

GRUNDVATTENKEMISK INTERAKTION MED UNDERMARKSANLÄGGNINGAR

Fredrik Mossmark

Lars O. Ericsson

Malin Norin

Omslagsfigur:

Grundvattennivåer, pH och sulfatkoncentrationer i bergborrhål BP08 (Figur 12 i rapporten).

GRUNDVATTENKEMISK INTERAKTION MED UNDERMARKSANLÄGGNINGAR

Hydrochemical interaction with underground
constructions

Fredrik Mossmark, Chalmers tekniska högskola
Lars O. Ericsson, Chalmers tekniska högskola
Malin Norin, NCC Teknik

FÖRORD

Tunnlar utgör idag en viktig och nödvändig del i den svenska moderna infrastrukturen. För att hålla en hög säkerhet och en relevant kostnad för drift och underhåll av tunnlar så behöver man förstå och kunna bedöma mängden inläckande vatten och dess kemiska sammansättning. Påverkan av de material som är inbyggda i tunnarna påverkas av det inläckande grundvattnets korrosiva egenskaper, och då är det främst konsekvenserna för bärande huvudsystem och igensättning av dräner som bedöms få störst betydelse. Eftersom vattnet som läcker in till en tunnel så småningom kommer att släppas ut i något ytvattendrag är vattnets kemiska sammansättning av betydelse och därför är det bra om sammansättningen kan bedömas i ett tidigt skede. Numerisk modellering kan användas för att på så sätt prognostisera den kemiska sammansättningen i det vatten som kan läcka in i en framtida undermarksanläggning.

Tidigare har man genomfört systematiska fältstudier av såväl hydrogeologiska som kemiska effekter som orsakas av den ökade grundvattenbildningen i samband med undermarksbyggande. I föreliggande forskningsprojekt sammanfattas två fältstudier från järnvägstunnlar, Kattleberg och Hallandsås, där man har haft mycket olika geologiska förhållanden vilket i sin tur ger olika vattenkemisk påverkan på inläckande vatten. Förståelsen för de vattenkemiska processerna är central för att numeriskt kunna modellera en förväntad vattenkemisk sammansättning i det inläckande vattnet.

Vattenkemisk modellering har utförts med data från tidigare försök vid Gårdsjön där man har olika blandningsförhållanden av ytligt grundvatten och berggrundsvatten, med målet att återskapa uppmätta resultat. Modelleringarna visade att man kan modellera förhållanden och de förändringar som uppstår vid undermarksbyggande och grundvattenuttag och förutsätter en god förståelse av de geologiska förhållandena som indata till modellen.

Detta arbete utfördes av Fredrik Mossmark vid Chalmers Tekniska Högskola, Bygg- och Miljöteknik med Lars O Ericsson (Chalmers) och Malin Norin (NCC Teknik) som handledare. En referensgrupp har följt projektet och bidragit med råd och diskussioner. Referensgruppen bestod av Katinka Klingberg Annertz (Trafikverket), Ola Landin (Trafikverket), Ann Emmelin (Golder/SKB), Ulf Håkansson (Skanska), Marcus Laaksoharju (Geopoint/Nova) och Mikael Hellsten/Per Tengborg (BeFo). Projektet har finansierats av BeFo och Formas som ett resultat av en gemensam utlysning.

Stockholm, december 2013

Per Tengborg

SAMMANFATTNING

Grundvattenkemisk påverkan har observerats vid ett ganska stort antal tunnelprojekt. I förekommande fall har dessa förändringar inneburit att vattnet fått nya kemiska egenskaper som har större potential att bryta ner stål- och cementbaserade konstruktionsmaterial.

De grundvattenkemiska förändringarna drivs av att det sker inläckage i undermarksanläggningar. Dessa läckage innebär ökad grundvattenströmning, något som bl.a. orsakar att vatten med nya egenskaper strömmar mot platsen för anläggningen. Som regel innebär detta också att grundvattenbildningen ökar på bekostnad av vatten som finns tillgängligt för ytavrinning och för vegetationen. Dessa ändrade hydrogeologiska förhållanden möjliggör också för att vattenkemiska processer sker på ett annat sätt än tidigare.

I föreliggande rapport presenteras en sammanfattning av två fältstudier som genomförts vid järnvägstunnlar under genomförandeskede. Studierna har gjorts i syfte att förbättra förståelsen för påverkan från undermarksanläggningar på hydrologi, hydrogeologi och vattenkemi. rapporten presenteras också resultat från numerisk modellering med programvaran Phreeqc. Arbetet ingår som en del i ett forskningsprojekt med syfte att skapa en metodik för att kunna förutse vilka förändringar som kan förväntas vid ett undermarksprojekt och kvantifiera dessa.

Resultaten från de två fältstudierna, vid Kattleberg och Hallandsås, bekräftar att de geologiska förhållandena är avgörande för vilka förändringar som sker. De två studieobjekten har sina markytor belägna över (Hallandsås) respektive under (Kattleberg) högsta kustlinjen efter senaste istiden. Denna skillnad har medfört att de jordartsgeologiska förhållandena skiljer sig åt. Vid Kattleberg begränsade ett (i havsvatten avsatt) lerlager den hydrauliska kontakten mellan en våtmark och berggrundvatten/tunnel. Detta begränsade också den vattenkemiska påverkan. Däremot konstaterades att heterogeniteten i berggrunden skapar olika vattenkemiska förhållanden i tunnelns närhet. I ett av borrhålen som gjorts från tunnelvägg hade vattnet stark påverkan från injekteringsmedel, medan ett annat borrhål från tunnelvägg uppvisade ursprunglig berggrundvattenkaraktär.

På Hallandsås observerades stora rumsliga skillnader i berggrundvattnet. I ett av bergborrhålen observerades enbart mindre förändringar, medan två andra borrhål fick en miljö som var tydligt mer aggressiv mot cement- och stålbase material. Oxidation av pyrit, både som sprickmineral och förekommande i våtmarker (direktkontakt spricksystem-våtmark då detta område inte legat under havsytan efter sista istiden och därigenom inga finsediment avsatts) bedöms vara en viktig orsak till höga sulfatkoncentrationer, pH-sänkning och minskad alkalinitet.

De redoxkänsliga parametrarna järn och mangan påverkades, men återhämtade sig snabbt i samband med att grundvattennivåerna steg vid minskad påverkan från tunneldrivningen vid Hallandsås. De vattenkemiska förändringarna med sulfatpulser och pH-sänkning återhämtade sig däremot långsammare. Vid ett återställande av grundvattennivåer bedöms denna process ske under några år.

Fältundersökningarna har givit värdefulla insikter om processförståelse som i sin tur utgör underlag till konceptuella utgångspunkter för modellering. Numerisk modellering utfördes inom projektet på data som samlats in vid ett tidigare försök med grundvattenuttag vid Gårdsjön, Stenungsunds kommun. Kvalitativa utvärderingar har tidigare visat på ökad vattenkemisk interaktion mellan ytliga vatten i exempelvis en våtmark och berggrundvatten. Modelleringsresultaten visar på att av vattnet som togs ut från berggrunden utgjorde vatten med ursprung från våtmarken 5% - 10%. Under opåverkade förhållanden är våtmarken ett utströmningsområde som ej bildar berggrundvatten. Vidare visar modelleringen att kalцит (förekommande som sprickmineral) går i lösning.

SUMMARY

The impact of groundwater chemistry has been observed in quite a large number of tunnel projects. In certain cases, these changes have caused the water to acquire new chemical properties with greater potential to degrade steel and cementitious construction materials.

The changes in groundwater chemistry are driven by leakage into underground constructions. This leakage results in increased groundwater flow, giving rise, among other things, to water with new properties flowing in the direction of the construction. Generally, this also means that groundwater recharge increases at the expense of water available for surface runoff and vegetation. These changes in hydrological conditions also allow hydrochemical processes to take place in a different way than previously.

This report presents a summary of two field studies conducted in rail tunnels during the construction phase. The studies were carried out in order to improve understanding of the impact of underground constructions on hydrology, hydrogeology and hydrochemistry. The report also presents results from numerical modelling using the Phreeqc computer program. This work is part of a research project aimed at establishing methodology for predicting changes that can be expected in conjunction with underground projects and the subsequent quantification of these changes.

The results from the two field studies, conducted at Kattleberg and Hallandsås, confirm that geological conditions are crucial to determining the changes that take place. The ground surface of the two study objects is above (Hallandsås) and below (Kattleberg) the highest coastline after the most recent ice age. This difference has resulted in varying soil geology. At Kattleberg, a layer of clay (deposited in seawater) limited hydraulic contact between a wetland and the groundwater/tunnel. It also limited hydrochemical impact. It was noted that heterogeneity in the rock creates different hydrochemical conditions near the tunnel. In one of the boreholes, drilled from the tunnel wall, water was affected strongly by grouting agent, whilst in another borehole from the tunnel the water had the same character as the original groundwater.

At Hallandsås, large spatial variations were observed in the groundwater. In one of the bedrock boreholes, only minor changes were noted whilst two other boreholes revealed an environment that was clearly more aggressive to steel and cementitious construction materials. Oxidation of pyrite, both as a fracture mineral and in wetlands (there was direct fracture system-wetland contact as this area was not below the ocean surface after the last ice age with a consequent absence of fine sediment deposition), was considered a key reason for high sulphate concentrations, reduced pH and reduced alkalinity.

