Siiviläputkikaivojen vanheneminen ja elvytys

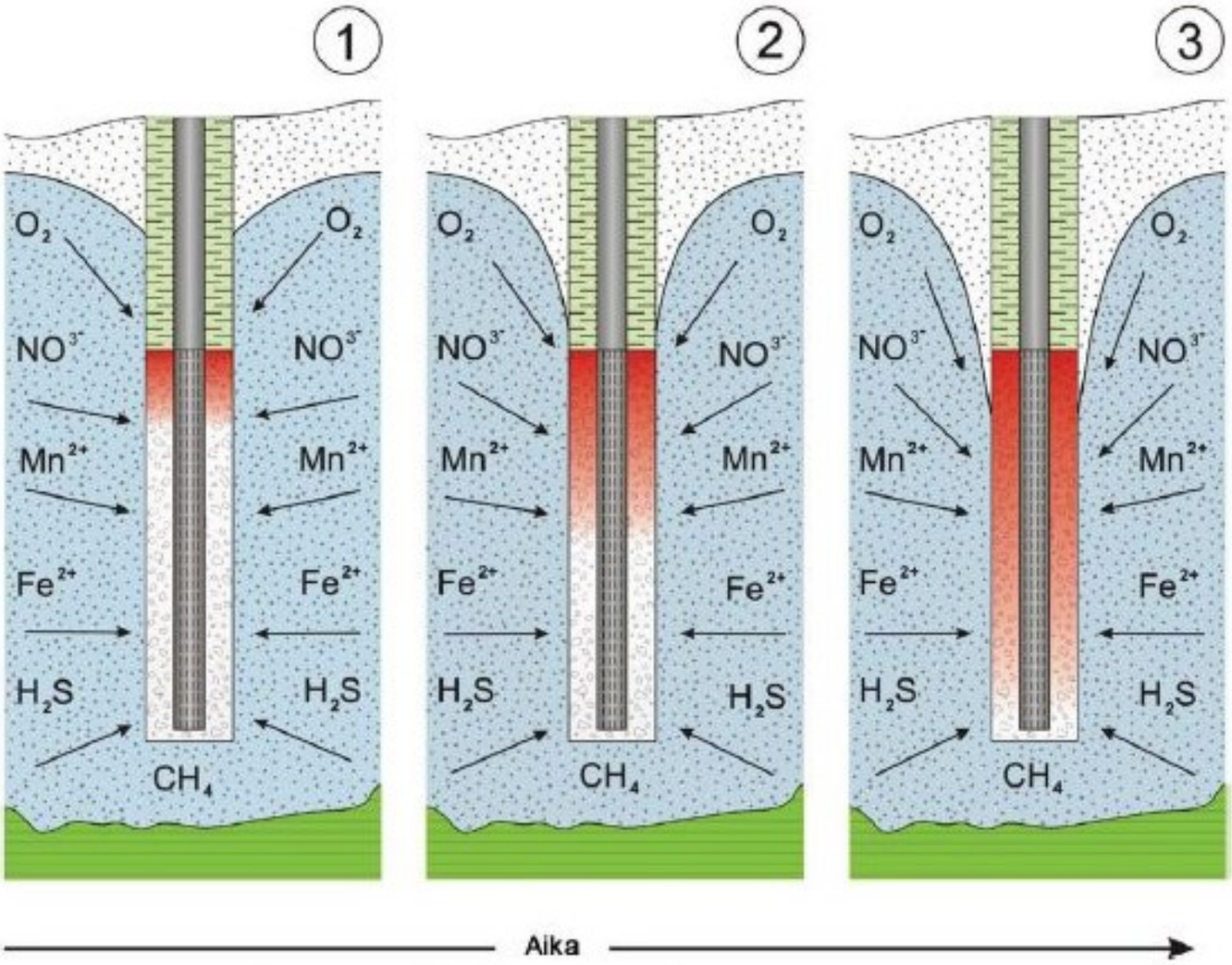
Kemiallisen elvyttämisen tulos (Ehrenreich 2000).

