

MOKKA
Modern Mérnöki Eszköztár
Kockázatközpontú
Környezetmenedzsmenthez

III/2b feladat
6. részfeladata,
Remediáció elmélete és gyakorlata II:

EU és magyar innovatív technológiák összegyűjtése, osztályozása

Passzív kezelések: reaktív falak

Készítette:
Geomechanics Kutató, Fejlesztő, Szolgáltató és Tanácsadó Betéti Társaság.
3529 Miskolc, Aulich u. 9.

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék	2
1 Működési elv	3
2 Hatásmechanizmus	6
3 Anyagkiválasztás és kármentesítési eljárások	13
3.1 Redukciós folyamatok	15
3.1.1 Illékony halogénezett szénhidrogének lebontása és a dehalogénezés mechanizmusa Fe^0 -val	17
3.1.2 Fizikai és kémiai határfeltételek hatása az illékony halogénezett szénhidrogének Fe^0 -val való dehalogénezésére	21
3.1.3 A Fe^0 -val való dehalogénezés fokozása további reaktív anyagokkal	24
3.1.4 Illékony halogénezett szénhidrogének dehalogénezése más redukáló szerekkel	26
3.1.5 Szervetlen szennyezők redukciója Fe^0 -val	27
3.1.6 Nitroaromások redukciója Fe^0 -val	27
3.1.7 További redukciós folyamatok	27
3.2 Kicsapási reakciók	28
3.3 Szennyezők szorpciója	29
3.3.1 Szorbensek	29
3.3.1.1 Agyagásványok	29
3.3.1.2 Organofil bentonitok	31
3.3.1.3 Zeolitok	31
3.3.1.4 Aktívszén	32
3.3.1.5 Szervetlen oxidok és hidroxidok	32
3.3.2 Uránszennyezés eltávolítása	32
4 Építési eljárások	33
4.1 Résfalak építése	33
4.1.1 Résfal-típusok	33
4.1.1.1 Egyfázisú résfal	33
4.1.1.2 Kétfázisú résfal	34
4.1.1.3 Kombinált résfalak	34
4.1.1.4 Résfal kamra-rendszerek	34
4.1.1.5 Vékony falak	34
4.1.1.6 Szádfalak	35
4.1.1.7 Fúrt cölöpös résfal és torkrétozás	35
4.1.1.8 Injektált falak	35
4.1.1.9 Fagyasztott falak	35
4.1.2 Résfal anyagok	35
4.2 Reaktív falak építése	37
4.2.1 Tervezési szempontok	38
4.2.2 Reaktív falak építési technológiái	40
4.2.2.1 Résfal-építés reaktív fal céljára	40
4.2.2.2 Kapuszerkezetek	41
4.2.2.3 Vékony reaktív fal	42
4.2.2.4 Fúrás és deep soil mixing	42
4.2.2.5 Sugártechnológia	42
4.2.2.6 Kútsor vagy DART	43
4.2.2.7 Reaktor barrier technológia alkalmazása meglévő résfal-rendszerre	44
4.2.2.8 Injektált rendszerek	44

4.2.2.9	Hidraulikus repesztés	44
4.2.2.10	Biobarrier	45
4.2.2.11	Reaktív fal és phytoremediáció kombinálása	46
4.2.2.12	Biopolimeres árokmélyítés	46
4.3	Költségek	47
5	Reaktív falak alkalmazása	48
6	Irodalom	54

1 Működési elv

Passzív kármentesítési eljárások, melyeknél a talajvíztisztítás in situ zajlik le és nincs külső energiabevezetés, egyre elterjedtebbek a hidraulikus eljárások (pump and treat) alacsony hatékonysága miatt. Az egyik legsokatígérőbb módszer a *reaktív falak* technológiája. Az 1982 óta ismert eljárás egy a talajvíz áramlási irányára merőleges árkot használ, melybe alkalmas reaktív anyagot helyeznek és amelyen a talajvíz átáramlik (US Environmental Protection Agency, 1995). A reaktív falak hatásmechanizmusa a geokémiai barrier elvén alapul, amely a kémiai species feldúsítását és a szállítási út mentén való lebontását a geokémiai határfeltételek megváltoztatásával éri el. Fe(III)- és Mn(IV)-oxidkicsapás a réteghatárokon vagy korai diagenetikus fémdúsulás aquatikus üledékekben (mangáncsomók képződése a tengerfenéken) a geokémiai barrier régóta ismert termékei. A legfontosabb immobilizálási folyamatok geokémiai barrierekben a kicsapás, szorpció és mikrobiológiai lebontás, melyeket rendszerint a pH és a redoxpotenciál jelentős megváltozása idéz elő. Ha a geokémiai viszonyok ill. ezek változásai a (rendszerint az ember által okozott) szennyezőanyagok immobilizálását váltják ki, „intrinsic (bio)remediációról“, „dilute and disperse“-ről vagy „natural attenuation“-ről beszélünk (Bagchi 1990, Holzlohner & Meggyes 1996, Wienberg 1997).

Környezetvédelmi és alkalmazási tényezőkre tekintettel kézenfekvő a kőzetformációk természetes geokémiai gáthatásának hasznosítása, azaz a természet öntisztító funkciójának alkalmazása. Műszaki beavatkozással mesterséges geokémiai barrierok hozhatók létre, melyekkel a hidraulikus kármentesítő eljárások kiegészíthetők vagy helyettesíthetők és a szennyezőanyagok tartós immobilizációja érhető el (Dahmke et al. 1996).

A szennyezőforrások, azaz szennyezett területek és hulladéklerakók szempontjából az "Agency for Toxic Substances and Disease Registry" szerint mindenekelőtt a klórozott szénhidrogének, aromás szénhidrogének, különböző nehézfémek és oxoanionok lényegesek (1. táblázat). Ez a felsorolás más országokra is jellemzőnek tekinthető. A talajvíz-szennyezések tisztítására túlnyomórészt úgynevezett aktív hidraulikus kármentesítést alkalmaznak, melynél a szennyezett talajvizet kiszivattyúzzák, megtisztítják és visszajuttatják a vízvezető rétegbe ("pump-and-treat").

Különböző tényezők, mint a hidrofób szerves anyagok csökkent vízdoldhatósága, a talaj heterogenitása és hosszú idő alatt a talajba bejutott szennyezőanyagok lassú visszadiffúziója miatt a hidraulikus kármentesítés hatékonysága rendszerint nagyon alacsony. Emiatt számos szennyeződés kármentesítésére 100 éves időtartamot irányoznak elő, ami sem gazdasági, sem ökológiai szempontok (energia- és vízfelhasználás) alapján nem megfelelő.