The redox-sensitive parameters iron and manganese were affected but recovered quickly when the groundwater levels rose in response to reduced impact from tunnelling at Hallandsås. However, recovery from the hydrochemical changes, with sulphate pulses and pH reduction, took place more slowly. The assessment is that during reinstatement of groundwater levels this process takes a number of years.

Field investigations have provided valuable insight into process understanding, which in turn provides a basis for conceptual starting points for modelling. Numerical modelling took place within the project using data collected as part of a previous experiment related to groundwater extraction at Gårdsjön, in the municipality of Stenungsund. Previous qualitative evaluations revealed increased hydrochemical interaction between surface water – in wetland for example – and groundwater. The modelling results show that 5-10% of the water extracted from the rock originated from wetlands. Under unaffected conditions, wetlands constitute a discharge area with no groundwater recharge. The modelling also shows that calcite (which occurs as a fracture mineral) is dissolved.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	I
SAMMANFATTNING	II
SUMMARY	IV
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	VII
1 INLEDNING	1
1.1 MÅLSÄTTNING	1
2 BAKGRUND	1
2.1 Konceptuella modeller	2
2.2 Bedömning av vattenkemisk aggressivitet	4
3 AVGRÄNSINGAR	5
4 GENOMFÖRANDE	5
4.1 FÄLTSTUDIER	5
4.2 Vattenkemisk modellering	9
5 DISKUSSIONER OCH RESULTAT	13
5.1 Kattleberg	13
5.2 Hallandsås	16
5.3 Vattenkemisk modellering	21
6 SLUTSATSER	23
REFERENSER	25
Bilaga 1 Publikationslista.	

1 INLEDNING

Det ändrade grundvattenflödet som orsakas av läckage i tunnlar och berganläggningar skapar förändringar av grundvattnets kemiska sammansättning. Dessa förändringar kan innebära att vattnet blir mer aggressivt mot stål- och cementbaserade material. På sikt kan detta medföra beständighetsproblem för bergförstärkning, tätande injektering och installationer. Vattenkemiska förändringar till följd av undermarksbyggande har observerats i ett ganska stort antal projekt. Däremot finns bara ett fåtal studier med högupplösta tidsserier.

1.1 MÅLSÄTTNING

Föreliggande rapport sammanfattar två genomförda fältstudier av järnvägstunnlar i Sverige; Hallandsås och Kattleberg. Vidare har syftet med studien varit att skapa ett underlag för att kunna förutse vattenkemiska förändringar vid tunnlar genomförande- och driftskeden baserat på information som insamlats under planeringsskedet. Dataserierna kommer att utgöra grund för att skapa konceptuella modeller likväl som indata till datorbaserade numeriska modelleringar som baseras på de modeller som skapats i föreliggande studie. Projektet syftar till att skapa förutsättningar för att göra kostnadseffektivare materialval i undermarksanläggningar.

2 Bakgrund

Inom projektgruppen har ett flertal studier med syfte att förbättra förståelsen av vattenkemiska förändringar vid hydrogeologiska störningar genomförts. Nedan listas några av de studier som bedrivits:

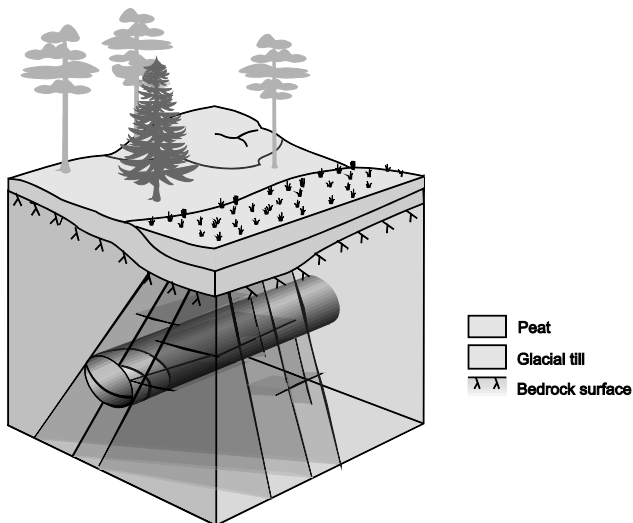
- En omfattande datasammanställning (Olofsson och Ericsson, 1985) av vattenkemiska förändringar vid grundvattenuttag.
- Två fleråriga försök med grundvattenuttag (bl.a. Mossmark m.fl., 2008b; Mossmark, 2010).
- En utvärdering av vattenkemiska förändringar vid genomförandet av det östra tunnelröret Hallandsås (Mossmark, 2010; Mossmark m.fl., 2010).
- En litteraturstudie av erfarenheter från vattenkemiska och hydrologiska förändringar vid tunnelbyggande (Mossmark m.fl., 2008a).
- En licentiatuppsats (Mossmark, 2010).

Ytterligare publiceringar finns i form av ett stort antal rapporter, konferensbidrag samt vetenskapliga artiklar (se bilagor).

2.1 Konceptuella modeller

Eftersom projektgruppen genomfört studier under varierande geologiska förhållanden har resultaten från dessa kunnat användas för att utvärdera samband mellan geologi och vattenkemi. Erfarenheter från de tidigare forskningsprojekten sammanfattades därför i konceptuella modeller (Mossmark, 2010). Dessa modeller schematiserade vilka vattenkemiska processer som kan förväntas vara viktiga vid grundvattenpåverkan från undermarksbyggnad beroende på geologiska förhållanden. Modellerna utgår bl.a. ifrån kvartärgeologiska förhållanden som uppstått under och efter den senaste istiden samt skillnader mellan ut- och inströmningsområden för grundvatten.

Förhållanden som vanligtvis råder i utströmningsområden för grundvatten över högsta kustlinjen presenteras i Figur 1. Vanligt förekommande är våtmarksområden med vitmossetorv som kan stå i god hydraulisk förbindelse med en underliggande svaghetszon i berggrunden. När en undermarksanläggning byggs i närheten kan vatten flöda från våtmarken och koncentrationen av organiskt material öka, redoxförändringar i både berg och jord kan ske. I våtmarken kan detta påverka svaveldynamik och kvävesystem.

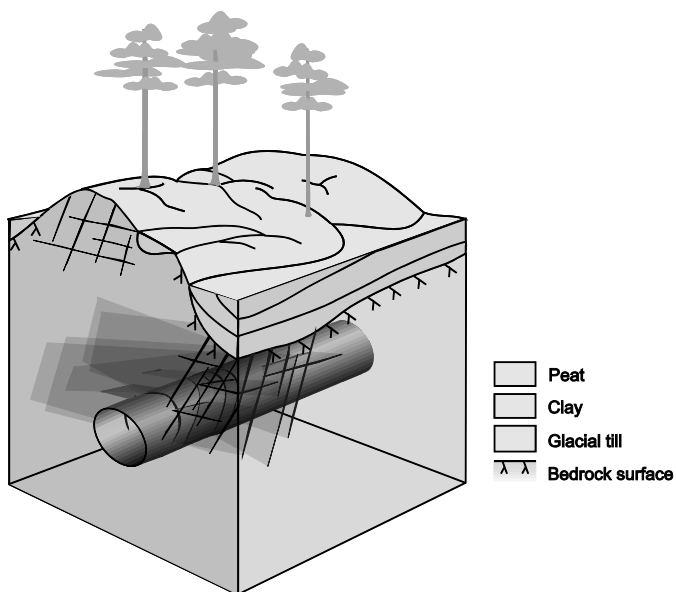


Figur 1. Vanliga geologiska förhållanden vid ett utströmningsområde för grundvatten beläget över högsta kustlinjen sedan den senaste glaciationen.

Figure 1. Common geological conditions in a groundwater discharge area that has not been subjected to marine or lacustrine transgressions following the most recent glaciation period.

I observerade fall belägna över högsta kustlinjen har sulfidmineral oxiderats och sulfatkoncentrationerna i yt- och grundvatten ökat med minskad alkalinitet och pH som följd. Detta är en typmiljö som bl.a. studerats under fältförsök vid Gårdsjön (Mossmark, 2008) och i föreliggande studie representeras av de hydrogeologiska förhållandena vid Hallandsås.

Vid förhållanden som vanligtvis råder i utströmningsområden under högsta kustlinjen förekommer sediment av finmaterial som silt och lera. Dessa kan fungera som en barriär mellan t.ex. en våtmark och spricksystem i berggrunden. Marint avsatta leror har normalt höga klorid- och svavelkoncentrationer. I tillägg har marint vatten genom sin högre densitet än sött grundvatten kunnat påverka berggrundvattnet. I tidigare studier inom projektgruppen har försök med grundvattenuttag i ett område som har förhållanden som liknar dessa genomförts på norra delen av Äspö (Knape, 2002; Mossmark, 2010). Inom förliggande projekt representerar Kattleberg nämnda geologiska förhållanden.



Figur 2. Vanligt förekommande geologiska förhållanden vid ett utströmningsområde för grundvatten under högsta kustlinjen.

Figure 2. Common geological conditions in a groundwater discharge area that has been subjected to marine or lacustrine transgressions following the most recent glaciation period.

