

# Laboratorietesting av en kjemikalie som reduserer og løser opp jernoksid. Vurdering av anvendelighet til brønnrensing

Av Lars Aaberg Stenvik

Lars Aaberg Stenvik er sivilingeniør i hydrogeologi og stipendiat ved NTNU, Institutt for geovitenskap og petroleum.

## Summary

*Laboratory testing of a chemical which reduces and dissolves iron oxide incrustations. Assessment of applicability to well rehabilitation.* Groundwater often contains dissolved iron which will be oxidized in contact with oxygen to form iron oxide precipitates. The precipitates will incrust and clog wells, and necessitate well cleaning. International experience has shown that a combination of chemical and mechanical cleaning yields the best results. Chemical well cleaning is seldom applied in Norway, due to environmental concerns. The reducing chemical (sodium) dithionite ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) has previously demonstrated high dissolution capacity of synthetic iron oxides, reacts at neutral pH, and leaves relatively non-hazardous residues. This article presents a laboratory experiment with dissolution of iron oxide incrustations from an open-loop ground source heat pump system in Melhus, Norway in a mixture of dithionite and bicarbonate. This resulted in 37-45 wt.-% of the incrustations being dissolved, and a comparable reaction efficiency as with synthetic iron oxides. The chemicals are relatively cheap. Cleaning effect, environmental concerns and economy indicate that the chemicals should be tested on Norwegian wells. Still, some technical challenges must be overcome before the method can be applied.

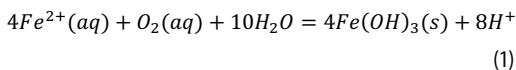
## Sammendrag

Grunnvann inneholder ofte løst jern som ved kontakt med oksygen feller ut som jernoksider. I grunnvannsbrønner medfører dette gjentetting av f.eks. brønnfiltre, og behov for brønnrensing. Internasjonal erfaring har vist at kombinasjonen av kjemiske og mekaniske rensemetoder gir best effekt. Kjemisk rens er lite brukt i norske brønner. Den reduserende kjemikalien (natrium)-ditionitt ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) virker under nøytral pH, gir relativt ufarlige uorganiske restprodukter, og har tidligere vist god oppløsningsevne på syntetiske jernoksider. I denne artikkelen presenteres et laboratorieforsøk med oppløsning av jernoksid-utfellinger fra et grunnvarmeanlegg i Melhus i ditionitt, bufret med bikarbonat. Resultatene viser at 37-45 vekt-% av utfellingsprøven hadde blitt oppløst etter to timer, og sammenlignbar reaksjonseffektivitet (mengde forbrukt vs. tilsatt kjemikalie) som med syntetiske jernoksider. Kjemikaliene er relativt billige og lett tilgjengelige. Renseeffekt, miljøhensyn og økonomi tilsier at kjemikalien først bør uttestes på grunnvarmebrønner. Enkelte tekniske utfordringer knyttet til utføring av rens må løses før metoden kan anvendes i Norge.

## Introduksjon

Løste og suspenderte stoffer i grunnvannet kan felle ut i brønner som tar ut eller infiltrerer vann. Dette medfører større friksjonsmotstand per utpumpet vannvolum, økte pumpekostnader, og i verste fall gjentetting av brønnene. Særlig er jernoksid-utfellinger et verdensomspennende problem for grunnvannsbrønner (Houben & Treskatis, 2007), både til drikkevanns- (van Beek, 1989; Banks, 1992; Walter, 1997; Dimkić et al., 2012; Bustos Medina et al., 2013), irrigasjons- (Stuetz & McLaughlan, 2004), drenerings- (Weidner et al., 2012) og grunnvarmeformål (Lindblad-Påsse, 1986; Bakema, 2001; Woyessa, 2012; Riise, 2015; Possemiers et al., 2016).

Ved oksygenfattige betingelser vil jern reduseres og løses som  $Fe^{2+}$ -ioner i grunnvannet. Dersom det jernrike grunnvannet kommer i kontakt med oksygen ( $O_2$ ) vil  $Fe^{2+}$ -ionene oksideres til  $Fe^{3+}$ -ioner. Rundt nøytral grunnvanns-pH vil  $Fe^{3+}$  danne uløselige, oransje/rustrøde jern(hydr)oksider (Houben, 2004):

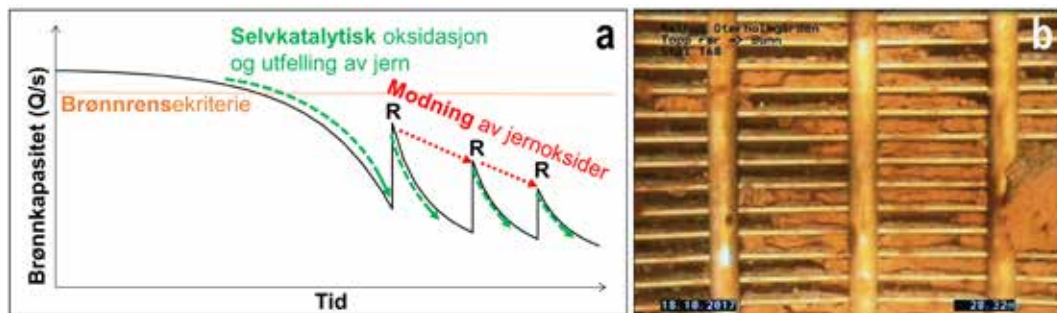


Under uttak av grunnvann er det fare for at reaksjonen i ligning 1 finner sted. Uttaksbrønner fungerer ofte som en «redoks-kortslutning» der dypt, jern-rikt grunnvann mixes med grunt, oksygenrikt grunnvann (van Beek, 1989). Mixing kan også forkomme som følge av horisontale vannkvalitetsvariasjoner (Stuetz & McLaughlan, 2004). Videre er det fare for at det

utpumpede grunnvannet kommer i kontakt med oksygen ved transport gjennom lekkende rør(komponenter) (Bakema, 2001). Dette forklarer hvorfor brønnsystemer som pumper jernrikt vann ofte opplever gjentettingsproblemer i filtre, pumper, rør og varmevekslere, og behov for kostbare rens tiltak (Houben & Treskatis, 2007).