A geokémiai barrier, mint alternatív stratégia, a szennyezőanyagok és a geokémiai barrier anyagai közötti kémiai egyensúly hiánya ($-\Delta G_R^\circ$) használja fel. Így a szennyezőanyagok in situ és passzív kicsapása, szorpciója vagy mikrobiológiai vagy abiotikus lebontása érhető el külső energiabetáplálás nélkül.

1. táblázat. 25 toxikus szennyezőanyag rangsora gyakoriság és toxicitás alapján a szennyezett területeken (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1994 és Dahmke et al., 1996).

Szennyezőanyag		Szennyezőforrás	
1	Triklóretén	TCE	Száraz tisztítás, fémzsírtalanítás
2	Ólom	Pb	Benzin (1975 előtt), bányászat, csővezetékek, Pb-feldolgozás
3	Tetraklóretén (Per)	PCE	Száraz tisztítás, fémzsírtalanítás
4	Benzol	BTEX	Üzemanyag, ipar
5	Toluol	BTEX	Üzemanyag, ipar
6	Króm	Cr	Fémnemesítés
7	Diklóretán (metilénklorid)	MC	Zsírtalanítás, festékeltávolítás
8	Cink	Zn	Bányászat, fémnemesítés, különböző iparágak
9	1,1,1-triklóretán	TCA	Fém- és műanyagtisztítás
10	Arzén	As	Bányászat, ipar
11	Triklóretán (kloroform)	CF	Oldószer
12	1,1-diklóretán	DCA	Zsírtalanítás, oldószer
13	1,2-diklóretán (transz)	DCE	1,1,1-TCA lebomlási terméke
14	Kadmium	Cd	Bányászat, különböző iparágak
15	Mangán	Mn	Fémfeldolgozás, bányászat és természetes előfordulás
16	Réz	Cu	Fémfeldolgozás, bányászat
17	1,1-diklóretán	1,1-DCE	Műanyagfeldolgozás
18	Klóretén (vinilklorid)	VC	Műanyagfeldolgozás
19	Bárium	Ba	Különböző iparágak, mélyfúrás
20	1,2-diklóretán	1,2-DCA	Fémzsírtalanítás, festékeltávolítás
21	Etilbenzol	BTEX	Aszfaltfeldolgozás, benzin
22	Nikkel	Ni	Fémfeldolgozás, bányászat
23	Ftalátok		Műanyagfeldolgozás
24	Xilol	BTEX	Oldószer, üzemanyag
25	Fenol		Fakezelés, gyógyszergyártás

A geokémiai barrier-elv legfőbb előnye az üzemeltetési díj csökkentése, amely a hidraulikus eljárásoknál az összköltség jelentős részét teszi ki. Hogy a geokémiai barrier általában magasabb beruházási költsége az alacsonyabb üzemeltetési díj révén milyen mértékben amortizálódik, leginkább a reaktív anyagok reaktivitásától és hosszú távú stabilitásától függ. E tekintetben további megfigyelések szükségesek megfelelő tapasztalatok gyűjtésére a hosszú távú stabilitásról.

Az egyensúly hiányából nem mindig lehet a reakciók kinetikájára következtetni, mivel egyes reakciók a magas aktivációs energia miatt csak mikroorganizmusok segítségével vagy egyáltalán nem zajlanak le.

A szerves reakciók kinetikája rendszerint a ΔG_R° függvénye, így termodinamikai egyensúlyi számításokkal a kedvező immobilizációs reakciókat előre lehet jelezni. Ezeket laboratóriumban rendszerint oszlopkísérletekkel különböző méretek mellett ellenőrzik. Ez a megközelítés elvileg a mikrobiológiai lebomlási folyamatokra is érvényes, melyeknél a ΔG_R° függvény nem mindig ismert köztvetlenül. Az 1. táblázatban felsorolt szennyezőkre a következő immobilizációs eljárások vehetők számításba:

A kevésbé redox-érzékeny nehézfémek, mint Pb, Zn, Cd, Cu, Ba, Ni elsősorban különböző kicsapási reakciókkal immobilizálhatók nehezen oldódó ásványi fázisban való megkötés révén. Ez a módszer a gyakorlatban például nehézfémekkel szennyezett víz helyszíni tisztításában régóta bevált (Anderson, 1994). Redox-érzékeny szerves komponenseket, mint Cr, As és Mn-t hasonlóan lehet kicsapni. A mérgezőbb vagy mozgékonyabb anyagok kezelésére célszerű oxidációt vagy redukciót illeszteni a geokémiai barrier elé.

Bár a kicsapási reakciók kinetikája és az egyensúlyi állandók a vegyes fázisokban általában nem ismertek, geokémiai-termodinamikai egyensúlyi modellek, pl. PHREEQE vagy kapcsolt reakció-transzport modellek mint pl. COTAM (Hamer & Sieger, 1994) megfelelő biztonsági tényezők figyelembevételével megbízható következtetésekre adnak lehetőséget (Isenbeck-Schröter, 1995).

Szerves szennyezők lebontási stratégiáját a reaktív falakban termodinamikai tulajdonságaik alapján hasonló módon lehet kialakítani. Többszörösen halogénezett vegyületek rendszerint erős oxidáló szerek, melyek redukción keresztül lebonthatók. A gyengén halogénezett vegyületek (pl. vinilklorid) köztes vegyületek és mind erős oxidáló szerekkel, mind erős redukáló szerekkel kis energianyereséggel lebonthatók. Kémiai perzisztenciájuk azzal magyarázható, hogy természeti rendszerekben gyenge oxidáló és redukáló szerek dominálnak. Aromás szénhidrogének, mint benzol, toluol, xilol, viszont önmagukban elég erős redukáló szerek, melyek természeti rendszerekben oxidatív úton lebonthatók (Dahmke et al. 1996).

Nehezebb a szennyezők szilárd anyagokon való szorpciós folyamatát elméleti formában leírni mivel jobbra csak empirikus összefüggések állnak rendelkezésre, melyeket nehéz terepi viszonyokra extrapolálni. Szerves szennyezők retardációjának meghatározására rendszerint a K_d állandót használjuk, míg a szerves szennyezőkre általában nem-lineáris adszorpciós izotermákat szolgáltatnak. Víz tisztítási ismeretek aktív szén szűrőkkel hasznosak lehetnek. A szorpció különösen perzisztens szennyezők esetében nyújt jó lehetőséget a kármentesítésre.

2 Hatásmechanizmus

A szennyezett víz keresztüláramlik a reaktív falakon és eközben a szennyezők lebomlanak, kicsapódnak vagy adszorbeálódnak. A leggyakrabban alkalmazott építési típusok:

1. Folytonos permeábilis reaktív falak
2. Tölcsér és kapu (funnel and gate)
3. Injektálás vagy "mixed in place"-eljárás a reaktív anyagok bejuttatására.