2.2 Bedömning av vattenkemisk aggressivitet

Trafikverket och dess föregångare (Banverket/Vägverket) har beslutat om föreskrifter som bestämmer hur grundvattnets kemiska egenskaper ska bedömas för att göra materialval i tunnlar. Före år 2012 fanns vattenkemiska kriterier med haltangivelser för när kompletterande skydd av stålmaterial skulle vara obligatoriskt i Trafikverkets tunnlar. Dessa kriterier har dock avlägsnats i de nu gällande föreskrifterna Trafikverkets tekniska krav/råd Tunnel (TrVK/TrVR). Emellertid fanns vattenkemiska kriterier i de tidigare föreskrifterna BV Tunnel (ursprungligen utgiven av Banverket) och ATB Tunnel (Vägverket). De tidigare kriterierna bedömde vattnet som aggressivt om:

- $pH < 6,5$.
- Totalhårdhet $< 20 \text{ mg/L } (Ca^{2+} + Mg^{2+})$.
- Alkalinitet $< 1 \text{ mEq/l } (\text{motsvarande } 61 \text{ mg/l } HCO_3^-)$.
- Elektrisk konduktivitet $> 100 \text{ mS/m}$.

I de nu gällande föreskrifterna från Trafikverket saknas kriterier med haltangivelser för att bedöma aggressivitet mot stålmaterial. Materialval efter korrosionsklass görs istället efter kvalitativa bedömningar om vattnet är aggressivt, utifrån bergkvalitet, genomförd förinjektering och om det är sött, salt eller bräckt vatten.

För att anpassa sammansättning på cementbaserade material hänvisar TrVK till standarden SS-EN 206-1. De delar av standarden som berör vattenkemiska förhållanden anger tre nivåer på förhöjd exponering, XA1-XA3, se tabell 1.

Table 1. Exposure index for cementitious materials in compliance with the SSEN206-1 standard.

Tabell 1. Exponeringsklasser för cementbaserade material enligt SS EN 206-1.

Parameter	Ej förhöjd	XA1	XA2	XA3
SO_4^{2-} mg/l	<200	200-600	600-3000	3000-6000
pH	>6.5	6.5-5.5	5.5-4.5	4.5-4.0
CO_2 mg/l	<15	15-40	40-100	> 100
aggressive				
NH_4^+ mg/l	<15	15-30	30-60	60-100
Mg^{2+} mg/l	<300	300-1000	1000-3000	> 3000

3 Avgränsingar

De två fältstudierna har genomförts i tydligt avgränsade delområden av de två undermarksanläggningarna. I Hallandsås har det ej funnits möjlighet att övervaka grundvattenkemi i tunnelvägg. Enbart begränsade okulära mätningar av avrinningsflöden från de två objekten har genomförts. Numerisk modellering har gjorts enbart baserat på tidigare genomförda försök med grundvattenuttag vid Gårdsjön.

4 GENOMFÖRANDE

Fältstudierna har gjorts under genomförandefas av två järnvägstunnlar, Hallandsås och Kattleberg (Banaväg i Väst), studierna pågick mellan år 2010 och 2012. Inom ramen för fältstudierna övervakades yt- och grundvattenkemiska förhållanden samt grundvattennivåer. Hydrologiska och meteorologiska data inhämtades. Vid båda objekten fördes en nära dialog med Trafikverket. Vid Hallandsås genomfördes även undersökningar och utvärdering i aktivt samarbete med Trafikverket. I Kattleberg bedrevs undersökningarna även genom nära dialog med entreprenören Veidekke entreprenad. Modelleringsarbete har genomförts i nära samarbete med Marcus Laaksoharju (SKB/Geopint).

4.1 FÄLTSTUDIER

4.1.1 Kattleberg

Den studerade järnvägstunneln i Kattleberg utgör en del av BanaVäg i Väst, ett kombinerat projekt för att bygga 75 km fyrfältsväg och dubbelspårig järnväg mellan Göteborg och Trollhättan. Tunneln, som är belägen mellan Älvängen och Alvhem i Ale kommun, är 1.8 km lång och är byggd för dubbelspårig trafik med en parallell servicetunnel längs en delsträcka. Inom föreliggande projekt har ett delområde på norra delen av Kattleberg studerats. Sprängningsarbeten påbörjades sommaren 2010 och avslutades under våren 2011.

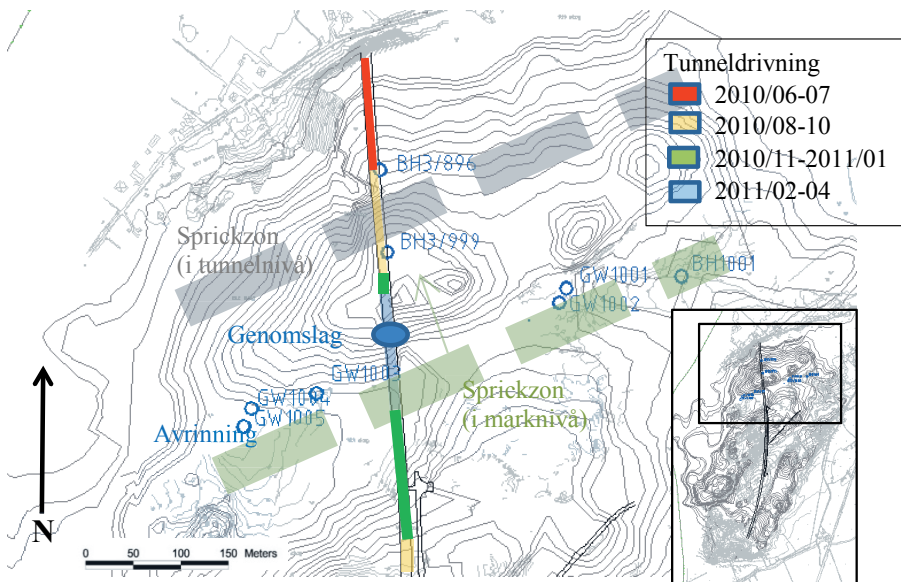
Kattleberg är beläget någon kilometer öster om Göta Älv-zonen. Berggrunden i Kattleberg består i huvudsak av granodiorit som utsatts för varierande grad av metamorfos. Intrusioner av metabasit förekommer och representeras av gångar i granodioriten. Inom studieområdet dominerar gnejs av granitisk eller granodioritiskt ursprung, vid borrhålskartering har kalcit, klorit och järnhydroxid identifierats i spricksystem.

Området är beläget under högsta kustlinjen efter den senaste istiden med marina transgressioner som påverkat jordlagerföljd och grundvattenkemi. Glaciären avsatte

morän i tunna lager direkt överlagrande berggrunden. Under påföljande marina transgressioner avsattes leror, både som glaciala och post-glaciala leror. I utströmningsområden förekommer våtmarker med vitmossetorv.

I studieområdet finns en svaghetszon i berggrunden som topografiskt representeras av ett låglänt långsträkt område. Detta delområde fungerar hydrogeologiskt som ett utströmningsområde, här förekommer marint avsatta leror som överlagras av vitmossetorv. Svaghetszonen stupar med en svag lutning och en nordlig strykning. Därigenom korsar den tunneln norr om våtmarksområdet, se Figur 3.

I Kattleberg installerade projektet fem filterbrunnar för att övervaka nivåförändringar och för att provta grundvatten för kemisk analys, se Figur 3. Filterbrunnarna förlades i anslutning till ett topografiskt lågt beläget våtmarksområde, men vatten i olika jordarter och inströmningsområde för grundvatten övervakades. Två bergborrhål installerades i tunnelväggen, varav det ena installerades norr om svaghetszonen medan det andra installerades i svaghetszonen, se Figur 3. Ett bergborrhål borrar från marknivå fanns sedan tidigare i området för Trafikverkets övervakning av berggrundsvatten (BH1001).



Figur 3. Studieområdet på norra delen av Kattleberg, fem filterbrunnar installerades i anslutning till ett våtmarksområde, två borrhål installerades i tunneln, ett borrhål för övervakning av berggrundsvatten fanns sedan tidigare (BH1001).

Figure 3. Study area in the northern part of the Kattleberg Hill. Five monitoring filter wells were installed in the vicinity of a wetland and two boreholes were drilled in the bedrock from inside the tunnel. A bedrock borehole that had previously been drilled from the surface (BH1001) was also monitored.

Under perioden oktober 2010 till december 2011 genomfördes provtagning och mätning av grundvattennivåer varannan vecka. I flera av punkterna har provtagning skett glesare till följd av tekniska svårigheter i fält.

4.1.2 Hallandsås järnvägstunnel

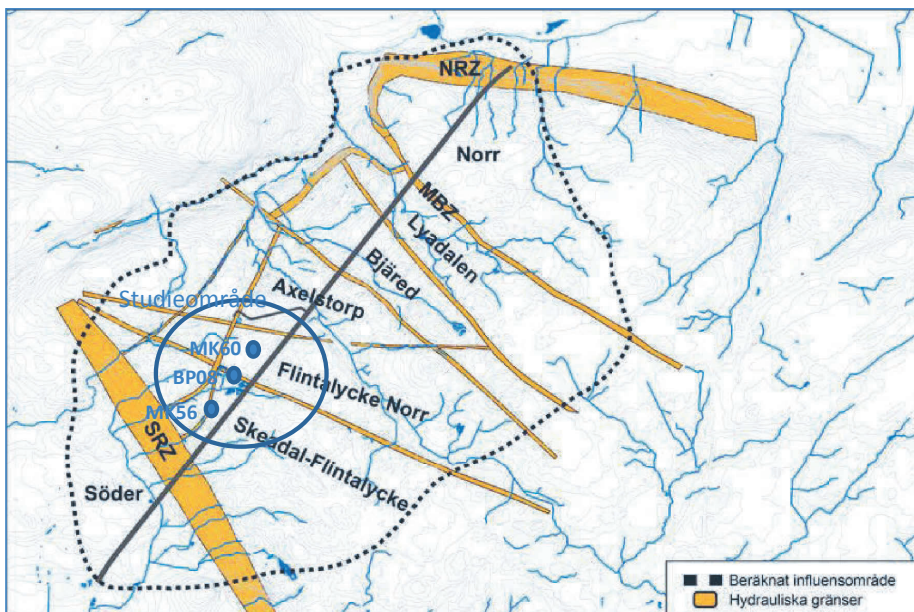
Tunnlarna genom Hallandsås utgör en del av Västkustbanan som är en järnvägsförbindelse mellan Göteborg och Lund. Tunnlarna är 8.6 km långa och består av två parallella huvudtunnlar där varje tunnel är avsedd för enkelspårig järnväg. Byggskedet inleddes 1992 och har sedan dess avbrutits vid två tillfällen. Tunneldrivning inom ramen för den sista entreprenaden inleddes 2005 och bedrivs med tunnelbormaskin. Tidigare entreprenader har i huvudsak använt konventionell borrar-sprängteknik. Genomslag på den östra huvudtunneln erhöles 2010, medan genomslag på den västra huvudtunneln planeras att ske under 2013.