Vedenhankintaan käytettävien siiviläputkikaivojen antoisuus laskee usein tuotantoajan kuluessa. Hydrokemiallisesti ja mikrobiologisesti katalysoidut kyllästymis- ja saostumisreaktiot aiheuttavat sen, että kaivoja käytettäessä rauta(III)- ja mangaanihydroksidit alkavat saostua pumpun ympärille, siiviläputken rakoihin, ympäröivään soraan ja kaivoa ympäröivään maaperään. Antoisuuden heikkeneminen ilmenee dynaamisen vedenpinnan alenemana samaa vesimäärää pumpattaessa, pumpun tehon heikkenemisenä ja vedentuotannon kustannusten nousuna. Siiviläputkikaivoja voidaan huoltotoimin elvyttää ja niiden antoisuutta parantaa. Saksassa on elvytyksestä kehittynyt kaivojen kunnossapidon keskeisin toimenpide viimeisten 15 vuoden aikana.

CHRISTOPH TRESKATIS
Prof. Dr. habil., dosentti
Rein-Westfalenin Tekninen korkeakoulu, Aachen ja Tekninen Yliopisto, Darmstadt
E-mail: C.Treskatis@bup-gup.de

PÄIVI PURONPÄÄ-SCHÄFER
M.A., toimitusjohtaja
deanwells GbR
E-mail: deanwells@deanwells.de

Siiviläputkella varustettu kaivo aiheuttaa muutoksia pohjaveden luonnollisessa virtauskentässä ja samanaikaisesti myös pystysuoran "oikosulun" sen kaikissa hydrokemiallisissa vyöhykkeissä. Useimmissa pohjavesikerroksissa esiintyy selvä vyöhykkeisyys Redox-arvon (hapetus-pelkistys-olosuhteiden) muuttuessa vähitellen hapettomammaksi syvemmälle mennessä (**Kuva 1**). Kameratutkimuksissa on huomattu kaivon vanhenemisen alkavan usein siiviläputken yläosasta, missä kaivoon pääsee pumppauksen yhteydessä eniten happea sekoittuen liukoiseen rautaan(II) ja/tai mangaaniin(II). Houben on osoittanut kohonneiden rautaoksidipitoisuuksien ulottuvan maaperässä jopa 4 m säteelle siiviläputkesta (Houben 2010).



Kuva 1. Pumppaamisen vaikutus pohjavesikerroksen pystysuoriin Redox-vyöhykkeisiin.

Kaivojen vanheneminen voi olla mekaanista, biologista tai kemiallista alkuperää. Siivilät, putket, johdot ja tiivisteet rapistuvat ajan kuluessa materiaalien vanhenemisen ja korroosion myötä. Pohjaveden virtauksen kuljettamat liukoiset ja toisiinsa kiinnittyneet hienoainespartikkelit, jotka vaihtelevat kooltaan 0,0001:sta lähes 10 mm:iin, voivat myös aiheuttaa kaivon antoisuuden vähenemisen (Houben & Treskatis 2007). Imetyskaivojen yleinen vanhenemisen syy on biomassan kerääntyminen. Maaperän liikkuminen, puiden ja kasvien juuret tai ilkivalta voivat myös heikentää kaivon toimivuutta.