1. A **folytonos permeábilis reaktív falakat** nem szigetelő részfalként építik, így a talajvíz többé-kevésbé akadálytalanul áramlik át rajtuk. Egész térfogatuk reaktív anyagot tartalmaz, amelyek a szennyezők kezelésére szolgálnak. A létesítés egy árok mélyítésével és feltöltésével történik, melynek során megfelelő résfal építési módszert alkalmaznak (Jessberger 1992). Ha a kármentesítés a szennyezett területen történik, a reaktív fal hossza néhányszor 100 m-nél is nagyobb lehet (megvalósított hosszak: 6 és 335 m között, résfal: néhány kilométer), mélysége általában maximum 30 m, kivételes esetben 100 m (USA). Itt gazdaságossági megfontolások szükségesek: a reaktív anyagokat élettartamra kell méretezni, az üzemeltetés során a reaktív anyag cseréjére nem kerül sor. Hogy a talajvíz ne kerülje meg áramlása során a reaktív falat, a fal permeabilitásának minimum tízszer akkora kell lennie, mint a környező vízvezető rétegek permeabilitása.

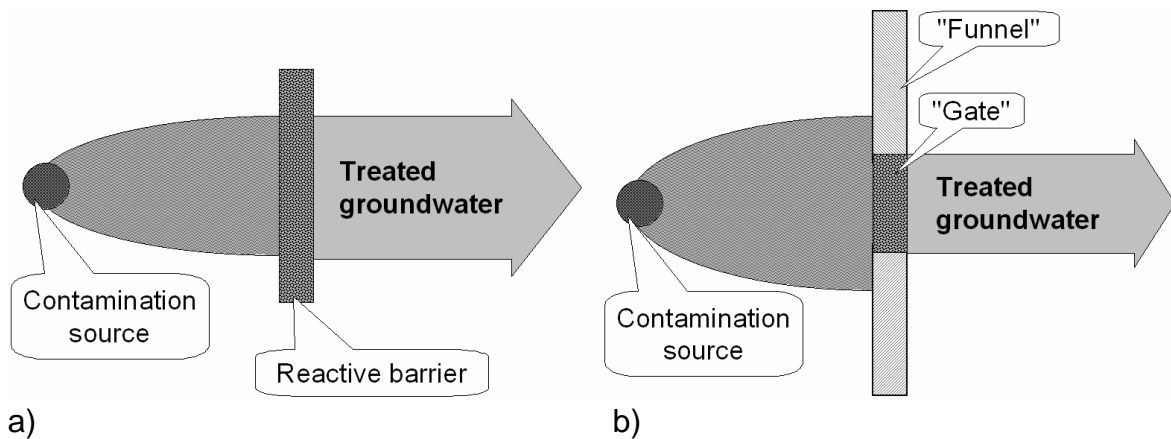
2. A **tölcsér és kapu (funnel-and-gate)** rendszerben a falnak csak egy része áteresztő reaktív zóna (gate), míg a többi rész szigetelő résfal (funnel). Nagykiterjedésű szennyezőforrásoknál több párhuzamosan kapcsolt kaput ill. reaktort lehet létesíteni. Többféle szennyezőanyag esetén több sorba kapcsolt reaktort lehet építeni, melyek különböző reaktív anyagokat tartalmaznak. Az 1. ábra mutatja az alapvető építési módokat.

A tölcsér és kapu rendszer méretezésében a talajvízáramlás vizsgálata és modellezése fontos szerepet játszik. A legnagyobb áramlási szélesség úgy érhető el, ha a nem áteresztő fal a természetes talajvízáramlás irányára merőlegesen áll, azaz a tölcsér 180° szöget zár be. A talajrétegek heterogenitása és anizotrópiája nagy befolyással van a reaktív falak méretezésére, ami adott esetben előnyös is lehet. Emiatt az alapos feltárás nélkülözhetetlen, ami viszont ki is fizetődik. A tölcsér és kapu rendszerben a kapu építhető reaktor vagy kút formájában: ez a konstrukciós megoldás lehetővé teszi a reaktív anyag időszakos cseréjét.

A tölcsér és kapu rendszer speciális változata a drén és kapu elrendezés (drainage-and-gate, D&G), melyet kispermeabilitású vízvezető rétegekben használnak, ahol „terelés” helyett a talajvizet oda kell „vezetni” a kapuhoz, erre szolgálnak a drének (csövek vagy kavicságyak).

2. táblázat. Résfal-rendszerek és tapasztalati adatok (Jessberger 1992)

Elv	Résfal típus	Talaj	Anyag	Mélység [m]	Vastagság [m]	Permeabilitás [m/s]	Tapasztalat
Talajkiemelés és szigetelő anyag elhelyezése	Egyfázisú résfal	Tőzeges és huminsav-tartalmú talajra korlátozottan alkalmas	Bentonit-cement keverék, adalék anyag	kb. 35	0,4 - 1,5	$\leq 1 \cdot 10^{-10}$	Hulladéklerakó 30 év
	Kétfázisú résfal	Tőzeges és huminsav-tartalmú talajra korlátozottan alkalmas	Bentonit zagy, talajbeton	> 50	0,4 - 1,5	$< 5 \cdot 10^{-10}$	Hulladéklerakó 22 év
	Kombinált résfal	Tőzeges és huminsav-tartalmú talajra korlátozottan alkalmas	Bentonit-cement keverék, szigetelő adalékok	kb. 30	> 0,6	$< 5 \cdot 10^{-10}$ for cut-off slurry	Hulladéklerakó 22 év
	Résfal egymásba ható fűrt pillérekből	Résfalbiztosítással nincs korlátozás	Talajbeton, beton	kb. 20	0,6 - 0,8	$< 5 \cdot 10^{-10}$	Hulladéklerakó 16 év
Talajkiszorítás és szigetelő anyag elhelyezése	Vékony fal		Bentonit-cement keverék, adalék anyag	18 - 23	0,05 - 0,20	$\leq 1 \cdot 10^{-9}$	Hulladéklerakó 20 év
	Szádfal	Cölöpverésre alkalmas	Acél	15 - 20	0,01 - 0,02	–	Szennyezett terület 20 év
	Vert résfal		Talajbeton, beton	15 - 20	> 0,4	$\leq 1 \cdot 10^{-9}$	Szennyezett terület 21 év
Permeabilitás in situ csökkentése	Injektált fal	Injektálható	Cement, agyag-cement keverék, szilikát gél	> 100	változtatható	$\leq 1 \cdot 10^{-9}$	Vízépítés és alapozások
	Torkrétozás, HPI	Nagyon finomszemcsés	Bentonit-cement keverék, adalék anyag	> 100	> 0,8	$\leq 1 \cdot 10^{-10}$	Vízépítés és alapozások
	Fagyasztott fal		Folyékony nitrogén	> 100	> 0,8 - 1,0	–	Mélyépítés és bányászat



1. ábra. Klasszikus PRB építési módok a) Folytonos fal b) Tölcsér és kapu (F&G) (Roehl et al. 2005a)