Hallandsås är en urbergshorst belägen i norra Skåne, c:a 80 km lång och 5-10 km bred och har en nordvästlig-sydostlig utbredning. Högsta punkten är belägen 226 m.ö.h.. Hallandsås avgränsas i nord respektive syd av sluttningar som utgörs av förkastningslinjer i vilka horsten förskjutits till att ligga topografiskt högre än omgivningen. I de låglandsområden som omger horsten i norr respektive söder överlagras urberget av sedimentära bergarter. Den dominerande bergarten i horsten är gnejs, men diabasgångar som intruderat har en viktig hydrogeologisk betydelse. Gångarna är i huvudsak orienterade längs horstens utbredningsriktning i en sydostlig-nordvästlig riktning. Gångarna har en nästan vertikal stupning och är mellan någon decimeter till några tiotals meter breda. Den bergmassa som omger gångarna, bestående av gnejs, är ofta ganska uppsprucken i närheten av bergartsövergången. Detta innebär att det ofta finns vattenförande vertikala zoner på var sin sida om en diabasgång. Diabasgångarna har, förutom ytnära, ganska få vattenförande sprickor och är därmed ganska vattentäta och fungerar genom sin vertikala utbredning som negativa hydrauliska gränser. Ytligt är berggrunden ganska uppsprucken med vattenförande sprickor (Annertz, 2010).

Morän finns avlagrat direkt ovanpå berggrunden över större delen av Hallandsåsen. Under isavsmältning har glaciälviala sediment sedimenterat i framförallt Sinarpsdalen, men även i Axeltorpsbäckens dalgång. Den högsta kustlinjen efter senaste istiden är i området c:a 60 m.ö.h.. Både norra och södra randzonerna (sluttningarna) har utsatts för svallningsprocesser under den gradvisa landhöjningen. Svämsediment finns i

Vadebäckens, Axeltorpsbäckens och Lyabäckens dalgångar. Våtmarker är relativt vanligt förekommande på Hallandsås (Ringberg, 2000).

Studieområdet ligger i södra delen av Hallandsås och avvattnas av vattendraget Vadebäcken med biflöden som rinner från Hallandsåsens södra delar, nerför södra randzonen (åsens södra sluttning) och sedan genom tätorten Förslöv. Områdets utbredning och belägenhet visas i Figur 4. De västliga delarna av avrinningsområdet domineras av åkermark, medan barrskog och våtmarker dominerar i de östliga topografiskt högre belägna delarna vilka ingår i studieområdet. Ur ett grundvattenperspektiv utgör generellt våtmarkerna lokala utströmningsområden medan barrskogen utgör inströmningsområden. Dessa system med inströmnings- och utströmningsområden är känsliga för yttre påverkan, som exempelvis när hydrologiska förhållanden förändras genom att ett flöde skapas mot en uttagsbrunn för grundvatten eller, som i detta fall, mot en läckande tunnel.



Figur 4. Försöksområdets belägenhet, hydrauliska gränser och placering av undersökta bergborrhål på Hallandsås (Björkman, 2010).

Figure 4. The study area on the Hallandsås Ridge. The hydraulic boundaries and the location of the monitoring boreholes in the bedrock are shown.

Enligt Björkman (2010) är den svaghetszon som utgör Hallandsåsens södra slänter insituvittrad och genom leromvandling hydrauliskt relativt tät. Studieområdet genomkorsas vid Flintalycke av en diabasgång som sträcker sig i Hallandsåsens längdriktning och är nästan vertikal. Gången, som på tunnelnivå är nästan tät, omges av vittrad gnejs som är relativt vattenförande (Gynnemo, personlig kommunikation). Från södra randzonen till våtmarkerna vid i studieområdet följer Vadebäcken en tektonisk zon. Denna zon har genom leromvandling av berg blivit relativt tät. Ytterligare en tektonisk zon finns mellan Vadebäcken och tunnelsträckningen. Berget överlagras i nästan hela studieområdet enbart av morän, men våtmarker förekommer i lågområden.

Dataövervakningen i studieområdet genomfördes som komplettering till Trafikverkets kontrollprogram. I kontrollprogrammet ingår främst övervakning av grundvattennivåer och provtagning av ytvatten. I tillägg till detta provtogs tre bergborrhål i samarbete med Trafikverket varannan vecka från april till december 2011 och därefter en gång per månad till juni 2012. Projektet genomförde också upprepade vattenkemiska borrhålsloggningar.

4.2 Vattenkemisk modellering

I ett inledande steg i utvecklandet av prognosmodeller genomfördes vattenkemisk modellering av data insamlade vid ett tidigare försök vid Gårdsjön. Målsättning var att återskapa uppmätta resultat från påverkansperiod i berggrundvattnet genom att blanda olika vattentyper och genom inverkan från vattenkemiska processer.

4.2.1 Förhållanden vid Gårdsjön

Två avrinningsområden vid Gårdsjön utanför Stenungsund övervakades under perioden 1997 till 2008 genom vattenkemisk provtagning av ytvatten, ytligt grundvatten och berggrundvatten, mätning av grundvattennivåer, klimatologiska förhållanden och avrinningsvolym.

Området är kvartärgeologiskt beläget vid eller strax över högsta kustlinjen vilket innebär att finsediment kan förekomma i sänkor, men detta har bara i mycket liten omfattning noterats i studieområdena. Berggrunden utgörs främst av granodiorit med flera tydliga tektoniska zoner, vilka påverkar landskapet. Des tektoniska zoner framträder som svaghetszoner som utgör topografiska sänkor, vattenförande zoner med låg bergkvalitet.

Eftersom området utsatts för glaciation överlagras generellt morän berggrundens överyta. I sänkor som hydrogeologiskt utgör utströmningsområden förekommer torv. Eftersom området är näringsfattigt domineras dessa av vitmossetorv.

I ett av de två övervakade områdena gjordes ett grundvattenuttag från två olika bergborrhål under perioden 2000 till 2005. Påverkan i området som användes för uttag jämfördes med observationer i det andra övervakade området som användes som referens.

4.2.2 Tillgängliga data

Fältundersökningen vid Gårdsjön har skapat ett underlag som har använts som indata för modellering. Data inkluderar månatliga värden för vattenkemiska parametrar i avrinningsvatten, ytligt grundvatten och berggrundvatten. Vidare har geologisk kartering okulärt och vid borrhning i både jordlager och i berggrunden utgjort underlag för kunskap om möjliga vattenkemiska processer och källor.

4.2.3 Numerisk modellering

För modellering användes Phreeqc (U.S.G.S., 2013), vilket är ett numeriskt modelleringsverktyg. Phreeqc har ofta använts i vetenskapliga tillämpningar, över 600 kollegialt granskade publikationer redovisar resultat från modellering med denna programvara. Indata till modelleringarna utgjordes av kemiska analysdata från försöket vid Gårdsjön.

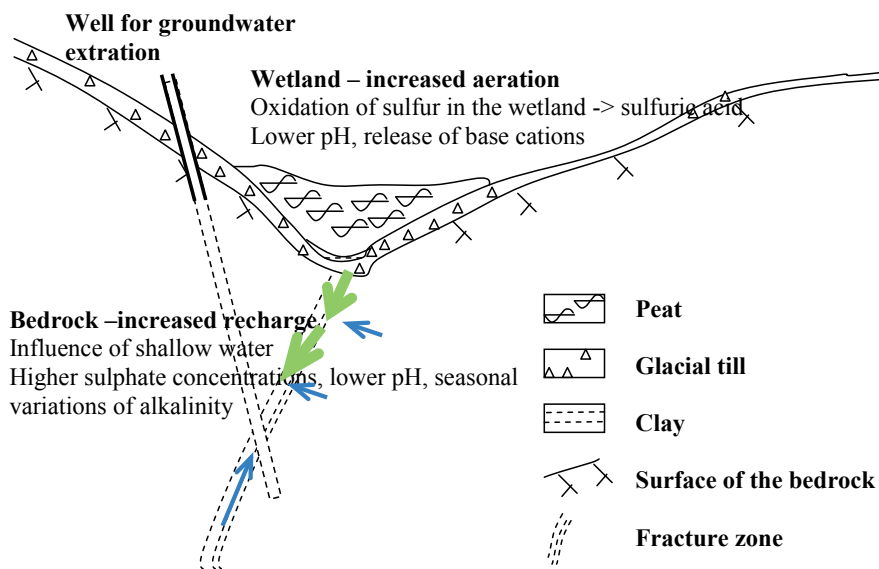
Inversmodellering gjordes för att bedöma inverkan från sprickmineral och mineral i omgivande berg på vattenkemiska förhållanden i berggrundvattnet. Enligt kartering och observationer vid borrhning etc. bedöms följande mineral vara relevanta (Hultberg, 2008):

- kalcit(sprickmineral)
- Kvarts (omgivande berg, granodiorit)
- Biotit (omgivande berg)
- Plagioklas (omgivande berg)
- K-feldspar (omgivande berg)
- Pyrit (sprickmineral)

Denna modellering gjordes för att studera om det opåverkade berggrundvattnet före det att grundvattenuttag påbörjades var i jämvikt med något/några av de tillgängliga mineralerna.