Det amorfe jernhydroksidet *ferrihydritt* ( $Fe(OH)_3$ ) som først dannes vil med tiden modnes til den mer stabile forbindelsen goethitt ( $FeOOH$ ) (Houben, 2003a). Modningen innebærer en re-krystallisering der overflatearealet og vanninnholdet minker. Re-krystalliseringen bruker måneder til år, og skjer raskere ved høyere pH (Schwertmann & Murad, 1983). I et brønnens-perspektiv vil goethitt med sitt lave overflateareal være vanskeligere å løsne og fjerne enn ferrihydritt (Houben, 2003b). Brønnrehabilitering bør derfor utføres før en for stor andel utfellingene har modnet til goethitt. Dersom derimot rehabilitering utføres for sent, vil det bli vanskelig å gjenopprette brønnens opprinnelige uttakskapasitet, se Figur 1a.

Akkurat hvor ofte en brønn bør renses er vanskelig å si på generelt grunnlag. Det finnes likevel enkelte veiledende tall, både for tidsintervall mellom rehabiliteringer og hvor stor nedgang i *spesifikk brønncapasitet*  $Q/s$  som kan tolereres før tiltak iverksettes. Her representerer  $Q$  pumperate, og  $s$  senkning eller heving av grunnvannsspeilet lokalt, henholdsvis i en uttaks- eller injeksjonsbrønn. Houben & Treskatis (2007) hevder en bør forvente å måtte rens



Figur 1. Brønncapasitet ( $Q/s$ ) logget mot tid for en brønn med jernoksid-utfellinger. R = rehabilitering. Modifisert etter Houben (2004) (a). Bilde fra kamerainspeksjon av brønnfilter tilknyttet grunnvarmesystem i Melhus (Foto: Gjøvaag AS) (b).

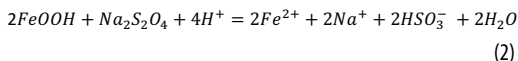
løsmassebrønner mellom hvert hele og femte år. Det er uenighet hvor stor Q/s-nedgang som kan tolereres før rehabilitering utføres. Forskjellige forfattere har foreslått at brønnen bør rehabiliteres etter 10% (McLaughlan, 2002, i Houben & Treskatis, 2007), 20% (Houben & Treskatis, 2007), 25% (Driscoll, 1989, i Houben & Treskatis, 2007) og 30% (Hilmo & Gurigard, 2017) kapasitetsnedgang. Q og s er derfor to essensielle parametere å overvåke, for å vurdere om og når brønnen bør renses, se Figur 1a.

Like mye som «når», er «hvordan» en brønnrensens essensielt. Brønnrensing deles inn i to hovedkategorier: kjemiske og mekaniske metoder. Mekanisk rens deles videre inn i termiske, hydrauliske og impuls-metoder (Houben & Treskatis, 2007). Alle metodene har til hensikt å løsne og fjerne utfellingene fra brønnen, ut fra informasjon om hvor og hva slags utfelling som tetter igjen brønnen. Kamerainspeksjon av brønner kan avsløre hvor i brønnen utfellingene er konsentrert, samt bidra til å karakterisere utfellingene, se Figur 1b. Vannkjemiske målinger og mineralogiske analyser av utfellingsmaterialet vil hjelpe med å fastsette utfellingstype. Ut fra denne informasjonen, kan en eller flere passende kjemisk eller mekanisk renseprosedyre(r) velges. Erfaring tilsier at best brønnrenseeffekt oppnås ved en kombinasjon av kjemisk og mekanisk rens (van Beek, 1989; Houben & Treskatis, 2007).

Jernoksidens kjemiske egenskaper gir enkelte implikasjoner for hvordan brønner med denne typen utfelling bør renses. Ligning 1 viser at jernoksider er mer løselig ved lavere pH og mer reduserende (dvs. mer oksygenfattige) forhold. Aktuelle renskemikalier er dermed sterke syrer og reduserende midler. Videre oksiderer og utfeller løst jern lettere når det er adsorbent til jernoksidoverflater. Jernoksid-utfellingene gir også grobunn for forskjellige *jernoksidende bakterier*, som nyttiggjør seg av energien fra oksidasjon av jern til egen metabolisme (Houben & Treskatis, 2007). Dette medfører en *selvkatalytisk* effekt, der oksidasjon og utfelling av jern skjer raskere etter hvert som mer jern allerede har oksidert og utfelt (Tamura et al.,

1976). Dette stemmer også med praktiske erfaringer, der brønner som sliter med jernoksid-utfellingene ofte kan driftes uten problemer over flere år før problemene oppstår og raskt forverres (Houben, 2004), se Figur 1a. Den selvkatalytiske effekten understreker også viktigheten av å få rens bort alle jernoksid-utfellingene under brønnrensing. Hvis ikke vil en i verste fall øke utfellingsraten, pga. mer jernoksid-overflateareal frigjøres, og raskt måtte rens brønnen igjen, se Figur 1a etter rens (R).