Contamination source: szennyezőforrás, Treated groundwater: kezelt talajvíz,
Reactive barrier: reaktív fal, Funnel: tölcsér, Gate: kapu

3. Az **injektálással** vagy „**mixed-in-place**“-eljárással a reaktív anyagokat a földbe juttatjuk és azok adott esetben a talajvízzel együtt mozognak. Ilyen célra folyékony vagy gázhalmazállapotú oxidálószerkeket vagy kicsapó reagenseket juttatunk a vízvezető rétegbe. Például FeCl_3 -oldat injektálása egy mésztartalmú vízvezető rétegben amorf Fe(III) oxihidroxidokból álló reaktív zónát hozhat létre, amely szorpciós barrierként funkcionálhat nehézfémek, pl. urán, molibdén és egyéb szerves szennyezőkkel szemben (Morrison et al., 1996, Burmeier et al., 2007). Amonette et al. (1994) laboratóriumi vizsgálatai azt igazolták, hogy a ditionit redukálószer ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) a vízvezető rétegben levő Fe(III) -oxidot Fe(II) szilárd fázissá alakítja át. Fe(II) -ásványok szintén kifejthetnek redukáló hatást a talajvízben levő szennyezőkre, pl. kromátokra vagy illékony halogénezett szénhidrogénekre.

Az in-situ falak méretezése, pl. a fal hosszúsága, permeabilitása, a reakciós zónák száma és elrendezése a talaj heterogenitásától, a talajvíz áramlási sebességétől és áramlási irányától függ és helyről helyre változik. Ennek megfelelően a reaktív fal megépítéséhez alapos helyszíni vizsgálat szükséges a hidrológiai, kémiai és geokémiai viszonyok tisztázására.

A reaktív anyag mennyiségének méretezéséhez a kezelendő talajvíz térfogatáramának ismerete szükséges (Burmeier et al., 2007):

$$Q = T \cdot i \cdot B \text{ [m}^3\text{/s]}$$

ahol:

- Q = térfogatáram [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$]
- T = transmisszivitás = $k_f \cdot M$ [$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$]
- M = vízzel telt rétegvastagság [m]
- I = hidraulikus gradiens [$\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$]
- B = áramlási szélesség [m]

A reaktív anyagokkal szemben támasztott legfontosabb követelmények:

1. hosszútávú kémiai reaktivitás a szennyezőkkel szemben,
2. a reaktív anyagok toxicitásmentessége vagy legfeljebb kismértékű toxicitása,
3. fizikai stabilitás a hosszútávú permeabilitás biztosítására,
4. a reaktív anyagoknak olcsó tömegcikknek kell lenniük

A leggyakrabban használt anyag, amely ezeknek az követelményeknek megfelel, az elemi vas, Fe^0 , mely oxidált vegyületekre redukálószerként hat. Az alkalmazás fő területe az illékony halogénezett szénhidrogének abiotikus dehalogénezése. A reakciók mechanizmusát és kinetikáját mindkét esetre alapos vizsgálatokkal elemezték. Elemi vasat nitroaromások és szervesetlen szennyezők pl. urán(VI), technécium(VII), arzén(V), arzén (III), szelén(VI) és nitrát redukálására is használtak.

Különösen a többszörösen halogénezett illékony szénhidrogének redukciója eredményes. A mérgező vinilklorid is a nehezen lebontható vegyületek közé tartozik. A többszörösen klórozott vegyületek dehalogénezése egymást követő szukcesszív lépésekben történik. A fő bomlástermékek a kiindulási vegyülettől függően telített vagy telítetlen szénhidrogének. Gyengén halogénezett vegyületek szintén előfordulnak mint közbenső és végtermékek. Illékony halogénezett szénhidrogének dehalogenezési sebessége a rendelkezésre álló fajlagos vasfelülettel arányosan növekszik. A vas oxidációja miatt a reakció során emelkedik a pH. A pH növekedése az illékony halogénezett szénhidrogének lebontására lassító hatással van, ezért pufferanyagok (pl. pirit) adagolása kedvező.

A talajvíz kémiai összetételétől és a benne oldott oxigén, hidrogénkarbonát és karbonát koncentrációjától függ a nehezen oldható vasvegyületek pl. sziderit ($FeCO_3$), vasoxihidroxidok vagy vasoxidok képződése. Ezek a vegyületek lerakódhatnak a vasfelületen és passziválás révén csökkenthetik a Fe^0 reaktivitását. A lebontási sebesség csökkentése mellett a csapadékképződés permeabilitás-csökkenéshez vezethet a reaktív falban. A laboratóriumi vizsgálatok azt mutatták, hogy a kicsapódás 15 %-os permeabilitás-csökkenést is okozhat.

Kiilerich et al. (2000), McMahon et al. (1999) és Wilkin et al., (2003) módszere szerint a porozitáscsökkenés az alábbiak szerint becsülhető:

$$\Delta V = \frac{Q}{1000} \cdot \left[\Delta Ca^{2+} \cdot 36,93 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} + \Delta Mg^{2+} \cdot 24,4 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} \right. \\ \left. + (\Delta TIC - \Delta Ca^{2+} - \Delta CH_4 - 2\Delta acetát) \cdot 21,28 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} \right. \\ \left. + \Delta SO_4^{2-} \cdot 13,46 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} + \frac{3}{4} \cdot \Delta O_2 \cdot 26,5 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} \right. \\ \left. + \frac{3}{8} \cdot (\Delta NO_3^- - \Delta NH_4^+) \cdot 7,2 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} + \Delta hal.szénh. \cdot 26,4 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} \right]$$

ahol ΔV = porozitáscsökkenés [$\text{cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$]

Q = térfogatáram [$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$]

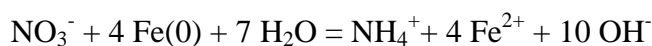
ΔCa^{2+} , ΔMg^{2+} , ΔTIC , ΔCH_4 , $\Delta acetát$, ΔSO_4^{2-} , ΔO_2 , ΔNO_3^- , ΔNH_4^+ , $\Delta hal.szénh.$ = a kalcium, magnézium, szervesetlen szén, metán, acetát, szulfát, oxigén, nitrát, ammónium és halogénezett szénhidrogén koncentráció változása, elektronegyenérték per liter

A permeabilitás-csökkenés pedig a következő összefüggéssel határozható meg:

$$\frac{k_{ft}}{k_{fstart}} = \frac{\left[\frac{n_{start} - \Delta n_t}{n_{start}} \right]^3}{\left[\frac{1 - n_{start} + \Delta n_t}{1 - n_{start}} \right]^2}$$

ahol k_{fstart} = kezdeti permeabilitás [$m s^{-1}$]
 k_{ft} = permeabilitás t időpillanatban
 n_{start} = kezdeti porozitás
 Δn_t = porozitás-csökkenés t időpillanatban