För att på ett grundläggande sätt bedöma berggrundvattnets ursprung under påverkansperioden i försöksområdet upprättades en blandningsmodell. Modellering gjordes där vatten av olika ursprung blandades i varierande förhållanden och resultatet jämfördes med uppmätta resultat från vattenkemisk analys av det påverkade berggrundvattnet. De ingående vattentyperna som blandades var opåverkat berggrundvatten (före grundvattenuttaget) med påverkat ytligt grundvatten. Detta med syfte att återskapa sammansättningen på påverkat berggrundvatten (under uttagsperioden).

Vidare ansattes en reaktiv modell med endimensionellt flöde i tio steg. I det första steget flödade vatten från våtmarken och berggrundvatten från opåverkade förhållanden tillsattes. Vattenkemiska processer simulerades varefter nästkommande modelleringssteg tog vid med ytterligare tillförsel av opåverkat berggrundvatten samt påverkan från vattenkemiska processer. De vattenkemiska processerna som simulerades i varje steg var jämvikt mot kalcit, justering av koldioxidtryck och jonbytesprocesser. Figur 5 presenterar översiktligt vattenkemiska processer och den endimensionella flödesmodellen.



Figur 5. Konceptuell modell som beskriver observerade vattenkemiska förändringar och angreppssätt för modellering.

Figure 5. Conceptual model of the hydrochemical processes and hydrological changes during groundwater extraction from a borehole drilled in the bedrock at Lake Gårdsjön. The arrows represent flow paths used as calculation steps in the hydrochemical modelling.

5 DISKUSSIONER OCH RESULTAT

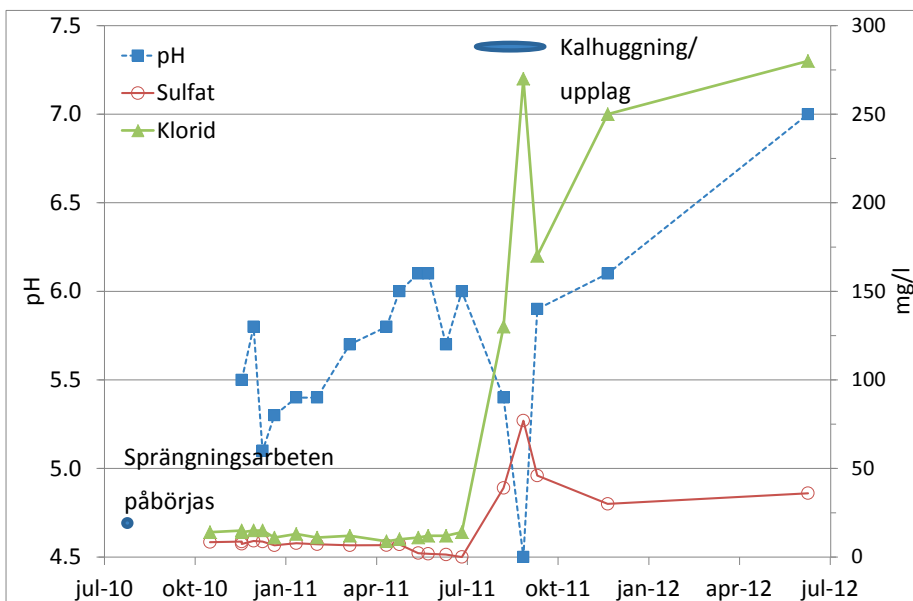
Ett urval av observerade vattenkemiska förändringar vid de två studieobjekten presenteras i detta kapitel. För en mer utförlig beskrivning hänvisas till de två bifogade artikelmanuskripten (se bilagor 2 och 3).

5.1 Kattleberg

De vattenkemiska förhållandena vid Kattleberg påverkades under genomförandeskedet av järnvägstunneln. De viktigaste observationerna som var direkt kopplade till tunneldrivingen gjordes i tunnelns närhet, medan mätningar i ytliga system främst påverkades av entreprenadarbeten som utfördes i markytan.

Figur 6 visar alkalinitet, pH och sulfatkoncentrationer i avrinningsvatten från våtmarken. Den tydligaste påverkan skedde i samband med kalhuggning och fyllning av sprängmassor inom studieområdet under sommaren 2011. Förändringarna i ytliga system med en tillfällig pH-sänkning och en 10-faldig höjning av kloridkoncentrationer belyser dels omgivningspåverkan från skogsbruk, men dessa förändringar kan också användas för att bedöma hydraulisk kontakt mellan ytliga system och berggrundsvatten.

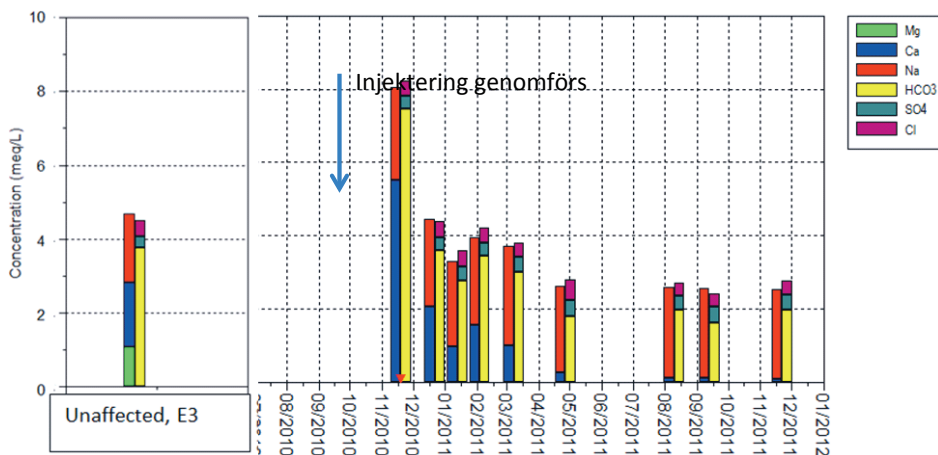
I Figur 7 visas jonbalans för bergborrhålet 3/896 vars vattenkemiska sammansättning bedöms som tydligt påverkad av hydrationsprocesser i vattentätande injektering. Enligt Dellming (personlig kommunikation) frigjordes kalcium under den initiala hydratationen. Senare under processen kom kalcium, kalium och magnesium att förbrukas. Under mätperioden sjönk pH från ca 11.5 till 10.0, medan natriumkoncentrationerna var stabilt höga i förhållande till klorid. En studie av förhållanden i närheten av genomförd injekteringsskärm som presenterades av Soler m.fl. (2011) visar hur natrium frigörs och kalcium binds under hydrationsprocessen samtidigt som pH gradvis sjunker. I Kattleberg råder lokalt höga halter natrium i förhållande till klorid. Detta kan vara orsakat till följd av att grundvatten av marint ursprung ersätts med grundvatten av meteoriskt ursprung.



Figur 6. Alkalinitet, pH och sulfatkoncentrationer i avrinningsvatten från våtmarken i studieområdet Kattleberg.

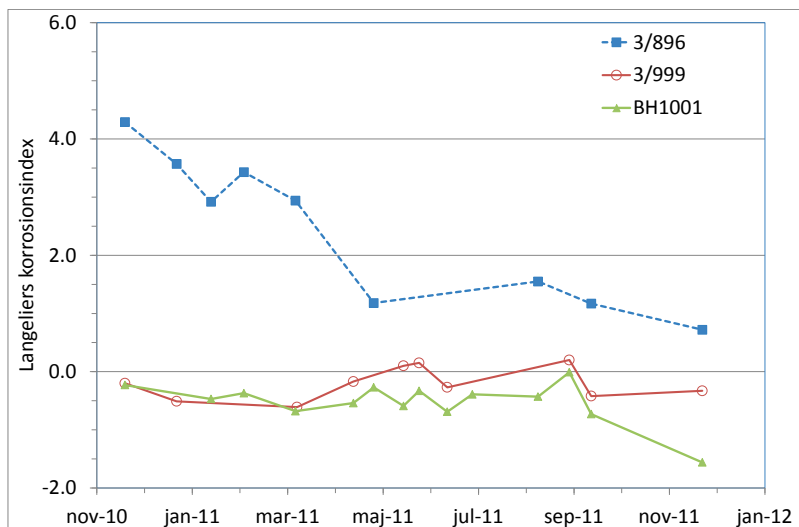
Figure 6. Alkalinity, pH and sulphate concentrations in the runoff water in the stream dewatering the wetland in the study area on Kattleberg Hill.

