

# Potentiella miljörisker med geoenergisystems temperaturpåverkan i mark och grundvatten

---

**JULIA NILSSON 2020**  
**MVEC02 EXAMENSARBETE FÖR KANDIDATEXAMEN 15 HP**  
**MILJÖVETENSKAP | LUNDS UNIVERSITET**



# Potentiella miljörisker med geoenergisystems temperaturpåverkan i mark och grundvatten

Julia Nilsson

2020



**LUNDS**  
UNIVERSITET

Julia Nilsson

MVEC02 Examensarbete för kandidatexamen 15 hp, Lunds universitet

Intern handledare: Karl Ljung, Geologiska institutionen, Lunds universitet

Extern handledare: Johan Barth, Svenskt Geoenergicentrum

CEC - Centrum för miljö- och klimatforskning

Lunds universitet

Lund 2020

# Abstract

The aim of this literature study was to answer whether the thermal impact of geothermal energy systems pose a potential environmental risk to groundwater quality and microorganisms in the sub surface and to above ground vegetation. This study shows that the thermal impact of high temperature systems operating with temperatures  $\geq 25^{\circ}\text{C}$  in groundwater could lead to adverse effects on groundwater chemistry and biodiversity, such as mobilization of arsenic and DOC. Elevated levels of DOC combined with a rise in temperature could lead to changes in microbial activity and a shift to anaerobic redox processes. Severe elevations of temperature in ground water might lead to reduced biodiversity and establishment of termophilic communities. However, many of the identified risks depend on site-specific factors, such as mineralogical composition of the aquifer, available amount of dissolved organic carbon and microbial communities. There is not enough data to state that the same effects occur with energy systems in bedrock. Small temperature differences can affect groundwater living organisms' activity and biodiversity, though the effects vary with access to organic matter. Therefore, this should mainly concern horizontal systems, or ATEs in the case the aquifer is polluted with organic matter. Vertical systems' thermal exchange occurs below the ground water pressure surface. While microorganisms should occur at those depths, there are no studies confirming whether they are affected. Horizontal systems have been seen to lower the soil temperature resulting in reduced occurrence of earthworm and later flowering of vegetation. High temperature storage systems may elevate ground temperature levels. While no research has been made on such a site, persistent elevated temperatures in soil may affect the presence of soil living organisms and possibly lead to changed plant flowering pattern. Though, the response of both flora and fauna seem to be species and site dependent. The results of the literature review were compared to observed changes in temperature and groundwater chemistry at a HT-BTES site in southern Sweden. Changes in groundwater chemistry, such as elevated levels of iron, was in line with what could have been expected based on the literature review. To date no complete survey of the biological impact of the temperature changes have been done at the site and there are no reported visible effects on the vegetation at the site.

*Keywords:* Geoenergi; grundvattenkemi; mikroorganism; flora; fauna



# Innehållsförteckning

## **Abstract 3**

## **Innehållsförteckning 5**

## **Inledning 7**

*Geoenergisystems uppbyggnad 8*

*Syfte och frågeställningar 10*

## **Metod 11**

*Avgränsningar 11*

*Litteratursökning 11*

*Fallstudie: Emmaboda högtemperaturlager 13*

*Etisk reflektion 13*

## **Resultat 15**

*Grundvattenmiljö 15*

*Kinetik 16*

*Mineralers löslighet 16*

*pH och vittring 17*

*Sorption-desorption 18*

*Organiskt material 18*

*Redoxförhållande och syrehalt 19*

*Mikroorganismer 20*

*Grundvattenfauna 22*

*Sammanfattning påverkan på grundvattenmiljö 23*

*Ytlig markmiljö 26*

*Makro- och mikroorganismer 26*

*Flora 28*

*Sammanfattning påverkan på ytlig markmiljö 29*

*Fallstudie: Emmaboda högtemperaturlager 32*

**Diskussion 35**

*Grundvattenkemi 35*

*Makro- och mikroorganismer i mark och grundvatten 36*

*Flora och fauna 38*

*Fallstudie: Emmaboda högtemperaturlager 39*

*Vidare forskning 40*

**Slutsatser 41**

**Tack 43**

**Referenser 45**

# Inledning

I denna studie undersöks om de temperaturförändringar som kan uppstå i mark och grundvatten vid användning av geoenergisystem utgör en potentiell miljörisk. Arbetet utfördes som en litteraturstudie, och fokus lades på potentiella effekter som kan uppstå på grundvattenkvalitet, makro- och mikroorganismer i grundvatten och flora och fauna i markytan.

Utvecklingen av geoenergi accelererade i Sverige under oljekrisen på 70- och 80-talet (Gehlin och Andersson, 2019). Inför vår tids klimatförändringar fortsätter geoenergi att vara ett intressant alternativ för att undvika utsläpp av växthusgaser (Jesušek et al., 2013). Användningen av geoenergi kan ersätta direktverkande el, fossila bränslen, fjärrvärme och fjärrkyla för bostäder (Erlström et al., 2016). Genom energilagring möjliggörs dessutom hushållning med energi (Jesušek et al., 2013). Förutsättningarna för geoenergi finns överallt i Sverige, vilket innebär att geoenergianvändningen inte är geografiskt begränsad (Erlström et al., 2016). Geoenergi klassas som en förnybar energikälla (EU 2018/2001) och Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) anser att användningen av den kan vara en viktig del i att nå EU:s klimatmål om att utsläppen av växthusgaser ska halveras från 1990 till 2050. Utbyggnaden av geoenergianläggningar måste dock ske på ett hållbart sätt (Erlström et al., 2016).

Markens temperatur varierar naturligt i ett ostört system, både dagligen och under året, på grund av solinstrålningen. Säsongsvariationerna i temperaturen kan ses ner till 15–20 meters djup. Markens årsmedeltemperatur på 100 meters djup ligger normalt mellan 3–10°C. Marktemperaturen påverkas också av värmeläckage från byggnader, grundvattnets rörelser och klimatförändringar. Efter ett tiotal meter tar den geotermiska gradienten vid och temperaturen ökar med 15–30°C/km (Erlström et al., 2016).

Användningen av geoenergianläggningar kan leda till att lokala temperaturförändringar uppstår i mark och grundvatten (Erlström et al., 2016; Griebler et al., 2016). Sådana temperaturförändringar riskerar att påverka miljön negativt, då effekter i både mark och grundvatten kan uppstå (Griebler et al., 2016; Hähnlein et al., 2013). I grundvatten kan temperaturhöjningar påverka biologiska och geokemiska processer, som mikrobiell aktivitet, gasers och metallers löslighet, nedbrytning av föroreningar och utlakning av mineral (Casasso & Sethi, 2019; Griebler et al., 2016). Litteraturen verkar överens om att endast mindre effekter uppstår i grundvattenmiljöer vid låga temperaturförändringar ( $\leq 10^\circ\text{C}$ ), dock



indikeras att en potentiell påverkan på grundvattenmiljöer kan uppstå vid högre temperaturförändringar ( $\geq 30^{\circ}\text{C}$ ) (Possemiersa et al., 2014; Griebler et al., 2016). Temperaturförändringar kan även påverka marklevande makro- och mikroorganismers aktivitet (Marandón-Jiménez et al., 2018; Troedsson et al., 1982), samt orsaka förändringar i markfloras tillväxt- och blomningsmönster (Mohan et al., 2019; Walientinus, 1984).

Effekter på grundvattenkvalitet och biodiversitet relaterar till miljömålen *Grundvatten av god kvalitet* samt *Ett rikt växt- och djurliv*. Inför den fortsatta utbyggnaden av geoenergisystem är det därför viktigt att undersöka vilka potentiella miljöeffekter som kan uppstå i mark- och grundvattenmiljöer.

## Geoenergisystems uppbyggnad

Generellt skiljer man på slutna och öppna system (Gehlin, 2017). Slutna system har en energibärande vätska som cirkulerar i ett slutet system med rör. Vätskan transporterar värmen från marken till värmesystemet i byggnaden, som ofta har en värmepump. Öppna system använder istället direkt grundvattnet som energibärare (Hähnlein et al. 2013). De flesta svenska anläggningarna arbetar i låga temperaturer ( $< 20^{\circ}\text{C}$ ) (Gehlin & Andersson, 2019) men anläggningar kan även vara högtempererade ( $> 20^{\circ}\text{C}$ ). Att dem är högtempererade innebär att energin som lagras i marken uppnår mycket högre temperaturer än vad marken hade haft om den varit ostörd (Gehlin, 2017).

Till slutna lågt tempererade system hör exempelvis yjordvärme, som utgörs av horisontella slingor som lagts på frostfritt djup i jorden, och bergvärme, som utgörs av vertikala borrhål (Gehlin, 2017). Temperaturpåverkan i jordytan från ett ensamt borrhål är försumbart i jämförelse mot naturliga dags- och säsongsvariationer (Claesson och Eskilson, 1987). Ett exempel på en högtempererad anläggning är borrhålslager, som också utgörs av vertikala borrhål. Ofta kan borrhålen vara 100–300 meter djupa. Marken som omger borrhålslager kyls ner och värms upp under vintern respektive sommaren (Gehlin, 2017). Akviferlager är exempel på öppna system, som går ut på att grundvatten pumpas upp i en brunn och återförs till en annan del av akviferen efter värmeväxling. Detta skapar en varm och en kall del av akviferen, som normalt är  $12\text{--}15^{\circ}\text{C}$  respektive  $5\text{--}7^{\circ}\text{C}$  i ett lågt tempererat system. Något högre temperaturer kan uppnås. Exempelvis uppgår den varma sidan av Arlandas akviferlager till  $15\text{--}25^{\circ}\text{C}$ . Akviferlagers brunnar är vanligtvis 20–40 meter djupa i grusåsar, och 50–150 meter djupa i kalk- och sandstensberggrund (Gehlin, 2017). Det finns flera typer av anläggningar, för vidare beskrivning av anläggningar se Gehlin (2017). Potentiell temperaturpåverkan från ett urval av system listas i tabell 1 nedan.

**Tabell 1 Geoenergisystems temperaturpåverkan i mark och grundvatten**

Vilken temperaturpåverkan som uppstår i marken beror på vilken temperatur som systemet uppnår. Notera att en del av temperaturerna som listas för temperaturpåverkan i mark är arbetstemperaturer. Den temperaturförändring som uppstår avtar utåt från borrhålet eller slangen och efter några meter påverkas marken inte längre av systemet (Claesson och Eskilson, 1987). Notera även att angiven temperaturpåverkan från högtempererade borrhålslager är data från lagret i Emmaboda.

Typ av system (urval)	Djup (m)	Temperaturpåverkan (°C)	
		Mark	Grundvatten
Bergvärme	100–300 <sup>1</sup>	Arbetstemperatur: -3/+7 <sup>2</sup>	
Borrhålslager	100–300 <sup>1</sup>	Arbetstemperatur: -1/+10 <sup>1</sup>	
Högtempererade borrhålslager	100–300 <sup>1</sup>	Exempel från Emmaboda <sup>3</sup>  Inne i lagret: 40–45 10 meter från lagret: 25–30 I jordytan: höjning med ca +10	
Akviferlager	I grusåsar: 20–40 <sup>1</sup>		Varm sida: 12–15 <sup>1</sup>
	I vattenförande kalk- och sandsten: 50–150 <sup>1</sup>		Kall sida: 5–7 <sup>1</sup>
Jordvärme (horisontellt system)	1, ibland 5–10 <sup>4</sup>	Arbetstemperatur: -5/+5 <sup>2</sup>	

1. Gehlin, 2017, 2. Andersson et al., 2012, 3. Nordell et al., 2016, 4. Erlström et al., 2016.

Gemensamt för geoenergianläggningar är att temperaturpåverkan i mark och grundvatten sker lokalt. Den temperaturförändring som uppstår avtar utåt från borrhålet eller slangen, och efter några meter påverkas inte marken längre av systemet. Det gäller även för borrhålslager när de är i balans mellan värme- och kyluttag (Claesson och Eskilson, 1987). I borrhålslager varierar temperaturen i lagret, som kyls på vintern när värme tas ut och vice versa. Vanliga arbetstemperaturer i ett lågt tempererat borrhålslager varierar mellan -1°C och +10°C (Gehlin, 2017). Om temperaturen störs kontinuerligt under lång tid kommer radien där temperaturen påverkas bli några meter längre. Expandingen av radien inom

vilken temperaturen påverkas sker huvudsakligen längre ner i borrhålet (Claesson och Eskilson, 1987).

I dagsläget finns två högtempererade borrhålslager i Sverige. Den ena anläggningen finns i Anneberg och den andra i Emmaboda, båda kommer upp i temperaturer runt 45°C (Nibe, n.d.; Jonsson et al., 2005). I Emmaboda uppnår marktemperaturen 25–30°C på 100 meters djup 10 meter från lagret (Nordell et al., 2016). Under tidsperioden 2011-07-30 till 2015-07-09 har lagret gett upphov till en ungefärlig temperaturhöjning i jordlagret över anläggningen med +10°C (Nordell et al., 2016, figur 29). Ett nytt lager planeras i Linköping med förhoppningar om att temperaturer över 60°C ska kunna plockas ut (Kretz, 2018).

