuell permanent vattentillförsel vid de övriga våtmarker i Forsmark som kan bli aktuella för denna åtgärd. Undersökningarna pekar även på behoven av stödjande information från borrhningar och mätningar direkt på jordprover vid tolkning av mätningarna. I det aktuella fallet fanns det tillgång på viss sådan stödjande information. Vid framtida tillämpningar bör dock denna information även inkludera resistivitetmätningar direkt på prov av den gytta som finns på botten av gölarna i Forsmark.

2.3 Dimensionering och tekniska lösningar för vattentillförsel och flödesmätning

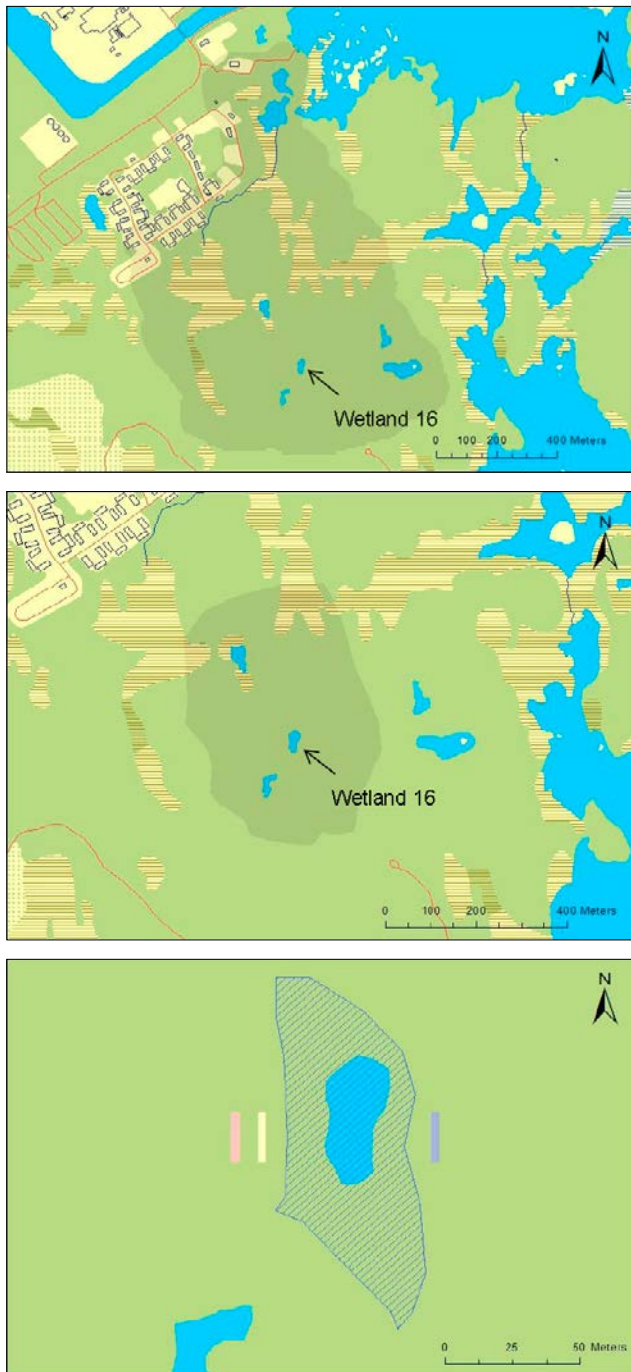
2.3.1 Dimensionering och förväntad hydrologisk respons

Inför försöket genomfördes hydrologiska modellberäkningar som underlag för dimensioneringen av tillförselsystemet och planeringen av försökets utförande (Bergström 2013). Beräkningarna genomfördes med modelleringsverktyget MIKE SHE, som även används av SKB för platsbeskrivande hydrologisk modellering (Bosson et al. 2008), analyser av hydrologiska effekter under uppförande och drift av kärnbränsleförvaret (Mårtensson och Gustafsson 2010) samt analyser av kärnbränsleförvarets långsiktiga säkerhet (Bosson et al. 2010). De MIKE SHE-modeller som upprättats för nämnda tillämpningar omfattar flödesprocesser som förändras över lång tid (upp till tusentals år) och sker på regional skala (flera tiotals km²). De aktuella modellberäkningarna berör däremot förhållandevis kortvariga hydrologiska förändringar som sker inom loppet av några dygn och på lokal skala (mindre än 1 km²).

För att kunna göra de eftersträvade prognoserna upprättades därför en lokal MIKE SHE-modell över den aktuella våtmarken (Bergström 2013). Den lokala modellen upprättades stegvis, via en regional modell och en semi-lokal modell. Som ett initialt moment inför det första steget uppdaterades en sedan tidigare upprättad regional MIKE SHE-modell över Forsmarksområdet (Mårtensson och Gustafsson 2010), dels med en uppdaterad höjdmodell (Strömgren and Brydsten 2013), dels med en uppdaterad modell över jordlagrens geometri i Forsmark (Sohlenius et al. 2013).

Det stegvisa förfarandet innebär att den semi-lokala modellen etableras som ett utsnitt ur den regionala modellen, medan den lokala modellen utgörs av ett utsnitt ur den semi-lokala modellen. I den lokala modellen etablerades en separat höjdmodell som baseras på laserskanning (Strömgren och Brydsten 2013), med en horisontell upplösning på 0,25 m. Laserskanningen ger dock data på nivån på gölens vattenyta, varför gölens batymetri (bottentopografi) representerades i MIKE SHE genom att interpolera djupdata från borrhningar (Werner et al. 2009) och sticksonderingar (Sohlenius och Hedenström 2009).

Den regionala modellens gränser följer vattendelare, medan gränserna för den semi-lokala och den lokala modellen (figur 2-7) förlades så att influensen från den vattentillförsel som skulle simuleras med säkerhet inte når fram till respektive modellområdes gränser. Efter ovannämnda uppdatering användes den regionala modellen för att ta fram tidsberoende randvillkor, i form av tidsberoende grundvattennivå längs modellens gränser på land, till den semi-lokala modellen. Den senare användes i sin tur för att ta fram tidsberoende randvillkor till den lokala modellen. Den regionala modellen har ett modellområde på 56 km², medan den semi-lokala modellen och den lokala modellen har ett modellområde på 0,83 respektive 0,18 km². Den horisontella rumsliga upplösningen i respektive modell är 40 m, 10 m respektive 2 m.



Figur 2-7. Översiktskartor som visar den geografiska utsträckningen på det semi-lokala modellområdet (övre bilden) och det lokala modellområdet (mellersta bilden). I den undre bilden markerar den gula och den lila randen väster om gölen lägena för den ytillförsel som ansattes på modellens överyta 10 respektive 20 m från gölen (Bergström 2013).

Den regionala modellen har sin bottenivå på nivån $-1\ 200$ m, medan den semi-lokala och den lokala modellen har bottenivå på nivån -200 m. Modellerna har identisk vertikal upplösning, där de två övre beräkningslagren representerar jord och de underliggande representerar berg. Det övre beräkningslagret (lager 1) har en mäktighet på minst 2,5 m, i syfte att underlätta för evapotranspirationen att verka på tillräckligt stort djup i modellen (evapotranspiration beräknas enbart i det övre beräkningslagret). Det underliggande beräkningslagret (lager 2) har en mäktighet på minst 1 m, medan underliggande berglager (lager 3–12) vardera har en mäktighet på 20 m.

Som del av modelletableringen användes den semi-lokala modellen för att jämföra då tillängliga tidsserier (2009–2010) på modellberäknade och uppmätta grund- och ytvattennivåer vid lägena för grundvattenröret SFM000114 och pegelröret SFM000115 (se avsnitt 4.2). Notera att vid tiden för modelleringen var ännu inga grundvattennivådata tillgängliga från grundvattenrören SFM000132–135 (avsnitt 2.2.2). Som del av dessa jämförelser justerades bland annat tröskelnivån på gölens utlopp iterativt i modellen, för att successivt få bättre passning mot tidsserier på uppmätt ytvattennivå i pegelröret SFM000115 och den hydrauliska gradienten mellan grundvattennivån i SFM000114 och ytvattnet i gölen. Sådana justeringar gjordes även i den uppföljande MIKE SHE-modelleringen efter försöket (kapitel 5).

Som diskuteras närmare i Bergström (2013) är de uppmätta hydrauliska gradienterna små. Ursprungliga och uppföljande röravvägningar visar att återkommande tjällyftning och ishävning i våtmarksmiljön rubbar rörens vertikala lägen. I kombination med de mätosäkerheter som är förknippade med själva avvägningarna är därför en slutsats att de hydrauliska gradienterna och deras förändring i tid får betraktas som osäkra. Den modell som etablerades av Bergström (2013) kan ändå anses som relevant för sina syften. Modellen ger en beräknad tidsserie på gölens ytvattennivå som har god passning mot motsvarande uppmätta tidsserie. Den modellberäknade grundvattennivån under gölen är dock något lägre än den uppmätta vattennivån i grundvattenröret SFM000114 och även lägre än den modellberäknade ytvattennivån i gölen. Detta innebär att delar av våtmarken utgörs av ett inströmningsområde i MIKE SHE-modellen, medan området bör utgöra ett utströmningsområde såsom också indikeras av grund- och ytvattennivåmätningarna.

Som underlag för dimensioneringen av tillförselsystemet och planeringen av försökets utförande användes den etablerade, lokala MIKE SHE-modellen för att undersöka den hydrologiska responsen i våtmarken för ett antal olika beräkningsfall (Bergström 2013). Som utgångspunkt antogs att vattentillförseln skulle ske via en perforerad, cirka 20 m lång ledning i ett läge väster om våtmarken. Specifikt kvantifierades den hydrologiska responsen för olika avstånd (10 eller 20 m) mellan gölen och vattentillförsel väster om våtmarken (figur 2-7), samt för olika flöden i tillförselsystemet i intervallet 0,25–2 l/s. I MIKE SHE modellen representerades vattentillförseln i form av ytillförsel inom ett 2 m brett och 20 m långt område på modellens överyta. I varje beräkningsfall ansattes tillförsel under 9 dygn, som i olika beräkningsfall förlades till en torrperiod (slutet av juni/början av juli 2010), en halvblöt period (maj 2010) eller en blötperiod (april 2010). Vid utvärderingen av de olika beräkningsfallen definierades den så kallade hydrologiska responstiden som den tid som krävs för att höja den modellberäknade ytvattennivån i gölen i våtmarken med 0,01 m relativt opåverkade förhållanden, det vill säga relativt motsvarande beräkningsfall utan vattentillförsel.