Laboratorietesting av diverse syrer og reduserende midler, viste at det reduserende middelet (*natrium*)dionitt ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) løste opp både fersk ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) og modnet ( $\text{FeOOH}$ ) jernoksid mest effektivt. Reaksjonsligningen er gitt ved (Houben, 2003b):



der  $\text{HSO}_3^-$  er *bisulfitt*. Ifølge Mehra & Jackson (1960) løser ditionitt jernoksider mest effektivt rundt nøytral pH. Derfor bufres reaksjonen med (natrium)bikarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ). Restproduktet fra denne reaksjonen er jern, natrium, sulfat (oksidert sulfitt) og bikarbonat, altså relativt ufarlige, uorganiske forbindelser som allerede finnes naturlig i grunnvannet. Dionitt bufret med bikarbonat utgjør dermed mindre risiko for skade på brønnmaterialet og naturmiljø enn alternative rensmidler, f.eks. sterke syrer (Houben & Treskatis, 2007). Disse egenskapene gjør ditionitt til et attraktivt brønnrensekemikalie. Kombinasjonen av ditionitt og bikarbonat med kompleksdannere som hindrer re-utfelling av det løsnede jernet, har blitt patentert som *Aixtractor*® 2.0. *Aixtractor*® 2.0 har sammen med seksjonsvis filtertrekking (hydraulisk rens) vist gode resultater også i praksis (Stuyfzand, 2007; Treskatis & Purnpää-Schäfer, 2013).

I norsk sammenheng er overvåking og rehabilitering av brønner et forsømt område. Banks (1992) avdekket i en spørreundersøkelse for norske grunnvannsverk «deprimerende» lav grad av overvåking og planer for rehabilitering. Denne tendensen virker å vedvare nærmere

30 år etter (Hilmo & Gurigard, 2017; Stenvik, 2020). Følgelig oppdages ofte gjentettingsproblemer for sent, og uten gode rutiner for å rense brønnene. Alternativet blir da ofte å bore nye brønner.

Så vidt forfatteren bekjent, virker det også å være en viss (sunn) skepsis mot å tilføre (rense) kjemikalier til grunnvannsmagasinet, særlig til drikkevannskilder, men uten nødvendigvis å vurdere hver enkelt kjemikalies kost mot nytte. Som et alternativ har en kombinert termisk og hydraulisk rensemetode blitt utviklet av Hilmo & Gurigard (2017). Metoden omfatter at varmt vann (nær 100 °C) tappes i brønnen over tid ( $\geq 12$  timer), før seksjonsvis mammutpumping med trykkluft utføres opp og ned langs brønnfilteret.

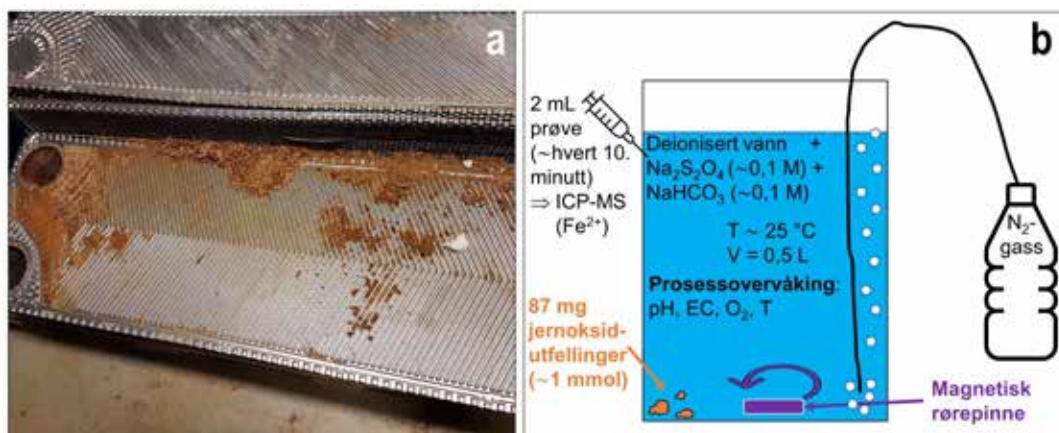
Denne artikkelen har til hensikt å løfte fram viktigheten av jevnlig overvåking og vedlikehold av grunnvannsbrønner, med særlig fokus på vedlikehold. Laboratorietesting av en reduserende kjemikalies evne til å løse opp jernoksidutfellinger fra et åpent grunnvarmeanlegg i Melhus vil bli presentert. Praktisk bruk av renskjemikalien vil også gjennomgås ut fra et kost-nytte-perspektiv for en grunnvarmebrønn i Melhus, sammenlignet med den kombinerte hydrauliske og termiske renseprosedyren til Hilmo & Gurigard (2017).

## Metode

Vann iblandet natriumditionitt og -bikarbonats evne til å redusere og løse opp jernoksidutfellinger ble undersøkt, ved hjelp av et laboratorieeksperiment inspirert av Houben (2003b). Til forskjell fra Houben (2003b) ble det i dette eksperimentet ikke brukt syntetisk framstilte jernoksid, men jernoksidutfellinger innhentet i felt.

Jernoksidutfellinger fra varmeveksleren til Lena terrasses grunnvarmeanlegg i Melhus ble prøvetatt under rens høsten 2018, se Figur 2a. XRD-analyse av materialet viste at den krystalline delen (10%) av prøven hovedsakelig bestod av goethitt ( $\text{FeOOH}$ ), med mindre mengder sideritt ( $\text{FeCO}_3$ ) og kvarts ( $\text{SiO}_2$ ). ICP-MS-analyse av den samme utfellingsprøven oppløst i  $\text{HNO}_3$ -syre indikerte at mellom 59 og 71% av materialet bestod av jernoksid, avhengig av mengdeforholdet mellom amorf ferrihydritt ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) og modnet goethitt ( $\text{FeOOH}$ ) (Stenvik et al., 2022).