## Syfte och frågeställningar

Syftet med detta arbete är undersöka hur kemiska och biologiska faktorer i mark- och grundvatten potentiellt kan påverkas av temperaturförändringar orsakade av geoenergisystem. Detta görs genom att svara på följande frågeställningar:

- Orsakar geoenergisystem temperaturförändringar som påverkar grundvattenkemin?
- Orsakar geoenergisystem temperaturförändringar som påverkar makro- och mikroorganismer i mark och grundvatten?
- Orsakar geoenergisystem temperaturförändringar som påverkar flora och fauna i markytan?

# Metod

Denna studie är uppbyggd i två delar. Den första delen är en litteraturstudie och den andra är en fallstudie över en högtemperaturanläggning i Emmaboda. Baserat på sammanställningen av forskningen ska en bedömning av potentiella risker med temperaturförändringar utföras.

## Avgränsningar

Eftersom studien avser undersöka påverkan på mark och grundvatten läggs fokus för studien på temperaturpåverkan orsakad av grunda geoenergisystem, installationer som inte är djupare än 400 meter under markytan (Erlström et al., 2016). Påverkan från anläggningar som är djupare eller påverkan på ytvatten togs inte med i denna studie.

Studien avser undersöka påverkan vid temperaturer inom intervallet 1–60°C. Valet av temperaturintervall baseras på de anläggningar som redan finns och planeras i Sverige; från vanligt förekommande lågtemperaturanläggningar till det planerade högtemperaturlagret där man hoppas kunna plocka ut temperaturer över 60°C.

## Litteratursökning

En första litteratursökning skedde i databasen Web of Science: core collection och Web of Science: all databases. Sökningen skedde på engelska eftersom det då kom fram flest relevanta träffar. Här inkluderades sökordet *geothermal energy* vid varje sökning, som kombinerades med något av sökorden *ground water*, *ecology*, *microbe*, *effect*, *environment*, *chemistry* och *vegetation*. Sökorden valdes eftersom de är relevanta för studiens frågeställningar. Det första urvalet av rapporter baserades på rapporternas titlar och abstract. Vissa sökningar gav för många träffar för att det skulle vara möjligt att gå igenom alla rapporter. Då sorterades träffarna på ”bäst matchning” och de första 50 träffarna utvärderades. Under det andra

urvalet lästes samtliga rapporter från det första urvalet i sin helhet, varefter de mest relevanta valdes.

En andra litteratursökning skedde i databasen LUBsearch. Sökningsschemat för detta kan ses nedan, se tabell 2. Sökorden som användes var *geothermal energy*, *environment*, *environmental impact*, *temperature*, *ground source heat pump*, *soil temperature*, *soil warming*, *fauna* och *ecosystem*. Dessa kombinerades med varandra på olika sätt för att få en så relevant sökning som möjligt. Det första urvalet av rapporter baserades på rapporternas titlar och abstract. Ifall för många träffar fanns sorterades träffarna på ”bäst matchning” och de första 100 träffarna utvärderades. Under det andra urvalet lästes samtliga rapporter från det första urvalet i sin helhet, varefter de mest relevanta valdes.

**Tabell 2**

Sökschema för den andra litteratursökningen.

LUBsearch	Sökord	Avgränsningar	Antal träffar	Urval 1	Urval 2
#1 2020-04-21	Geothermal energy AND environment AND temperature	Accessible at Lund University, Peer Reviewed	1450	2	0
#2 2020-04-21	Geothermal energy AND environmental impact AND temperature	Accessible at Lund University, Peer Reviewed	364	7	4
#3 2020-04-21	Ground source heat pump AND environmental impact AND temperature	Accessible at Lund University, Peer Reviewed	89	7	3
#4 2020-05-16	Soil temperature AND fauna AND ecosystem	Accessible at Lund University	622	1	1
#5 2020-06-14	Soil warming AND fauna	Accessible at Lund University	418	1	1

Utöver litteratursökningarna tillämpades *snöbollsmetoden* (Högskolan i Borås, 2020), som bidrog till att ytterligare forskning tillkom datainsamlingen.

Vetenskapliga artiklar och rapporter samlades även in genom kontakt med branschpersonal.

Litteraturstudien inkluderade forskning om potentiell påverkan både från lägre och högre temperaturförändringar. Även forskning från andra geografiska områden än Sverige har inkluderats. Insamlad information om temperaturförändringars potentiella påverkan på grundvattenkvalitet, makro- och mikroorganismer i mark och grundvatten samt flora och fauna sammanställdes och sammanfattades i flödesscheman, se figur 2, 3, och 4.

## Fallstudie: Emmaboda högttemperaturlager

Under litteraturstudien inhämtades mycket forskning som bedrivits i laboratoriemiljö eller andra geologiska områden än Sverige. En översiktlig fallstudie över miljöpåverkan som kan ses i samband med högttemperaturlagret i Emmaboda gjordes för att kunna jämföra resultatet av litteraturstudien mot ett verkligt fall i svensk geologisk miljö. Information om anläggningen inhämtades via telefon- och mailkontakt med Professor Olof Andersson, Geostrata, konsult för projektet. Data om temperaturpåverkan från anläggningen inhämtades från andra rapporter.

## Etisk reflektion

Denna studie har utförts i samarbete med Svenskt Geoenergicentrum med avsikt att fungera som en översikt av den forskning som finns. Arbetet har utförts fristående och den vetenskapliga metoden litteraturstudie har använts för att få ett resultat och svara på frågeställningarna.

En del litteratur har delats med mig genom kontakter med branschpersonal. Jag anser att denna litteratur tillsammans med den från min egen litteratursökning utgör ett väl avvägt underlag till min studie.

De informanter som delat litteratur inför projektet namnges inte i denna studie, förutom den informant som det refereras till under fallstudien. Denna informant tillfrågades om det var okej att publicera namnet.

Det förväntade resultatet av denna studie är att en viss påverkan på omgivningen kan uppstå vid temperaturförändringar som orsakas av geoenergianläggningar. Om så är fallet är det viktigt att detta kommuniceras vidare. Om en potentiell påverkan kan ses är min förhoppning att studien skulle kunna ligga till grund för planering av framtida försiktighetsåtgärder för att förhindra att geoenergianläggningar påverkar miljön samt den livsmedelresurs som grundvatten utgör.



# Resultat

För att svara på studiens frågeställningar presenteras nedan först resultatet av en litteraturstudie, i vilken potentiell påverkan på några av grundvattnets och markytans biotiska och abiotiska komponenter har undersökts. Därefter presenteras data och information från det högt tempererade borrhålslagret i Emmaboda, med mål att kunna jämföra effekter dokumenterade i litteraturen mot de effekter som har uppstått i svensk geologisk miljö.

## Grundvattenmiljö

Grundvattnets miljö spelar stor roll för dess kemiska egenskaper. Den kemiska sammansättningen beror på många olika faktorer, som nederbördens kemi, kontakttid med organiska och oorganiska material i marken och den geokemiska sammansättningen av de olika geologiska lager som finns på platsen (SGU, 2013).

I stora delar av Sverige utgörs berggrunden av kristallint berg. Den svenska kristallina berggrunden består till störst del av gnejser och graniter. I berggrunden finns sprickor, i vilka grundvattnet befinner sig. Grundvattnets tryckyta är antingen direkt i berget eller i ovanliggande jordlager, och grundvattenbildningen sker antingen via ovanliggande jordlager eller via bergets sprickor. Grundvattenomsättningen är vanligtvis långsam när den är opåverkad. Grundvattnet har ofta relativt hög alkalinitet och låg järnhalt. På större djup finns reducerande förhållanden, vilket kan leda till att vattnet får en högre järnhalt (SGU, 2013).

På några ställen i Sverige finns sedimentär berggrund, som på vissa ställen har goda hydrauliska egenskaper (Gehlin och Andersson, 2019). Svenska sedimentära bergarter är oftast sandstenar, kalkstenar och skifferar. Grundvattenmagasinen utgörs oftast av sandsten eller kalksten, och grundvattnet finns i bergarternas porer, sprickor och skiktfogar. Den sedimentära berggrunden ger en tydlig prägling på grundvattnets kvalitet. Exempelvis kan en hög kalkhalt i berggrunden leda till ett grundvatten med hög halt baskatjoner, som kalcium och magnesium. En hög svavelhalt i berggrunden kan leda till att grundvattnet får en hög sulfathalt, samt en reducerande miljö till att grundvattnet får höga halter järn och mangan (SGU, 2013).



Många stora grundvattenmagasin i Sverige utgörs av isälvsavlagringar. Dessa är oftast öppna akviferer av sand och grus. Vattnets uppehållstid kan vara lång även om akviferen har bra vattenledningsförmåga. Innehållet av kalcium- och magnesium beror på materialets ursprungsbergart, och järnhalter beror på om miljön där vattnet infiltrerade var reducerande eller oxiderande (SGU, 2013). Grundvatten från isälvsavlagringar kan tas till dricksvatten, men de är även intressanta för uttag av värme eller kyla eller lagring av energi (Gehlin och Andersson, 2019).

Grundvattnets kemiska egenskaper kan även variera med temperaturen (Griebler et al., 2016; Brielmann et al., 2011; Jesušek et al., 2013). Under denna litteraturstudie har jag försökt identifiera de grundvattenparametrar som, enligt litteraturen, påverkas mest av temperaturförändringar. De identifierade parametrarna är kinetik, mineralers löslighet, pH, sorption-desorption, oxidering av löst organiskt kol (DOC), redoxförhållande och grundvattenlevande makro- och mikroorganismer.

## **Kinetik**

När grundvatten värms eller kyls kan de kemiska reaktionernas hastighet, kinetiken, påverkas. Många reaktioner som sker i grundvattnet bestäms av kinetik, snarare än jämvikter. Exempel på sådana reaktioner är vittring av silikater och redoxreaktioner (Possemiersa et al., 2014). Enligt Van 't Hoff's ekvation bör en temperaturökning med 10°C resultera i att kemiska reaktioner går 2–4 gånger snabbare (Hähnlein et al., 2013).

## **Mineralers löslighet**

I ett ostört system står grundvattnet i kemisk jämvikt med berggrunden. Ett ämne i fast fas står i jämvikt med samma ämne i löst fas (Branzén et al., 2013). Jämvikter för upplösning och utfällning varierar med temperaturen (Griebler et al., 2016). Dock kan temperaturens inverkan på mineralers jämvikt antas vara begränsad vid temperaturer <25°C (Possemiersa et al., 2014). Det har inte observerats någon större påverkan på grundvattenkemin vid temperaturförändringar  $\pm 10^\circ\text{C}$ , även under längre tidsperioder (Brielmann et al., 2009; Sowers et al., 2006). Om en medeltemperatur i berggrunden antas vara 3–10°C, bör lågtempererade geoenergisystem inte påverka grundvattenkemin märkbart. Detta gäller för de lågtempererade, vertikala system som nämns i tabell 1.

Vid högre temperaturer minskar gasers löslighet i vatten, vilket gör att koldioxid kan avgå till atmosfären. Detta kan leda till nya jämvikter, speciellt i karbonatrika system (Griebler et al., 2016). Vid högre temperaturförändring kan

även, till exempel, silikater lösas upp, vilket leder till högre koncentrationer av silikater i vattnet. Silikaterna fälls sedan ut när vattnet svalnar av (Possemiersa et al., 2014).

Utlakningsförsök med gabbro, granit och urbergsgrus vid temperaturerna 50, 70, 100, 125 och 150°C visade att skillnaderna i utlakning mellan temperaturerna under 100°C var relativt små, medan temperaturer över 100°C gav upphov till en nästan fördubblad löslighet av mineral (Claesson, 1983). Slutsatsen var att geologiska formationer kan ge ifrån sig bland annat kisel, natrium, kalium, kalcium samt en del aluminium, som kommer tillföras vattnet tills jämviktsläget uppnått för den temperatur som avses för lagret. Dock är det inte möjligt att förutsäga hur mycket mineral som kan utlakas. Därför måste materialets utlakningsegenskaper testas i varje fall (Ronge, 1983). Vid avkylning kan mineralerna fällas ut igen (Possemiersa et al., 2014).

## pH och vittring

Mineralers vittringshastighet varierar med pH, jonstyrka och mikrobiell aktivitet. Karbonater, silikater, leror och sulfidmineral är lättvittrade. Det mineralogiska innehållet av dessa avgör vilka ämnen som finns i grundvattnet (Branzén et al., 2013).

pH är ett mått för halten vätejoner, surhetsgraden, i grundvattnet och alkalinitet är ett mått för vattnets förmåga att motstå försurning (SGU, 2013). pH och alkalinitet är faktorer som har stor betydelse för ämnens löslighet och i vilken form de förekommer (SGU, 2013).