Modelleringsresultaten visar sammanfattningsvis följande (Bergström 2013):

- En tillförsel på 0,25 l/s ger en förhållandevis lång hydrologisk responstid på 3–5 dygn, beroende på tillförselplatsens avstånd från våtmarken samt rådande meteorologiska förhållanden (en torr eller en halvblöt period). Motsvarande maximala hydrologiska respons (högsta ytvattennivåhöjning i gölen relativt opåverkade förhållanden) är enligt modellberäkningarna 0,01–0,03 m (fallet med kort responstid motsvaras av stor maximal respons). I beräkningsfallet med vattentillförsel under en blötperiod är den maximala responsen mindre än 0,01 m.
- En tillförsel på 0,5 l/s ger en responstid på 1–2 dygn, beroende på avståndet samt de meteorologiska förhållandena (en torr eller en halvblöt period). Motsvarande maximala respons är 0,03–0,07 m. I beräkningsfallet med tillförsel under en blötperiod erhålls en förhållandevis lång responstid (4 dygn) och en maximal respons på 0,01 m.
- En tillförsel på 1 l/s ger en responstid på 1 dygn, oberoende av tillförselplatsens avstånd från våtmarken och oberoende av om tillförseln sker under en torr eller en halvblöt period. Motsvarande maximala respons är 0,06–0,1 m. I beräkningsfallet med tillförsel under en blötperiod erhålls dock en förhållandevis lång responstid (3 dygn) och en maximal respons på 0,03 m.
- En tillförsel på 2 l/s ger en responstid på 1 dygn, oberoende av avståndet och oberoende av om tillförseln sker under en torr eller en halvblöt period. Den maximala responsen är 0,1–0,2 m (störst respons under en torrperiod). I beräkningsfallet med tillförsel under en blötperiod erhålls dock en förhållandevis lång responstid (3 dygn) och en maximal respons på 0,05 m.
- Inom ramen för studien undersöktes även tillförsel i intervallet 0,25–1 l/s med tillförseln i ett läge 10 m öster om våtmarken. Jämfört med motsvarande beräkningsfall med tillförsel väster om våtmarken ger dessa beräkningsfall något längre responstider och lägre maximala responser, vilket indikerar att delar av det tillförda vattnet inte når våtmarken.

Sammantaget indikerar de genomförda beräkningarna att vattentillförseln primärt bör ske under en torrperiod eller en period med endast begränsad nederbörd. Vattentillförseln bör inte ske under en blötperiod, på grund av svårigheter att identifiera den hydrologiska responsen på vattentillförsel under en sådan period. För de avstånd som är aktuella (i storleksordningen 10–20 m) visar modelleringen att avståndet mellan vattentillförseln och gölen påverkar responstiden men inte den maximala responsen. Modelleringen visar dock att flödet i tillförselsystemet har inverkan på både responstid och maximal respons.

Baserat på de genomförda modellberäkningarna bedömdes att utvärderingsbar hydrologisk respons på stegvis ökande tillförsel, i intervallet 0,5–2 l/s (liter per sekund), skulle kunna uppnås med ett försök som totalt pågick upp till cirka 10 dygn. Det fortsatta dimensioneringsarbetet (avsnitt 2.3.2) utgick därför från att flödena under försöket skulle vara i intervallet 0,5–2 l/s. Vidare antogs att den förväntade responstiden vid ett initialt flöde på 0,5 l/s i tillförselsystemet skulle bli i storleksordningen 1–2 dygn och ungefär ett dygn för respektive efterföljande steg under försöket, med tillflöden på 1–2 l/s.

2.3.2 Tekniska lösningar för vattentillförsel och flödesmätning

Som nämnts ovan användes processvatten från FKA:s vattenverk som vattenkälla under försöket. Inför försöket gjordes en utredning för att ta fram tekniska lösningar i form av lednings- och pumpdimensioner, flödesreglering och flödesmätning. Under försöket leddes vattnet från en inkopplingspunkt på FKA:s ledningsnät via en ledning till en ståltank (volym 10 m³), uppställd i området för tillfälligt boende i början av vägen till SKB:s undersökningsområde (figur 2-8). Tillflödet till tanken (SKB-id PFM007407) styrdes av en automatisk regleringsventil (Ventim VM9356), som var kopplad till nivåvippor (Pulsar BlackBox 130) för låg respektive hög vattennivå i tanken. I tanken fanns en dränkbar pump (Flygt B2102.041) som pumpade vattnet från tanken via en PEM-slang som övergick i en Alveniusledning (inre diameter 95 mm, längd cirka 1 200 m) längs vägen. Alveniusledningen var i sin tur ihopkopplad med dubbla PEM-slangar (diameter 50 mm, vardera med en längd på 300 m) som gick genom ett skogsområde och fram till tillförselplatsen. Elförsörjningen vid ståltanken skedde via en dieseldriven Atlas Copco QAS 28 elgenerator.

Vid tillförselplatsen var de parallella PEM-ledningarna ihopkopplade med en cirka 20 m lång, perforerad spridningsledning (Trelleborg Irriberg 15, inre diameter 50 mm) via en stålledning med en ventil (Ventim VM5950) för manuell reglering av flödet. En villamätare (AhlSELLs) var monterad i övergången från PEM-slangarna och stålledningen, för mätning av ackumulerad vattenvolym (den fick dock kopplas bort på grund av igensättningar) och en batteridriven flödesmätare (Pulsar Flow Pulse) låg an mot stålledningen för kontinuerlig mätning och loggning av vattenflödet till spridningsledningen.



Figur 2-8. Bild på den ståltank som var uppställd i området för tillfälligt boende, i början av vägen till SKB:s undersökningsområde. Till höger i bild syns den tillloppsledning som var inkopplad på FKA:s ledningsnät. Utgående vatten leddes i PEM-slangen från tankens manhål och vidare ut mot tillförselplatsen. Till vänster i bild syns den elgenerator som försedde regleringsventilen, nivåvipporna och den dränkbara pumpen i tanken med el under försöket.

2.4 Program för flödesreglering, mätning och provtagning

Inför försöket togs ett program fram avseende flödesreglering (tabell 2-3) samt mätning och provtagning. Som framgår av tabell 2-3 så planerades tillförseln starta med ett lågt flöde på 0,5 l/s som stegvis ökas under försöket. Denna flödesreglering innebär att det både under försöket och vid den efterföljande utvärderingen skulle bli lättare att utvärdera hydrologiska responser på olika flöden i tillförselsystemet. Ett lågt initialt flöde innebär dock att den initiala hydrologiska responsen blir mindre och tar längre tid från det att tillförseln påbörjas (se avsnitt 2.3.1). För att nyttja fördelarna med ett lågt initialt flöde, sågs det därför som viktigt att avvakta hydrologiska responser innan nästföljande flödessteg påbörjades.

Baserat på de förberedande hydrologiska modellberäkningarna (Bergström 2013) anger tabell 2-3 förväntade responstider och maximala responser vid olika flöden, samt möjliga ”brytpunkter” i termer av uppmätt respons på ytvattennivån i pegelröret SFM000115 ($\Delta h_{\text{SFM000115}}$) då flödet skulle ökas. Responstider, responser och brytpunkter betraktades som planeringsmässiga riktlinjer inför försöket. Det sågs som möjligt att justeringar av planen måste ske under försöket, eftersom den verkliga hydrologiska responsen skulle bero på väderläget och rådande grund- och ytvattennivåer. Under försöket genomfördes därför dagliga manuella yt- och grundvattennivåmätningar som underlag för flödesregleringen (se kapitel 3). I pegelröret SFM000115 har det gjorts kontinuerliga ytvattennivåmätningar sedan april 2009 (se avsnitt 4.2). I denna tidsserie är den årliga, maximala ytvattennivån normalt i intervallet 2,52–2,56 m, vilket kan tolkas som att gölen har sin tröskel inom eller under detta nivåintervall. För att kunna nyttja alla preliminära brytpunkter i tabell 2-3 (totalt 0,13 m) skulle ytvattennivån i pegelröret SFM000115 vid start av tillförseln därför vara högst cirka 2,40 m. I det fall nivån i pegelröret skulle vara högre än denna nivå skulle det behövas en justering av brytpunkterna.

SKB har sedan flera år ett omfattande monitoringsprogram i Forsmark. Programmet inkluderar kontinuerliga grundvattennivåmätningar i jord och berg, kontinuerliga ytvattennivåmätningar i sjöar och gölar samt regelbunden vattenkemisk provtagning och analys av grund- och ytvatten. Det program för mätning och provtagning som togs fram inför försöket nyttjar dels mätpunkter som används inom SKB:s långtidsmonitoring (SKB 2007), dels mätpunkter som upprättats inom ramen för pilotförsöket (avsnitt 2.2.2):

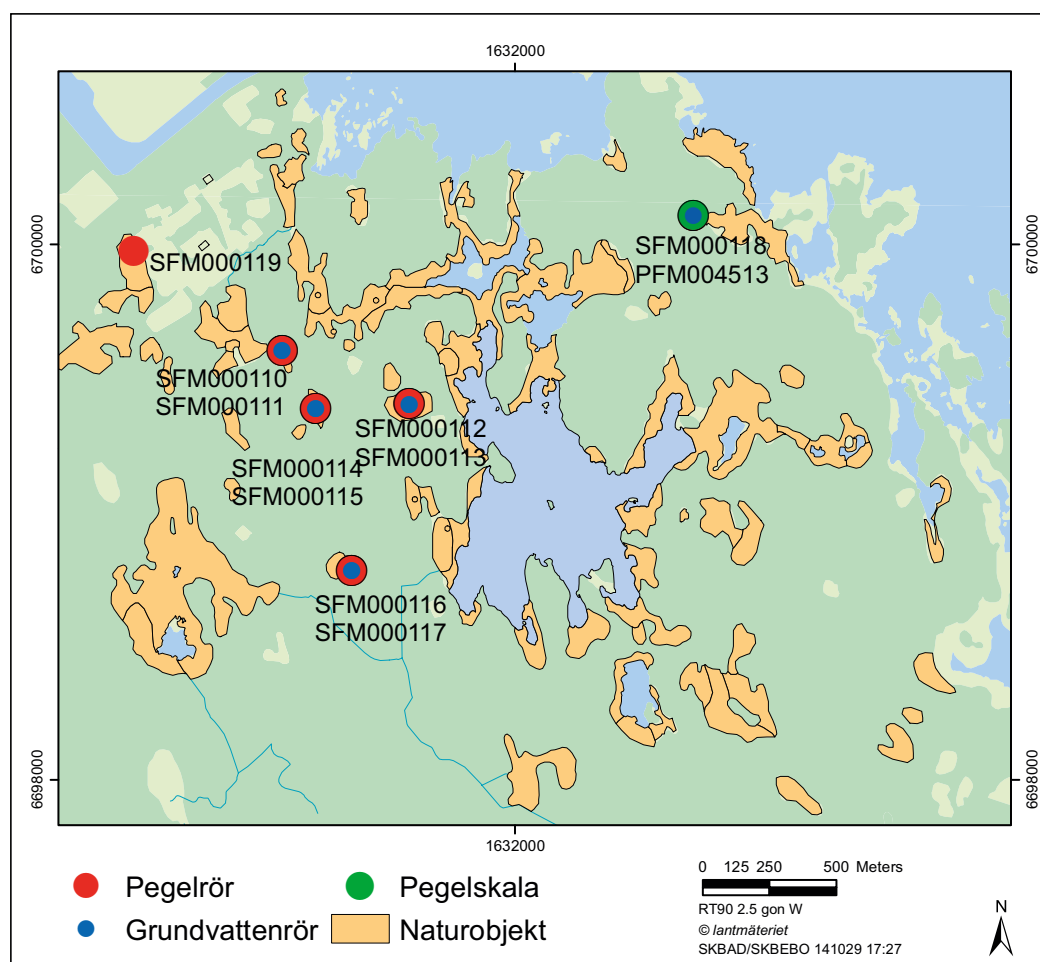
- Momentant och ackumulerat flöde i tillförselsystemet.
- Grundvattennivå i morän samt ovan lager med glaciärra strax nedströms tillförselplatsen: Grundvattenrören SFM000132–135.
- Grundvattennivå i morän under gölen i våtmarken: Grundvattenrör SFM000114.
- Ytvattennivå i gölen i våtmarken: Pegelrör SFM000115.
- Grundvattennivå i morän under gölar i tre andra våtmarker i Forsmark (Werner et al. 2009, 2010): Grundvattenrören SFM000110 (våtmarksobjekt 7), SFM000112 (våtmarksobjekt 14) samt SFM000116 (våtmarksobjekt 18).
- Ytvattennivå i andra gölar i tre andra våtmarker i Forsmark (Werner et al. 2009, 2010): Pegelrören SFM000111 (våtmarksobjekt 7), SFM000113 (våtmarksobjekt 14) och SFM000117 (våtmarksobjekt 18).
- Vattenprovtagning i grundvattenrören SFM000114, -132 och -133, i gölen samt i den ståltank från vilken vatten från FKA:s ledningsnät leddes vidare till tillförselplatsen.