Eksperimentoppsettet og -prosedyren er vist i Figur 2b. Et beger med deionisert vann ( $V = 0.5$  L) ble tilsatt 8,71 g  $\sim 50$  mmol) natriumditionitt (Thermo Scientific,  $\geq 85\%$  renhet) og 4,20 g  $\sim 50$  mmol) natriumbikarbonat (VWR Chemicals,  $\geq 99\%$  renhet). Kjemikaliene fikk god tid til å løses i vannfasen før eksperimentet. En magnetisk rørepinne ble brukt for å sirkulere



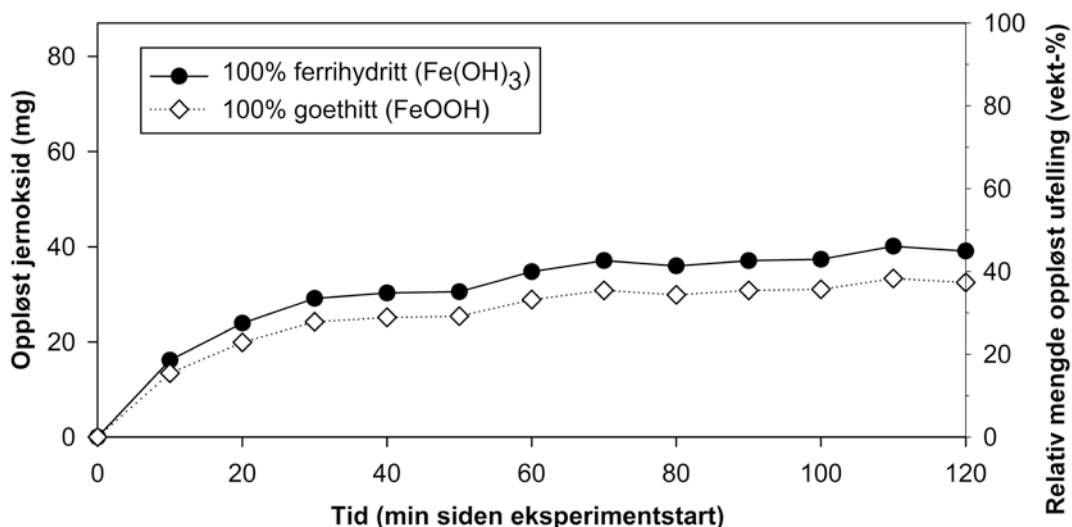
Figur 2. Jernoksidutfellinger fra varmeveksler tilknyttet åpent grunnvarmesystem i Melhus (Foto: Randi Kalskin Ramstad) (a). Eksperimentoppsett inspirert av Houben (2003b) (b).

vannet i karet, mens nitrogen-gass ( $N_2$ ) kontinuerlig boblet inn i bunnen av karet for å holde vannet oksygenfritt. Videre ble 87 mg ( $\sim 1$  mmol goethitt) utfellingsmateriale tilsatt begeret. Det molare størrelsesforholdet mellom ditionitt/bikarbonat og jernoksid (50:1) var høyere enn i ligning 2, for å sørge for å ha overskudd av kjemikalie som kunne reagere med jernoksidene. Med jevne mellomrom ( $\sim$ hvert tiende minutt) ble det tatt vannprøver (2 mL) som ble filtrert (0,2  $\mu$ m). 1 mL av vannprøven ble pipetert i et prøveglass, fortynt 1:9 med en 0,1M  $HNO_3$ -løsning, og analysert for  $Fe^{2+}$ -innhold med ICP-MS (Perkin Elmer ELAN DRC II).  $Fe^{2+}$ -innholdet, og molvekt av  $Fe(OH)_3$  og  $FeOOH$ , ble brukt til å omregne til vekt-% oppløst jernoksidutfelling relativt til total mengde tilsatt utfellingsprøve (87 mg). I tillegg ble prosessparameterne pH (WTW Sensolyt 900-P), elektrisk konduktivitet (EC) (WTW TetraCon 925/C), løst oksygen ( $O_2$ ) (WTW FDO 925) og temperatur (T) (alle tre forannevnte sensorer) målt med jevne mellomrom ( $\sim$ hvert 40. minutt). Eksperimentets varte ca. 2 timer, og ble utført i kjemisk-/mineralogisk laboratorium ved Institutt for geovitenskap og petroleum, NTNU.

## Resultater

Måling av prosessparameterne  $O_2$ , pH, EC og T forsikret at oppløsningseksperimentet gikk etter planen.  $O_2$ -målingene ( $\leq 0,1$  mg/L) viste at nitrogen-gassen effektivt tømte prøvebeholderen for atmosfærisk gass, mens temperaturmålingene viste at eksperimentet ble utført ved stabil temperatur ( $\sim 24-25$  °C). pH holdt seg ca. nøytral gjennom eksperimentet, som anbefalt av Mehra & Jackson (1960). Riktignok falt pH fra 7,3 til 6,9 gjennom eksperimentet. Den elektriske ledningsevnen økte gjennom hele eksperimentet, men med avtakende rate mot slutten av målingene. Dette tyder på at mye jernoksid ble redusert og oppløst innledningsvis, men at reaksjonen etter hvert avtok.

ICP-MS-målinger av konsentrasjon løst jern, omregnet til relativ mengde oppløst utfelling, stemmer overens med elektrisk ledningsevne-målingene, se Figur 3. Mesteparten av jernet ble løst under første halvdel av eksperimentet, men mengde utfelt jern økte gjennom hele eksperimentet. Enkelte unntak med nedgang i mengde løst jern (f.eks. mellom 70 og 80 minutter) tyder på konsentrasjonsvariasjoner i løsningen og/eller unøyaktigheter i prøvetakingen. Til sammen ble 0,37 mmol jernoksid, tilsvarende mellom



Figur 3. Faktisk og relativ mengde oppløst jernoksid (total mengde utfelling = 87 mg) vs. tid i løsning bestående av deionisert vann, natriumditionitt og natriumbikarbonat. Oppløst mengde jernoksider ble beregnet ut fra ICP-MS-analyse av  $Fe^{2+}$ , og antakelse om at løst jern stammet fra ferrihydritt (øvre grense) og goethitt (nedre grense).