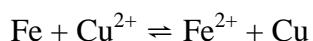
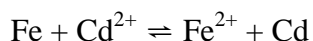
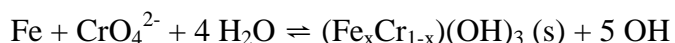
Az eredmények azt mutatják, hogy egy párhuzamos reakcióban az elemi vas a nitrátot nitritté redukálja, ami a illékony halogénezett szénhidrogének lebontását hátráltatja. A nitrit maga is csökkenti a lebontási sebesség állandóját. Elemi vasat szintén használtak nitrát lebontására:



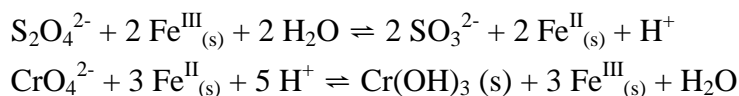
Denitrifikáló baktériumok a nitrátot N_2O -dá (kéjgáz) vagy elemi nitrogénné (N_2) tudják redukálni. Elemi vasat tartalmazó reaktív falakban az abiotikus nitrát-redukciót ammóniummá fokozatosan mikrobiológiai redukció N_2O -dá vagy N_2 -né váltja fel, úgyhogy a nitrát teljesen redukálódik számottevő ammóniumkoncentráció előidézése nélkül. Ennek során az anaerób korrózióból származó hidrogéngáz szolgál elektrononorként (Dahmke, 1997; Dahmke et al., 1997; LfU Baden-Württemberg, 1997; U.S. EPA 1998; Ebert et al., 1999a; Möller, 2000). Alacsony nitrátkoncentrációknál (néhányszor 10 mg/l) nem kell számolni a vasszemcsék felületének passziválásával abiotikus nitrát-redukció következtében, mivel a mikrobiológiai redukció dominál (Ebert, 2004).

Szulfát jelenléte főleg magasabb pH-érték mellett segíti az illékony halogénezett szénhidrogének lebontását azáltal, hogy a passziváló csapadékokat eltávolítja könnyen oldható vasszulfát formájában. A kutatások egyik fő célja az illékony halogénezett szénhidrogének és különösen a gyengén halogénezett vegyületek lebontásának javítása ill. lehetővé tétele Fe^0 -val. Az egyik módszer két fém keverékének pl. palládium/vas vagy alumínium/vas vagy katalizátorok használatán alapszik. Komposztot szintén kipróbáltak nitrátszennyezések lebontására.

Az elemi vas egyik további fontos alkalmazási területe krómtartalmú víz tisztítása: a króm(VI) króm(III)-má redukálódik és mint nehezen oldható króm(III)-vas(III)-oxihidroxid kicsapódik. A kromát redukcióját, mint a dehalogénezési reakciókat általában, a rendelkezésre álló vasfelület szabja meg. Pufferanyagok, pl. agyagásvány-tartalmú adalékok kedvezően hatnak kromát redukációjára. Kromát (Powell et al. 1995, Pratt et al. 1997, Puls et al. 1999, Alowitz und Scherer 2002), kadmium (Shokes und Möller 1999) és réz redukzív úton kicsapható (Gl. 1 bis Gl. 3), cink pedig magas oxigéntartalomnál és pH-nál a vas korróziós termékein adszorbeálódik (Rangsivek, Jekel 2005):



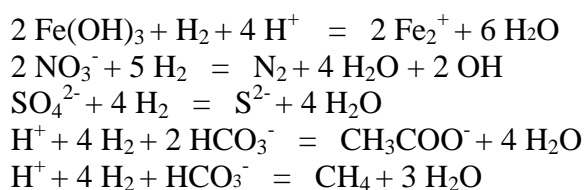
Arzén és antimon vashidroxidokkal együtt kicsapható (Shokes et al. 1999). Kromát redukciójára ditionit ($\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$) jön számításba, a reakcióban vas is részt vesz (Fruchter et al. 1997, Vermeul et al. 2002):



Nehézfémekkel szennyezett víz kezelésére főleg olyan anyagokat vizsgáltak, melyek a szennyezők kicsapását vagy szorpcióját eredményezik. Laboratóriumi kísérletek azt mutatták, hogy nehézfémek, mint ólom, kadmium vagy cink immobilizálhatók hidroxipatit [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$] segítségével. Egy másik módszer a fémek közvetett szulfidos kicsapásán alapszik: a vízben lévő szulfátot baktériumok H_2S -dá redukálják, ami a fémkationokkal nehezen oldható szulfidokká reagál.

Redukción vagy kicsapáson alapuló reaktív anyagok alkalmazásán kívül különböző szorbeáló anyagokat próbáltak ki. Az oxoanionok (szulfát, kromát vagy szelenát) szorpciós eltávolítására például módosított szerves zeolitokat ajánlanak. Hidrofób szerves szennyezők szorpcióval könnyen eltávolíthatók magas széntartalmú anyagok felhasználásával. Ennek megfelelően kerogéntartalmú agyagok, magas szénülési fokú szenek vagy aktívszén kiválóan alkalmasak szorbeáló falakban való felhasználásra.

Laboratóriumi kísérletekben (oszlopkísérletek, batchkísérletek és mikrokozmosz-vizsgálatok) valamint reaktív falakból vett mintákban hidrogénkedvelő vasredukáló, nitrátredukáló, szulfátredukáló, homoacetogén és metanogén mikroorganizmusokat lehetett kimutatni, melyek az anaerób korrózió során keletkező hidrogént hasznosítják (Korte et al., 1997; Liang et al., 1997; Weathers et al., 1997; Novak et al., 1998a; Till et al., 1998; Gu et al., 1999; Gu et al., 2002; Gavaskar et al., 2002; U.S. EPA, 2003; Rosenthal, 2004). Hatásuk a következő egyenletekkel írható le:



Úgynevezett dehalorespiratív mikroorganizmusokat is izoláltak, melyek a halogénezett szénhidrogéneket anaerób vagy aerób úton közvetlenül és teljesen metabolizálják (Bradley, 2003). A dehalorespiratív metabolizmusnak sokkal magasabb lebontási sebességet tulajdonítanak, mint a co-metabolikus lebontás (Wiedemeier et al., 1999). Halogénezett szénhidrogének dehalorespiratív redukciójánál elsősorban hidrogén szerepel elektron-donorként (Bradley, 2003), az elméleti határkoncentráció pedig a nitrátredukcióhoz hasonló (Yang & McCarty, 1998).

A reaktív falak technikáját számos terepi kísérletben és üzemi méretű kármentesítésnél alkalmazták. 2005-ig körülbelül 200 reaktív fal épült világszerte, egyedül az USA-ban 120 (ITRC 2005), Európában 20 - 30 (ebből 11 Németországban) és néhány alkalmazás Japánban és Ausztráliában (Birke et al., 2004). A falak jelentős része elemi vasat használ reaktív anyagként és illékony halogénezett szénhidrogénekkal szennyezett víz dehalogenezésére szolgál. Az eredmények azt mutatják, hogy magas tisztítási fok és hatékony lebontás érhető el.