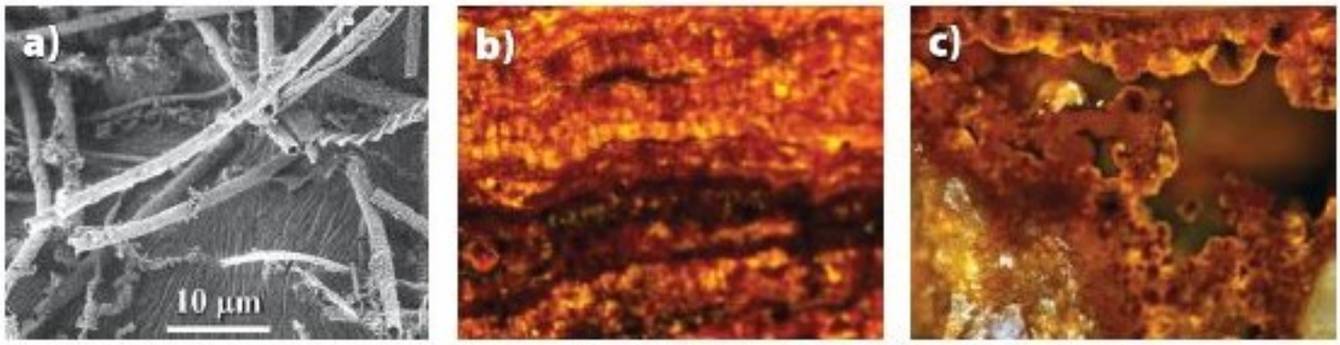
Kaikkein yleisimmin antoisuuden väheneminen aiheutuu vettä hyvin johtavien huokosten täyttymisestä mineraalisaostumilla. Saksassa näistä saostumista lähes 90 prosenttia koostuu raudan ja mangaanin oksideista, hydroksideista ja oksihydroksideista (Houben & Treskatis 2003). Erikoistuneet mikro-organismit kuten Gallionella ferruginea ja Leptothrix ochracea tai discophorus, niin kutsutut "rautabakteerit", viihtyvät erinomaisesti lievästi happamassa ympäristössä hankkien elintoimintoihinsa tarpeelliset ravintoaineet pohjaveden sisältämästä liukoisesta rauta(II):sta ja mangaani(II):sta. Bakteerien aineenvaihdunnan tuloksena syntyvät hapettuneet rauta(III) ja mangaani(III,IV) ovat veteen liukenemattomia ja saostuvat rauta- ja mangaanioksideiksi muodostaen saostumia (**Kuva 2a**).

Nämä saostumat myös ikääntyvät ajan myötä. Vanhentuneiden rautaoksidisaostumien poikkileikkaus muistuttaa puiden vuosirenkaita (**Kuva 2b**) osoittaen saostumista tapahtuvan jatkuvasti vanhempien kerrosten toimiessa kiinnityskohtana uudemmille. Käytännössä se merkitsee sitä, että liejuiset rautapitoiset sorahuokosten tukkijat muuttuvat aikaa myöten kivikoviksi kiteiksi (**Kuva 2c**). Lisäksi saostuvilla oksideilla on autokatalyyttinen vaikutus hapettumisprosesseihin, eli niiden lisääntyminen ei ole asteittaista vaan eksponentiaalista (Tamura et al. 1976 in Houben & Treskatis 2003).

Vanhenemisen kustannukset

Tuotantoaikana virtausvastus lisääntyy ja virtaaman alenema jyrkkenee eksponentiaalisesti kaivon luontaisen ikääntymisen takia. Kokonaisalenema muodostuu laminaarisesta akviferiosasta ja turbulentista sisääntulohäviöstä $s_w = BQ + CQ^2$ [s = alenema kaivossa (m); Q = pumppausteho (m^3/s); B = hydraulinen vastus (salpavesi) s/m^2; C = sisääntulohäviö (s^2/m^5)] (**Kuvat 3, 4**).

Esimerkkikaivoa 30 m^3/h:n teholla pumpattaessa ikääntymisen aiheuttama sisääntulohäviö ylittää 1,8 m kokonaisalenemasta ja 40 m^3/h:n teholla se lisääntyy yli 3 metriin. Pumpattaessa samaa kaivoa 70 m^3/h teholla 14,16 m:n kokonaisalenemasta 9,51 m lasketaan sisääntulohäviön