Laboratorieexperiment med sediment från olika geografiska områden visar att pH kan sjunka eller öka med temperaturen (Griebler et al., 2016; Jesušek et al., 2013; Bonte et al., 2013b). Till exempel såg Griebler et al. (2016) signifikanta sänkningar av pH vid temperaturer  $\geq 40^\circ\text{C}$  under modellering. Dock var skillnaderna i pH nästan lika stora mellan vattenproverna för de olika sedimenten (Griebler et al., 2016). Bonte et al. (2013b) såg en signifikant höjning av pH vid  $60^\circ\text{C}$ . Temperaturer  $\geq 40^\circ\text{C}$  i mark förväntas endast uppnås lokalt med högt tempererade anläggningar, se tabell 1.

En konsekvens av sänkt pH i grundvattnet kan vara vittring av berggrundens mineral, vilket producerar vätekarbonatjoner och baskatjoner. Om jord- och bergarterna inte innehåller karbonatmineral är de svårvittrade, varvid vittringen ökar mycket lite vid sänkt pH. Ett surt grundvatten kan även leda till att aluminium och tungmetaller frigörs samt att ledningar korroderar (SGU, 2013). Exempel på metaller som lätt kan frigöras vid sjunkande pH är kadmium, kobolt, mangan, nickel, tallium och zink, som generellt mobiliseras när pH är under 6 (Ladenberger et al., 2016).

## Sorption-desorption

Sorption och desorption kan variera med temperaturen (Griebler et al., 2016). En temperaturhöjning kan leda till att kontamineringar som tidigare varit immobile frisläpps, genom att löslighet ökar och sorption minskar (Bonte et al., 2011). Till exempel kan mobilisering av löst organiskt kol (DOC) bero på desorption från metalloxider (Filius et al., 2000) eller omvandling av sedimenterat organiskt material (Brons et al., 1991).

Brons et al. (1991) visade genom laboratorieexperiment att DOC kan mobiliseras vid  $\geq 45^{\circ}\text{C}$ , vilket leder till att den kemiska syreförbrukningen (COD) i grundvattnet ökar. Det kvarvarande organiska materialet, som vid opåverkade förhållande adsorberar föroreningar, kan få minskad adsorberande förmåga som resultat. Det finns därför en risk att en termisk påverkan ökar akviferens sårbarhet mot föroreningar (Bonte et al., 2013a).

Vid undersökning av en anoxisk akvifer såg Bonte et al. (2013b) att halten arsenik ökade vid en temperaturhöjning från  $11^{\circ}\text{C}$  till  $25^{\circ}\text{C}$ . Vid  $60^{\circ}\text{C}$  sågs en höjning av halter DOC, fosfor, kalium, kisel, arsenik, molybden, vanadin, bor och fluor. Medan koncentrationshöjningarna av kalium och kisel troligtvis berodde på upplösning av silikater, berodde de förhöjda halterna arsenik, bor, molybden, vanadin, fosfor och DOC troligtvis på desorption från, och eventuellt reaktiv upplösning av, järnoxider. Höjningar av halterna DOC och fosfor kan även ha berott på mineralisering av organiskt material (Bonte et al., 2013b).

Högtempererade system kan uppnå temperaturer över  $25^{\circ}\text{C}$  och  $45^{\circ}\text{C}$ , se tabell 1, och skulle kunna leda till att ämnen som arsenik och organiskt kol mobiliseras. Halter av arsenik i berggrund och jordlager är ofta låga i Sverige, men det förekommer områden med förhöjda halter. Dessa finns främst i norra Sverige (Ek et al., 2008). Arsenik som desorberats och mobiliserats i uppvärmt vatten kan resorberas igen i kallare vatten (Bonte, 2013c).

## Organiskt material

En ökning av temperaturen kan, som tidigare nämnt, leda till mobilisering av löst organiskt material (DOC) (Brons et al., 1991). Stigande halter DOC i vatten till följd av temperaturhöjning har även observerats av Bonte et al. (2013a) och Griebler et al. (2016) i laboratorieexperiment. I Bonte et al. (2013a) steg koncentrationerna relativt konstant i förhållande till temperaturhöjningen, och i Griebler et al. (2016) var ökningen signifikant vid temperaturer  $\geq 45^{\circ}\text{C}$ . I ett annat laboratorieförsök av Jesubek et al. (2013) steg koncentrationen organiskt kol i vattnet svagt redan vid temperaturer på  $25^{\circ}\text{C}$  och  $40^{\circ}\text{C}$ , och en stark ökning skedde vid temperaturer  $70^{\circ}\text{C}$ .

Akviferer förorenade med organiskt material kan ge upphov till att mycket DOC mobiliseras vid temperaturhöjningar. Detta kan utgöra en stor näringskälla för mikroorganismer och stimulera deras aktivitet (Griebler et al., 2016).

## Redoxförhållande och syrehalt

Grundvatten kan ha naturligt hög eller låg redoxpotential och syrehalt (Virgin, 2012). Redoxpotential och syrehalt i grundvatten påverkar många ämnens löslighet, och därmed förekomsten av ämnena i grundvattnet. Redoxreaktioner är reaktioner där elektroner överförs. Då ett ämne oxideras lämnas elektroner iväg till ett annat ämne som reduceras. Om redoxreaktioner inte katalyseras av bakterier är de ofta långsamma (SGU, 2013).

Syres löslighet minskar när vattentemperaturen stiger, vilket leder till att syrehalten minskar (Griebler et al., 2016). Syrehalten påverkar redoxpotentialen, som även är beroende av temperaturen i vattnet (Branzén et al., 2013). Redoxreaktioners jämviktspunkt påverkas av redoxpotential, pH och temperatur (SGU, 2013).

Jesušek et al. (2013) visade i laboratorieexperiment med sand och kranvatten att redoxpotential sjunker, samt redoxprocesser ändras, med stigande temperatur. Under experimentet bibehölls oxiska förhållande vid 10°C och mikroorganismers respiration skedde aerobiskt. Vid 25°C och 40°C ändrades förhållande till nitrat-respektive järnreducerande. Vid 70°C skedde främst sulfatreduktion (Jesušek et al., 2013).

Laboratorieexperiment med sediment från en anoxisk akvifer påvisade inte någon effekt på vattenkvaliteten då temperaturen sänktes från in-situ temperaturen 11°C till 5°C (Bonte et al., 2013a; Bonte et al., 2013b). Ett skifte i redoxförhållande påvisades dock med stigande temperatur. Vid en temperaturhöjning från 11°C till 25°C skedde ett skifte från järnreducerande till sulfatreducerande och metanogena, metanproducerande, förhållande. Vid 45°C framträdde ett mikrobiellt termofiliskt samhälle som var specialiserat på fermentering och sulfatreduktion (Bonte et al., 2013a).

Experimenten av Jesušek et al. (2013) och Bonte et al. (2013a) visar att ingen märkbar påverkan på grundvattenkemin sker vid en låg sänkning av temperaturen, men att en höjning från 10°C till  $\geq 25^\circ\text{C}$  skulle kunna orsaka en påverkan. Enligt tabell 1 är detta aktuellt för högtemperatursystem.

Då grundvatten är syrefattigt och har låg redoxpotential kan det uppvisa höga halter järn och mangan eftersom lösligheten hos järn och mangan ökar när syrehalten minskar (Olausson, 2012). Låg redoxpotential kan även leda till att svavelväte bildas genom att svavel i sulfatjoner reduceras, och att kol som funnits bundet i organiskt material kan frigöras som metangas. Dock kan denitrifikation gynnas av syrefria förhållande, vilket kan leda till minskad nitrat halt i områden där

stora kväveläckage förekommer. Syrefria förhållande kan även gynna nedbrytningen av organiska föroreningar som bekämpningsmedel (SGU, 2013).

Tillgängligheten på DOC, löst organiskt kol, som elektrondonator kan spela stor roll för grundvattnets redoxprocesser och de redox-förändringar som temperaturhöjning ger upphov till (Jesušek et al., 2013). Som tidigare nämnt kan mobilisering av DOC ske vid förhöjda marktemperaturer, vilket kan stimulera mikrobiell aktivitet (Jesušek et al., 2013). Ökande tillgänglighet av DOC i kombination med ökad mikrobiell aktivitet kan göra redoxförhållande mer reducerande. Reducering av nitrat, järn och sulfat beror på redoxförhållande. Jesušek et al. (2013) menar att dricksvattenkvaliteten skulle kunna försämrats vid  $\geq 25^{\circ}\text{C}$  på grund av att metalloxider reduceras så att tungmetaller frigörs från sediment.

## **Mikroorganismer**

Mikrobiell biodiversitet styrs av flera olika biotiska och abiotiska faktorer, som habitatstorlek, kontaminering, pH, temperatur och tillgång på syre (Hähnlein et al., 2013). Mikroorganismer i grundvatten utför viktiga ekosystemtjänster, som rening av infiltrerande vatten, nedbrytning av föroreningar, eliminering av skadliga mikroorganismer, samt deltar i kretslopp för kol och näringsämnen (Griebler et al., 2016).

Mikroorganismer har optimala temperaturer, där de är som mest produktiva. Ofta ligger den optimala temperaturen nära den maximala temperaturen, vilket är den högsta temperatur mikroorganismen tolererar. Det finns även en lägsta temperatur. När temperaturer som är utanför en mikroorganismers toleransområde uppnås kan organismen dö (Jarvis och Schnürer, 2009). Organismer som lever i grundvatten är anpassade till de naturliga temperaturvariationerna som förekommer på platsen (Griebler et al., 2016). I Sverige ligger grundvattentemperaturen normalt mellan  $3\text{--}10^{\circ}\text{C}$  (Erlström et al. 2016). Mikroorganismer kan delas in i grupper baserat på vilket temperaturområde de trivs inom, och inom detta spann trivs psykrofiler som har sina minimi-, opti- och maximitemperaturer inom temperaturintervallet  $4\text{--}25^{\circ}\text{C}$ , se tabell 3. Mesofiler trivs bäst inom temperaturintervallet  $25\text{--}40^{\circ}\text{C}$ , termofiler inom  $50\text{--}60^{\circ}\text{C}$  och hypertermofiler vid temperaturer  $>60^{\circ}\text{C}$  (Jarvis och Schnürer, 2009). Som kan ses i tabell 1 är det högtemperaturanläggningar som uppnår temperaturer över psykrofilers maximala temperatur.

**Tabell 3**

Minimi- och maximitemperaturer för olika mikroorganismer (Jarvis och Schnürer, 2009).

Temperaturområde	Temperatur (°C)
Psykrofil	4–25
Mesofil	25–40
Termofil	50–60
Hypertermofil	>60

Eftersom de mikroorganismer och den fauna som finns i grundvatten är anpassade till de naturliga temperaturerna kan en marktemperaturhöjning till 20°C påverka biodiversiteten och ekosystemet i grundvattnet (Hähnlein et al., 2013). Enligt tabell 1 skulle de flesta akviferlagren inte uppnå sådana temperaturer. Dock kan exempelvis Arlandas akviferlager som uppnår 15–25°C på den varma sidan (Gehlin, 2017) eventuellt kunna ge upphov till sådana effekter. Ett skifte i artsammansättningen kan i sin tur påverka grundvattenkemin (Griebler et al., 2016), då bakterier kan ha viktiga kemiska funktioner som reducering av nitratjoner till kvävgas eller reducering av sulfat till svavelväte (SGU, 2013). Grundvattnets mikroorganismer kan även oxidera de näringsämnen som finns i vattnet och därmed minska redoxpotentialen. Dessa processer är viktiga då de förhindrar tillväxten av patogener, skadliga mikroorganismer, i grundvattnet (Bonte et al., 2011). När den naturliga artsammansättningen i grundvatten hämmas skulle patogener kunna förökas (Casasso & Sethi, 2019).

Under en studie av en anoxisk akvifer som normalt har temperaturer på  $11 \pm 1^\circ\text{C}$  och påverkades av en värmeplym  $\geq 20^\circ\text{C}$  sågs inga signifikanta förändringar i grundvattenlevande mikroorganismers aktivitet, som kolproduktion och upptag av fosfor, inom temperaturintervallet 8–18°C. Däremot observerades ett negativt samband mellan mikrobiell biodiversitet och temperaturförändringar (Briemann et al., 2009). Sediment från samma akvifer användes sedan i laboratorieexperiment. Vid temperaturer  $\geq 20^\circ\text{C}$  observerades en påverkan på mikroorganismers kolomsättning och upptag av näringsämnen, och vid temperaturerna 4°C och 45°C var den mikrobiella biodiversiteten lägre jämfört mot vad den var vid 10°C. Under försöket sågs dock endast en mindre effekt på mängden mikroorganismer i systemet (Briemann et al., 2011). Den förmodade anledningen till att inga signifikanta aktivitetsförändringar sågs vid temperaturer under 20°C var en begränsning av tillgången på DOC och näringsämnen (Briemann et al., 2009; Briemann et al., 2011).