Kedvező eredmények:

- A technikai kivitelezéshez fontos reakciómechanizmusok és a befolyásoló tényezők hatása a különböző reaktív anyagok hatásfokára (főképp a fémes vasnál) ismertek.
- A reakciókinetikát alapos vizsgálatokkal elemezték, ami alapján a permeábilis reaktív falak méretezhetőek.
- Világszerte 200 üzemi alkalmazás az eljárás hatékonyságát igazolja.
- A tölcser és kapu eljárásnál a fal (tölcser) építésére a hagyományos résfaltechnikát alkalmazzák. A permeábilis reaktív falak építésére speciális módszereket is kifejlesztettek (Debreczeni, Meggyes, 1999, Köhler, 1997, Meggyes, 2005, Burmeier et al., 2007).

Problematikus tényezők:

- Kicsapás és okkeresedés befolyásolhatja a reaktív falak hatékonyságát. Egyes félüzemi kísérletek viszont hosszú távú hatékonyságot mutattak ki. Megfelelő pH-pufferozás előnyös a hosszú távú állékonyság szempontjából.
- Nyilvánvaló, hogy a reduktív dehalogénezéssel a többszörösen halogénezett vegyületeket nem a végtermékekig bontják le (CO₂ és klorid), hanem például csak diklórmétánig. Ha vinilklorid szintén mint stabil termék keletkezne, mérgezés és nem méregtelenítés esete állna fenn.
- Egyes tanulmányok a talajvízben lévő nitrát sokkal mérgezőbb nitritté való redukálásáról tudósítanak.
- Az illékony halogénezett szénhidrogének lebontásánál de a természetes CO₂ redukálása közben is előfordul, hogy rövidlánú szénhidrogének, pl. propén vagy bután keletkezik, melyek ökotoxikológiai jelentősége még nem tisztázott.

Kutatási és fejlesztési igény

- Konstrukciók mély falakra
- Előregyártott zsaluelemek
- Hosszútávú stabilitás/korrózióállékonyság
- Reaktív anyagok regenerálhatósága
- Olcsó előállítási módszerek
- Reaktív anyagok fejlesztése
- Kombinált redukív/oxidatív reaktorok
- Permeábilis bioreaktorok
- Elektrokémiai eljárások
- Szennyezők keverékének kezelése
- Mikrobiológiai reaktív falak
- A falak paramétereinek és konstrukciójának optimálása, az anyag kiválasztás szempontjai
- További reaktív anyagok, pl. kettős fém rendszer vagy katalizátorok (pl. palládium, pirit) vizsgálata
- A katalizátorok költségoptimálása
- Reaktív anyagok hosszú távú hatásfoka és állékonysága
- A vízösszetétel, a Fe(0)-fal porozitásváltozása, hidraulikus hatékonysága és reaktivitása közötti összefüggések pontosabb kvantitatív leírása,
- A reaktív anyagok reaktivitásának és hatékonyságának időbeli változása a szennyezők és a hidrogeológiai és geokémiai határfeltételek függvényében,

- Mikroorganizmustársulások vizsgálata Fe(0)-falakban biomassza keletkezését befolyásoló tényezők meghatározására
- Háromdimenziós áramlási tér pontosabb leírása reaktív falakban,
- Reaktív falak kombinálása más módszerekkel: monitored natural attenuation, elektrokinetikus technika, biobarrierék, phytoremediáció stb.,
- Reaktív anyagok in situ regenerálása,
- Új monitoringstratégiák kifejlesztése, melyek figyelembe veszik, hogy a reaktív fal mögött a szennyezőanyagok dúsulása következhet be,
- A tisztulási front előrehaladási sebességének leírása,
- A költségmeghatározási módszerek fejlesztése.

3 Anyag kiválasztás és kármentesítési eljárások

A legfontosabb követelmények a reaktív anyagokkal szemben:

1. hosszútávú kémiai reaktivitás a szennyezőkkel szemben
2. toxicitásmentesség vagy legfeljebb kismértékű toxicitás
3. fizikai stabilitás a hosszútávú permeabilitás biztosítására
4. olcsó tömegcikknek kell lenniük

Négy típusú reaktív anyagot különböztetünk meg a dekontaminációs módszerek alapján (Starr & Cherry, 1994):

1. **A pH-érték vagy a redoxpotenciál megváltoztatása.** Ez a változás befolyásolja a pH- vagy redox-érzékeny anyagok oldhatóságát vagy a lebontás sebességét. Ennek fontos példája a illékony halogénezett szénhidrogének abiotikus lebontása elemi vassal.
2. **Ásványfázisok kicsapása** és egyúttal a szennyezők immobilizálása. Az ólom hidroxapatittal $\text{Ca}_{10}\text{OH}_2(\text{PO}_4)_6$ való kicsapása szolgál erre példaként. A hidroxapatit oldási folyamata megemeli a foszfátkoncentrációt, ami a nehezen oldható ólomfoszfát kicsapását eredményezi.
3. **Szennyezők szorpciója.** Hidrofób, szerves szennyezőknél például aktív szenet használnak szorbensként, míg szintetikus ioncserélők vagy zeolitok a talajvízben lévő ionos szennyezők (pl. fémek) eltávolítására alkalmasak.
4. **Tápanyag bejuttatása a talajba** a reaktív anyagok segítségével, ami javítja a mikroorganizmusok létfeltételeit.

A 3. táblázat áttekintést tartalmaz szóbajöhető reaktív anyagokról, melyek laboratóriumi kísérletek, in situ vizsgálatok és demonstrációs projektek során alkalmasnak bizonyultak.