Figur 8 visar beräknat korrosionsindex för berggrundvatten. Två av provpunkterna är borrade från tunnelväggen och ett är borrar från markytan (BH1001). Resultaten visar på hur geologisk heterogenitet skapar platsberoende viktiga skillnader. De två provpunkterna 3/896 och 3/999, som båda borrar från tunnelväggen, skiljer sig tydligt åt. I borrhål 3/999 är Langeliers index runt eller strax under noll, medan grundvattnet i 3/896 indikeras ha en mindre aggressiv sammansättning. Sammansättningen i borrhål 3/999 har en vattenkemisk sammansättning som liknar den i borrhålet som borrar från marknivå, medan borrhål 3/896 är tydligt påverkat av injekteringsmedel.



Figur 7. Jonbalans för grundvatten i borrhål 3/896. Initieellt höga i kalciumkoncentrationer som sedan minskar påtagligt, men med en relativt hög alkalinitet är beroende av hydrationsprocesser i injekteringsbruket.

Figure 7. Major ions in the groundwater in borehole 3/896 (drilled from within the tunnel). During the post-grouting period, high calcium concentrations were found that declined gradually. However, the alkalinity remained high during the monitoring period.



Figur 8. Langliers korrosionsindex för berggrundvatten.

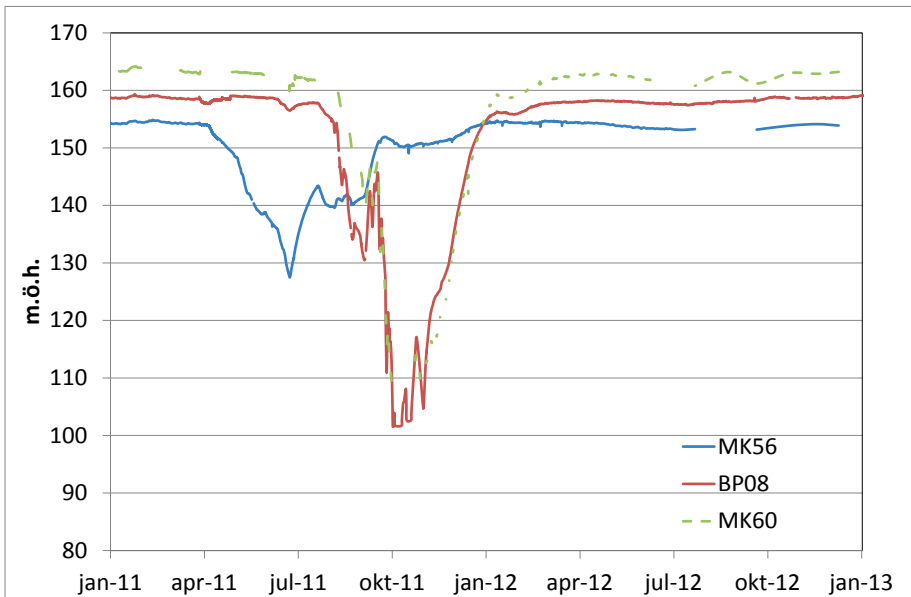
Figure 8. Langelier Saturation Index calculated for the three groundwater sampling locations in the bedrock.

Även för de redoxkänsliga ämnena järn och mangan skiljde sig resultaten åt mellan de två borrhålen i tunneln. Generellt förekom löst järn och mangan i borrhål 3/999 medan koncentrationen var under detekteringsgränsen i borrhål 3/896. Troligen beror det på att cementinjekteringen orsakat en alkalisk miljö i 3/896 där järn och mangan bildade fällningar i berget i tunnelns närhet. I detta fall kan ett tätande lerlager i våtmarken genom att motverka en oxidation ha förhindrat att järn och mangan fällt ut i berget och istället kunnat flöda in i tunneln som vid 3/999. Dessa två parametrar är av betydelse då utfällningar som uppstår i dräneringssystem orsakar igensättning med stora underhållskostnader som följd.

5.2 Hallandsås

I studieområdet på Hallandsås påverkades både ytliga system och berggrundvatten av drivningen av den västra huvudtunneln. Eftersom området är beläget över högsta kustlinjen efter den senaste glaciationen avsaknas vattenavsatta finsediment som begränsar hydraulisk kontakt mellan berggrundvatten och ytliga system. I områden som påverkats av tunneldrivningen genom avsänkning av berggrundvattennivåer har detta inneburit att ytvattensystemen direkt påverkats. Detta har exempelvis utgjorts av att basflöde i bäckar har försvunnit och att våtmarker fått minskat tillflöde av utströmmande grundvatten. Ytliga vatten i områden som under opåverkade förhållanden utgör utströmningsområden har också fått ändrad flödesriktning och kunnat bilda berggrundvatten och flöda mot tunneln.

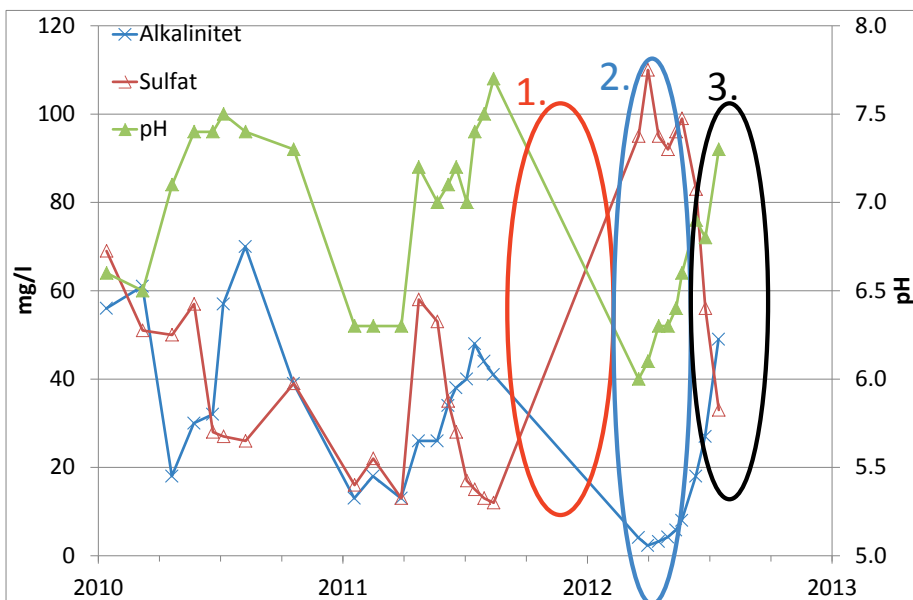
Figur 9 visar grundvattennivåer i de tre övervakade borrhålen inom studieområdet. MK56, som är belägen i den sydliga akviferen påverkades först när tunneln närmade sig söderifrån. När tunneln passerat diabasgången som genomkorsar området (se Figur 4) skedde en återhämtning av nivåer i MK56 medan nivåerna i borrhålen belägna i den nordliga akviferen (BP08 och MK60) sjönk.



Figur 9. Berggrundvattennivåer, det sydliga borrhålet MK56 påverkas före de mer nordliga borrhålen BP08 och MK60.

Figure 9. Groundwater levels in the bedrock. The southernmost borehole was affected by an earlier lowering of the groundwater level compared to the more northerly boreholes, BP08 and MK60.

Figur 10 visar hur pH, alkalinitet och sulfatkoncentrationer varierar i en provtagningspunkt för ytvatten i studieområdet. Under hösten 2011, orsakade tunneldrivningen genom området att vattendraget torrlades, se händelse 1 i Figur 10. Återhämtning skedde under våren 2012, men sulfatpuls och påföljande alkalinitet- och pH-minskning. Under sommar 2012 återhämtades även de vattenkemiska parametrarna.



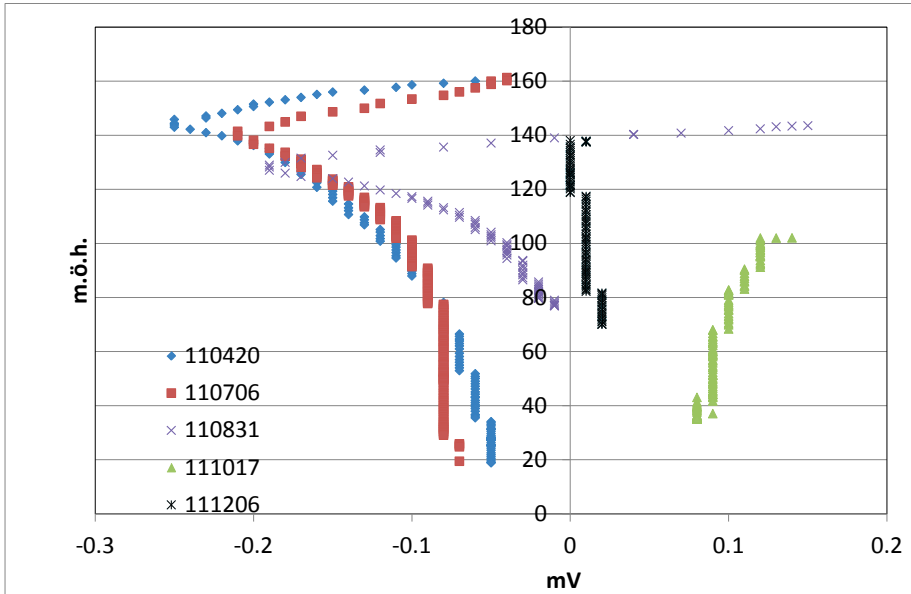
Figur 10. Alkalinitet, pH och sulfatkoncentrationer vid ytvattenprovtagningspunkten P03. Bäckens blev torr och provtagning var ej genomförbar (1). Återhämtning av flöden våren 2012, sulfatpuls, pH-sänkning och minskad alkalinitet (2). Vattenkemisk återhämtning sommaren 2012 (3).