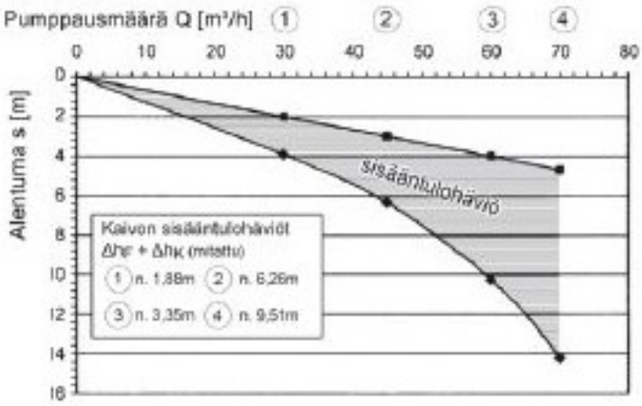
Kuva 2. Rautaoksidien vanheneminen. a) Rautabakteereiden eritteitä, b) Rautaoksidi-vuosirenkaita, c) Götiittikiteitä.

aiheuttamaksi. Ikääntymisestä aiheutuva ylimääräinen pumppausteho on laskettavissa (**Kuva 5**).

Aleneman korkeus vaikuttaa suoraan vedentuotannon energiakustannuksiin (**Kuva 6**). Ikääntymisen aiheuttaman sisääntulohäviön kompensointi maksaisi 10-vuotisella tuotantokaudella ja teoreettisesti keskeyttämättömällä 950 000 m³ vuosituotantomäärällä kaivon 30-vuotisen kokonaiskäytön aikana yli 10 000 €. Jokaisesta pumpun siirrosta 5 metriä alaspäin koituisi 1 000 euron lasku nousevan "wire-to-water"-suhteen takia (Driscoll 1989). Mitä pidemmäksi aikaväli käyttöönoton ja huoltotoimenpiteiden aloittamisen välillä kasvaa, sitä vaikeampaa ja kalliimpaa on alkuperäisen antoisuuden palauttaminen.

Pumppausteho Q [m³/h]	[m³/s]	Kokonaisalenema [m]	Lisäalenema D s [m]	$Q^{1,5}$ [s¹m⁻²]	BQ [m]	CQ² [m]	s (laskettu) [m]
30	0,0083	3,88	3,88	465,79	1,99	1,69	3,68
45	0,0125	6,35	2,47	508,00	3,00	3,81	6,81
60	0,0167	10,26	3,91	615,48	4,00	6,78	10,78
70	0,0194	14,16	3,90	729,90	4,66	9,18	13,81

Kuva 3. Kaivo no. 4, Horgesgath/Reinin laakso (salpavesi). Porrastetun koepumppauksen tulokset, laskettu turbulentti sisääntulohäviö ja ylimääräinen pumppaustarve (Treskatis 1999).



Kuva 4. Kaivo nro. 4, Horgesrath – Reinin laakso (salpavesi). 1: Laminaari virtausvastus s = BQ, 2: Turbulentti sisääntulohäviö sw = BQ + CQ².

Elvytyksen eri vaiheet

Antoisuuden vähentymistä 10 prosentilla alkuperäisestä pidetään rajana, jonka ylityksen tulisi käynnistää syyn selvittäminen ja elvytysmenetelmän valinta (DVGW W 130 2001). Elvytyksen ensimmäiset työvaiheet ovat mekaaninen esipuhdistus ja hydraulinen elvytys, eli saostumien fyysinen irrottaminen ja poisto putkista, siivilästä, sen raoista, kaivosoran huokosista ja ympäröivästä maaperästä (**Kuva 7**).

Kemiallinen elvytys perustuu saostumien geokemiallisen tai mineralogisen analyysin mukaan valittuun oikeaan liuotusaineeseen. Elvytysaineelta vaaditaan mahdollisimman korkeaa liuotus- ja nopeaa kemiallista reaktiokykyä ilman haittoja kaivon rakenteille, pohjavedelle laadulle tai kaivoa ympäröivään geologiaan. Rauta- ja mangaanioksidit liukenevat

Pumppausteho[m³/h]	Turbulentti sisääntulohävlö kokonais-alenemasta [m]	Ylimääräinen pumppaus-kapasiteetti [W]
30	1,88	236
45	3,35	632
60	6,26	1,575
70	9,51	2,791