Tabell 2-3. Program som togs fram inför försöket avseende stegvis flödesreglering, förväntade responstider och preliminära brytpunkter.

Steg	Flöde (l/s)	Förväntad responstid (nivåhöjning i SFM000115 > 0,01 m)	Max. förväntad respons	Prel. brytpunkt ($\Delta h_{\text{SFM000115}}$) rel. föreg. steg	Max. steglängd
1	0,00	–	–	–	1–2 veckor (nivåmätning samt provtagning/analys)
2	0,50	30–40 h	~ 0,03–0,07 m	0,03 m	3 dygn
3	1,00	~ 24 h	~ 0,06–0,11 m	0,05 m	2 dygn
4	2,00	~ 24 h	~ 0,10–0,17 m	0,05 m	2 dygn
5	0,00	–	–	–	Minst lika lång tid som tillförseln sammanlagt pågått (nivåmätning)

Lägena för aktuella grundvatten- och pegelrör visas i figur 2-1 och figur 2-9. Grundvattenrören SFM000132–135 (figur 2-1) installerades inom ramen för de kompletterande fältundersökningarna inför försöket. Grundvatten- och pegelrören SFM000110–117 installerades våren 2009 i våtmarker med höga naturvärden (Werner et al. 2009). De loggrar som är installerade i de aktuella grundvatten- och pegelrören är normalt inställda på en nivåmätning varannan timme. Inför försöket ställdes majoriteten av de inblandade loggrarna om till en mätning var tionde minut (SFM000110, -111, -114 samt SFM000132–135 den 10 juli 2013, SFM000112 och -113 den 24 maj 2013, och SFM000116 den 30 maj 2013). Loggrarna tillhörande SFM000115 och -117 är dock av en annan typ än de övriga och dessa ställdes inte om inför försöket.

De vattenkemiska analyser som planerades omfattade elektrisk konduktivitet, pH, klorid, alkalinitet, sulfat, brom, fluor, färg samt natrium, kalium, kalcium, magnesium, mangan, litium, järn, strontium, kisel och svavel. Som förberedelse för vattenprovtagningen under försöket tömdes grundvattenrören i början av juli 2013, för att bedöma erforderlig tid för den vattenomsättning som krävs inför varje provtagningsomgång. Vid tömningen sänktes vattennivån i SFM000114, -132 respektive -133 med 1,9 m, 1,3 m respektive 1,7 m, med nivååterhämtning inom 12 timmar, 20 minuter respektive 2 timmar. För att minska störningen på pågående nivåmätningar bestämdes att grundvattenrören skulle provtas enbart inför och efter avslutat försök, med undantag för SFM000132 som till följd av snabb nivååterhämtning kunde provtas vid ett tillfälle även under pågående försök. Ytvatten från gölen skulle provtas inför, vid två tillfällen under försöket samt efter avslutat försök, medan vatten från ståltanken skulle provtas vid två tillfällen under pågående försök.



Figur 2-9. Översiktsskarta som visar lägena för de grundvatten- och pegelrör som installerades våren 2009 i våtmarker med höga naturvärden (Werner et al. 2009). PFM004513 är en pegelskala för manuell ytvattennivåavläsning utanpå grundvattenröret SFM000118. Naturobjekt avser geografiskt avgränsade våtmarks- och skogsobjekt (Hamrén och Collinder 2010).

2.5 Testkörning och gropgrävning

Genomförandet av försöket planerades inledningsvis ske under sensommaren eller hösten 2012. På grund av ovanligt ihållande regn och blöta förhållanden, som medförde att ytvattennivån i gölen i den aktuella våtmarken låg över tröskelnivå, bestämdes att skjuta upp försöket till 2013. Efter etableringen genomfördes i juni 2013 ett test av systemen för vattentillförsel, flödesreglering och flödesmätning, vilket även medförde en renspolning av ledningssystemet. Testet visade att systemet fungerade tillfredsställande, med undantag för en läckande skarv längs Alveniusledningen som fick åtgärdas. Vid renspolningen kom det initialt en del luft och rostblandat vatten från spridningsledningen. I samband med testkörningen borrades sammanlagt 60 stycken hål (diameter 3 mm) jämnt fördelade längs den 20 m långa spridningsledningen (se principskiss i figur 1-1).

Sammantaget pekade de genomförda fältundersökningarna på att glaciallera främst förekommer i våtmarkens södra och norra del, men endast ställvis och då i relativt tunna lager i övrigt. Utifrån detta fattades beslut om att bibehålla det sedan tidigare planerade läget för tillförseln, och att fyra gropar skulle grävas omedelbart nedströms spridningsledningen för att underlätta den hydrauliska kontakten med moränen. I samband med testkörningen grävdes en första grop strax nedanför spridningsledningen. Under sommaren fördjupades denna grop (figur 2-10) och ytterligare tre grävdes. Vid grävningen påträffades ett svart-brunt, rotinnehållande lager med organiskt material och ett underliggande grått, grusigt lager. Grävningen fortgick tills man nådde underliggande grusiga, steniga morän och avslutades om glaciallera inte återfunnits eller genomgrävts på 1 m djup. Uppgrävt material förlades på spridningsledningens uppströmssida. Groparna fick en diameter på cirka 1,2 m och inbördes avstånd på 3,5 m, 6,80 m respektive 4,5 m (se figur 2-2).



Figur 2-10. Bild på den första gropen vid tillförselplatsen, efter att den fördjupats i början av juli 2013.

3 Genomförande

Utifrån rådande väderläge, uppmätt ytvattennivå i gölen (långt under tröskelnivå) samt väderprognoser bestämdes i början av augusti 2013 att vattentillförseln skulle påbörjas i mitten av månaden. Vid manuell nivåodning den 14 augusti 2013 var grundvattennivån under gölen och ytvattennivån i gölen på nivå 2,2 m. Med denna ytvattennivå fanns det således god marginal för att nyttja alla preliminära brytpunkter upp till gölens tolkade tröskelnivå (tabell 2-3).

Pilotförsökets vattentillförsel skedde under sammanlagt 9 dygn, från den 19 augusti 2013 klockan 15:00 (sommartid) till den 28 augusti klockan 12:00. Under försöket ökades flödet i två steg enligt ett på förhand uppgjort program. Specifikt var flödet cirka 0,5 l/s under perioden 19–22 augusti (3 dygn), 1 l/s under perioden 22–26 augusti (4 dygn) och 2 l/s under perioden 26–28 augusti (2 dygn). Den 20 augusti gjordes ett kort avbrott i vattentillförseln för att koppla bort villamätaren, som då hade satts igen av rostflagor från ledningssystemet. I samband med de dagliga kontrollerna gjordes vid behov en reglering för att säkerställa att korrekt flöde bibehölls.

Nedan ges en kortfattad sammanfattning av viktigare händelser och noteringar under försökets genomförande:

Måndag 19 augusti

Vattentillförseln påbörjas kl. 15:00 (sommartid). Initialt kommer det mycket luft från spridningsledningen, vilket innebär att flödesmätaren visar felaktigt höga flöden. Mängden luft innebär vidare att vattnet endast kommer ut ur den första halvan av spridningsledningen. Regleringsventilen öppnas därför maximalt kl. 15:30–15:35 för att fylla systemet med vatten och få bort kvarvarande luft (flöde drygt 4 l/s). Åtgärden lyckas, flödet minskas och ligger stabilt på cirka 0,5 l/s från kl. 15:40. Den påkopplade villamätaren för mätning av ackumulerat flöde har dock vattenfyllts och är svår att läsa av. Den tycks även vara igensatt, eftersom den ger utslag vid maximalt öppen regleringsventil men endast rör sig sporadiskt vid ett flöde på 0,5 l/s. På förmiddagen, innan försöket påbörjas, har manuell nivåmätningar gjorts i alla aktuella grundvatten- och pegelrör (se avsnitt 2.4).

Tisdag 20 augusti

Vid inspektion mitt på dagen visar flödesmätaren ett flöde på cirka 1,6 l/s, trots att endast lite vatten kommer ut ur spridningsledningen. Bedömningen är att luft återigen kommit in i ledningssystemet. Regleringsventilen öppnas därför maximalt under en kort stund för att fylla systemet med vatten och få bort kvarvarande luft.

Under eftermiddagen konstateras att villamätaren är igensatt, antagligen av rostflagor. Tillförseln avbryts därför kl. 13:50, varefter villamätaren kopplas bort och systemet rensas under en kort stund. Tillförseln återstartas kl. 14:30 och tillflödet återjusteras till det är stabilt på cirka 0,5 l/s. Inför återstarten har även den första delen av spridningsledningen pallats upp, i syfte att få bättre lutning och därmed jämnare spridning från hela ledningen.

Onsdag 21 augusti

Vid inspektion konstateras att tillförseln nu fungerar utan problem. Dock har flödet under natten avtagit något till cirka 0,35–0,4 l/s och justeras därför upp till drygt 0,5 l/s. Utifrån manuella nivåmätningar (se avsnitt 4.2) beslutas att under morgondagen öka flödet till 1 l/s.

Torsdag 22 augusti

Efter att ha varit inställt på 0,5 l/s i cirka tre dygn ökas flödet till 1 l/s kl. 11:30.

Fredag 23 augusti

Vid inspektion mitt på dagen är flödet cirka 1,1 l/s. Det beslutas att låta flödet vara inställt på 1 l/s under kommande helg.

Lördag 24–söndag 25 augusti

Under helgen görs påfyllning av dieselgeneratoren, ledningssystemet inspekteras för att upptäcka eventuella läckage och flödet i systemet kontrolleras. Vid inspektion på söndag kväll konstateras utan åtgärd att flödet har minskat något.

Måndag 26 augusti

Vid besiktning mitt på dagen är flödet cirka 0,8–0,9 l/s. Utifrån manuella nivåmätningar (avsnitt 4.2) beslutas att öka flödet till 2 l/s (flödesökningen görs kl. 13:45), efter att ha varit inställt på 1 l/s i cirka 4 dygn.

Tisdag 27 augusti

Vid besiktning mitt på dagen är flödet cirka 1,6–1,7 l/s och justeras upp till 2 l/s.

Onsdag 28 augusti

På förmiddagen genomförs de sista manuella nivåmätningarna under pågående försök. Vid besiktning mitt på dagen är flödet cirka 1,7 l/s. Tillförseln till ståltanken samt pumpen i tanken stängs av kl. 12:00. Under eftermiddagen töms tanken med självtryck ut till tillförselplatsen, fortfarande med flödesloggern inkopplad.