Den mikrobiella aktiviteten kan stimuleras både av temperaturhöjningar såväl som en ökad tillgång av DOC (Jesušek, et al., 2013). Detta kan få grundvattenförhållande att övergå från aeroba till anaeroba, samt från oxiska till reducerande, vilket i sin tur kan leda till en förändring i mikrobiella processer och

interaktioner (Griebler et al., 2016). Till exempel är reducering av nitrat, järn och sulfat i grundvattenmiljöer beroende av redoxförhållande (Jesušek, et al., 2013). Vidare befaras temperaturförändringar i urbana områden, som ofta är påverkade av organiska föroreningar, kunna ge effekter på mikrobiell aktivitet och biodiversitet redan vid små temperaturförändringar om  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  (Briemann et al., 2011). Tillgängligheten av organiskt material och näringsämnen kan därför vara avgörande för temperaturförändringars påverkan på mikrobiella samhällen (Briemann et al., 2009; Briemann et al., 2011).

### Grundvattenfauna

Det är få studier som har utförts på de effekter som kan uppstå på grundvattenfauna vid temperaturförändringar (Griebler et al., 2016). Grundvattenfauna vars livscykel helt utspelar sig i grundvatten kallas stygobionta, se figur 1. En del arter betar av biofilm medan andra är predatorer. Dock saknas kunskap om många arters funktion i näringskedjan. Stygobionter kan, till skillnad från mycket annan fauna, överleva med begränsad tillgång av näringsämne och syre. De kan även överleva anoxiska förhållande under en kort tidsperiod. På grund av sina egenskaper finns stygobionterna i nästan alla grundvatten där åtminstone lite organiskt material och syre finns. Stygobionter är stenoterma, vilket innebär att de endast tål en liten förändring i miljöns temperatur. Många stygobionter slutar reproduceras vid förhöjda temperaturer (Thulin och Hahn, 2008).



**Figur 1 Stygobionta stygofila hoppkräftor**

Till vänster syns en *Megacyclops viridis*, ca 1,3 mm lång, som lever i källor och ytligt grundvatten. Till höger syns en *Diacyclops languidooides*, en av de vanligaste stygobionterna (Thulin och Hahn, 2008). Båda bofasta i Sverige (Dyntaxa, n.d.a; n.d.b). Bild: H. J. Hahn (Thulin och Hahn, 2008).

Förutom minskad reproduktion har det även visats att temperaturhöjningar leder till en ökad metabolism hos stygobionter. Den ökade metabolismen leder till ökad stress och dödlighet (Briemann et al., 2011). Den generella kalla stenoterma grundvattenfaunan påverkas negativt vid temperaturer uppåt 14–20°C (Griebler et al., 2016), och den yttersta toleransen för grundvatteninvertebrater verkar vara 20°C (Hähnlein et al., 2013). Detta bekräftades under en studie där grundvattenfaunan, vid 22°C, nästan var helt obefintlig (Foulquier et al. 2011). Samtidigt fanns där en stor mikrobiell biomassa, vilket utgjorde en potentiell näringskälla för faunan. I akviferen fanns en stor tillförsel av DOC. Det i kombination med de fluktuerande förhöjda temperaturerna ledde till att anoxiska miljöer bildades. Med avsaknad av fauna skapades ett tillfälligt stopp i näringsöverföringen mellan ekosystemets trofiska nivåer (Foulquier et al. 2011).

Temperatur och tillgång till organiskt material verkar vara huvudfaktorerna som bestämmer grundvattenfaunans sammansättning. Eftersom det finns grundvattenfauna som är tolerant mot olika temperaturer leder en temperaturförändring i marken till minskad grundvattenfaunadiversitet. Långtidseffekter av temperaturpåverkan på ekosystem har dock inte studerats (Griebler et al. 2016).

### Sammanfattning påverkan på grundvattenmiljö

Temperaturens påverkan på kinetik, mineralers löslighet, pH, sorption-desorption, oxidering av organiskt material och redoxpotential har studerats, mest i laboratorieförsök (Griebler et al., 2016; Briemann et al., 2011; Jesušek et al., 2013). Med utgångspunkt i befintlig litteratur kan komplexa samband ses mellan kemiska och biologiska mekanismer.

De flesta studier är överens om att endast mindre effekter uppstår på grundvattenkvaliteten vid mindre temperaturförändringar  $\Delta T \leq 10^\circ\text{C}$  (Possemiersa et al., 2014; Griebler et al., 2016), men att signifikanta förändringar i grundvattenkemi och ekologi kan ske vid höjning av marktemperaturen till  $\geq 25^\circ\text{C}$  (Bonte et al., 2013b; Jesušek et al., 2013). Om en medeltemperatur i marken antas vara 3–10°C, bör lågtempererade geoenergisystem inte påverka grundvattenkemin märkbart, se tabell 1. Däremot skulle högttempererade system, som högttempererade borrhålslager, kunna påverka grundvattenkemin lokalt eftersom temperaturer kan överstiga 25°C, se tabell 1. Dock verkar det som att grundvatten med låga koncentrationer näringsämnen och organiskt material har extra bra förutsättningar att undvika alltför stora kemiska och biologiska förändringar vid temperaturhöjningar (Griebler et al., 2016; Briemann et al., 2011).

Grundvattenlevande organismer är anpassade till de naturligt förekommande temperaturvariationerna i grundvattnet. En liten höjning av marktemperaturen skulle kunna leda till förändrad artsammansättning av både mikroorganismer och



grundvattenfauna (Briemann, 2011; Thulin och Hahn, 2008), vilket i sin tur kan påverka grundvattenkemin (Griebler et al., 2016). Effekter på mikroorganismer kan uppstå redan vid lägre temperaturförändringar, men eftersom påverkan verkar begränsas av tillgången till organiskt material (Briemann, 2011), och mycket organiskt material finns i jord, bör effekter främst uppstå i samband med användning av horisontella system, eller akviferlager ifall en akvifer är förorenad med organiskt material.

Vilka potentiella kemiska och biologiska effekter en temperaturhöjning i grundvattensystem kan orsaka beror på platsspecifika egenskaper, som tillgång på organiskt material och mineralogisk sammansättning (Jesubeck et al., 2013). Potentiella kemiska och biologiska effekter som kan uppstå i grundvattensystem vid förhöjda temperaturer har illustrerats i figuren nedan, se figur 2.



**Figur 2** Konceptuell modell över potentiella effekter som kan uppstå i grundvattenmiljöer vid temperaturhöjningar.

De viktigaste sambanden som behandlats av den studerade litteraturen är presenterade (ex. Griebl et al., 2016; Briemann et al., 2011; Thulin och Hahn, 2008). Vad som faktiskt kan förväntas i ett grundvattensystem beror på platsspecifika faktorer, som värdbergartens egenskaper och vilka temperaturer som uppnås (Jesůšek et al., 2013).

## Ytlig markmiljö

Temperaturpåverkan i jordytan från ett ensamt borrhål är försumbart i jämförelse mot naturliga dags- och säsongsvariationer (Claesson och Eskilson, 1987). Dock kan horisontella anläggningar, som jordvärmesystem, påverka temperaturen i markytan (Troedsson et al., 1982). Jordvärmesystem orsakar lokala temperaturer i jorden inom  $-5/+5^{\circ}\text{C}$ , se tabell 1. Vissa högtempererade anläggningar, som högtempererade borrhålslager, kan även ge upphov till temperaturförändring i markytan. Exempelvis har Emmabodas högtempererade borrhålslager gett upphov till en ungefärlig temperaturhöjning i jordlagret över anläggningen med  $+10^{\circ}\text{C}$ , se tabell 1.

En förändrad marktemperatur kan påskynda eller hämma metabolismen hos makro- och mikroorganismer (Brooker, 2017). Förutom marktemperatur påverkas växter och djur även av vattenhalten i marken, vilken kan bli fuktigare vid en temperatursänkning (Walientinus, 1984; Svensson, 1983) och torrare vid en temperaturhöjning (Svensson, 1983; Snyder och Callahan, 2019).

Geoenergianläggningars påverkan på mikroorganismer, flora och fauna vid uppvärmning är mycket sparsamt dokumenterat. I detta avsnitt behandlas därför forskning från uppvärmningsexperiment och naturligt förekommande uppvärmda miljöer, för att slutligen kunna diskutera geoenergins temperaturpåverkan på markmiljön.

### Makro- och mikroorganismer

Makro- och mikroorganismer bidrar med nedbrytning av organiskt material (Halldin, 1979; Jarvis och Schnürer, 2009). Nedbrytningen frigör näringsämnen till jorden som växter sedan kan ta upp. Mikroorganismer måste ha tillgång till substrat, näring, för att föröka sig. Substratet används för uppbyggnad av nya celler och produktion av energi för tillväxt. De flesta marklevande mikroorganismerna är heterotrofer, vilket innebär att de använder organiska kolföreningar som källa till energi. Förutom substrat behöver mikroorganismen även en bra omgivning, och viktiga faktorer som påverkar den mikrobiella tillväxten är temperatur, pH, tillgång till syre och koncentrationer av salt (Jarvis och Schnürer, 2009). En långvarig temperaturhöjning med  $2-3^{\circ}\text{C}$  kan påverka artsammansättningen av marklevande mikroorganismer (Griebler et al., 2016; Cowden et al., 2019).

Vid nedbrytning av organiskt material kan kol antingen avgå till atmosfären som koldioxid via respiration eller användas till uppbyggnad av biomassa, varvid marken verkar som en kolsänka (Marañón-Jiménez et al., 2018). En uppvärmning av marken kan leda till att mikroorganismers metabolism och respiration ökar. Den höjda respirationen kan leda till en utarmning av labilt kol i marken (Bradford et

al., 2008; Marañón-Jiménez et al., 2018). Till exempel observerades en 8,6 – 58 % minskning av kolhalten i jordens toppskikt (0–10 cm) efter sju års uppvärmning inom temperaturerna 1,8 °C till 15,9 °C i isländsk siltig lerig andosoljord (Marañón-Jiménez et al., 2018). Den ökade respirationshastigheten avtar igen efter några år, även vid kvarstående uppvärmda förhållande (Bradford et al., 2008).

Som tidigare nämnt beror grundvattenkemin delvis på miljön där vattnet infiltrerar (SGU, 2013). Infiltration i jord med ökad respiration till följd av en temperaturhöjning kan leda till att det infiltrerande vattnets halter löst syre (DO) minskar (Foulquier, 2009).

Makroorganismer, som exempelvis dagmaskar, har stor betydelse för markens struktur, luftning och dränering. Markmaterial som passerat markorganismer innehåller högre halter mikroorganismer, vilket innebär att de är viktiga för markens näringsinnehåll. Förekomst av markorganismer styrs av temperatur, fuktighet och växtlighetens sammansättning (Halldin, 1979).

En temperatursänkning i marken kan leda till minskad mikrobiologisk nedbrytning, med långsammare omsättning av näringsämnen som följd (Troedsson et al., 1982). Mer specifikt, har en sänkning av marktemperaturen genom värmeuttag med jordvärmeanläggning setts leda till minskad förekomst och aktivitet hos dagmask (Troedsson et al., 1982; Lundkvist, 1983). Avsaknaden av mask berodde sannolikt på ökad tjälbildning, vilket ledde till att masken fastnade mellan tjälen och isen som bildades runt jordslingorna och frös ihjäl (Lundkvist, 1983). En sänkning av marktemperaturen kan även leda till att maskens aktivitet börjar senare på säsongen. Ifall säsongen förkortas kan det vara svårt för dagmaskpopulationen att reproduceras (Troedsson et al., 1982).

Utbudet av studier om temperaturhöjningars påverkan på makroorganismer är begränsat (Snyder och Callaham, 2019). Snyder och Callaham (2019) resonerar att eftersom markens temperatur varierar med säsong och dygnsrytm är markorganismer anpassade till ett intervall av temperaturer som varierar under både korta och långa tidsperioder. Temperaturen fluktuerar mest i jordens toppskikt, vilket även är var mest biodiversitet finns. Det är möjligt att en höjning av marktemperaturen på ett begränsat område leder till att den lätttrörliga makrofaunan flyttar till närliggande, opåverkade jordar (Snyder och Callaham, 2019). Lindberg (2003) visade att en temperaturhöjning i jorden med +5°C kan ge negativa, positiva eller inga effekter på olika arters förekomst, och effekter som uppstår borde därför vara artspecifika. Markens fuktighet är även en viktig faktor att ta i beaktning vid en uppvärmning. Även vilken jordtyp som förändringen sker i är avgörande för vilka effekter som kan uppstå (Snyder och Callaham, 2019).