Pumppausmäärä $P = \frac{Q \cdot g \cdot h \cdot \rho}{3600 \cdot \eta}$

g = painovoimasta johtuva kiihtyvyys = 9,81 m/s²

Q = pumppausteho (m³/h)

h = imukorkeus (tässä esimerkissä ikääntymisen aiheuttama)

ρ = veden tiheys

η = pumpun agregaatin tehokkuus = 0,7

Kuva 5. Kaivo no 4 Horgesgath; Vanhenemisen aiheuttama sisääntulohäviö ja siitä johtuva ylimääräinen energian tarve (Treskatis 1999).

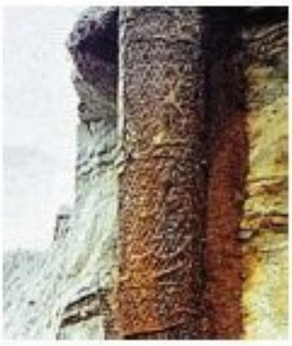
Kaivon vuosituotto:		950 000 m³/a
Pumppausaika		
Päivä:	35%	332 500 m³/a
Yö:	65%	617 500 m³/a
Pumppauskorkeus:	**Uusi kaivo:**	**Vanhentunut:**
Raakavesi:	20 m	25 m
Puhdasvesi (kesk.):	120 m	120 m
Yhteensä:	140 m	145 m
Energianostokustannukset:		
Päivä:	0,07 € / kWh	
Yö:	0,04 € / kWh	
Energiantarve / m³: = (1x pumppauskorkeus)/ 365 x tehokkuustaso		
Oletettu tehokkuustaso:	65 %	
Energiantarve / m³:	**Uusi kaivo:**	**Vanhentunut:**
	0,59 kW / m³	0,61 kW /m
Pumppauskustannukset / vuosi = tuotto x (energiantarve / m³) x energiankustannukset		
Päivä:	13.734 €/a	14.225 €/a
Yö:	14.575 €/a	15.096 €/a
Yhteensä:	**28.309 €/a**	**29.321 €/a**
Kustannusten nousu:	n. 1011 €/a	= 3,6 % lisäkust.

Kuva 6. Esimerkkilaskelma energiakustannusten noususta pumppauskorkeuden lisääntymisestä johtuen (Treskatis 1999).