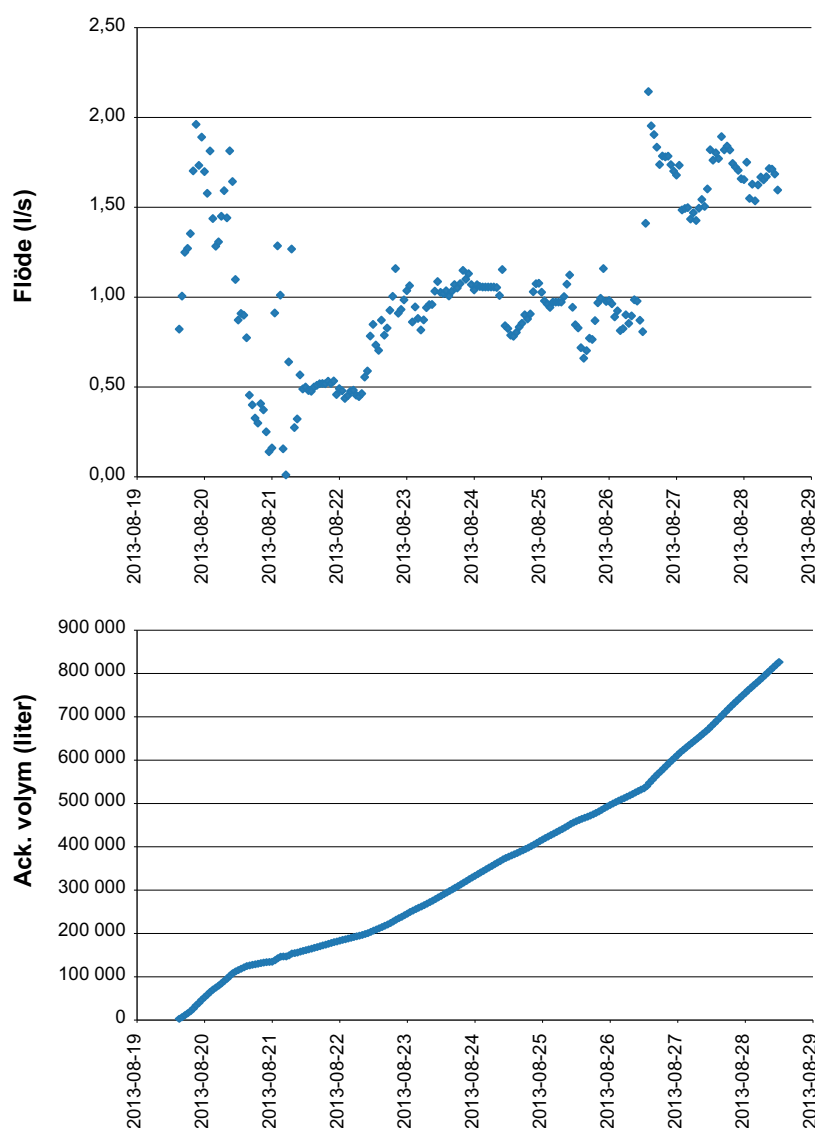
Alla aktuella loggrar töms på data den 9–11 september 2013, för vidare bearbetning och analys (se kapitel 4 och 5).

4 Resultat

4.1 Flöden och tillförda vattenvolymer

Figur 4-1 visar tidsserier på momentant vattenflöde (l/s) samt ackumulerad tillförd vattenvolym (liter) under försöksperioden 19–28 augusti 2013 (dataleverans: sicada_14_044). Eftersom villamätaren fick kopplas bort i inledningen av försöket, har ackumulerad vattenvolym beräknats utifrån de momentana mätningarna. Tidsserierna som visas i figuren utgår från timmedelvärden på högupplösta flödesdata (var 10:e minut), där enstaka timmar med saknade data ersatts med medelvärden för närliggande timmedelvärden.

Som framgår av figuren var det inledningsvis svårt att behålla korrekt flöde (0,5 l/s) till spridningsledningen. Enligt kapitel 3 åtgärdades detta genom att palla upp tilloppsdelen till ledningen och flödet stabiliserades kring 0,5 l/s den 21 augusti. Flödet höjdes till 1 l/s den 22 augusti och till 2 l/s den 26 augusti. Medelflödet under försöket var cirka 1 l/s och sammanlagt tillfördes drygt 826 000 liter vatten.



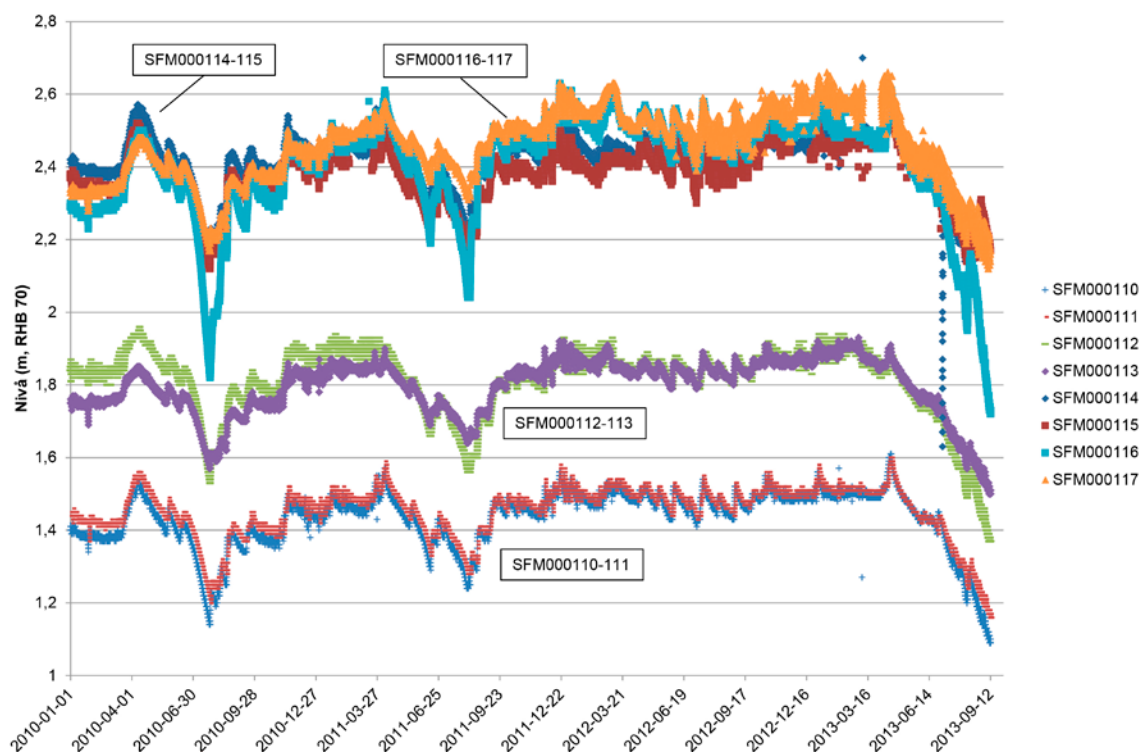
Figur 4-1. Tidsserier på uppmätt momentant vattenflöde (l/s; övre bilden) samt ackumulerad, tillförd vattenvolym (liter; nedre figuren) under perioden 19–28 augusti 2013. De tidsserier som visas i figuren baseras på timmedelvärden av högupplösta data (var 10:e minut).

4.2 Hydrologiska responser

Som nämnts tidigare omfattar mätprogrammet under försöket dels mätpunkter som används inom SKB:s långtidsmonitoring, dels mätpunkter som upprättats inom ramen för pilotförsöket. För övervakning av hydrologiska responser på tillförseln under försöket användes data från manuella nivåmätningar i grundvatten- och pegelrör (tabell 4-1), medan data från automatiska nivåmätningar (figur 4-2 och figur 4-3) användes för bearbetning och analys. De aktuella mätpunkterna är belägna i och kring den aktuella våtmarken, samt i tre andra våtmarker i Forsmark (se avsnitt 2.4). Dessa tre våtmarker ligger i samma område, de är av samma typ och de har motsvarande storlek som pilotförsökets våtmark, varför de ansågs lämpliga som referensobjekt för pilotförsöket.

Figur 4-2 visar tidsserier på kontinuerligt uppmätta grund- och ytvattennivåer från den aktuella våtmarken (SFM000114–115) samt från de tre andra våtmarkerna i Forsmark (SFM000110–113, SFM000116–117) under perioden 2010-01-01 till 2013-09-11 (dataleverans: sicada_14_046). Enligt figuren uppvisar uppmätta nivåer generellt stor grad av samvariation, både i termer av grund- och ytvattennivå inom respektive våtmark och mellan olika våtmarker. Detta styrker antagandet att parallella tidsserier på uppmätta grund- och ytvattennivåer i andra våtmarker i området utgör relevanta referenser för utvärdering av den hydrologiska responsen i den aktuella våtmarken under pilotförsöket.

Tabell 4-1 visar resultat från de manuella nivåmätningar som gjordes med ljuslod under juli–augusti 2013, inklusive de dagliga mätningar som gjordes för övervakning av hydrologiska responser på vattentillförseln under försöket. Notera att mätdata visas i form av meter under röröverkant (m u rök), vilket innebär att minskande värden motsvarar ökande nivå. Den aktuella perioden var varm och nederbördsfri, med undantag för ett antal dagar i början på augusti, och kännetecknas av sjunkande grund- och ytvattennivåer i hela området från början på juli till mitten på september. Enligt tabellen minskar grund- och ytvattennivåerna i referensvåtmarkerna (SFM000110–113, SFM000116–117) kontinuerligt under den aktuella perioden till följd av den varma och torra väderleken.



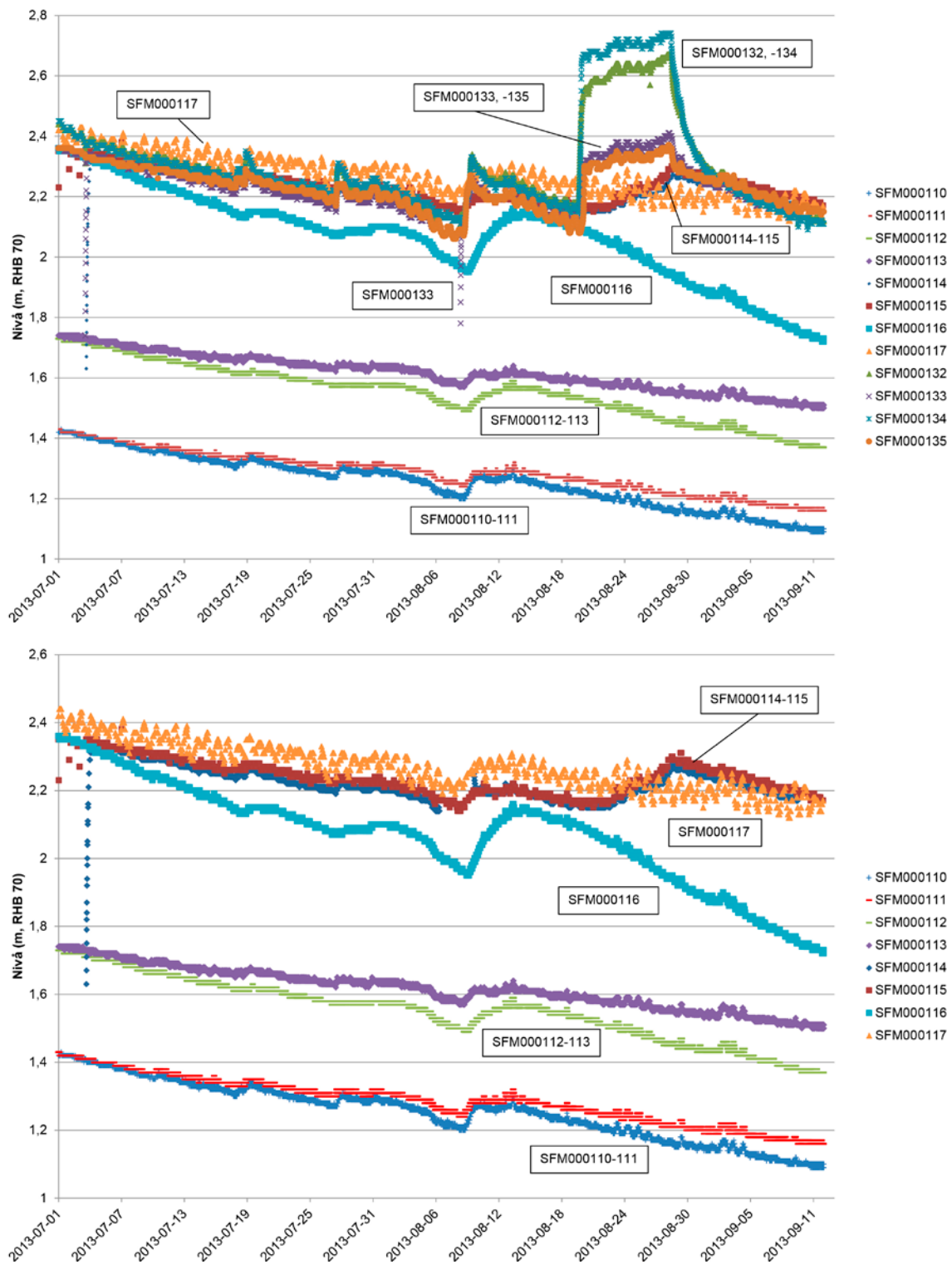
Figur 4-2. Tidsserier på uppmätta grund- och ytvattennivåer i den aktuella våtmarken (SFM000114–115) samt i andra våtmarker i Forsmark (SFM000110–113, SFM000116–117) under perioden 2010-01-01 till 2013-09-11.