## Flora

Plantors utveckling och tillväxt beror på många biotiska och abiotiska faktorer, som förekomst av pollinatörer, mykorhizza, patogener, ljus, fuktighet och jordtyp (Mohan et al., 2019). Vid en temperatursänkning skulle växter kunna skadas genom att vattnet i växters celler fryser och orsakar cellsprickning (Brooker, 2017).

Förändring i markens temperatur kan leda till en fenotypisk och reproduktiv respons hos växter (Valencia et al., 2016). Blomningsresponsen hos *Cerastium fontanum* undersöktes vid en naturlig geotermal gradient på Island, och visade att växter som stod i varmare marktemperaturer blommade tidigare än de som stod i kallare temperaturer (Valdés et al., 2018).

En höjning av marktemperaturen leder inte alltid till att blomning sker tidigare. Under ett fältexperiment i Italien utsattes två olika arter, *Erica multiflora* och *Globularia alypum*, för antingen torka eller uppvärmning. Medan torkan ledde till en minskad blomning och kortare blomningsperiod hos båda arterna, skiljde sig responsen av uppvärmning mellan arterna. Den ena uppvisade inte någon respons, medan den andra fick en senare blomningssäsong (Llorens och Peñuelas, 2005). Även Bloor et al. (2010) observerade, i experiment med gräsarter, att blomningsresponsen varierade mellan arter.

Den fenotypiska responsen till uppvärmning kan även påverka växtens tillväxt, dess totala biomassa, som sågs i en studie på gräsmark (Bloor et al., 2010). Generellt ledde en uppvärmning av marktemperaturen med 3,5 °C till en ökning i biomassa under våren. Dock var resultatet inte samma för alla arter som var med i studien. I studien uppvisades även negativa samband mellan växters biomassa och uttorkning (Bloor et al., 2010), samband som också kan ses för produktionen av blommor och frukt (Valencia et al., 2016).

Växters fenotypiska respons på temperaturförändring i marken kan även bero på ursprungliga platsförhållande. Alatalo och Totland (1997) såg att *Silene acaulis* hade olika blomnings- och fröbildningsresponser till samma markuppvärmning, då de stod i två olika nordiska miljöer. På grund av sådana mekanismer föreslår Mohan et al. (2019) att det är de ursprungliga temperaturförhållandena på platsen, tillsammans med varje arts individuella respons sätt, som bestämmer hur växter reagerar på temperaturförändringar.

Många växters frögroning regleras av marktemperaturen. En del växter kräver en viss tids köldperiod för att bryta frövilan (Halldin, 1979; Brooker, 2017). Ändrade marktemperaturer kan leda till att växter gror sent, för tidigt eller inte alls. Vid förhöjda marktemperaturer kan växten gro för tidigt, vilket kan leda till frostsador (Halldin, 1979; Svensson, 1983). Vid sänkta marktemperaturer kan frögroning försenas eller utebli (Walentinus, 1984).

Näringsupptag och transport av näring kan gå långsammare vid kyllda förhållanden. Detta kan leda till näringsbrist (Walentinus, 1984). Ifall växters reproduktion sker genom rotskott och upplagring av energi kan sänkta

marktemperaturer orsaka att upplagring sker för långsamt på grund av långsam näringstransport till roten (Halldin, 1979). I kontrast kan förhöjda temperaturer leda till en för hög rotandning så att energi förbränns för tidigt istället för att fastläggas (Halldin, 1979).

Nedkylning av mark genom uttag med jordvärme har bland annat lett till längre tjälningstid och senare snösmältning, vilket kan leda till att växter grönskar och blommar senare (Walientinus, 1984). Värmeuttag genom ytjordvärme kan även leda till att isbränna uppstår, vilket kan döda gräs som finns över slingorna (Walientinus, 1984).

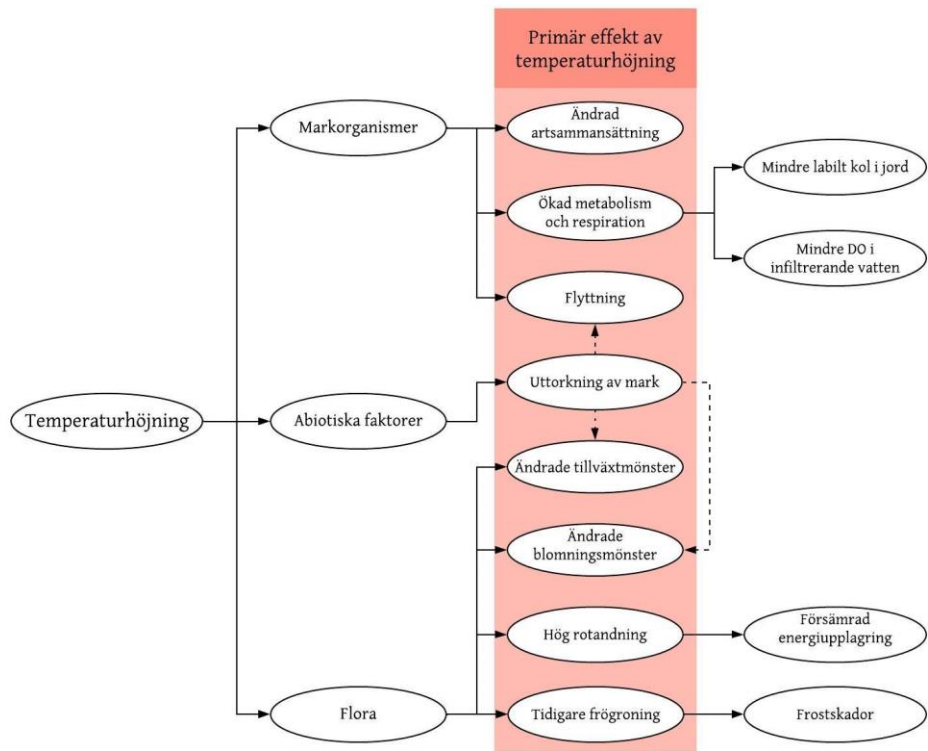
### Sammanfattning påverkan på ytlig markmiljö

Temperaturens påverkan på jordlevande makro- och mikroorganismer samt växter har studerats. I jord bidrar makro- och mikroorganismer till nedbrytning av organiskt material och tillgängliggör näringsämnen till markens flora (Jarvis och Schnürer, 2009; Halldin, 1979). Mikroorganismers nedbrytning, metabolism och respiration kan öka vid en temperaturhöjning, vilket kan leda till en minskning av labilt kol i jorden (Maranón-Jiménez et al., 2018), samt att vattnet som infiltreras får minskad syrehalt (Foulquier, 2009).

Förhöjda marktemperaturer på en begränsad yta kan leda till att makroorganismer, som dagmaskar, flyttar till opåverkad mark (Snyder och Callahan, 2019), medan sänkta temperaturer kan leda till minskad produktivitet och förekomst (Troedsson, 1982).

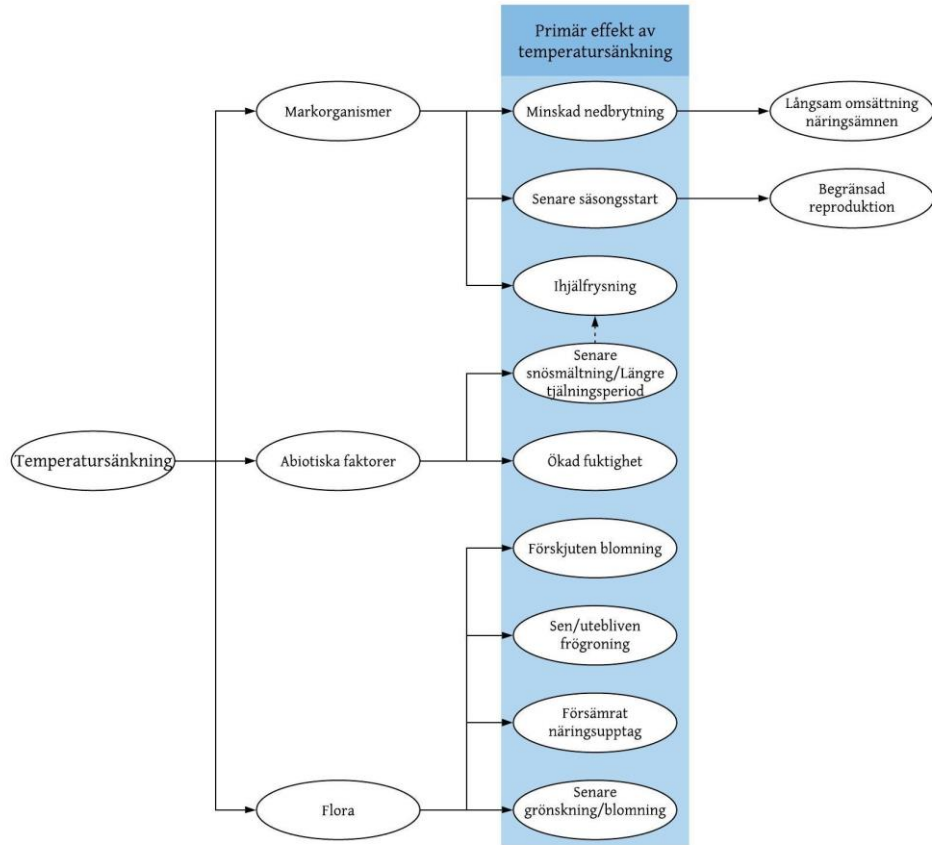
Flora kan påverkas av både höjda och sänkta temperaturer på många sätt, bland annat genom ändrade blomnings- och tillväxtmönster, försämrat näringsupptag, hämmad reproduktion och förskjuten frögroning (Valdés et al., 2018; Halldin, 1979).

Vilka effekter som faktiskt kan uppstå på vegetation och markorganismer beror på vilket geoenergisystem som används. Jordvärme kan ge upphov till en sänkning av jordens temperatur, se tabell 1, så att effekter uppstår på växter och organismer som dagmaskar (Troedsson, 1982). Högtemperaturanläggningar skulle kunna ge upphov till att jordens temperatur höjs, se tabell 1, vilket i så fall skulle kunna ge upphov till effekter på markorganismer och vegetation (Snyder och Callahan, 2019; Valdés et al., 2018), men det är inget som bekräftats genom studier. De effekter som eventuellt uppstår beror även på plats- och artspecifika egenskaper (Mohan et al., 2019). Nedan har potentiella effekter av temperaturhöjning i marken illustrerats i figur 3, och potentiella effekter av temperatursänkning har illustrerats i figur 4.



**Figur 3 Konceptuell modell över potentiella effekter som kan uppstå i markmiljöer vid temperaturhöjningar**

De viktigaste sambanden som behandlats av den studerade litteraturen är presenterade (ex. Snyder och Callahan, 2019; Valdés et al., 2018; Marañón-Jiménez et al., 2018). Vilka effekter som faktiskt kan förväntas i ett marksystem beror på platsspecifika faktorer, som vilka växter som finns på platsen, dess egenskaper och vilka temperaturer som uppnås.



**Figur 4 Konceptuell modell över potentiella effekter som kan uppstå i markmiljöer vid temperatursänkningar**

De viktigaste sambanden som behandlats av den studerade litteraturen är presenterade (ex. Halldin, 1979; Troedsson, 1982). Vilka effekter som faktiskt kan förväntas i ett marksystem beror på plats specifika faktorer, som vilka växter som finns på platsen, dess egenskaper och vilka temperaturer som uppnås.