37-45 vekt-% av utfellingsprøven, oppløst av vann-ditionitt-bikarbonat-løsningen.

## Diskusjon

Den oppløste mengden jernoksider (37-45%) i dette eksperimentet er lavere enn den estimerte mengden jernoksider (59-71%) i en sammenlignbar prøve (Stenvik et al., 2022). Dette kan ha flere mulige forklaringer:

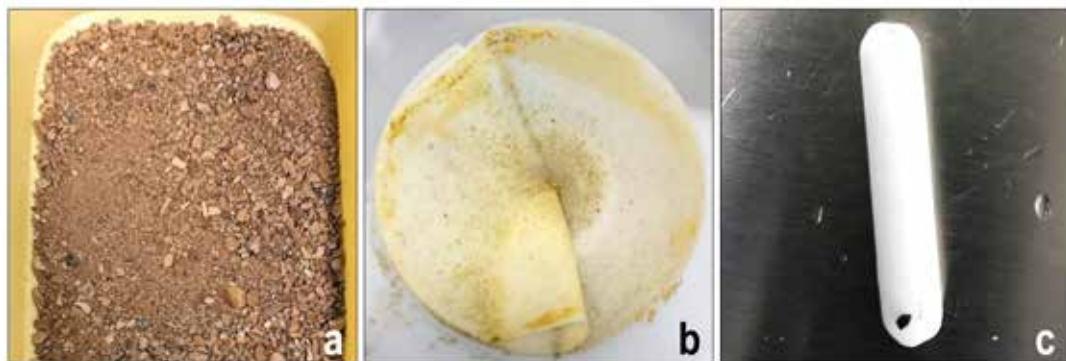
- 1) Siden prøvetaking i 2018 har prøven blitt lagret i romtemperatur i en ikke lufttett boks. Dette medfører fare for at prøven kan ha blitt modnet til å bestå av mer goethitt under eksperimentet i mai 2022 enn under prøvetaking i 2018. Ettersom goethitt har mindre overflateareal og er mer stabil enn ferrihydritt, vil modnet jernoksid være vanskeligere å løse opp med  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ .
- 2) Naturlige variasjoner i mengde jernoksider i utfellingsprøven kan også forekomme. En tidligere XRD-analyse har vist at utfellingene fra Lena terrasse bestod av mest jernoksid, men mindre mengder sideritt ( $\text{FeCO}_3$ ) og kvarts ( $\text{SiO}_2$ ) (Stenvik et al., 2022). Utfellingsprøven fra Lena terrasse ser ut til å være relativt inhomogen, se Figur 4a. Dette underbygger risikoen for naturlige variasjoner i mineralinnhold.
- 3) Avviket mellom oppløst (37-45%) og beregnet (59-71%) (Stenvik et al., 2022) mengde jernoksider kan også skyldes feilberegninger. ICP-MS-analyse av utfelling

oppløst i  $\text{HNO}_3$  ligger til grunn for beregning av mengden jernoksid i utfellingsprøven (59-71%). Her ble det antatt at alt løst jern ( $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ) stammet fra jernoksid (Stenvik et al., 2022). Det er likevel fare for at oppløsning av syreløselig  $\text{FeCO}_3$  bidro til et overdrevet estimat.  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$  løser derimot ikke  $\text{FeCO}_3$ . Dermed er ikke ICP-MS-analyser av utfellinger oppløst i  $\text{HNO}_3$  og  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$  nødvendigvis sammenlignbare.

Sammenligning mellom oppløst mengde jernoksider i dette eksperimentet med tidligere estimert jernoksid-konsentrasjon i utfellingene har derfor begrenset relevans.

Renskjemikalie- og jernoksid-løsningen ble filtrert gjennom et  $0,45 \mu\text{m}$ -filter etter eksperimentet. Dette førte til at en mengde mindre, sorte sedimenter, i tillegg til oransje jernoksidlignende slam, ble filtrert ut, se Figur 4b. Filtringen skjedde en stund etter at eksperimentet ble fullført. Deler av jernoksid-slammet bestod derfor trolig av re-utfelt jern, etter at  $\text{N}_2$ -gass ikke lenger holdt løsningen oksygen-fri. Noe av det sorte materialet festet seg til den magnetiske rørepinnen, se Figur 4c. Dette materialet bestod trolig av *magnetitt* ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) korrodert fra brønn-systemet.

Den filtrerte utfellingsprøven etter rens virker mer inndelt etter mineralfaser (Figur 4b og c) enn utfellingsprøven før rens (Figur 4a). Få av de



Figur 4. Sammenligning av utfellingsprøve før (venstre) og etter (midten, høyre) laboratorieforsøk. Bildet i midten viser filteret ( $0,45 \mu\text{m}$ ) som kjemikalieløsningen ble silt gjennom etter eksperimentet, mens bildet til høyre viser den magnetiske rørepinnen med magnetiske deler fra utfellingsprøven som har festet seg (svart bit på bunnen).

filtrerte sedimentene så ut til å være omgitt av en oransje hinne med jernoksider. Natriumdittionitt- og bikarbonat-blandingen ser dermed ut til å ha en god evne til å løse jernoksid-utfellinger fra silikatholdige sedimenter, noe som er hovedformålet ved kjemisk rensing av et brønnfilter.