Figure 10. Alkalinity, pH and sulphate concentrations at the P03 surface water sampling location. The stream became dry and sampling was not possible during the autumn and winter of 2011/2012 (1). Recovery of stream flows during spring 2012, sulphate surge, lowering of pH and decreasing alkalinity (2). Hydrochemical recovery during summer 2012 (3).

Förändrade redoxförhållanden påverkar flera vattenkemiska parametrar och kan ge upphov till sulfidoxidation som i sin tur orsakar sulfatpulser och pH-sänkningar med minskning av alkalinitet som följd. Vidare är redoxförhållanden viktiga för lösligheten av järn och mangan, dessa parametrar är den vanligaste orsaken till problem med igensättning av dräneringssystem i tunnlar. Figur 11 visar resultat av borrhålsloggningar i MK60. Före det att tunnelfronten påverkade området rådde reducerande förhållanden (mätningarna 110420 och 110706). Under hösten 2012 påverkade tunnelfronten den norra akviferen i studieområdet, där MK60 är borrarad, och en mer oxiderad grundvattenkemisk miljö orsakades.

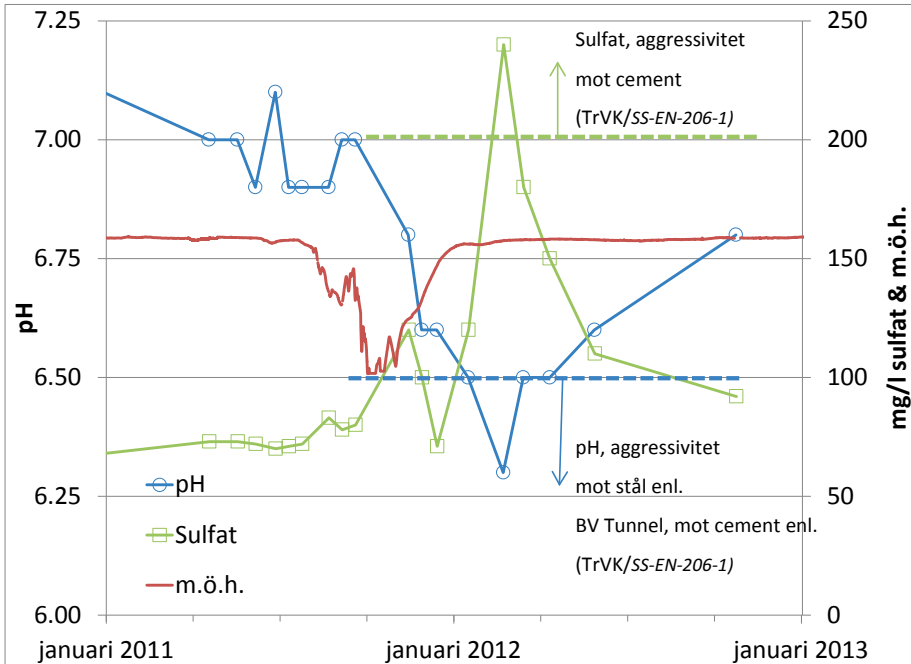
Figur 12 exemplifierar vattenkemiska förändringar i bergborrhål BP08. Påverkan från tunneldrivning orsakade bl.a. att pyrit (svavelkis) oxiderade, vilket resulterade i förhöjda sulfatkoncentrationer och lägre pH. Påverkan är som mest påtaglig i samband

med att grundvattennivåerna stiger efter att tunnelfronten passerat området. Förändringarna innebär att vattnet blev mer aggressivt mot både cement- och stålbaseade konstruktionsmaterial.



Figur 11. Redoxpotential på olika djup i bergborrhålet MK60 enligt loggningar som genomförts vid olika tillfällen.

Figure 11. Redox potential (mV) for depth profiles (levels are presented as m a.s.l. (m.ö.h.)) in the MK60 borehole based on loggings conducted on five occasions during 2011.



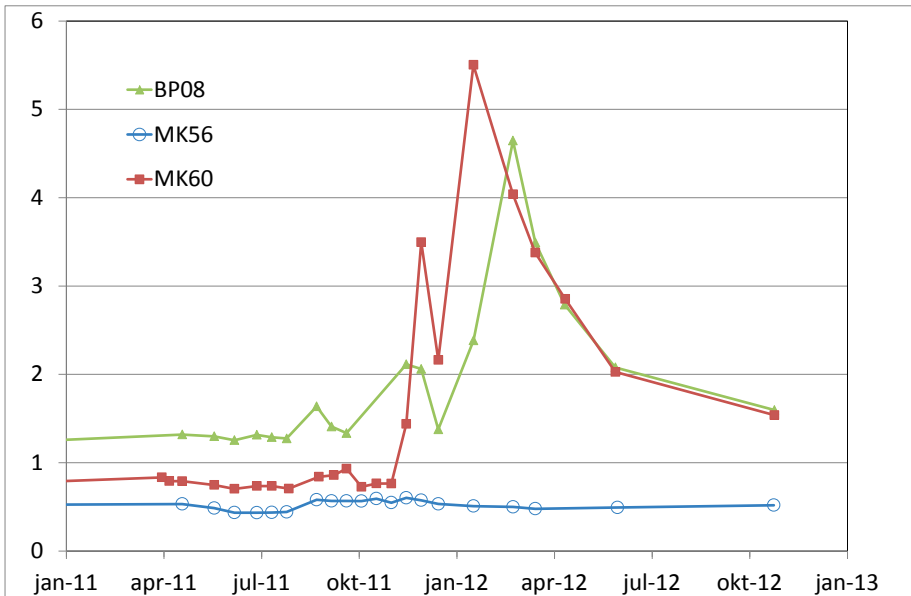
Figur 12. Grundvattennivåer, pH och sulfatkoncentrationer i bergborrhål BP08.

Figure 12. Groundwater levels, pH and sulphate concentrations in the BP08 bedrock borehole. The results for pH and sulphate are compared to standards for steel and cementitious construction materials.

Den ökade grundvattenbildningen och flödet mot den läckande tunneln bidrar till att omsättnings- och uppehållstider för grundvatten minskar. En viktig förändring är som nämnts att grundvattnet blir mer syresatt. Vid opåverkade förhållanden förekommer ofta långa omsättningstider för berggrundvatten, ibland 1000-tals år. Detta innebär att processer som är långsamma kan ha större betydelse vid opåverkade tillstånd, men bli irrelevanta till följd av påverkan av en undermarksanläggning. I svensk kristallin berggrund är ofta silikatvittring av betydelse för att ge grundvattnet ett relativt högt pH och buffringskapacitet mot försurning, alkalinitet. Genom att skapa korta uppehållstider får denna process en mindre viktig betydelse. Detta är troligtvis en bidragande orsak till de tydliga pH-sänkningar som observerats vid Hallandsås.

Korrosionsindex beräknades för berggrundvattnet för att bedöma aggressivitet mot stålbase material. Figur 13 visar tidsserier för beräknat Larson-Skold Index och belyser platspecifika skillnader. Detta index beräknar en kvot mellan sulfat- och kloridkoncentrationer respektive alkalinitet. Enligt Larson-Skold bedöms vatten

vars beräknade index är <0.8 som ej aggressivt, medan vatten med index >1.2 bedöms som aggressivt. I borrhål MK56, som omges av relativt homogen gnejs skedde små förändringar under tunneldrivingen och grundvattnet kunde utifrån index bedömas som ej aggressivt (<0.8). De två borrhålen i den norra akviferen, BP08 och MK60 uppvisade större variation. Index i MK60 stiger från <1 till 5.5 och övergår således från att bedömas som ej aggressivt till att bedömas som aggressivt. För dessa borrhål förekommer pyrit som sprickmineral och i BP08 finns troligtvis hydraulisk kontakt med närliggande våtmarker.



Figur 13. Korrosionsindex Larson-Skold för grundvatten i de tre övervakade bergborrhålen. Vattnet i BP08 och MK60 blev mer aggressivt, en återhämtning med minskad aggressivitet pågår sedan våren 2012.

Figure 13. Larson-Skold corrosion index calculated for groundwater in the three monitored boreholes in the bedrock. The groundwater in the boreholes BP08 and MK60 became more aggressive and a gradual recovery has been observed since spring 2012.

5.3 Vattenkemisk modellering

Modelleringens tre delar visar på blandningsförhållanden, vattenkemiska processer och vilka tillgängliga mineral som är av betydelse för de vattenkemiska förhållandena under grundvattenuttaget. Av mineralerna är det enbart kalcit som enligt simuleringarna står i jämvikt med berggrundvattnet under opåverkade förhållanden.

Enligt Appelo och Postma (2005) sker processer i kalk-kolsyra systemet ofta snabbt medan processer som involverar silikatmineral är långsamma. Förekomsten av pyrit i berggrunden är osäker, men det bedöms vara ett vanligt förekommande mineral i våtmarken.

I blandningsmodellen blandades ytligt grundvatten som påverkats av försöket med grundvattenuttaget med opåverkat berggrundvatten i olika blandningsförhållanden. Utifrån resultat från denna modellering bedöms c.a 5-10% av berggrundvattnet under perioden ha sitt ursprung från ytligt grundvatten. Under opåverkade förhållanden utgör våtmarken ett utströmningsområde och dess grundvatten bildar därför normalt inte berggrundvatten.