## Fallstudie: Emmaboda högtemperaturlager

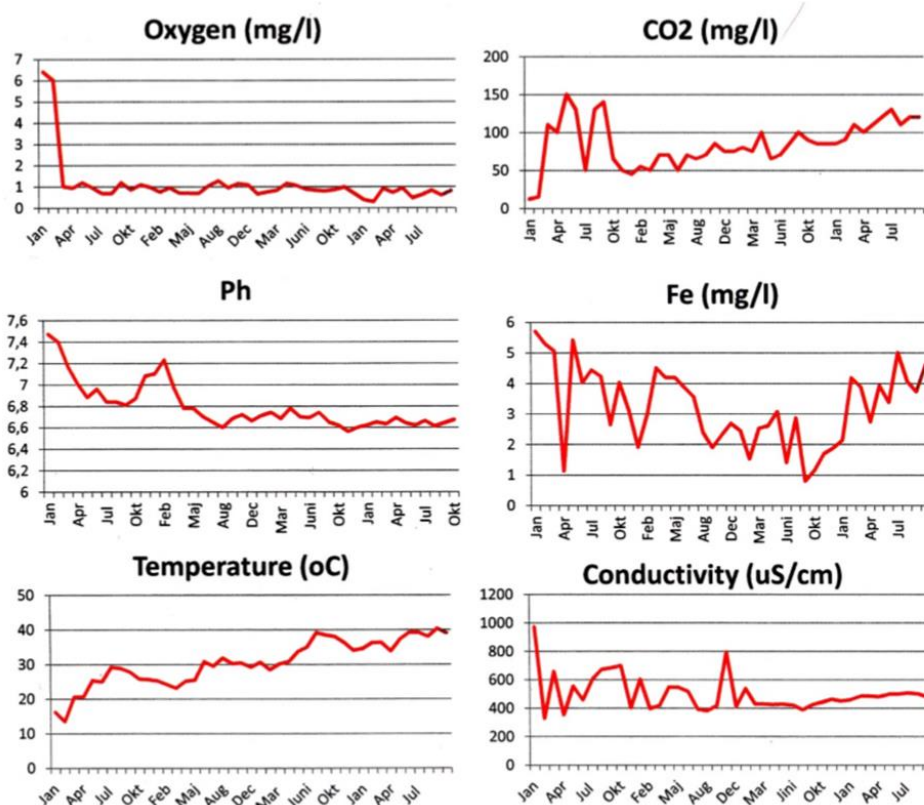
I Emmaboda finns ett av Sveriges två högtempererade borrhålslager. Borrhålslagret är beläget i en park där en bäck skiljer borrhålslagret från fabriksområdet som lagret är kopplat till. På området finns även en damm som hör till en gammal kvarn (Nordell et al., 2016). Berggrunden består till största del av granodiorit med inslag av amfibolit i varierande mäktighet och med relativt låg kvartshalt (Sweco, 2010). Berggrunden har spricksystem som är vattenförande, och i ett av två undersökningshål observerades vattenförande sprickor på 29–33 meters djup, medan sprickor i det andra förekom nära ytan (Sweco, 2010). Dock förkom inget betydande grundvattenflöde. Den nivåreglerade dammen står i hydraulisk kontakt med brunnarna, och grundvattennivåerna i laget är därför relativt konstanta under året (Prof. Olof Andersson, Geostrata, mailkontakt, 2020-04-17).

Borrhålslagret består av 140 borrhål som är 150 meter djupa och är placerade med 4 meters avstånd mellan varandra (Nordell et al., 2016). Bergvolymen som värms upp har beräknats vara ungefär 320 000 m<sup>3</sup>. Isolering av skumglas ligger mot markytan under 30 cm jord för att minimera värmeförluster mot markytan (Prof. Olof Andersson, Geostrata, mailkontakt, 2020-04-17).

Värmeväxlingen i borrhålen sker genom en form av öppna koaxialkolektorer. Köldbärarvätskan i lagret består i grunden av grundvatten från platsen och står i direktkontakt med bergväggen. Vid några tillfällen under 2011 och 2012 har kranvatten tillsatts för att hålla trycket uppe (Nordell et al., 2016). Under provpumpning, innan anläggningen togs i drift, visade undersökningar att grundvattnet på platsen var mjukt (låg halt kalcium- och magnesiumjoner), pH-neutralt och hade låga halter av lösta salter. Vidare innehöll det en del järn och mangan, vilket tyder på att vattnet var svagt reduktivt. Det innehöll låga halter löst organiskt material (Sweco, 2010).

Lagret kommer upp i temperaturer strax över 40°C (Prof. Olof Andersson, Geostrata, telefonkontakt, 2020-04-17). Analyser av värmebärarens pH, konduktivitet och halter syre, koldioxid och järn tas regelbundet i förhållande till temperaturen, se figur 5. Provtagningar från januari 2012 till oktober 2015 visar att pH sjunker, koldioxidhalten ökar, syrehalten har minskat och stabiliserats och konduktiviteten och järnhalten har minskat och sedan ökat, i takt med stigande temperatur i lagret (Nordell et al., 2016).

Mer omfattande kemiska analyser har tagits 1–2 gånger per år. I dem visas att järnhalten är relativt hög (över 10 mg/l) (Nordell et al., 2016). Den förhöjda järnhalten kan ha sitt ursprung i berggrunden eller från systemets stålrör. Även konduktiviteten ökar, vilket tyder på att en högre halt fasta lösta ämnen finns i vattnet. Detta skulle kunna leda till utfällning och igensättning av rör. Alkalinitet, kalcium och hårdhet ökar som en följd av temperaturhöjningen, vilket förklarar varför även halten koldioxid ökar (Nordell et al., 2016).



**Figur 5** Mätvärden från köldbärarvätskan i Emmaboda högtemperurlager

Mätt under perioden januari 2012 till oktober 2015. *Bildkälla:* Nordell et al. (2016).

Inga biologiska faktorer, så som mikroorganismers förekomst, har provtagits. Ingen påverkan på vegetationen kan ses på marken över lagret, som endast utsätts för en liten temperaturpåverkan. Den temperaturpåverkan som finns i markytan leder till tidigare snösmältning (Prof. Olof Andersson, Geostrata, Mailkontakt, 2020-04-17), se figur 6.



**Figur 6 Snösmältning över värmelager**

Tidigare snösmältning som effekt av temperaturhöjning i marken. *Bild:* Leif Rydell, Xylem, mars 2018.

# Diskussion

## Grundvattenkemi

Många av studierna som behandlade grundvattenkemi använde material från olika geologiska formationer, som därmed hade olika mineralogiska sammansättningar och ursprungsförhållande (ex. Bonte et al., 2013b; Griebler et al., 2016; Jesušek et al., 2013). Trots att deras ursprungsförhållande skiljer sig åt visar studierna att signifikanta förändringar i både grundvattenkvalitet och ekologiska mönster potentiellt kan uppstå vid uppvärmning till temperaturer  $\geq 25^\circ\text{C}$  (Bonte et al., 2013b; Jesušek et al., 2013). Ökande temperaturer kan leda till ökad kinetik, förändring av jämvikter, pH och sorption-desorption, mobilisering av organiskt material och sänkning av syrehalt och redoxpotential. Det är många faktorer som påverkar varandra (ex. Birelmann et al., 2011; Griebler et al., 2016; Possemiersa et al., 2014). Exempelvis kan mobilisering av DOC leda till att grundvattenmikrobers metabolism ökar, vilket i sin tur kan leda till att redoxpotentialen sänks ytterligare och syrefria förhållande skapas (Griebler et al., 2016). Stora delar av Sverige har dock kristallin berggrund, vilket inte brukar innehålla höga halter organiskt kol (Sundkvist et al., 2009). Mikrobiell aktivitet kan i sig stimuleras av en temperaturhöjning, men dess metabolism begränsas av avsaknaden av organiskt kol. Generellt verkar det som att grundvatten med mindre halter organiskt kol har en bättre resiliens mot potentiella kemiska och biologiska förändringar till följd av temperaturhöjningar (Griebler et al., 2016; Birelmann et al., 2011).

Litteraturen verkar överens om att endast en liten påverkan på grundvattenkemin bör uppstå vid lägre temperaturförändringar om  $\Delta T \leq 10^\circ\text{C}$  i grundvatten (Griebler et al., 2016; Possemiersa et al., 2014; Bonte et al., 2013a). Om en medeltemperatur i berggrunden är  $3\text{--}10^\circ\text{C}$ , bör lågtempererade geoenergisystem inte påverka grundvattenkemin märkbart, se tabell 1. Normala temperaturer för akviferlager är  $12\text{--}15^\circ\text{C}$  och  $5\text{--}7^\circ\text{C}$  på den varma respektive kalla sidan, och normala årsvariationer för lågtempererade borrhållager varierar mellan  $-1^\circ\text{C}$  och  $+10^\circ\text{C}$  (Gehlin, 2017). Inom dessa temperaturer bör inga märkbara förändringar ske på grundvattenkvaliteten. Högtempererade anläggningar skulle däremot kunna ge upphov till förändringar i grundvattenkvalitet vid temperaturer  $\geq 25^\circ\text{C}$  (Jesušek et al., 2013).

När det kommer till energisystem i kristallin berggrund finns inte tillräckligt med underlag för att med säkerhet kunna säga om grundvattenkvalitet och biodiversitet hotas eller ej. Men eftersom grundvattenomsättningen ofta är låg i kristallin berggrund (SGU, 2013) och radien som temperaturen påverkas från borrhålet inte är större än några meter (Claesson och Eskilson, 1987) kan en påverkan på grundvattenkemin eventuellt ske relativt nära anläggningen.

Effekterna som kan uppstå i en akvifer är mycket plats specifika, och kan bero på mineralogisk sammansättning av berggrund eller sediment, halt av organiskt material och vilka mikroorganismer som förekommer (Jesušek, et al., 2013), därför behövs god kännedom om området innan ett system anläggs.

Högtempererad lagring av energi i mark kan utgöra en potentiell risk för grundvattenkvaliteten och biodiversiteten i grundvatten (ex. Griebler et al., 2016; Foulquier, 2009). Ur ekologisk synpunkt bör, som Griebler et al. (2016) poängterar, temperaturpåverkan begränsas. Speciellt när mycket organiskt material och näringsämne finns tillgängligt för mikroorganismer (Griebler et al., 2016). Samtidigt klassas geoenergi som en förnybar energikälla (EU 2018/2001) och användningen av den kan innebära minskade växthusgasutsläpp från andra typer av energikällor som fossila bränslen (Erlström et al., 2016), samt hushållning med energi (Jesušek et al., 2013). Det krävs mer diskussioner inom detta område för att kunna avgöra hur prioriteringar bör göras.

## Makro- och mikroorganismer i mark och grundvatten

Grundvattenlevande mikroorganismer är anpassade till de förhållande som naturliga förekommer på platsen. En liten temperaturförändring skulle kunna ha en stor påverkan på biodiversiteten i grundvattnet (Jarvis och Schnürer, 2009). Vid höga temperaturförändringar är det troligt att de mikroorganismer som naturligt förekommer ersätts av andra organismer som är bättre anpassade (Griebler et al., 2016).

Litteraturen tar upp olika temperaturer för när påverkan sker på grundvattenlevande mikroorganismer, som varierar från  $\geq 20^{\circ}\text{C}$  vid näringsfattiga förhållande till  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  vid hög tillgång till organiskt material (Briemann et al., 2009; Briemann et al., 2011). Grundvattenfaunan kan påverkas negativt vid  $14\text{--}20^{\circ}\text{C}$  (Griebler et al., 2016; Hähnlein et al., 2013). I akviferlager är normala temperaturer  $12\text{--}15^{\circ}\text{C}$  och  $5\text{--}7^{\circ}\text{C}$  i den varma respektive kalla sidan, se figur 1. Det bör inte ge upphov till någon temperaturrelaterad påverkan. Dock finns det akviferlager som kommer upp i temperaturer  $15\text{--}25^{\circ}\text{C}$  (Gehlin, 2017). Om det finns en hög tillgång till organiskt material skulle temperaturförändringen i akviferen kunna ge upphov till förändrad mikrobiell aktivitet (Briemann et al., 2009; Briemann et al., 2011), och eventuellt påverka grundvattenfaunan (Griebler et al., 2016). De refererade

studierna på mikroorganismer har dock utförts i bland annat Tyskland (ex. Jesušek, et al., 2013), som kan ha en annan artsammansättning än Sverige. Det är inte säkert att de grundvattenorganismer som finns i Sverige reagerar likadant som de från andra miljöer. Det ska även tilläggas att grundvattenfaunans förekomst i akviferer är ytterst platsspecifikt. Förekomsten gynnas av en hög genomsläpplighet samt tillgång till syre och organiskt material. Förekomsten skiljer sig därför mellan akviferer, men även inom en och samma akvifer. Medan grundvattenfauna vanligen förekommer i exempelvis isälvavlagringar, är det okänt om de förekommer i ytnära sprickakviferer i kristallin berggrund (Thulin och Hahn, 2008).

För vertikala geoenergisystem sker termiskt utbyte under grundvattenytan (Geotec, n.d.). Akviferlager i vattenförande kalk- och sandsten kan vara 50–150 meter djupa, och borrhål/borrhålslager kan vara 100–300 meter djupa, se tabell 1. En av avgränsningarna för denna studie var att påverkan från anläggningar djupare än 400 meter inte togs med, men det är ändå viktigt att nämna att mikroorganismer har hittats i djupa sandstensformationer (1,228–1,268 m djup) (Lerm et al., 2013), och i djup kristallin berggrund (upp till 4,4 km djup) (Purkamo et al., 2019). Det är därför troligt att mikroorganismer förekommer även vid de djup som borrhål/borrhålslager och akviferlager i berggrund når. Som Griebler et al. (2016) poängterar, kan studier om påverkan från djupa anläggningar inte direkt jämföras mot påverkan från grunda geoenergisystem, men de kan ändå betona att det kan uppstå temperaturrelaterade effekter i grundvattenlevande mikroorganismers sammansättning och funktioner. De studier som refererats i detta arbete har utfört studier på mikrobiella samhällen från ytligt grundvatten (1–5 meter) (ex. Jesušek, et al., 2013; Brielmann, 2009). Eftersom påverkan på mikroorganismer begränsas av tillgången till organiskt material (Brielmann, 2011), och mycket organiskt material finns i jord, bör effekter på mikroorganismer främst uppstå i samband med användning av horisontella system, eller akviferlager i akviferer förorenade med organiskt material. Studier över effekter på mikroorganismer som lever i grundvatten ner till 400 meter skulle behövas, men baserat på litteraturstudien skulle det kunna antas att påverkan främst borde ske från högtempererade geoenergisystem.