Mengden oppløst jernoksid relativt til total mengde jernoksid utfellinger virker å være noe lavere i dette eksperimentet ( $37\% / 59\% = 63\%$ ), sammenlignet med mengden oppløst syntetisk jernoksid (75-100%) i laboratorieforsøket til Houben (2003b). Likevel er *reaksjonseffektiviteten* (*RE*) sammenlignbar for eksperimentet i denne ( $RE = 0,37\%$ ) og Houben (2003b) sin studie ( $RE = 0,38-0,5\%$ ), etter samme reaksjonstid (to timer) og med samme mengde  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$  tilsatt ( $\sim 50$  mmol):

$$RE(\%) = \frac{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4 \text{ forbrukt (mol)}}{\text{Total Na}_2\text{S}_2\text{O}_4 \text{ tilsatt (mol)}} * 100\% \quad (3)$$

$$= \frac{0,5 * \text{løst jernoksid (mol)}}{\text{Total Na}_2\text{S}_2\text{O}_4 \text{ tilsatt (mol)}} * 100\%$$

der løst jern leses av Figur 3. Lavest *RE* i Houben (2003b) sitt laboratorieforsøk ble oppnådd for modnede goethitter med lite overflateareal. Dette indikerer at ditionitt har tilnærmet like god evne til å løse naturlige som syntetiske goethitt-utfellinger, men at det kreves et relativt høyt forholdstall mellom mengde tilsatte kjemikalier og utfellinger. Ditionitts gode renseevne for jernoksider (Houben, 2003b) rettferdiggjør derfor en vurdering av kjemikalienes anvendelighet til norske brønner gjentatt av jernoksid-utfellinger.

## Ditionitts anvendelighet som brønnrensem metode

Anvendeligheten av ditionitt og bikarbonat som brønnrensem metode avhenger av økonomiske, tekniske og miljømessige forhold, i tillegg til kjemisk oppløsningsevne.

Det er økonomisk fordelaktig dersom kjemisk rensing med ditionitt ikke øker kostnadene vesentlig sammenlignet med gjeldende rensem metode(r). Returbrønnen til grunnvarmeanlegget på Lena terrasse i Melhus har blitt rensert med Hilmo and Gurigard (2017) sin termiske

og hydrauliske metode, senest i juni 2021. Femten timers drift av dieseldrevet fyrkjel til å varme opp vann som ble tappet i returbrønnen kostet da 5850 kr. Her bør det også nevnes at drivstoff-prisene har økt med 61-62% mellom juni 2021 til juni 2022 (Statistisk sentralbyrå, 2022). Mengden kjemikalier som kreves per brønn vil avhenge av mengde utfellinger i brønnfilteret. Cleanwells GbR (u.å.) angir likevel som en tommelfingerregel at  $c = 30$  g Aixtractor 2.0° kreves per liter med borehull som skal behandles. Returbrønnen til det åpne grunnvarmeanlegget på Lena terrasse i Melhus har borehulldiameter ( $\varnothing$ ) på 168 mm og filterørrelengde ( $l_f$ ) på 10 m. Med andre ord kreves det  $\pi\varnothing^2 / 4 * L_f * c \approx 6,6$  kg Aixtractor 2.0° til rens av brønnen. Dersom ekvimolart forhold mellom  $\text{NaHCO}_3$  og  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$  antas i Aixtractor 2.0°, som i eksperimentet i denne studien, kreves det ca. 2,2 kg  $\text{NaHCO}_3$  og 4,4 kg  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ . Ifølge et pristilbud fra VWR (mai 2022) koster 10 kg  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$  4800 kr og 5 kg  $\text{NaHCO}_3$  1250 kr ekskl. mva. uten bedriftsavtale. Med merverdiavgift på 25% kan derfor renskjemikalienes antas å koste  $\leq 7600$  kr. Kjemisk rens med ditionitt og bikarbonat virker derfor økonomisk konkurransedyktig med den termiske delen av rensem metoden til Hilmo & Gurigard (2017).

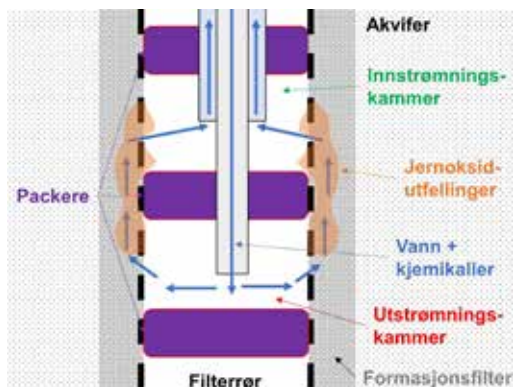
Videre har den kombinerte termiske og hydrauliske rensem metoden til Hilmo & Gurigard (2017) slitt med å rehabilitere returbrønnen på Lena terrasses tilbake til opprinnelig kapasitet (Q/s). Kapasiteten reduseres også raskt etter rens, slik at returbrønnen nå renses årlig. Lignende problemer er også erfart ved grunnvarmeanlegget til Oslo lufthavn på Gardermoen (Woyessa, 2012). Dette tyder på at filtrene er tettet igjen med modnede, tungtløselige jernoksid-utfellinger, som bidrar til rask selvkatalytisk oksidasjon og utfelling av jern etter rens. Brønneierne bør derfor vurdere å teste ut en ny brønnrensem metode, f.eks. en kombinert kjemisk og mekanisk rens med ditionitt.

Det er mer usikkerhet knyttet til den praktiske gjennomføringen av brønnrens med ditionitt og bikarbonat. Houben & Treskatis (2007) anbefaler at kjemikalieblanding

sirkuleres gjennom vertikalt avgrensede deler av brønnfilteret med et *multikammer packer-system*, se Figur 5. Sirkuleringen oppnås ved å injisere kjemikalie i et utstrømningskammer, og pumpe blandingen ut fra et separat innstrømningskammer. Etter forfatterens kjennskap er ingen norske bore- eller (brønn)rensefirmaer i besittelse av et slikt eller lignende packer-system(er). Systemet må spesialbygges, og kreve både investeringskostnader og teknisk kompetanse. Erfaringer fra bl.a. Finland og Tyskland der lignende systemer har blitt bygget vil derfor være verdifulle til design og bygging av packer-systemet.