Tabell 4-1. Resultat från de manuella nivåmätningar (m u rök) som gjordes för övervakning av hydrologiska responser på vattentillförseln under försöket.

Datum	ID (SFM000-)											
	110	111	112	113	114	115	116	117	132	133	134	135
2013-07-03	–	–	–	–	0,95	0,97	–	–	1,52	1,22	1,52	1,17
2013-07-10	0,96	0,90	–	–	0,99	1,02	–	–	1,57	1,26	1,57	1,21
2013-07-15	–	–	–	–	–	–	1,22	1,11	–	–	–	–
2013-07-19	1,08	–	1,13	1,08	–	–	–	–	–	–	–	–
2013-07-24	–	–	–	–	1,07	1,10	–	–	–	–	–	–
2013-08-06	–	–	–	–	1,20	–	–	–	1,77	1,48	–	–
2013-08-09	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2013-08-14	–	–	–	–	1,09	1,11	–	–	–	–	–	–
2013-08-19	–	1,01	1,20	1,15	1,13	1,14	1,29	1,17	1,75	1,43	1,74	1,41
2013-08-20	1,09	1,01	1,22	1,16	1,14	1,14	1,31	1,18	1,35	1,24	1,23	1,21
2013-08-21	1,10	1,02	1,23	1,16	1,14	1,14	1,33	1,19	1,32	1,22	1,21	1,20
2013-08-22	1,10	1,03	1,23	1,17	1,13	1,14	1,34	1,20	1,33	1,22	1,22	1,20
2013-08-23	1,11	1,03	1,25	1,17	1,12	1,13	1,37	1,20	1,30	1,20	1,20	1,19
2013-08-26	1,12	1,04	1,27	1,18	1,08	1,08	1,42	1,23	1,29	1,20	1,20	1,18
2013-08-27	1,13	1,05	1,28	1,19	1,06	1,06	1,43	1,23	1,26	1,18	1,18	1,17
2013-08-28	1,15	1,05	1,29	1,20	1,03	1,03	1,45	1,23	1,25	1,16	1,16	1,14

De manuella nivåmätningarna under perioden 19–21 augusti, då vattentillförseln påbörjats med ett flöde på 0,5 l/s, visar att till skillnad från de andra tre våtmarkerna har trenden med sjunkande nivåer avstannat i den aktuella våtmarken. Mätningarna den 22 augusti visar att grundvattennivån i moränen under gölen har ökat med 0,01 m jämfört med föregående dag. Vid mätningarna den 23 augusti, då flödet ökats till 1 l/s, hade grundvattennivån i moränen under gölen ökat ytterligare, och man kunde nu även notera en höjning (0,01 m) av gölens ytvattennivå. Efter helgen den 24–25 augusti noteras att grund- och ytvattennivån i våtmarken stigit ytterligare och i snabbare takt. Under perioden 26–28 augusti, då flödet ökats till 2 l/s, visar mätningarna att grund- och ytvattennivån i våtmarken höjs med cirka 0,02–0,03 m per dygn.

Figur 4-3 visar tidsserier på automatiskt uppmätta grund- och ytvattennivåer under perioden 2013-07-01 till 2013-09-30, inklusive grundvattennivåer strax nedströms tillförselplatsen (SFM000132–135). På motsvarande sätt som de manuella nivåmätningarna (tabell 4-1) visar en jämförelse mellan SFM000114–115 och grund- och pegelrören i övriga våtmarker på en tydlig hydrologisk respons på vattentillförseln. Grundvattennivån i morän under de andra våtmarkerna sjönk med mellan 0,07 m (SFM000110 och -112) och 0,16 m (SFM000116) under den period då vattentillförseln ägde rum (19–28 augusti). Under samma period sjönk gölarnas ytvattennivå med 0,04–0,05 m. Under denna period ökade grundvattennivån i moränen under den aktuella våtmarken med 0,11 m och ytvattennivån i gölen ökade med 0,13 m. Om de i övrigt sjunkande grund- och ytvattennivåerna i området våtmarker beaktas, var den aktuella våtmarkens totala hydrologiska respons således cirka 0,2 m, med avseende på både grundvattennivån i moränen under gölen och gölens ytvattennivå. Under tillförseln höjdes grundvattennivån i grundvattenrören närmast spridningsledningen (SFM000132 och -134) med 0,5–0,6 m, och i de längre nedströms belägna grundvattenrören SFM000133 och -135 var höjningen 0,3 m. I samband med de dagliga inspektionerna upplevdes inte området nedströms spridningsledningen som sankt. Detta indikerar att vattnet från spridningsledningen dels tillfördes moränen på ett effektivt sätt, bland annat via de gropar som grävts nedströms spridningsledningen, dels att vattnet flödade vidare nedströms i det ytliga mulljordslaget.



Figur 4-3. Övre bilden: Tidsserier på uppmätta grund- och ytvattennivåer i den aktuella våtmarken (SFM000114–115, i andra våtmarker i Forsmark (SFM000110–113, SFM000116–117) samt uppmätta grundvattennivåer strax nedströms tillförselplatsen (SFM000132–135) under perioden 2013-07-01 till 2013-09-11. Nedre bilden: Motsvarande tidsserie utan grundvattenrören SFM000132–135.

4.3 Resultat från de vattenkemiska analyserna

Tabell 4-2 sammanfattar provtagningspunkter och -tider för den vattenkemiska provtagning som gjordes enligt mätprogrammet (se avsnitt 2.4). Vattenprovtagning och analyser gjordes enligt de standardmetoder som tillämpas inom SKB:s hydrokemiska monitorering av ytvatten och ytnära grundvatten (SKB:s interna Aktivitetsplaner: Projekt Kärnbränsleförvaret: AP SFK-10-032 – Hydrokemisk monitorering av ytvatten 2012–2014 respektive Projekt Kärnbränsleförvaret: AP SFK-10-033 – AP SFK-10-033 Hydrokemisk monitorering av ytnära grundvatten 2012–2014).

Bilaga 1 redovisar resultaten från de vattenkemiska analyser som genomförts på vattenproverna. Notera att för parametern färg avser analysmetoden A436 vattnets absorbans vid våglängden 436 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), medan AKF (1/m) avser den spektrala absorptionskoefficienten (absorbans per 0,05 m kvettlängd).

De vattenprover som togs i ståltanken under pågående försök analyserades för att säkerställa kvaliteten på det vatten som tillfördes under försöket. Som väntat fanns det relativt små, ur ett ekologiskt perspektiv betydelselösa, vattenkemiska skillnader mellan det tillförda vattnet å ena sidan och grundvatten och ytvatten vid den aktuella våtmarken å den andra. Det tillförda vattnet hade något lägre halter av klorid och kalcium jämfört med grundvattnet i och kring våtmarken samt ytvattnet i gölen. Vidare medför den fällning och pH-justering som görs i vattenreningsverket (avsnitt 2.1.1) att det processvattnet har högre halter av sulfat och natrium jämfört med dels ingående råvatten, dels vattnet i och kring våtmarken.

Ovannämnda skillnader kan nyttjas genom att se vissa kemiska parametrar som ”spårämnen” som följer vattnets flödesväg från tillförselplatsen, genom moränen och till respektive provtagningspunkt. Resultaten från de vattenkemiska analyserna (bilaga 1) visar på en något minskad halt av klorid och kalcium i grundvattnet vid tillförselplatsen (SFM000132) och i gölen (PFM007442) under pågående försök. De uppmätta halterna är dock högre än halterna i processvattnet. På motsvarande sätt kan man notera en ökad halt av natrium och sulfat i grund- och ytvattnet i samband med vattentillförseln, där de uppmätta halterna dock är lägre än i processvattnet och helt oskadliga för våtmarkens flora och fauna. De fortsatta provtagningar och analyser som gjorts inom ramen för SKB:s hydrokemiska monitorering (AP SFK-10-032 – Hydrokemisk monitorering av ytvatten 2012–2014) visar att halterna av klorid, kalcium, natrium och sulfat i ytvattnet i gölen sedermera återgått till de naturliga.

De vattenkemiska analyserna ger således stöd för att det tillförda vattnet, som avsett, nått moränen i tillförselområdet, följt flödesvägar i moränen till och i våtmarken och vidare mot gölen. Analyserna visar också att det tillförda vattnet längs dessa flödesvägar, i den mån det skiljer sig från våtmarkens naturliga vattenkemiska sammansättning, fått en karaktär som i huvudsak motsvarar våtmarkens naturliga grund- och ytvattenkemiska sammansättning. Med avseende på parametrar såsom natrium och sulfat har de kemiska processerna inte verkat fullt ut, vilket är en erfarenhet som bör beaktas vid val av vattenkälla, lokalisering av tillförselplatser och tillförselteknik vid eventuell framtida, permanent vattentillförsel till våtmarker i Forsmark.

Tabell 4-2. Provtagningspunkter och -tider för den vattenkemiska provtagning som genomfördes inför, under och efter vattentillförseln.