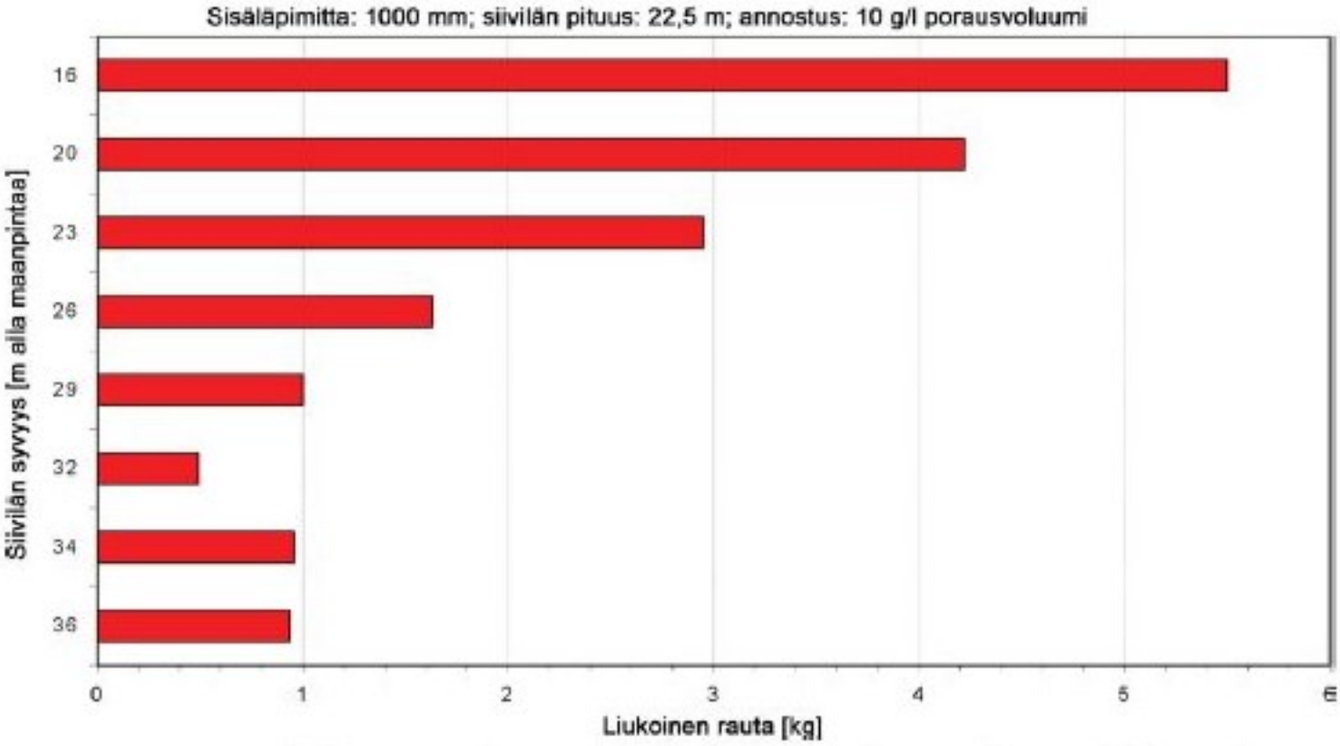
helpoimmin ja nopeimmin pH-neutraaleilla reduktioaineilla, joilla on 50-kertainen raudan(III) liuotuskyky stokiometrisesti samassa molaarisessa suhteessa verrattuna perinteisesti käytettyyn pH 1,0-arvoiseen suolahappoon (Houben 2003b). Karbonaatteja sisältävät saostumat vaativat pH-riippuvaisen elvytysaineen, jonka tulisi kuitenkin olla epäorgaaninen.

Markkinoilla tarjolla oleva elvytysvälineistö jakautuu pääasiassa kolmeen luokkaan perustuen joko korkeaan paineeseen, paineaaltojen luomiseen tai veden kiertovirtaukseen. Ihannetapauksessa voimakas irroitusteho poistaa keräytymät kaivosta, suorittaa kemiallisen elvytyksen ja samanaikaisesti mahdollistaa prosessin jatkuvan valvonnan. Parhaimmat tulokset on saavutettu veden kiertovirtaustekniikalla, jolla kaivoille ei aiheuteta minkäänlaisia rakenteellisia vaurioita toisin kuin usein tapahtuu paineeseen perustuvien menetelmien käytön yhteydessä (DVGW-Forschungsvorhaben 55/99 2003).

Elvytyksen eri vaiheiden valvonnalla on toimenpiteen kestävyyden kannalta huomattava merkitys. Jos rautaoksideja ei poisteta perusteellisesti eri käsittelyvaiheiden aikana ja jäljelle jäävien oksidien pinta-ala on suurempi kuin ennen elvytystä, se tarjoaa rautabakteereille jopa aiempaa paremmat kiinnittymismahdollisuudet. Elvytys voi tällöin toimia katalysaattorina mikä aiheuttaa entistä nopeamman rautasaostumien muodostumisen (**Kuva 8**).