Miljømessig vil termiske rensemetoder ofte være gunstigere enn kjemiske rensemetoder. For eksempel kan nærliggende drikkevannsbrønner være i drift mens termisk brønnrens utføres (Hilmo & Gurigard, 2017). Videre er termisk forurensing av naturmiljø antakeligvis et mindre problem enn kjemikalieforurensning. Det må framheves at restproduktene av rensing med  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$  og  $\text{NaHCO}_3$  er relativt ufarlige, uorganiske forbindelser med høye eller ingen grenseverdier i Drikkevannsforskriften (2016), og nøytral pH. Akviferer som kun brukes til grunnvarmeformål, f.eks. Melhus akviferen, bør derfor kunne gis tillatelse til uttesting av kjemisk brønnrensing med ditionitt.

Aixtractor 2.0<sup>o</sup> inneholder i tillegg til  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$  og  $\text{NaHCO}_3$  en kompleksdanner som



Figur 5. Multikammer packer-system brukt til seksjonsvis brønnrens. Kjemikalieblanding sirkuleres fra utstrømnings-, via formasjonsfilteret med utfellinger, til innstrømningskammeret. Modifisert etter Detay (1997), i Houben & Treskatis (2007).

sikrer at det oppløste jernet forblir løst, og ikke re-utfeller. Dette kan medføre større vanskeligheter med å få tillatelse til bruk av kjemikalien. Forfatteren anbefaler derfor at en blanding utelukkende bestående av  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$  og  $\text{NaHCO}_3$  først uttestes, før mer komplekse kjemikalieblandinger eventuelt vurderes nødvendige.

## Konklusjon

Det utførte laboratorieforsøket viser at en løsning bestående av 0,5 L deionisert vann, ~0,1 M av reduktanten  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$  og bufret med ~0,1 M  $\text{NaHCO}_3$  evnet å løse 37-45 vekt-% av en utfellingsprøve (87 mg) fra et åpent grunnvarmesystem i Melhus. Utfellingsprøven bestod hovedsakelig av goethitt og ferrihydritt, og mindre mengder kvarts og sideritt. Selv om tilsynelatende ikke all jernoksid i utfellingsprøven ble oppløst, var reaksjonseffektiviteten sammenlignbar med et tidligere laboratorieeksperiment med syntetiske jernoksider. I sistnevnte laboratorieeksperiment, der flere kjemikalier ble uttestet, viste natriumdionitt ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) seg å ha best renseevne for jernoksider. Med tanke på oppløsningsevne virker derfor ditionitt som et foretrukket valg til kjemisk brønnrensing av jernoksidutfellinger.

Anvendeligheten av ditionitt avgjøres av økonomiske, tekniske og miljømessige forhold. Prisen på ditionitt-kjemikalier er konkurransedyktig med oppvarmingskostnader relatert til termisk brønnrensing. Rensing med ditionitt er mer krevende teknisk, ettersom sirkulering av renskjemikalie gjennom brønnfilteret bør utføres med et spesialbygget *multikammer packer-system*. Miljømessig gir rensing med ditionitt og bikarbonat de ufarlige restproduktene jern, natrium, sulfat og bikarbonat, og nøytral pH. Dette er fordelaktig sammenlignet med andre kjemiske rensedmidler, både mtp. fare for spredning i naturmiljøet og skade på brønnmaterialet. Tillatelse til testing av kjemikalien i akviferer som brukes til åpne grunnvarmesystemer bør derfor kunne gis. Utprøving anbefales derfor i grunnvarmebrønner der termisk og/eller hydraulisk brønnrensing ikke har gitt ønsket renseeffekt.



## Takksigelser

Det presenterte arbeidet er en del av forskningsprosjektet ORMEL 2 (Optimal ressursutnyttelse av grunnvann til oppvarming og kjøling i Melhus), støttet av Regionalt forskningsfond Midt-Norge (tildelingsnummer 284965). ORMEL 2 er et samarbeid mellom Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), Norges geologiske undersøkelse (NGU), Asplan Viak AS, Melhus kommune og Gjøvaag AS. Jeg vil takke alle involverte partnere i forskningsprosjektet for deres støtte. Spesielt vil jeg takke professor Bjørn Frengstad og førsteamanuensis II Randi Kalskin Ramstad ved Institutt for geovitenskap og petroleum, NTNU for oppfordring og støtte til å gjennomføre laboratorieeksperimentet. Videre rettes det en stor takk til senioringeniør Laurentius Tjihuis og overingeniør Torill Sørløkk ved kjemisk-/mineralogisk laboratorium ved Institutt for geovitenskap og petroleum, NTNU, for støtte under planlegging og gjennomføring av laboratorieforsøket.

## Referanser

Bakema, G. (2001). *Well and Borehole Failures and Solutions in Underground Thermal Energy Storage* (2/9805/GW). Arnhem, NL: IF Technology.

Banks, D. (1992). *Grunnvannsbrønner : kontroll, vedlikehold, rehabilitering. GiN-veileder 13* (Skrifter 108). Trondheim: NGU

Bustos Medina, D.A., van den Berg, G.A., van Breukelen, B.M., Juhász-Holerman, M., & Stuijzand, P.J. (2013). Iron hydroxide clogging of public supply wells receiving artificial recharge: Near-well and in-well hydrological and hydrochemical observations. *Hydrogeology Journal*, 21(7), 1393-1412. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1005-0>

Cleanwells GbR. (u.å.). *AIXTRACTOR 2.0\* brochure*. Hentet 10. mai 2022 fra [http://cleanwells.de/downloads/en/aixtractor\\_2\\_en.pdf](http://cleanwells.de/downloads/en/aixtractor_2_en.pdf)

Detay, M. (1997). *Water Wells - Implementation, Maintenance and Restoration*. London, UK: John Wiley and Sons.