Temperaturpåverkan i jordytan från ett ensamt borrhål är försumbart i jämförelse mot naturliga dags- och säsongsvariationer (Claesson och Eskilson, 1987). Dock kan horisontella anläggningar, som jordvärmesystem, påverka temperaturen i markytan (Troedsson et al., 1982). Vissa högtempererade anläggningar, som högtempererade borrhålslager, kan även ge upphov till temperaturförändring i markytan. Exempelvis har Emmabodas högtempererade borrhålslager, under tidsperioden mellan 2011-07-30 och 2015-07-09, gett upphov till en ungefärlig temperaturhöjning i det översta jordlagret med +10°C, se tabell 1. Denna temperaturhöjning kan ge upphov till tidigare snösmältning, se figur 6. Även med naturliga variationer i dags- och säsongstemperaturer skulle en ihållande temperaturförändring kunna ge upphov till påverkan på mikroorganismer i mark

(Griebler et al., 2016; Bradford et al., 2008; Foulquier, 2009), men det har inte bekräftats i samband med geoenergianläggningar.

En temperaturhöjning i jord kan leda till ökad metabolism hos mikroorganismer, med avgivande av koldioxid från marken som följd (Maranón-Jiménez et al., 2018). Även om den ökade respirationshastigheten avtar efter några år av uppvärmning (Bradford et al., 2008), skulle en ökad tillförsel av koldioxid till atmosfären kunna bidra till klimatförändringar. Å andra sidan kan lagring av energi samt utvinning av geoenergi bidra till att andra energislag, så som fossila bränslen, används mindre vid uppvärmning eller nedkylning (Jesušek, et al., 2013; Erlström et al., 2016), och därmed samtidigt bidra till minskade koldioxidutsläpp.

En ökad respiration hos jordlevande mikroorganismer kan även bidra till att det infiltrerande vattnet innehåller mindre löst syre (Foulquier, 2009). Detta skulle kunna utgöra en risk för grundvattenlevande makro- och mikroorganismer, som potentiellt utsätts för ytterligare påverkade syrenivåer i grundvattnet.

Det ska dock tilläggas att den ytliga markens temperatur även kan påverkas av annat än geoenergisystem, som värmeläckage från hus och klimatförändringar (Erlström et al., 2016).

## Flora och fauna

Växters utseende, blomningsmönster och tid för frögroning är några faktorer som kan påverkas av ihållande temperaturförändringar, även vid låga skillnader om  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  (Bloor et al., 2010; Mohan et al., 2019). Det är dock inte alltid en växt visar en respons på uppvärmning eller nedkylning (Llorens och Peñuelas, 2005). Responser varierar både mellan arter och platsens ursprungliga temperaturförhållande (Mohan et al., 2019). Eftersom responserna kan bero på olika faktorer är det svårt att svara på om geoenergianläggningars temperaturpåverkan potentiellt skulle kunna påverka växter. Från litteraturen verkar snarare ett uttorkning, som en följd av markuppvärmning, orsaka större problem för vegetationen (Llorens och Peñuelas, 2005; Bloor et al., 2010).

Som tidigare nämnts är temperaturpåverkan från ett enskilt borrhål försumbar i jämförelse med naturliga dags- och säsongsvariationer (Claesson och Eskilson, 1987), men horisontella system och högt tempererade anläggningar skulle kunna ge upphov till temperaturförändring i jord. Emmabodas högt tempererade anläggningar, som har höjt medeltemperaturen i jordytan med ungefär  $+10^{\circ}\text{C}$ , se tabell 1, har inte gett upphov till någon synlig påverkan på vegetationen (Prof. Olof Andersson, Geostrata, Mailkontakt, 2020-04-17), trots att denna höjning är större än många av de temperaturhöjningar som undersökts i de refererade studierna. Detta skulle kunna bero på att isoleringen skyddar ovanliggande flora från alltför stor temperaturpåverkan, eller att floran inte visar någon respons till de

temperaturförändringarna (Llorens och Peñuelas, 2005). Temperaturpåverkan sker dock på en begränsad yta, så eventuella effekter på vegetationen bör endast ske i området över anläggningen.

Vid nedkylning av jord genom uttag av jordvärme har en minskad förekomst av mask, samt en minskning av den mikrobiologiska nedbrytningen av organiskt material setts, vilket även leder till långsammare näringsomsättning i marken (Troedsson et al., 1982). Högtempererade anläggningar kan höja temperaturen i jordens yttersta lager, se tabell 1. Eftersom mikroorganismers metabolism ökar vid ökade temperaturer, skulle även faunans nedbrytning kunna öka. En annan teori är att den lätttrörliga faunan helt enkelt flyttar till närliggande, opåverkade marker (Snyder och Callahan, 2019). Effekter som kan uppstå verkar vara artspecifika, eftersom olika arter har uppvisat negativa, positiva eller inga effekter i samband med en uppvärmning av jorden (+5°C) (Lindberg, 2003). Markens fuktighet samt vilken jordtyp som förändringen sker i är också avgörande för vilka effekter som kan uppstå vid en uppvärmning (Snyder och Callahan, 2019).

## Fallstudie: Emmaboda högtemperaturlager

Provpumpningen som utfördes innan anläggningen i Emmaboda togs i drift visade att grundvattnet hade låg kemisk syreförbrukning (COD(Mn)), vilket indikerar att vattnet hade en låg halt humusämnen (Aquaexpert, n.d.). Enligt litteraturen, en bra förutsättning för att motstå förändringar (Griebler et al., 2016). Det fanns en del järn och mangan löst i vattnet innan start, vilket tydde på att vattnet var svagt reduktivt (Sweco, 2010). I detta fall verkar ytterligare höjning av halter mangan och järn utgöra den största risken för grundvattenkvaliteten vid en temperaturhöjning, eftersom en ökning av grundvattentemperaturen leder till att syres löslighet minskar, och när syrehalten minskar ökar lösligheten hos järn och mangan (Olausson, 2012).

Även en sänkning av syrehalt, samt en ökning av lösta ämnen kunde förväntas (Griebler et al., 2016; Claesson, 1983). Detta överensstämmer med kemiska analyser, se figur 5. Syrehalten sjönk kraftigt i början. Den ursprungligt höga halten syre beror troligtvis på att kranvatten fick tillsättas (Nordell et al., 2016). Inget oväntat observerades i analyserna av vattenkemin.

Det ska även tilläggas att hastigheten på grundvattenrörelsen i berggrunden är relativt långsam (Prof. Olof Andersson, Geostrata, mailkontakt, 2020-04-17). Därför bör en potentiell påverkan på grundvattenkemin ske relativt nära lagret.

Inga biologiska tester, som förekomst av mikroorganismer och fauna, har tagits vid anläggningen (Prof. Olof Andersson, Geostrata, mailkontakt, 2020-04-17). Det hade varit mycket intressant att se om förekomsten av mikroorganismer i mark och grundvatten påverkats till följd av anläggningens temperaturpåverkan. Ett



förslag är att utföra en biologisk undersökning på området ovanpå och runt lagret för att se om markfaunan, exempelvis daggmask, frodas i den uppvärmda marken eller flyttar till närliggande mark. Ett annat förslag är undersöka förekomsten av mikroorganismer i grundvattnet vid anläggningen jämfört med en bit bort, där grundvattnet är opåverkat av temperaturförändringar från lagret.

## Vidare forskning

Avsaknad av grundvattenfauna kan innebära ett stopp i näringsöverföringen mellan de trofiska nivåerna (Foulquier et al., 2011). Medan påverkan hos mikroorganismer har undersökts under tidsperioder på några veckor till några månader (Brielmann et al., 2009; Jesušek, et al., 2013), hittades ingen studie om hur sådana förändringar kan påverka grundvattnets ekosystem på lång sikt.

Studier på hur jordfauna påverkas av temperaturhöjningar behövs. Exempelvis kan detta undersökas genom att ett begränsat markområde värms upp, och förekomst eller aktivitet av jordlevande organismer, som daggmask, jämförs mot ett opåverkat område. Om faunans näringsomsättning ökar kan dels påverkan på flora, dels påverkan på det infiltrerande vattnets kemiska egenskaper, undersökas.

# Slutsatser

## Påverkan grundvattenkemi:

- Det är troligt att geoenergisystem som opererar i temperaturer  $\geq 25^{\circ}\text{C}$  påverkar grundvattenkemin. Hur kemin påverkas beror på platsspecifika egenskaper som mineralogisk sammansättning, halter av organiskt kol och mikrobiell förekomst.
- Det finns inte tillräckligt med underlag för att med säkerhet kunna säga om grundvattenkvalitet och biodiversitet påverkas negativt av geoenergisystem i berggrunden.

## Påverkan makro- och mikroorganismer i mark och grundvatten:

- Temperaturförändringar kan påverka grundvattenlevande organismers aktivitet och biodiversitet och effekter kan uppstå redan vid små temperaturförändringar. Effekter kan dock variera med tillgången på organiskt material. Detta är främst aktuellt för horisontella system.
- För vertikala geoenergisystem sker termiskt utbyte under grundvattenytan. Det bör förekomma mikroorganismer på sådana djup, men studier om effekter på dessa saknas.
- Högtemperaturlager skulle kunna påverka marktemperaturen. Mikroorganismer i yttlig mark kan påverkas av ihållande temperaturhöjningar, vilket kan leda till en ökad aktivitet.

## Påverkan flora och fauna i markytan:

- Små temperaturskillnader i det översta marklagret ( $\pm 1-5^{\circ}\text{C}$ ) kan ge upphov till bland annat ändrade blomningsmönster hos växter.
- Nedkylning från ytjordvärmsystem har setts påverka flora och fauna. Någon sådan effekt har inte dokumenterats från vertikala system.
- Det är möjligt att högtemperaturlager höjer marktemperaturen så att vegetationen kan påverkas, men det är inte bekräftat.
- Uppvärmning av markens översta skikt skulle kunna påverka jordfaunan, men fler studier behövs.



# Tack

Stort tack till mina handledare, Karl Ljung och Johan Barth. Jag vill även rikta ett tack till Olof Andersson, Lars Ericsson, Signhild Gehlin, Göran Hellström, Henrik Lindståhl, Mats Ohlsson och Nina Reistad.



# Referenser

- Alatalo, J.M., Totland, Ø. (1997). Response to simulated climatic change in an alpine andsubarctic pollen-risk strategist, *Silene acaulis*. *Global Change Biology* (1997) 3 (Suppl. 1), 74–79. DOI: 10.1111/j.1365-2486.1997.gcb133.x
- Andersson, O., Barth, J., Berg, M., Frank, H., Gehlin, S., Hellström, G., Nordell, B., Nowacki, J.E., Risberg, G. (2012). Geoenergin i samhället - En viktig del i en hållbar energiförsörjning. 2012:1. Geotec.
- Aquaexpert. (n.d.). COD(Mn). <http://aquaexpert.se/vattenanalys/termer/cod> [2020-05-18]
- Bloor, J., Pichon, P., Falcimagne, R., Leadley, P., & Soussana, J. (2010). Effects of Warming, Summer Drought, and CO<sub>2</sub> Enrichment on Aboveground Biomass Production, Flowering Phenology, and Community Structure in an Upland Grassland Ecosystem. *Ecosystems*, 13, 888–900 (2010). DOI: 10.1007/s10021-010-9363-0
- Bradford, M.A., Davies, C.A., Frey, S.D., Maddox, T.R., Melillo, J.M., Mohan, J.E., Reynolds, J.F., Treseder, K.K., Wallenstein, M.D. (2008). Thermal adaptation of soil microbial respiration to elevated temperature. *Ecology Letters*, (2008) 11: 1316–1327. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2008.01251.x
- Bonte, M., P. J. Stuyfzand, A. Hulsmann, and P. Van Beelen. (2011). Underground thermal energy storage: environmental risks and policy developments in the Netherlands and European Union. *Ecology and Society* 16(1): 22. DOI: 10.5751/ES-03762-160122
- Bonte, M., Röling, W.F.M., Zaura E., van der Wielen, P.W.J.J., Stuyfzand, P.J., van Breukelen, B.M. (2013a). Impacts of Shallow Geothermal Energy Production on Redox Processes and Microbial Communities. *Environmental Science & Technology*, 47, 14476-14484. DOI: 10.1021/es4030244
- Bonte, M., van Breukelen, B.M., Stuyfzand, P.J., (2013b). Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production. *Water Res.* 47, 5088–5100. DOI: 10.1016/j.watres.2013.05.049
- Bonte, M. Impacts of Shallow Geothermal Energy on Groundwater Quality – a Hydrochemical and Geomicrobial Study of the Effects of Ground Source Heat Pumps and Aquifer Thermal Energy Storage. (PhD Thesis). Department of Earth Sciences, VU Amsterdam (2013c), p. 175
- Branzén, H., Vestin, J., Berggren Kleja, D. (2013). *Utvärdering av grundvattenprovtagning för pH- och redoxkänsliga ämnen*. Statens geotekniska institut, SGI. Publikation 5, Linköping.