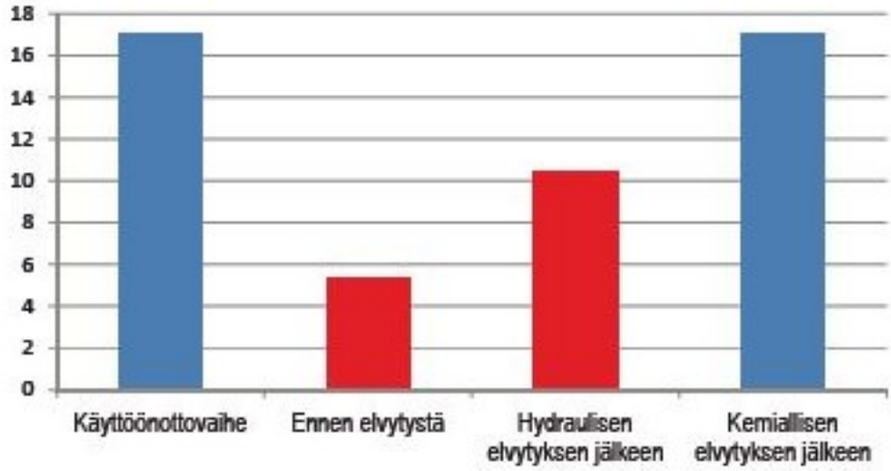


Kuva 8. Rautaoksidisaostumia siiviläputken ulkopuolella.



Kuva 7. Liuotettujen rautaoksidien määrä siivilän syvyyden suhteen kemiallisesti elvytetyssä kaivossa Krefeldissä (Houben, Merten & Treskatis 1999).

Hannoverin lähellä Pohjois-Saksassa vuonna 1974 rakennetun siiviläputkikaivon alkuperäinen Q_E = 17 m³/h m suhteellinen tuotto oli vähentynyt 5,4 m³/h m:iin alentuman kasvaessa metrillä alkuperäisestä 15,25 metristä. Kaivo nro 12 oli kokonaissyvyydeltään 39 m ja poraushalkaisijaltaan 850 mm, puinen siiviläputki halkaisijaltaan DN 300 ja pituudeltaan 18 m. Kaivon rakennus- ja toimintatietojen, pohjaveden geokemian ja saostumien analyysin pohjalta omistaja valitsi elvytysmenetelmäksi veden kiertovirtaukseen perustuvan soranpesun yhdessä pH-neutraalin liuotusaineen kanssa.



Kuva 9. Esimerkki antoisuuden lisääntymisestä kolmivaiheisen elvytyksen ansiosta.

Videotarkastuksen ja koepumppauksen lisäksi suoritettiin ennen elvytystä myös geofysikaalinen tutkimus toimenpiteen eri vaiheiden tehokkuuden dokumentoimiseksi. Mekaaninen esipuhdistus, soran hydraulinen elvytys ja saostumien poisto lisäsi suhteellista tuottoa Q_E = 17,1 m³/h m:iin. Kemiallinen elvytys nosti kaivon tuoton jopa yli alkuperäisen antoisuuden töiden lopuksi suoritetun hiekan poiston ansiosta.

Elvytysten välinen intervalli on määriteltävissä yksilöllisesti kullekin kaivolle tietokantojen systemaattisen tarkastelun ja tuotannonaikaisen antoisuuden seurannan avulla. Elvytysvälin pituuteen vaikuttavat raakaveden hydrokemia, tuotantomäärä ja -tapa (pumppausrytmi, dynaamisen vedenpinnan etäisyys siivilän yläreunaan), rakenteellinen kunto (esim. putket, liitokset ja tiivisteet) sekä erityisesti edellisten elvytysten tehokkuus.

Vanhenemisen hidastaminen käytännössä

Kaivojen vanheneminen mineraalipitoisten saostumien muodostumisen takia on yleismaailmallinen ilmiö, joka aiheutuu luonnollisista syistä ja ilmenee suuressa osassa kairattuja tuotantokaivoja. Vanhenemisen ehkäisy alkaa geologisesti ja hydrokemiallisesti hyväksyttävien kaivokenttien ja pitkäaikaiseen tuottavuuteen soveltuvien pohjavesiesiintymien paikallistamisella. Kaivon suunnittelulla voidaan vaikuttaa saostumien kasvunopeuteen. Rakenteellisten osien, erityisesti soran raekoon huolellisella mitoittamisella on mahdollista pidentää kaivon elinikää. Yleinen tavoite on vähentää turbulenttista virtausta, joka edistää keräytymien muodostumista sekoittumisen ja kaasuuntumisen kautta. Viime vuosien aikana on rakennettu satakunta siiviläputkikaivoa, joissa on käytetty lasihelmiä perinteisen soran sijasta. Tähän mennessä dokumentoidut tuotanto- ja huoltotiedot osoittavat uudistuksesta koituvan huomattavia taloudellisia etuja.