Provtagningspunkt (id)	Datum
Ståltank (PFM7407)	2013-08-22, 2013-08-26
Ytvatten i gölen (PFM7442)	2013-08-08, 2013-08-22, 2013-08-26, 2013-09-09
Grundvatten i morän under gölen (SFM00114)	2013-08-08, 2013-09-12
Grundvatten i morän nedströms tillförselplatsen (SFM00132)	2013-08-08, 2013-08-26, 2013-09-10
Grundvatten i morän nedströms tillförselplatsen (SFM00133)	2013-08-08, 2013-09-12

5 Uppföljande MIKE SHE-modellering

5.1 Bakgrund

I avsnitt 2.3.1 beskrivs de hydrologiska modellberäkningar med MIKE SHE som genomfördes inför försöket, som underlag för dimensioneringen av tillförselsystemet och planeringen av försökets utförande. Dessa beräkningar pekade på utvärderingsbar hydrologisk respons på stegvis ökande tillförsel under upp till cirka 10 dygn, vilket i huvuddrag stämmer med responserna under försöket (avsnitt 4.2). I samband med de kompletterande fältundersökningarna påträffades glaciallera, vars utbredning avgränsades med en geofysisk undersökning (avsnitt 2.2). Det läge som sedermera valdes för tillförseln är beläget längre söderut jämfört med det läge som antogs i de förberedande modellberäkningarna. I dessa beräkningar representerades tillförseln i form av ytillförsel på markytan, medan ett antal gropar grävdes genom glacialleran omedelbart nedströms spridningsledningen, i syfte att underlätta den hydrauliska kontakten med moränen.

Efter de förberedande modellberäkningarna har det således tillkommit information om de hydrogeologiska förhållandena och det har även skett förändringar av genomförandet av vattentillförseln. Som en uppföljning av tillförsel försöket har det därför gjorts en justering och uppdatering av den lokala MIKE SHE-modellen, som därefter använts för att modellera tillförselperioden med de tillförselflöden som uppmättes under försöket. Detta kapitel ger en sammanfattande beskrivning av de genomförda modelluppdateringarna, av resultaten från modelleringen av tillförselperioden och de lärdomar som kan dras från de genomförda modellberäkningarna.

5.2 Uppdatering av lokal MIKE SHE-modell

De uppdateringar som genomförts av den lokala MIKE SHE-modellen omfattar följande:

- Justering av gölens batymetri (bottentopografi) och utloppets geometri, i syfte att få bättre överensstämmelse dels med den yta som omfattar gölens verkliga vattenspegel, dels med uppmätt hydraulisk gradient mellan grundvatten under gölen och ytvattnet i gölen.
- Uppdatering av jordlagermodellen i MIKE SHE (i det lokala modellområdet) utifrån de kompletterande fältundersökningar som gjordes inför försöket (avsnitt 2.2), specifikt med avseende på det lager med glaciallera som påträffats och avgränsats.

5.2.1 Justering av gölens batymetri och utlopp i modellen

I ett första steg gjordes mindre justeringar av gölens batymetri i modellen, för att den bättre ska reproducera den yta som omfattar gölens verkliga vattenspegel. I nästa steg justerades geometrin på gölens utlopp iterativt, i syfte att få bättre passning mot uppmätt ytvattennivå och hydraulisk gradient mellan grund- och ytvatten. I den lokala MIKE SHE-modell som upprättades inför försöket (avsnitt 2.3.1) begränsades möjligheterna att justera geometrin på gölens utlopp av modellens rumsliga upplösning (2 m). Därför lades istället utloppet in som en kanal i kanalflödesmodellen MIKE 11, som är integrerad med MIKE SHE och används för att beskriva nivåer och flöden i bäckar och interaktionen mellan ytvattnen och de vattenflöden som hanteras av MIKE SHE (Bosson et al. 2008).

Specifikt representerades utloppet i MIKE 11 som en tvärsektion bestående av två olika V-formade tvärsektioner, vilket ger en successivt ökande avbördningskapacitet vid ökande ytvattennivå. Denna representation av utloppet motsvarar ett mindre dike på tröskelnivå, och ett mer diffust utflöde på ”bred front” på högre nivåer. Den slutliga tvärsektionen har dels en tvärsektion med en bredd på 0–0,5 m mellan nivåerna 2,20–2,50 m, dels en tvärsektion med en bredd på 0,5–8 m mellan nivåerna 2,50–2,66 m. Diket har endast begränsad flödeskapacitet, medan övergången till den övre, bredare tvärsektionen är inom eller över gölens tolkade tröskelnivå (se avsnitt 2.4).

5.2.2 Uppdatering av jordlagermodellen i MIKE SHE

I den lokala MIKE SHE-modellen lades ett separat, 0,3 m mäktigt lager med glaciallera in i två områden med tolkad förekomst av sådan lera (se figur 2-6). Enligt ödometerförsök (avsnitt 2.2.2) har glacialleran en hydraulisk konduktivitet på cirka 10^{-9} m/s. Det övre beräkningslagret i MIKE SHE, där lerlagret ingår, har en mäktighet på 2,5 m och består huvudsakligen av morän med en hydraulisk konduktivitet som är 3–4 storleksordningar större än glaciallerans. Detta innebär att lerlagret får relativt liten inverkan på den ”effektiva” hydrauliska konduktiviteten i det övre beräkningslagret. I syfte att undersöka betydelsen av den vertikala diskretiseringen och parameteriseringen av jordlagren i MIKE SHE-modellen, genomfördes ett beräkningsfall för perioden med vattentillförsel där glacialleran representeras i ett eget beräkningslager i MIKE SHE (avsnitt 5.3).

5.3 Modellering av försöket med vattentillförsel

Den lokala MIKE SHE-modell som etablerades och användes som underlag för dimensioneringen av tillförselsystemet och planeringen av försökets utförande (avsnitt 2.3.1) visar överlag på rimliga grund- och ytvattennivåer under och i gölen i våtmarken. Som nämnts tidigare är de uppmätta hydrauliska gradienterna små, vilket i kombination med återkommande tjällyftning och ishävning som rubbar rören, medför att de hydrauliska gradienterna och deras förändring i tid får betraktas som osäkra. I den ursprungliga modellen (Bergström 2013) är den modellberäknade grundvattennivån under gölen överlag lägre än den modellberäknade ytvattennivån i gölen. Detta innebär att delar av våtmarken utgörs av ett inströmningsområde i den MIKE SHE-modellen, medan området bör utgöra ett utströmningsområde, såsom också grund- och ytvattennivåmätningarna indikerar.

Den enligt ovan justerade och uppdaterade lokala MIKE SHE-modellen användes för att modellera perioden med vattentillförsel. Jämfört med den tidigare lokala modellen ger den justerade och uppdaterade modellen en svag, uppåtriktad hydraulisk gradient, med undantag för en torrperiod sommaren 2010. Modelleringen av vattentillförselperioden gjordes i två steg. I det första steget gjordes beräkningar utan vattentillförsel för perioden 1 januari 2011–15 september 2013 (jmf avsnitt 2.3.1), först med den regionala modellen för att få fram tidsberoende randvillkor för den semi-lokala modellen och därefter med den semi-lokala modellen som gav randvillkor för den lokala modellen (uppdaterad enligt avsnitt 5.2). De indata och kalibreringsdata som användes för den aktuella perioden omfattar följande (dataleveranser: sicada_13_064, sicada_13_066, sicada_14_044, sicada_14_046):

- **Nederbörd, lufttemperatur och potentiell avdunstning:** I det levererade datasetet saknas högupplösta nederbördsdata för perioden 2012-12-05 kl. 17:30 till 2012-12-17 kl. 10:00. Den ackumulerade nederbörden under den aktuella perioden (24,42 mm) anges dock i datasetet. Denna ackumulerade nederbörd fördelades därför ut jämnt på de dygn som ingår i den saknade perioden.
- **Havsnivådata:** Vid tiden för modelleringen var data från SKB:s havsnivåpegel (PFM010038) ännu inte godkända efter 2013-02-27. Datasetet kompletterades därför med högupplösta havsnivådata (timvärden) från SMHI:s havsnivåpegel i Forsmark (SMHI-id 2179, SKB-id PFM010039). SMHI:s havsnivådata, som är angivna i höjdsystemet RH 2000, transformerades till höjdsystemet RHB 70 genom att subtrahera 0,18 m, vilket motsvarar landhöjningen i Forsmark under 30-årsperioden 1970–2000 (Söderbäck 2008).
- **Grund- och ytvattennivådata:** Data från grundvattenröret SFM000114 (till och med 2013-09-09), pegelröret SFM000115 (till och med 2013-09-11) och grundvattenrören SFM000132–135 (2012-10-25 till 2013-09-09–11).
- **Vattentillförsel:** Vattentillförseln under försöket representerades dels i form av yttillförsel, dels som vattentillförsel via brunnar (se vidare nedan). Vattentillförseln representerades längs den linje som är indikerad i form av kryssymboler i figur 5-1, mellan koordinaterna (6699328, 1631242) och (6699340, 1631232) där spridningsledningen var placerad under försöket. Koordinaterna är inmätta med en handhållen GPS, med en bedömd noggrannhet på cirka ± 5 m. I MIKE SHE representerades den tidsmässigt varierande vattentillförseln i form av medelvärden över 4 timmar (jmf figur 4-1).



Figur 5-1. Översiktskarta som indikerar läget sydväst om gölen i våtmarken där spridningsledningen var placerad under tillförsel försöket. I MIKE SHE-modelleringen representerades tillförseln dels i form av ytillförsel, dels som tillförsel via brunnar (kryssymboler).

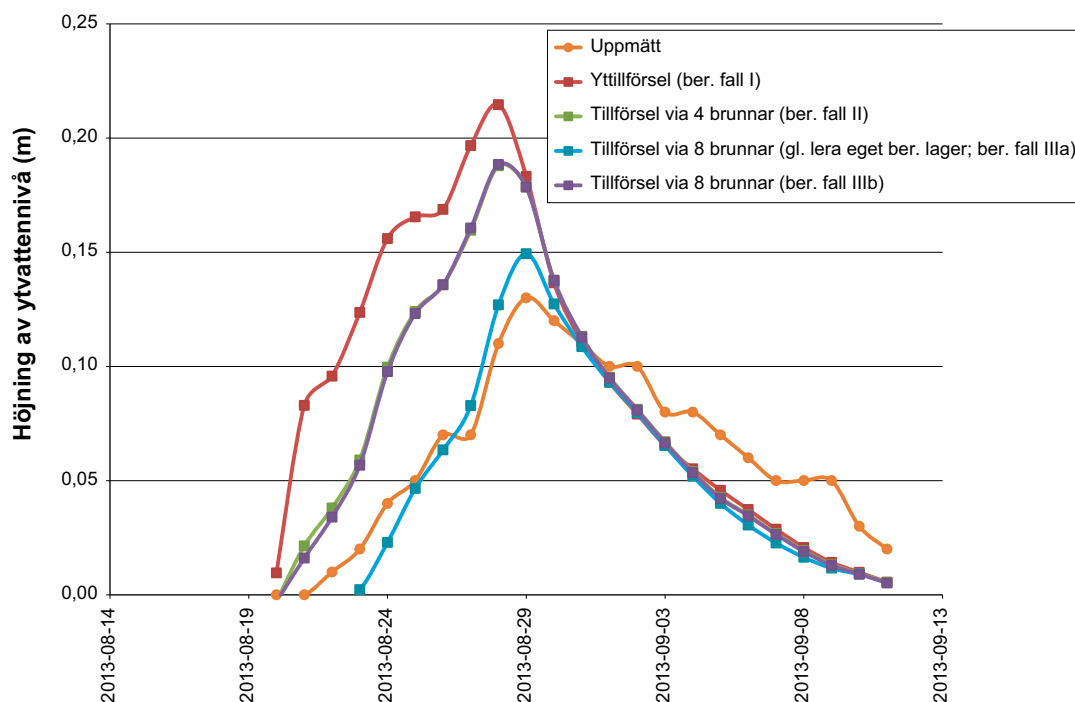
Inverkan av olika sätt att representera vattentillförseln under försöket undersöktes med MIKE SHE-modellen. Specifikt representerades tillförseln dels som ytillförsel, det vill säga tillförsel av vatten på markytan, dels som tillförsel via brunnar i jordlagren. De beräkningsfall som genomförts kan sammanfattas enligt följande:

- **Beräkningsfall I, ytillförsel:** Vattentillförseln representeras i form av tillförsel inom ett 2 m brett och cirka 20 m långt område på markytan i modellen (figur 5-1).
- **Beräkningsfall II, tillförsel via fyra brunnar (glaciallera representeras inte i ett eget beräkningslager):** Vattentillförseln sker via fyra brunnar i beräkningslager 2, med en lokal mäktighet på 2 m (2,5–4,5 m under markytan).
- **Beräkningsfall IIIa, tillförsel via åtta brunnar (glaciallera representeras i ett eget beräkningslager):** Vattentillförseln sker via åtta brunnar i beräkningslager 2, och glacialleran representeras i ett eget beräkningslager med en mäktighet 0,3 m.
- **Beräkningsfall IIIb, tillförsel via åtta brunnar (glaciallera representeras inte i ett eget beräkningslager):** Vattentillförseln sker via åtta brunnar i beräkningslager 2. Detta beräkningsfall syftar till att undersöka den relativa betydelsen av antalet brunnar (beräkningsfall II) respektive den rumsliga upplösningen av jordlagrens stratigrafi (beräkningsfall IIIa).