Resultaten från den endimensionella flödesmodellen visar att om det i varje modelleringssteg blandas in c:a 25% opåverkat berggrundvatten till vattnet från föregående steg, återskapas den uppmätta vattenkemin under försöken med uttag. Utifrån modelleringsresultaten är grundvattnet i jämvikt med atmosfären avseende koldioxid.

Modelleringarna visar på möjligheter att kunna förutse vattenkemiska förändringar till följd av undermarksbyggande. Det är dock nödvändigt att modellera vattenkemiska förändringar även i ytliga system för att fullt ut skapa en prediktionsmodell.

6 SLUTSATSER

Undersökningarna i föreliggande projekt bekräftar resultat från tidigare studier att platsspecifika geologiska förhållanden är avgörande för hur den vattenkemiska påverkan från ett undermarksprojekt blir.

- Vattenkemiska förhållanden i närheten av en tunnel kan variera betydligt lokalt beroende på heterogenitet i geologiska förhållanden.
 - I de två undersökta borrhålen i tunnelväggen i Kattleberg noterades skiljaktiga resultat där det ena uppvisade tydlig påverkan av injektering medan det andra hade berggrundvattenkaraktär.
 - Cementbaserad injektering kan bidra till ökad vattenkemisk heterogenitet.
- Finsediment under våtmarken i studieområdet på Kattleberg bidrog till att begränsa kommunikation mellan ytliga system och berggrundvatten.
 - Vattenkemiska förändringar motverkades, vilket också bidrog till att löst järn och mangan förekom i tunnelns närhet.
 - Resultat skiljer sig åt från tidigare studier på Äspö, belägen under högsta kustlinjen, där det finns kommunikation mellan ytliga system och berggrundvatten.
- Oxidation av mineralet pyrit (järnsulfid, både som sprickmineral och i våtmark) hade en avgörande påverkan då vattenkemiska förhållanden i ett par av borrhålen på Hallandsås. Vattnet blev mer aggressivt mot både cement- och stålbase material i två av borrhålen.
 - I ett av borrhålen på Hallandsås där mer homogena förhållanden råder erhöles enbart påverkan för löslighet av järn och mangan.
 - Eftersom studieområdet på Hallandsås är beläget över högsta kustlinjen förekommer ej finsediment i lågområden och direkt hydraulisk kontakt uppstår mellan spricksystem och våtmarker/ytvatten. Detta innebär större sårbarhet än i områden under högsta kustlinjen.
- Uppehållstiderna för grundvatten minskade. Detta har betydelse för underopåverkade förhållanden betydande men långsamma vattenkemiska processer. Silikatvittring är i kristallin berggrund ofta den viktigaste processen för att skapa ett välbuffrat vatten med relativt högt pH. Denna process får minskad betydelse vid korta uppehållstider, vilket bidrar till att berggrundvattnets buffrande egenskaper (mot försurning) försämras.
- Vattenkemisk modellering av data från Gårdsjön visar på möjligheten att förutse förändringar till följd av undermarksbyggande och grundvattenuttag. Resultaten belyser behovet av god förståelse av geologiska förhållanden som indata till modellen för att kunna ansätta jämviktsekvationer m.m..

Referenser

Annertz, K. , 2010. Projekt Hallandsås, Geologi. Underlagsrapport för ny tillståndsansökan.

Björkman, F, 2010. Projekt Hallandsås. Påverkan på grundvattennivåer 2006-2009. Underlagsrapport för ny tillståndsansökan.

Knape S., 2001. Natural Hydrochemical Variations in Small Catchments with Thin Soil Layers and Crystalline Bedrock: A Two-year study of Catchments on the East and West Coasts of Sweden. CTH Geologi Publ. A 98, Thesis for the Degree of Licentiate of Engineering. Göteborg.

Mossmark, F, Norin, M, Dahlström, L-O, Ericsson, L O, 2008a. Vattenkemins påverkan på undermarksanläggningar. SveBeFo report K29. Stockholm.

Mossmark, F, Hultberg, H, Ericsson, L O, 2008b. Recovery from an intensive groundwater extraction in a small catchment with crystalline bedrock and thin soil cover in Sweden. The Science of the Total Environment (vol. 404:1-3 (2008) 253-261).

Mossmark, F, 2010. Groundwater chemistry affected by underground constructions. Publ. Lic 2010:2. Chalmers tekniska högskola.

Mossmark, F, 2010. Underlagsrapport för ny tillståndsansökan. Påverkan på grund- och ytvattenkemiska förhållanden 2006-2009. Trafikverket Hallandsås.

Olofsson, B., Ericsson, L.O., (1985c): Miljöförändringar vid värmeutvinning ur berg och grundvatten. BFR Rapport R149.

Ringberg, B., 2000. Beskrivning till jordartskartan 4C Halmstad SV. Swedish geological survey, series Ae no 121.

Soler, M J, Vuorio, M, Hautojärvi, A, 2011. Reactive transport modeling of the interaction between water and a cementitious grout in a fractured rock. Applied geochemistry 26, pp 1115-1129.

BILAGA 1

PUBLIKATIONSLISTA

Abbas, Z, Mossmark, F and Funehag, J, 2012. Durability studies of natural cement grouted fractures - Chemical analyses and modelling of the solubility of cement minerals from two tunnels in Gothenburg. Chalmers university of technology. In progress.

Ericsson L. O. & Hultberg H., 2003. Effekter av grundvattensänkning och vattenuttag på grundvattenbildning och vattenkvalitetsutveckling i kristallin berggrund – Syntes av resultat från fältförsök i Äspö och Gårdsjön under perioden 1997-2002. Publikation B 512 vid GEO-institutionen Chalmers.

Graffner, O., Mossmark, F., Hultberg H., 2005. Geohydrological field investigation and experiment at Lake Gårdsjön during the years 1997-2004 –Measured parameters, instrumentation and data bases, report 2005:16 Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Gothenburg, Sweden.

Hultberg H., Ericsson L. O., Hultengren S., Mossmark F., 2005. Effekter av grundvattensänkning och vattenuttag på grundvattenbildning och vattenkvalitetsutveckling i kristallin berggrund – Slutrapport av fas 1 från fältförsök i Äspö och Gårdsjön under perioden 1997-2005. Rapport 2005:17, Institutionen för bygg- och miljöteknik. Avdelningen för geologi och geoteknik, Chalmers.

Knape S., 2001. Natural Hydrochemical Variations in Small Catchments with Thin Soil Layers and Crystalline Bedrock: A Two-year study of Catchments on the East and West Coasts of Sweden. CTH Geologi Publ. A 98, Thesis for the Degree of Licentiate of Engineering. Göteborg.

Mossmark, F., Hultberg, H., Ericsson, L. O., 2007. Effects on water chemistry of groundwater extraction from chrystalline hard rock in an acid forested catchment at Gårdsjön, Sweden. Applied Geochemistry (vol. 22, 1157-1156).

Mossmark, F., Hultberg, H., Ericsson, L. O., 2008. Recovery from an intensive groundwater extraction in a small catchment with crystalline bedrock and thin soil cover in Sweden. The Science of the Total Environment (vol. 404:1-3 (2008) 253-261).

Mossmark, F., Ericsson, L.O, Dahlström, L-O., Hultberg, H., Norin, M., 2008. Aggressive groundwater chemistry caused by underground constructions. The 33rd International Geological Congress in Oslo 2008 6–14 August.

Mossmark, F, Hultberg, H, Ericsson, L O, 2008. Effekter av återhämtning av en flerårig grundvattensänkning i kristallin berggrund. Slutrapport av fas 2 från fältstudier vid Gårdsjön av grundvattenbildning och vattenkvalitetsutveckling. IVL rapport. Göteborg.

Mossmark, F, 2010. Groundwater chemistry affected by underground constructions. Publ. Lic 2010:2. Chalmers tekniska högskola.

Mossmark, F., Ericsson, L O, Norin, M, Annertz, K K, Dahlström, L-O, 2010. Groundwater and hydrochemical interaction with underground constructions – experience from Hallandsåsen. Bergmekanikk i Norden, Kongsberg.

Mossmark, F, Ericsson, L O, Norin, M, Dahlström, L-O, 2010. Field study: aggressive groundwater caused by underground constructions and water extraction 11th IAEG Congress 2010: Geologically active. Auckland.

Mossmark, F, Ericsson, L, 2011. Modeling Approach for Groundwater Chemistry Related to Underground Constructions. Modflow and More Conference. Colorado School of Mines. Golden.

Mossmark, F, Ericsson, L O, Norin, M, Dahlström, L-O., to be submitted. Hydrochemical Changes Caused by Underground Constructions –a Case Study of the Kattleberg Rail Road Tunnel.

Mossmark, F, Annertz, K K, to be submitted. Impact to Hydrochemistry from the Construction of the Western Tube of the Hallandsås Railroad Tunnel, Sweden.

Mossmark F, Norin M, Dahlström L-O, Ericsson L O, 2008. Vattenkemins påverkan på undermarksanläggningar. SveBeFo rapport K29.

Mossmark, F, 2010. Underlagsrapport för ny tillståndsansökan. Påverkan på grund- och ytvattenkemiska förhållanden 2006-2009. Trafikverket Hallandsås.

Mossmark, F, 2011. Technical note –Modeling of groundwater chemistry at Lake Gårdsjön using PHREEQC. Chalmers tekniska högskola.

BeFo



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

info@befoonline.org • www.befoonline.org
Besöksadress: Storgatan 19

ISSN 1104-1773