Teräslangasta punotut siiviläputket ovat helposti elvytettävissä suuren sisääntuloalueen ja lankojen geometrian ansiosta. Tekohartsilla siiviläputkeen kiinnitetyt sorakerrokset ovat sitä vastoin osoittautuneet erittäin vaikeasti puhdistettaviksi. Ikääntymisprosessia voidaan myös hidastaa siiviläputkikaivon tuotantotavoilla. Liiallinen pumppaus aiheuttaa turbulensseja, hapen sekoittumista veteen ja kaasuuntumista. Tarkkailu- ja mittausmenetelmien rakentaminen kaivon käyttöönoton yhteydessä on edellytyksenä luotettavan tuotannon varmistamiseksi ja tulevien häiriöiden tunnistamiseksi jo etukäteen.

Vanheneminen ei ole kokonaan estettävissä, mutta sitä on mahdollista hidastaa oikein ajoitetuilla vastatoimenpiteillä. Esimerkiksi Saksassa vanheneminen koskee suurinta osaa noin 25.000 talousvettä tuottavista kaivoista. Paikalliset tekniset laatunormit ohjaavat vedentuotantolaitoksia, insinööritoimistoja ja elvytysyhtiöitä kaivojen kunnossapitotehtävien suorittamisessa uusimpien tieteellisten tutkimustulosten mukaisesti.

Vedentuottajien kustannustietoisuuden kasvaessa ennalta ehkäisevän toimenpiteiden ja säännöllisten elvytysten taloudellinen merkitys lisääntyy. Olemassa olevien kaivojen elinkaarta on mahdollista pidentää viimeisintä teknistä osaamista edustavilla kunnossapitomenetelmillä (**Kuva 9**). Uusien kaivojen rakennustarve vähenee, tuotantolaitosten investointivaatimukset pienenevät ja ihmisen aiheuttamat häiriöt pohjavesivaroihin minimoituvat.

Kiitämme **FT Kirsti Korkka-Niemeä** suomenkielisen tekstin ja terminologian tarkastuksesta.

Kirjallisuus

- Houben, G. (2010). Spatial Distribution of Incrustations around a Water Well after 38 Years of Use GROUNDWATER Vol. 48, No. 1, pages 53-58.
- Houben, G. & Treskatis, C. (2007). Water Well Rehabilitation and Reconstruction McGraw Hill. New York.
- Houben, G. & Treskatis, C. (2003). Regenerierung und Sanierung von Brunnen. Oldenbourg München.
- Tamura, H., Goto, K., & Nagayama, M (1976). The Effect of ferric hydroxide on the oxygenation of ferrous ions in neutral solutions. Corrosion Sci. 16: 197-207.
- Treskatis, C. (2002). Brunneneintrittswiderstände und Skineffekt als Ursache für erhöhte Förderkosten. - In: bbr 8(02): 18–22; 4 Abb., 3 Tab.; R. Müller, Köln.
- Driscoll, F. (1989). Groundwater and Wells St. Paul, MN: Johnson.
- DVGW W 130 (2001). Brunnenregenerierung. Bonn: DVGW.
- Houben, G. (2003). Iron oxide incrustations in wells. Part II: chemical dissolution and modeling. Applied Geochemistry 18, pages 941-954.
- DVGW Forschungsvorhaben W55/99-Brunnenregenerierung (2003). Untersuchungen zur Bewertung von Gerätetechnik auf die Wirksamkeit in der Kiesschüttung.