3. táblázat: Potenciális és alkalmazott reaktív anyagok (Dahmke et al., 1996, Nordlohne et al., 1997, Burmeier et al., 2007)

Reaktív anyag	Szennyező	Folyamat	Fejlettség mértéke	Szerző
Fe ⁰ , Fe ⁰ /Al ⁰ Fe ⁰ /Pd-keverék Fe ⁰ /Pirit-keverék Pd/H ₂	Illékony halogénezett szénhidrogének, fluor-klór szénhidrogének, klórozott aromások, PCB Illékony halogénezett szénhidrogének	Abiotikus, reduktív dehalogénezés Redukció	Laboratóriumi kísérlet, félüzemi kísérleti berendezés, nagyüzemi alkalmazás Laboratóriumi kísérlet	Gillham et al., 1994 Korte et al., 1995 Grittini et al. 1995 Burmeier et al., 2007 Schreier et al. 1995 Burmeier et al., 2007
Fe ⁰ és metanotróf bakteriumok	Illékony halogénezett szénhidrogének	Abiotikus, reduktív dehalogénezés és mikrobiológiai lebontás	Laboratóriumi kísérlet	Weathers et al., 1995
Zeolitok és metanotróf bakteriumok	TCE	Szorpció mikrobiológiai lebontással kombinálva	Laboratóriumi kísérlet	Alvarez-Cohen et al., 1993
ORC (oxigén kibocsátó vegyületek)*	BTEX	Oxidatív lebontás, mikrobiológiai hatás	Laboratóriumi kísérlet, in-situ vizsgálat	Bianchi-Mosquera et al., 1994 Burmeier et al., 2007
Aktívszén	Benzol	Szorpció	Laboratóriumi kísérlet	Rael et al., 1995 Burmeier et al., 2007
Fe ⁰ Aktívszén	Nitroaromások Poliaromás szénhidrogének (PAH)	Redukció Szorpció mikrobiológiai lebontással	Laboratóriumi kísérlet Laboratóriumi kísérlet	Agrawal et al., 1996 Schad, 1996a Burmeier et al., 2007
Fe ⁰	CrO ₄ ²⁻	Redukció és kicsapás	Laboratóriumi kísérlet, félüzemi kísérleti berendezés	Blowes et al., 1992 Burmeier et al., 2007
Hidroxiapatit [Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (OH) ₂]	Pb ²⁺	Kicsapás	Laboratóriumi kísérlet, in-situ vizsgálat	Ma et al., 1993 Burmeier et al., 2007
Hidroxiapatit [Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (OH) ₂]	Zn ²⁺	Szorpció / közös kicsapás	Laboratóriumi kísérlet	Xu et al., 1994

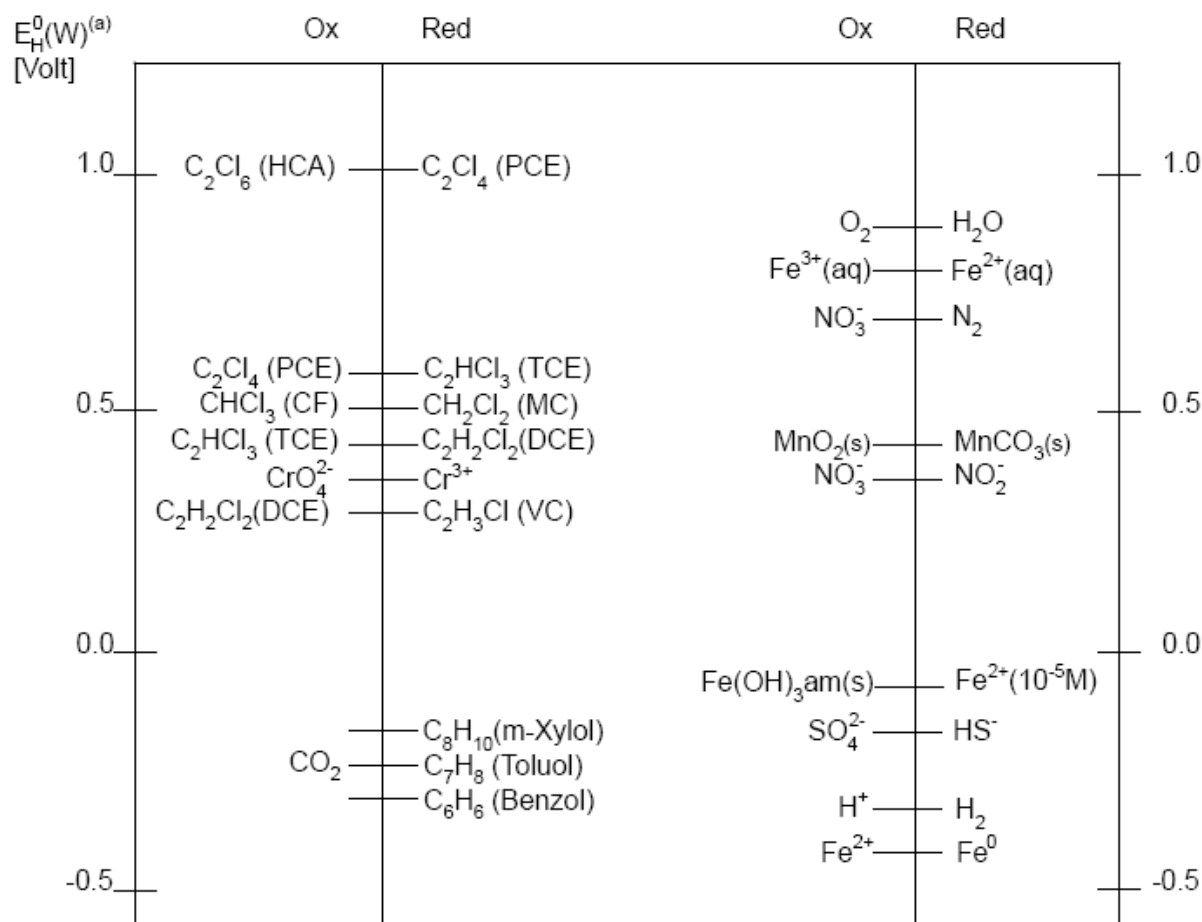
Reaktív anyag	Szennyező	Folyamat	Fejlettség mértéke	Szerző
Hidroxiapatit [Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (OH) ₂]	Cd ²⁺	Közös kicsapás	Laboratóriumi kísérlet	Xu et al., 1994
Oltott mész, pernye	UO ²⁺	Közös kicsapás	Laboratóriumi kísérlet	Morrison et al., 1992
Fe ⁰	UO ₂ ²⁺	Redukció és kicsapás	Laboratóriumi kísérlet	Anonymus (CI-RIA), 1995 Biermann, 2007
	NO ³⁻	Redukció		
Fe ⁰	TcO ⁴⁻	Redukció és kicsapás	Laboratóriumi kísérlet	Clausen et al., 1995
Fe ⁰	As(V) As(III) Se(VI)	Redukció és kicsapás	Laboratóriumi kísérlet	Blowes et al., 1996 a
Szerves szén- Forrás	Fémek	Fém-szulfidok kicsapása szulfátredukáló környezetben	Laboratóriumi kísérlet, in-situ vizsgálat	Blowes et al., 1996 b
Tőzeg, Fe(III)- oxidok	MoO ₄ ²⁻	Szorpció / közös kicsapás	Laboratóriumi kísérlet	Morrison et al., 1992
Zeolitok	⁹⁰ Sr ²⁺	Szorpció	Laboratóriumi kísérlet	Cantrell et al., 1994
Szerves modifikált zeolitok	Oxoanionok pl. CrO ₄ ²⁻	Szorpció	Laboratóriumi kísérlet	Haggerty et al., 1994
Aktívszén	Hg ⁰	Szorpció	Laboratóriumi kísérlet	Krishnan et al., 1994
Fűrészpor	NO ₃ ⁻	Redukció	In-situ vizsgálat	Robertson et al., 1995

* Olyan anyagok (valószínűleg peroxidok), melyek vízkontaktus esetén hosszú időn keresztül oxigént adnak le. A pontos vegyi összetétel szabadalmi okokból nem ismert.