Figur 5-2 redovisar uppmätt höjning av ytvattennivån i gölen i våtmarken (SFM000115) under tillförselsförsöket samt resultaten av de olika beräkningsfallen, i termer av modellberäknad ytvattennivåhöjning. Specifikt jämför figuren uppmätta och modellberäknade momentanvärden kl. 00:00 under perioden 2013-08-20 till 2013-09-11, där den hydrologiska responsen (ytvattennivåhöjningen) definieras som differensen mellan respektive momentant nivåvärde och nivåvärdet 2013-09-19 kl. 00:00, det vill säga cirka 15 timmar innan vattentillförseln påbörjades (jmf kapitel 3).

I figur 5-2 kan följande noteras:

- Beräkningsfall I (yttillförsel) ger en tydlig och realistisk hydrologisk respons på den simulerade vattentillförseln. Den modellberäknade responsen är dock något snabbare och större än den uppmätta responsen, med en modellberäknad maximal respons som är cirka 0,1 m större än den uppmätta.
- Beräkningsfallen II och IIIb (tillförsel via brunnar, glaciärla inte representerat i ett eget beräkningslager) ger en långsammare och mindre hydrologisk respons jämfört med beräkningsfall I. Även i dessa beräkningsfall är dock den modellberäknade responsen något snabbare och större jämfört med den uppmätta responsen. En jämförelse mellan beräkningsfallen II och IIIb visar att antalet brunnar endast har marginell inverkan på modelleringsresultatet.
- Beräkningsfall IIIa (tillförsel via brunnar, glaciärla representerat i ett eget beräkningslager) ger bäst överensstämmelse med den uppmätta hydrologiska responsen. Jämfört med den uppmätta responsen sker den modellberäknade initiala responsen något senare och är därefter något snabbare vid initialt låga tillförselöden. Under tillförselsförsökets senare del, vid högre flöden i tillförselsystemet, är den modellberäknade responsen i god överensstämmelse med den uppmätta responsen. För beräkningsfall IIIa är den modellberäknade maximala responsen endast cirka 0,02 m större än den uppmätta.
- Den modellberäknade hydrologiska återhämtningen, det vill säga nivåsänkningen efter avslutad vattentillförsel, är likartad i samtliga beräkningsfall och sker något snabbare jämfört med den uppmätta återhämtningen. Specifikt följer den modellberäknade återhämtningen ett kontinuerligt förlopp, medan den uppmätta återhämtningen har mer stegvis karaktär. Skillnaden mellan modellberäknade och uppmätta återhämtningsförlopp har dock inte undersökts närmare inom ramen för denna studie.



Figur 5-2. Jämförelse mellan uppmätt ytvattennivåhöjning i gölen och beräknad ytvattennivåhöjning, med vattentillförsel representerad som yttillförsel på markytan (beräkningsfall I) eller tillförsel via brunnar i jordlagren (beräkningsfall II och IIIa–b).

Baserat på de genomförda beräkningsfallen kan det konstateras att vattentillförsel i form av ytillförsel på markytan ger en tydlig och realistisk hydrologisk respons på den simulerade vattentillförseln. Ytillförsel ger dock upphov till ytavrinning i modellen, vilket medför en hydrologisk respons som är något snabbare och större än den uppmätta responsen. I samband med försöket noterades ingen ytavrinning och området nedströms spridningsledningen upplevdes heller inte som sankt (jmf avsnitt 4.2).

Beräkningsfallen med vattentillförsel via brunnar ger en annan, och möjligen mer realistisk, representation av försökets verkliga utförande. Under försöket tillfördes en stor del av vattnet från spridningsledningen moränen via de gropar som grävts genom glacialleran. I beräkningsfallen med brunnar uppstår dock en viss vattenuppträngning och därmed också en del ytavrinning i modellen. Detta innebär en hydrologisk respons som även i dessa fall är något snabbare och större än den uppmätta responsen. Det beräkningsfall där tillförsel via brunnar kombineras med representation av glaciallera i ett eget beräkningslager ger bäst överensstämmelse med den uppmätta hydrologiska responsen. I detta beräkningsfall reduceras vattenuppträngningen och därmed ytavrinningen ytterligare.

Under försöket tillfördes vattnet dels moränen via groparna genom glacialleran (här representerade som brunnar), dels flödade vattnet vidare nedströms i det ytliga lagret ovanpå lagret med glaciallera. Detta innebär att vattnet följde olika flödesvägar med olika uppehållstider mellan tillförselplatsen och gölen. Det ytliga lagret har en mäktighet på 0,3–0,4 m och består av grusig-stenig mulljord (avsnitt 2.2.2). Det har därför sannolikt en hög flödeskapacitet och eliminerar effektivt ytavrinning vid aktuella tillförselflöden, även om det underlagras av tät glaciallera. Den genomförda modelleringen indikerar att även detta ytliga lager skulle representeras i ett eget beräkningslager i MIKE SHE-modellen, i syfte att ge en än mer realistisk representation av de hydrogeologiska förhållandena vid och nedströms tillförselplatsen. Alternativt kan det ytliga lagret representeras som en ytlig dränering, med ett flödesmotstånd som då skulle utgöra en tillkommande parameter vid modellkalibrering eller prognoser.

Ett beräkningsfall som kombinerar ytillförsel och glaciallera i ett eget beräkningslager har inte studerats inom ramen för denna undersökning. Bedömningen är dock att ett sådant beräkningsfall skulle ge mer ytavrinning, och därmed snabbare och större hydrologisk respons, jämfört med beräkningsfall I (jmf figur 5-2). För att ge rimlig överensstämmelse med uppmätt hydrologisk respons skulle ett sådant beräkningsfall därför sannolikt kräva att det ytliga lagret representeras i ett eget beräkningslager i MIKE SHE-modellen, alternativt som en ytlig dränering på motsvarande sätt som i regionala MIKE SHE-modeller (Bosson et al. 2008).

I det aktuella problemet studeras snabba hydrologiska förlopp på lokal skala, vilket ställer krav på tidsupplösningen på indata samt på den rumsliga diskretiseringen och parameteriseringen av jordlagren. De genomförda modellberäkningarna visar dels på vikten av att representera tillförseln på ett realistiskt sätt, dels betydelsen av noggranna förundersökningar som underlag för en korrekt representation av de hydrogeologiska förhållandena vid och nedströms tillförselplatsen. För den aktuella typen av våtmarker pekar modellberäkningarna på att modellens representation av de verkliga förhållandena ökar om man ansätter fler och tunnare beräkningslager, vilket bedöms vara fullt möjligt i en lokal modell.

6 Utvärdering och slutsatser

Det genomförda pilotförsöket får i sin helhet anses som lyckat. Genom försöket har SKB demonstrerat att det är praktiskt genomförbart att vid behov, och med relativt små flöden, reglera grund- och ytvattennivåer i områdets värdefulla våtmarker för att bevara deras ekologiska värden under uppförande och drift av slutförvaret. Pilotförsökets vattentillförsel skedde under en ovanligt torr period, med sjunkande grund- och ytvattennivåer i hela området. Som framgår av den övre bilden i figur 6-1 (våtmarksobjekt 7, september 2013) torrlades flera av områdets våtmarker naturligt under den aktuella perioden. Denna naturliga torrläggning var mer omfattande än den hydrologiska påverkan som grundvattenbortledningen från slutförvaret bedöms kunna ge upphov till (Werner et al. 2010). Genom förhållandevis liten vattentillförsel (0,5 l/s) motverkades initialt trenden med sjunkande grund- och ytvattennivå under/i den aktuella våtmarken, och nivåerna höjdes därefter successivt under ett antal dagar med ökad tillförsel (1–2 l/s). Bedömningen är att den av SKB föreslagna metoden för vattentillförsel skulle fungera även under uppförande och drift av slutförvaret för använt kärnbränsle.

Genomförandet av pilotförsökets olika moment har gett viktiga erfarenheter och lärdomar, inför eventuell permanent vattentillförsel till våtmarker vid uppförande och drift av slutförvaret. Projektet visar bland annat på vikten av kompletterande fältundersökningar vid tilltänkta tillförselplatser samt rensning och underhåll av ledningssystem för att förhindra igensättningar. Projektet pekar vidare på behov av system som under drift endast kräver liten grad av tillsyn, reglering och ger stabil vattentillförsel vid både låga och höga flöden. Förundersökningar (sticksonderingar, borrhningar och geofysiska undersökningar) bör genomföras i god tid (minst två år) innan uppförandet av slutförvaret påbörjas. Vidare bör lokala kvartärgeologiska och hydrologiska modeller upprättas över potentiella tillförselplatser i god tid. Som del av dessa förberedelser rekommenderas även att fördjupade studier görs av alternativa vattenkällor för eventuell permanent vattentillförsel, med avseende på både vattentillgång och vattenkvalitet.

Som underlag för försöket etablerades en lokal hydrologisk modell, med modelleringsverktyget MIKE SHE, över den aktuella våtmarken. De prognoser som gjordes med modellen stämde överlag väl, med utvärderingsbar hydrologisk respons på stegvis ökande tillflöden under upp till 10 dygn. Som ett uppföljande moment har arbete genomförts med att uppdatera modellen med data och information från de kompletterande fältundersökningarna. Den uppdaterade modellen har därefter använts för att modellera perioden med vattentillförsel, med tillförsel i korrekt läge och med de tillförselflöden som uppmättes under försöket. Syftet var att undersöka i vilken mån den uppdaterade modellen kan åter skapa de grund- och ytvattennivåer som uppmätts inför, under och efter försöket. Resultaten visar att modellen med rimliga anpassningar kan ge god överensstämmelse med uppmätt hydrologisk respons under försöket. De genomförda modellberäkningarna visar vikten av att tillförseln representeras på ett så realistiskt sätt som möjligt i modellen. Beräkningarna visar också på betydelsen av hur jordlagrens stratigrafi vid och nedströms tillförselplatsen representeras i modellen.