Dimkić, M., Pušić, M., Obradović, V., & Kovačević, S. (2012). The effect of certain biochemical factors on well clogging under suboxic and mildly anoxic conditions. *Water Sci Technol*, 65(12), 2206-2212. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.129>

Drikkevannsforskriften. (2016). *Forskrift om vannforsyning og drikkevann* (FOR-2016-12-22-1868). Lovdata. <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2016-12-22-1868>

Driscoll, F.G. (1989). *Groundwater and wells* (2. utgave). St. Paul, US: Johnson Division.

Hilmo, B. O., & Gurigard, R. (2017). Rehabilitering av filterbrønner – erfaringer fra Norge. *Grundvattendagarna*, 7.-8. november 2017, Uppsala, Sverige.

Houben, G. (2003a). Iron oxide incrustations in wells. Part 1: genesis, mineralogy and geochemistry. *Applied Geochemistry*, 18(6), 927-939. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00242-1](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00242-1)

Houben, G. (2003b). Iron oxide incrustations in wells. Part 2: chemical dissolution and modeling. *Applied Geochemistry*, 18(6), 941-954. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00185-3](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00185-3)

Houben, G. (2004). Modeling the Buildup of Iron Oxide Encrustations in Wells. *Groundwater*, 42(1), 78-82. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2004.tb02452.x>

Houben, G., & Treskatis, C. (2007). *Water well rehabilitation and reconstruction*. New York, US: McGraw-Hill.

Lindblad-Påsse, A. (1986). *Järnutfällningsproblem i grundvattenvärmsystem* (R109:1986). Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning.

McLaughlan, R. (2002). *Managing water well deterioration*. Lisse, NL: Balkema.

Mehra, O.P., & Jackson, M.L. (1960). Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, 5, 317-327. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-009235-5.50026-7>

Possemiers, M., Huysmans, M., Anibas, C., Batelaan, O., & Steenwinkel, J. (2016). Reactive transport modeling of redox processes to assess Fe.sub.3 precipitation around aquifer thermal energy storage wells in phreatic aquifers. *Environmental Earth Sciences*, 75(8), 1. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5398-7>

Riise, M. H. (2015). *Praktisk guide for grunnvarmeanlegg basert på oppumpet grunnvann*. [Masteroppgave]. NTNU, Trondheim.

Schwertmann, U., & Murad, E. (1983). Effect of pH on the Formation of Goethite and Hematite from Ferrihydrite. *Clays and Clay Minerals*, 31(4), 277-284. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1983.0310405>

Statistisk sentralbyrå. (2022). *Sal av petroleumprodukt og flytande biodrivstoff*. Hentet 10. mai 2022 fra <https://www.ssb.no/statbank/table/09654/>

Stenvik, L. A. (2020). Utfellingsproblemer med jern og mangan i norske drikkevannsbrønner [Eng: Iron and manganese incrustations in Norwegian groundwater works. In Norwegian]. *Kommunalteknikk* (4). [https://issuu.com/kommunalteknikk/docs/6kt\\_4-20/s/11415728](https://issuu.com/kommunalteknikk/docs/6kt_4-20/s/11415728)

Stenvik, L. A., Gjengedal, S., Ramstad, R. K., & Frengstad, B. S. (2022). Hydrochemical and biotic control on iron incrustations in groundwater heat pump systems: Case study from a saline, anoxic aquifer in Melhus, Norway. *Geothermics*, 100. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102349>

Stuetz, R., & McLaughlan, R. (2004). Impact of localised dissolved iron concentrations on the biofouling of environmental wells. 49(2), 107-113. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0100>

Stuyfzand, P. (2007). Naar een effectievere diagnose, therapie en preventie van chemische put- en drainverstopping [Norsk: Mot mer effektiv diagnostisering, vedlikehold og forebygging av kjemiske brønnutfellinger. På nederlandsk]. *H2O*, 8, 44-47. <https://edepot.wur.nl/343238>

Tamura, H., Goto, K., & Nagayama, M. (1976). The effect of ferric hydroxide on the oxygenation of ferrous ions in neutral solutions. *Corrosion Science*, 16(4), 197-207. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(76\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0010-938X(76)90046-9)

Treskatis, C., & Puronpää-Schäfer, P. (2013). Keeping up the flow. *WorldWater*, 15-17. <http://cleanwells.de/downloads/fachartikel/WORLWATER%202014.pdf>

van Beek, C. G. E. M. (1989). Rehabilitation of clogged discharge wells in the Netherlands. *Quarterly journal of engineering geology and hydrogeology*, 22(1), 75-80. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1989.022.01.06>

Walter, D. A. (1997). *Geochemistry and microbiology of iron-related well-screen encrustation and aquifer biofouling in Suffolk County, Long Island, New York* (Water-Resources Investigations Report 97-4032). Coram, New York, US: U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/wri974032>

Weidner, C., Henkel, S., Lorke, S., Rude, T. R., Schüttrumpf, H., & Klauder, W. (2012). Experimental Modelling of Chemical Clogging Processes in Dewatering Wells. *Mine Water and the Environment*, 31(4), 242-251. <https://doi.org/10.1007/s10230-012-0188-2>

Woyessa, A. O. (2012). *Identification of hydrochemical processes in the screen environment in shallow geothermal wells from Gardermoen University of Oslo*. Oslo.