- Briellmann, H., Griebler, C., Schmidt, S.I., Michel, R., Lueders, T. (2009). Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *FEMS Microbiol Ecol* 68, 273–286. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2009.00674.x
- Briellmann, H., Lueders, T., Schregelmann, K., Ferraro, F., Avramov, M., Hammerl, V., Blum, P., Bayer, P., Griebler, C. (2011). Oberflächennahe Geothermie und ihre potentiellen Auswirkungen auf Grundwasserökologie. *Grundwasser*, 16, 77–91. DOI: 10.1007/s00767-011-0166-9
- Brons, H.J., Griffioen, J., Appelo, C.A.J., Zehnder, A.J.B. (1991) (Bio)geochemical reactions in aquifer material from a thermal energy storage site. *Water Res.*, 25 (1991), 729-736. DOI: 10.1016/0043-1354(91)90048-U
- Brooker, R.J. (2017). *Biology* (4th ed.). McGraw-Hill Higher Education.
- Casasso, A., Sethi, R. (2019). Assessment and Minimization of Potential Environmental Impacts of Ground Source Heat Pump (GSHP) Systems. *Water*, 11(8), 1573. DOI: 10.3390/w11081573
- Claesson, J., Eskilson, P. (1987). Conductive heat extraction to a deep borehole: thermal analyses and dimensioning rules. *Energy*, 13, 6, 509-527.
- Claesson, T., Gustavsson, G & Ronge, B., 1983: *Löslighet hos grusmaterial och betong i vatten av olika temperatur och sammansättning*. BFR, rapport till forskningsanslag 791768-2. VIAK AB, Göteborg.
- Cowden, C.C., Shefferson, R.P., Mohan, J.E. (2019). *Chapter 7 - Mycorrhizal mediation of plant and ecosystem responses to soil warming*. In Mohan, J.E., *Ecosystem Consequences of Soil Warming* (pp. 61-102). Academic press.
- Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (Text with EEA relevance.) PE/48/2018/REV/1.
- Dyntaxa. (n.d.a) *Megacyclops viridis*.  
<https://www.dyntaxa.se/taxon/info/263801?changeRoot=True> [2020-05-23]
- Dyntaxa. (n.d.b) *Diacyclops languidoides*.  
<https://www.dyntaxa.se/taxon/info/263788?changeRoot=True> [2020-05-23]
- Ek, B.M., Falk, R., Mjönes, L., Thunholm, B., Östergren, I. (2008). Naturligt radioaktiva ämnen, arsenik och andra metaller i dricksvatten från enskilda brunnar. SSI Rapport 2008:15. Statens stålskyddsinstitut.
- Erlström, M., Mellqvist, C., Schwarz, G., Gustafsson, M., Dahlqvist, P. (2016). *Geologisk information för geoenergianläggningar – en översikt* (SGU-rapport 2016:16). Sveriges geologiska undersökning.
- Filius, J.D., Lumsdon, D.G., Meeussen, J.C.L., Hiemstra, T., Van Riemsdijk, W.H. (2000). Adsorption of fulvic acid on goethite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64 (1) (2000). DOI: 10.1016/S0016-7037(99)00176-3
- Foulquier A, Malard F, Barraud S, Gibert J. (2009). Thermal influence of urban groundwater recharge from stormwater infiltration basins. *Hydrol Process*, 23, 1701–1713. DOI: 10.1002/hyp.7305

- Foulquier A, Malard F, Mermillod-Blondin F, Montuelle B, Doledec S, Volat B, Gibert J. (2011). Surface water linkages regulate trophic interactions in a groundwater food web. *Ecosystems*, 14, 1339–1353. DOI: 10.1007/s10021-011-9484-0
- Gehlin, S. (2017). Guide för geoenergi. Offentliga fastigheter. Sveriges Kommuner och Landsting. ISBN 978-91-7585-572-1
- Gehlin, S., Andersson, O. (2019). Geothermal Energy Use, Country Update for Sweden. European Geothermal Congress 2019.
- Geotec. (n.d.). *Vad kostar bergvärme och vad är geoenergi?*  
<https://geotec.se/geoenergi/fragor-och-svar-om-geoenergi/#toggle-id-5> [2020-06-09]
- Griebler, C., Brielmann, H., Haberer, C.M., Kaschuba, S., Kellermann, C., Stumpp, C., Hegler, F., Kuntz, D., Walker-Hertkorn, S., Lueders, T. (2016) Potential impacts of geothermal energy use and storage of heat on groundwater quality, biodiversity, and ecosystem processes. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1391. DOI: 10.1007/s12665-016-6207-z
- Högskolan i Borås. (2020). *Snöbollen*.  
<https://libguides.hb.se/c.php?g=515608&p=4291102> [2020-05-22]
- Jarvis, J., Schnürer, A. (2009). *Mikrobiologisk handbok för biogasanläggningar*. Svenskt gastekniskt center.
- Jesušek, A., Grandel, S., Dahmke, A. (2013). Impacts of subsurface heat storage on aquifer hydrogeochemistry. *Environmental Earth Sciences*, 69, 1999–2012(2013). DOI: 10.1007/s12665-012-2037-9
- Jonsson, A., Lundh, M., Löfström, E. (2005). Hushåll med solvärme – ett svenskt pilotprojekt i Anneberg. ISSN 1403-8307
- Halldin, Swen. (1979). *Ekologiska aspekter på säsongsvärmelager i mark*, Bilaga 3. Sveriges lantbruksuniversitet, institutionen för ekologi och miljövärd.
- Hähnlein S., Bayer P., Ferguson G., Blum P. (2013). Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy*, 59, 914-925. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.04.040
- Kretz, M. (2018, september 27). Dubbel vinst i största geoenergilagret. *Energi & Miljö*, 9.  
<https://www.energi-miljo.se/tidningen/dubbel-vinst-i-storsta-geoenergilagret>
- Ladenberger, A., Carlsson, M., Andersson, M., Bergman, S., Uhlbäck, J., Ohlsson, S.Å., Smith, C., Morris, G., Arvanitidis, N. (2016). *Markgeokemiska kartan. Morängeokemi i södra Norrbotten*. Rapport K 561. Sveriges geologiska undersökning. ISBN 978-91-7403-378-6
- Lerm, S., Westphal, A., Miethling-Graff, R. et al. Thermal effects on microbial composition and microbiologically induced corrosion and mineral precipitation affecting operation of a geothermal plant in a deep saline aquifer. *Extremophiles* 17, 311–327 (2013). <https://doi-org.ludwig.lub.lu.se/10.1007/s00792-013-0518-8>
- Llorens, L., Peñuelas, J. (2005). Experimental evidence of future drier and warmer conditions affecting flowering of two co-occurring mediterranean shrubs. *Int. J. Plant Sci.*, 166(2), 235–245. DOI: 10.1086/427480



- Lindberg, N. 2003. Soil fauna and global change – responses to experimental drought, irrigation, fertilisation and soil warming. Doctor's dissertation. ISSN 1401-6230, ISBN 91-576-6504-4.
- Lundkvist, H, 1983, *Markbiologiska effekter av yttjordvärmsystem*. I: Hård, S (ed.), *Seminarium om miljöeffekter av yttjordvärmsystem*. (Inst. för vattenbyggnad, CTH.) Report Series B:42, p. 10-18. Göteborg.
- Maranón-Jiménez, S., Soong, J. L., Leblans, N. I. W., Sigurdsson, B. D., Peñuelas, J., Richter, A., Asensio D., Fransen, E., Janssens, I. A. (2018). Geothermally warmed soils reveal persistent increases in the respiratory costs of soil microbes contributing to substantial C losses. *Biogeochemistry*, 138(3), 245-260. DOI: 10.1007/s10533-018-0443-0
- Mohan, J.E., Wadgyamar, S.M., Winkler, D.E., Anderson, J.T., Frankson, P.T., Hannifin, R., Benavides, K., Kueppers, L.M., Melillo, J.M. (2019). *Chapter 3 Plant reproductive fitness and phenology responses to climate warming: Results from native populations, communities, and ecosystems*. In Mohan, J.E., *Ecosystem Consequences of Soil Warming* (pp. 61-102). Academic press.
- Nibe. (n.d.). Världsunik värmepumpseffektivitet på xylem. Nibe group. Retrieved March 30, 2020, from <https://www.nibe.eu/sv-se/kunskapsbank/nibe-stories/varldsunik--varmepumpseffektivitet-pa-xylem>
- Nordell, B., Liuzzo scorpo, A., Andersson, O., Rydell, L., Carlsson., B. (2016). *The HT BTES plant in Emmaboda- Operation and Experiences 2010-2015*. Div. Of architecture and water. Luleå university of technology.
- Olausson, T. (2012). Reduktion av järn, mangan och CODMn i dricksvatten – Ett pilotförsök vid Högåsens vattenverk. Uppsala universitet, Institutionen för geovetenskaper
- Possemiersa, M., Huysmansa, M., Batelaana, O. (2014). Influence of Aquifer Thermal Energy Storage on groundwater quality: A review illustrated by seven case studies from Belgium. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2(2014), 20-34. DOI: 10.1016/2014.08.001
- Purkamo, L., Kietäväinen, R., Nuppenen-Puputti, M., Bomberg, M., Claire Cousins, C. (2019). Ultradeep Microbial Communities at 4.4 km within Crystalline Bedrock: Implications for Habitability in a Planetary Context. *Life* 2020, 10(1), 2. DOI: 10.3390/life10010002
- Ronge, B. (1983). *Kemiska problem i samband med lagring av vattenburen energi under mark*. I Nordiskt samarbete om säsongslagring av värme, Rapport R21:1984 (pp. 163-174). Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm.
- SGU. (2013). *Bedömningsgrunder för grundvatten*. SGU-rapport 2013:01.
- Snyder, B.A., Callahan, M.A. (2019). *Chapter 11 Soil fauna and their potential responses to warmer soils*. In Mohan, J.E., *Ecosystem Consequences of Soil Warming* (pp. 61-102). Academic press.
- Sowers, L., York, K.P., Stiles, L. (2006) Impact of thermal buildup on groundwater chemistry and aquifer microbes. *Proceedings of Ecostock Pomona*, Richard Stockton College of New Jersey.

- Sundqvist, U., Graffner, O., Lindblad, T., Borg, G.C., Wallroth, T., Holmström, P., Bank, A., Håkansson, K. (2009). *Undersökning av föroreningar i berggrund*. Rapport 5930. Naturvårdsverket.
- Thulin, B., Hahn, H.J. (2008). *Ecology and living conditions of groundwater fauna*. Technical Report TR-08-06.
- Svensson, T. (1983). *Miljöfrågor och juridik. I Nordiskt samarbete om säsongslagring av värme*, Rapport R21:1984 (pp. 189-193). Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm.
- Sweco. (2010). *Borrhålslager itt emmaboda. Resultat av förundersökningar och projektering*. Uppdragsnummer 1240434.100.
- Troedsson, T., P.-E. Jansson, H. Lundkvist, L. Lundin & R. Svensson. 1982. *Ekologiska effekter av ytjordvärmeuttag*.- Bygg- forskningsrådet R51:1982.
- Valdés, A., Marteinsdóttir, B., Ehrlén, J. (2018). A natural heating experiment: Phenotypic and genotypic responses of plant phenology to geothermal soil warming. *Glob Change Biol.* 2019;25:954–962. DOI: 10.1111/gcb.14525.
- Valencia, E., Méndez, M., Saavedra, N., Maestre, F.T. (2016). Plant size and leaf area influence phenological and reproductive responses to warming in semiarid Mediterranean species. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 21, 31-40. DOI: 10.1016/j.ppees.2016.05.003
- Virgin, H. (2012). *Grundvattenkvalitet i Skåne län – utvärdering av regional provtagning 2007-2010*. Länsstyrelsen i Skåne län. ISBN 978-91-86533-78-6.
- Walentinus, H.G. (1984). *Ytjordvärme- och sjövärmeanläggningar. Omgivningspåverkan och driftproblem — en enkätundersökning*. Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm. ISBN 91-540-4232-1



**LUNDS**  
UNIVERSITET

[WWW.CEC.LU.SE](http://WWW.CEC.LU.SE)  
[WWW.LU.SE](http://WWW.LU.SE)

Lunds universitet

Miljövetenskaplig utbildning  
Centrum för miljö- och  
klimatforskning  
Ekologihuset  
223 62 Lund