Under uppförande och drift av slutförvaret kommer permanent vattentillförsel att initieras, om grundvattenbortledningen från slutförvarets undermarksdelar medför grund- och/eller ytvattennivåförändringar i någon eller några utpekade våtmarker med högst naturvärden (SKB 2011). Pilotförsöket utgör en känd störning av det lokala hydrologiska systemet. Vid utvärderingen av försöket användes data från parallella grund- och ytvattennivåmätningar i andra, ostörda våtmarker i området. Genom hög grad av samvariation kunde dessa data användas för att identifiera störningen och kvantifiera dess magnitud och förlopp.

Försöket påvisar vikten av referensmätningar och utvärderingsmetodik, som gör att man i god tid kan detektera eventuell hydrologisk påverkan på våtmarker med höga naturvärden och om denna beror på SKB:s verksamhet. På SKB pågår utvecklingsarbete rörande monitoringsprogram samt metodik för datautvärdering. Denna utveckling kommer bland annat att utgöra underlag för förslag på mätbara kriterier för initiering och uppföljning av vattentillförsel till våtmarker i Forsmark.



Figur 6-1. Övre bilden: Torrlagd våtmark (våtmarksobjekt 7) den 12 september 2013. Nedre bilden: En göl-groda solar i gölen i våtmarksobjekt 16 den 27 augusti 2013, under pågående vattentillförsel.

Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer. Referenser till SKB:s opublicerade dokument finns samlade i slutet av referenslistan. Opublishade dokument lämnas ut vid förfrågan till dokument@skb.se.

Bergström M, 2013. Artificial groundwater recharge in wetlands: pre modelling for a pilot study in Forsmark, Sweden. TRITA LWR Degree Project 13:33, KTH, Stockholm.

Bosson E, Gustafsson L-G, Sassner M, 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.

Bosson E, Sassner M, Sabel U, Gustafsson L-G, 2010. Modelling of present and future hydrology and solute transport at Forsmark. SR-Site Biosphere. SKB R-10-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

FKA, 2005. Miljökonsekvensbeskrivning av FKA:s verksamhet. FKA-2005-290, Forsmarks Kraftgrupp AB.

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

Hedenström A, Sohlenius G, 2008. Description of the regolith at Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark SKB R-08-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

IEG, 2010. SS-EN/ISO 14688-2:2004 Geoteknisk undersökning och provning. Identifiering och klassificering av jord. Del 2: Klassificeringsprinciper. Tillämpningsdokument. IEG Rapport 2010:13, Implementeringskommission för Europastandarder inom Geoteknik.

Jol H M (red), 2009. Ground penetrating radar: theory and applications. Amsterdam: Elsevier Science.

Lindborg T (red), 2008. Surface system Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Lowrie W, 1997. Fundamentals of geophysics. Cambridge: Cambridge University Press.

Mattsson, H, 2013. Projekt Kärnbränsleförvaret. Resistivitetsmätning vid våtmark 16 i Forsmark. SKB P-13-48, 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.

Nabighian M N (red), 1991. Electromagnetic methods in applied geophysics – Applications Part A and Part B. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists.

Qvarfordt S, Borgiel M, Berg C, 2010. Monitoring Forsmark. Hydrochemical investigations in four calciferous lakes in the Forsmark area. Results from complementary investigations in the Forsmark area, 2008–2009. SKB P-10-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Qvarfordt S, Borgiel M, Berg C, 2011. Forsmark site investigation. Hydrochemical investigations in four calciferous lakes in the Forsmark area. Results from the second year of a complementary investigation in the Forsmark area. SKB P-11-47, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Qvarfordt S, Wallin A, Borgiel M, 2014. Vattenkemiska undersökningar i fyra nyanlagda gölar samt två befintliga småvatten. SKB P-14-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2007. Forsmark site investigation. Programme for long-term observations of geosphere and biosphere after completed site investigations. SKB R-07-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2011. Miljökonsekvensbeskrivning. Mellanlagring, inkapsling och slutförvaring av använt kärnbränsle. Svensk Kärnbränslehantering AB

Sohlenius G, Hedenström A, 2009. Platsundersökning Forsmark. Stratigrafiska undersökningar i våtmarksobjekt. SKB P-09-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sohlenius G, Strömgren M, Hartz F, 2013. Depth and stratigraphy of regolith at Forsmark. SR-PSU Biosphere. SKB R-13-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Strömgren M, Brydsten L, 2013. Digital elevation model of Forsmark. Site-descriptive modelling. SR-PSU Biosphere. SKB R-12-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Söderbäck B (red), 2008. Geological evolution, palaeoclimate and historical development of the Forsmark and Laxemar-Simpevarp areas. Site descriptive modelling. SDM-Site. SKB R-08-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Werner K, Lundholm L, Johansson P-O, 2009. Platsundersökning Forsmark. Installation av grundvattenrör och pegelrör i våtmarker och sjön Tjärpussen. SKB P-09-17, 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.

Opublicerade dokument

SKBdoc id, version	Titel	Utfärdare, år
1366471 ver 1.0	Jordborring och installation av grundvattenrör vid läge för infiltrationsförsök, våtmarksobjekt 16, Forsmark	SWECO Infrastructure AB, 2012
1395324 ver 1.0	SKB avvägning jordrör/bäckrännor: uppföljande mätning av 14 jordrör, nybestämning av åtta jordrör samt lägen på sju bäckrännor	SWECO Infrastructure AB, 2012
1417299 ver 2.0	SKB avvägning jordrör/bäckrännor: uppföljande mätning av 29 jordrör, lägen på sju bäckrännor samt sju strandlinjer	SWECO Infrastructure AB, 2013

Resultat från vattenkemiska analyser

Vatten i ståltanken (PFM007407)

Tabell B1-1. Resultat från kemiska analyser av vatten från ståltanken.

Parameter	Provtagningsdatum (SKB id)	
	2013-08-22 (30033)	2013-08-26 (30034)
EC (mS/m)	24,9	25,5
Alkalinitet (mg/l)	65	68
pH	8,1	8,1
Cl (mg/l)	3,48	3,6
F (mg/l)	< 0,2	< 0,2
Br (mg/l)	< 0,2	< 0,2
SO ₄ (mg/l)	56,3	56,3
Ca (mg/l)	22,6	22,1
Fe (mg/l)	< 0,02	< 0,02
K (mg/l)	1,12	1,22
Mg (mg/l)	1,48	1,48
Na (mg/l)	27,9	27,6
S (mg/l)	19,3	19,2
Si (mg/l)	1,35	1,43
Li (mg/l)	< 0,004	< 0,004
Mn (mg/l)	0,00569	0,00877
Sr (mg/l)	0,0344	0,0339
Färg (A436)	0,011	0,012
Färg (AKF, 1/m)	0,22	0,24

SFM000132: Grundvattenrör i morän vid tillförselplatsen

Tabell B1-2. Resultat från kemiska analyser av vatten från grundvattenrör SFM000132.

Parameter	Provtagningsdatum (SKB id)		
	2013-08-08 (30021)	2013-08-26 (30036)	2013-09-10 (30065)
EC (mS/m)	46,4	42,9	44,3
Alkalinitet (mg/l)	300	240	220
pH	7,3	7,3	7,5
Cl (mg/l)	4,3	4,25	4,8
F (mg/l)	0,37	0,34	0,38
Br (mg/l)	< 0,2	< 0,2	< 0,2
SO ₄ (mg/l)	2,37	30,8	37,3
Ca (mg/l)	87,9	76,4	76,8
Fe (mg/l)	2,21	1,55	1,45
K (mg/l)	2,69	2,48	2,83
Mg (mg/l)	3,88	3,23	3,26
Na (mg/l)	6,6	7,85	10
S (mg/l)	1,09	10,6	12,5
Si (mg/l)	5,93	5,16	5,53
Li (mg/l)	< 0,004	< 0,004	< 0,004
Mn (mg/l)	0,4	0,265	0,267
Sr (mg/l)	0,115	0,097	0,108
Färg (A436)	0,333	0,283	
Färg (AKF, 1/m)	6,66	5,66	

SFM000133: Grundvattenrör i morän vid tillförselplatsen**Tabell B1-3. Resultat från kemiska analyser av vatten från grundvattenrör SFM000133.**

Parameter	Provtagningsdatum (SKB id)	
	2013-08-08 (30022)	2013-09-12 (30063)
EC (mS/m)	61,7	58,9
Alkalinitet (mg/l)	390	340
pH	7,4	7,5
Cl (mg/l)	6,05	5,68
F (mg/l)	0,54	0,53
Br (mg/l)	< 0,2	< 0,2
SO ₄ (mg/l)	1,05	0,92
Ca (mg/l)	108	102
Fe (mg/l)	3,53	2,44
K (mg/l)	4,03	3,88
Mg (mg/l)	6,51	6,15
Na (mg/l)	9,11	8,43
S (mg/l)	3,45	1,43
Si (mg/l)	9,68	9,62
Li (mg/l)	0,0042	0,0044
Mn (mg/l)	0,8	0,798
Sr (mg/l)	0,152	0,149
Färg (A436)	0,146	
Färg (AKF, 1/m)	2,92	

PFM007442: Ytvatten i gölen**Tabell B1-4. Resultat från kemiska analyser av ytvatten från gölen.**

Parameter	Provtagningsdatum (SKB id)			
	2013-08-08 (30023)	2013-08-22 (30032)	2013-08-26 (30035)	2013-09-09 830045)
EC (mS/m)	29,5	32,7	28,0	32,4
Alkalinitet (mg/l)	160	180	120	150
pH	8,2	8,0	7,4	8,0
Cl (mg/l)	8,5	7,34	4,53	4,97
F (mg/l)	0,4	0,38	0,33	0,35
Br (mg/l)	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
SO ₄ (mg/l)	1,65	2,04	28,6	30,8
Ca (mg/l)	51,2	59,4	44,8	50,8
Fe (mg/l)	0,1	0,293	0,18	0,102
K (mg/l)	1,43	1,36	0,503	1,14
Mg (mg/l)	4,31	4,05	3,07	3,1
Na (mg/l)	4,88	4,65	8,38	11,4
S (mg/l)	1,29	1,32	10,1	11
Si (mg/l)	6,73	7,03	4,19	2,29
Li (mg/l)	< 0,004	< 0,004	< 0,004	< 0,004
Mn (mg/l)	0	0,0823	0,0388	0,0169
Sr (mg/l)	0,088	0,0963	0,0717	0,0753
Färg (A436)	0,153	0,215	0,229	0,191
Färg (AKF, 1/m)	3,06	4,3	4,58	3,82

SFM000114 (stålrör): Grundvatten i morän under gölen**Tabell B1-5. Resultat från kemiska analyser av vatten från grundvattenrör SFM000114.**

Parameter	Provtagningsdatum (SKB id)	
	2013-08-08 (30024)	2013-09-12 (30064)
EC (mS/m)	64,2	65,2
Alkalinitet (mg/l)	370	400
pH	7,1	7,2
Cl (mg/l)	16,4	13,2
F (mg/l)	1,36	1,24
Br (mg/l)	< 0,2	< 0,2
SO ₄ (mg/l)	0,37	< 0,2
Ca (mg/l)	73,8	107
Fe (mg/l)	21	28,3
K (mg/l)	8,07	9,66
Mg (mg/l)	11,1	14,5
Na (mg/l)	10,5	11,2
S (mg/l)	1,04	1,24
Si (mg/l)	7,85	14,4
Li (mg/l)	0,0208	0,02
Mn (mg/l)	0,4	0,479
Sr (mg/l)	0,227	0,335
Färg (A436)	0,027	
Färg (AKF, 1/m)	0,54	