3.1. Redukciós folyamatok

A kármentesítés reduktív folyamatában a szennyező és a reaktív anyag közötti kémiai termodinamikai egyensúly hiányát használják fel.

A 2. ábra a fontos redox-párok standard redoxpotenciálját, azaz E_H⁰-értékeit mutatja. A baloldali oszlop tipikus talajvíz szennyezőket mutat: illékony halogénezett szénhidrogének, króm, BTEX, a jobboldali oszlop talajvízben domináló redoxpárok E_H⁰-értékeit tartalmazza. Minél nagyobb a redoxpárok E_H⁰-értékei közötti különbség, annál nagyobb a termodinamikai hajtóerő. A perklóretén PCE reduktív dehalogénezése például (a PCE/TCE redoxpár E_H⁰-értéke kb. 650 mV) vassal (Fe⁰/Fe²⁺ E_H⁰-értéke kb. 440 mV), sokkal spontánabban zajlik le mint a króm(VI) króm(III)-má való redukálása (CrO₄²⁻/Cr³⁺ E_H⁰-értéke kb. 325 mV). Az első esetben a potenciálkülönbség kb. 1000 mV, a másodikban kb. 770mV.



2. ábra. Az anyagpárok E_H^0 standard redoxpotenciálja pH=7 és $c_{Cl^-} = 10^{-3}$ mol/l-nél. Gyakori talajvízszennyezők (baloldali oszlop) és természetes talajvízösszetevők (jobboldali oszlop) (Haderlein & Schwarzenbach szerint, kiegészítve: Dahmke et al., 1996a)

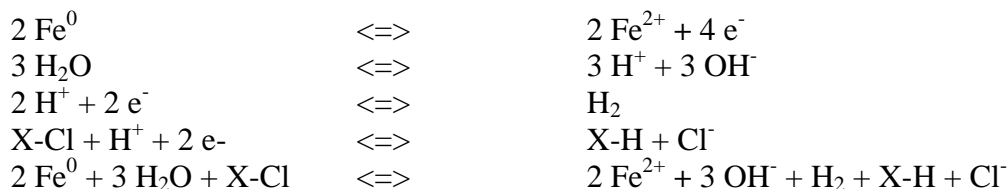
A többszörösen halogénezett vegyületek maguk is erős oxidálószer, melyeket redukálószer (Fe⁰, H₂, S²⁻) lebonthatnak. Ezzel szemben a gyengén halogénezett vegyületek mint pl. vinilklorid (VC) vagy 1,1-diklóretén (1,1 DCE) olyan anyagok, melyek mind erős oxidáló mind erős redukálószerrel és csekély energiafejléssel lebonthatók. Ennek megfelelően ezen vegyületeknek a környezetben megfigyelhető perzisztenciája részben azzal magyarázható, hogy a természetben gyenge oxidáló és redukáló szerek dominálnak (Dahmke et al., 1996). Aromás vegyületek (benzol, toluol, xilol) önmaguk is erős redukáló szerek, melyek csak oxidatív módon bonthatók le.

A redukción alapuló reaktív falak jelenleg legjelentősebb reaktív anyaga az elemi vas (Fe⁰). A legfőbb alkalmazási terület illékony halogénezett vegyületek dehalogenezése, melyet alapos laboratóriumi és in situ kísérletekkel vizsgáltak. Ezenkívül használják az elemi vasat oxoanionok (kromát, arzenát) redukálására és kicsapására is.

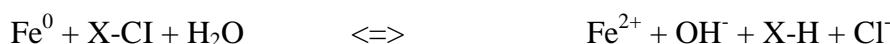
Vas mellett más anyagokat is vizsgálnak redukáló szerként reaktív falakban való alkalmazásra: pl. más tiszta fémeket (Boronina & Klabunde, 1995 a), hidrogént palládiummal kombinálva vagy fűrészpont nitrát-redukcióra (Robertson et al., 1995).

3.1.1 Illékony halogénezett szénhidrogének lebontása és a dehalogénezés mechanizmusa Fe^0 -val

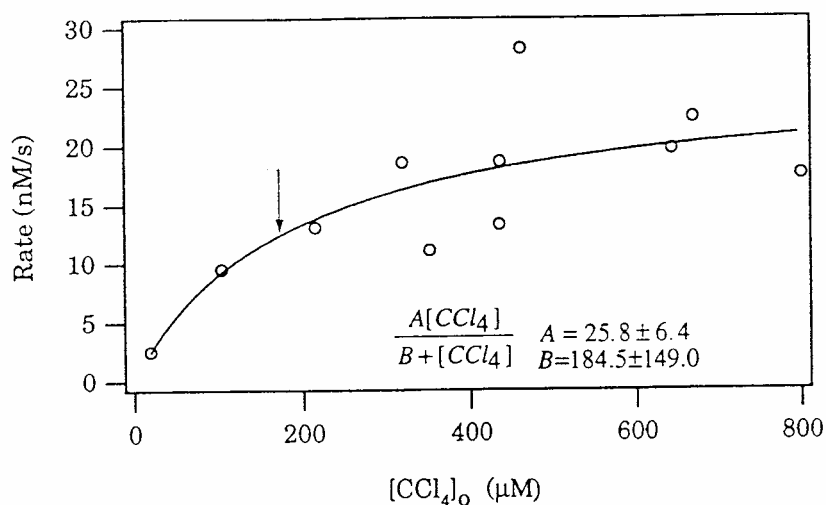
A dehalogénezés Fe^0 -val Gillham & O'Hanessian (1994) szerint, a víz disszociációját is figyelembe véve, a következő reakciókból áll:



Ha a víz disszociációját figyelembe kívül hagyjuk, a redukciót a következő egyenlet írja le:



Reardon (1995); Odziemkowski et al. (1998); Scherer et al. (1998) és Dahmke et al. (2000) különböző ásványi fázisokat, pl. magnetitet vagy FeO -t, jelölnek meg Fe(II) -nyelőként. Erősebb oxidálószer (oxigén, nitrát) jelenléte esetén az Fe(II) tovább oxidálódik Fe(III) -má. Emiatt széles alkalmazási skála áll rendelkezésre mind szerves, mind szervetlen szennyezők terén, de a tisztítás fő célja klórozott eténnel (PCE, TCE és cisz-DCE) szennyezett talajvíz (Birke et al., 2004b; Carey et al., 2002; Dahmke, 1997; EPA, 2002; Gavaskar et al., 2002).

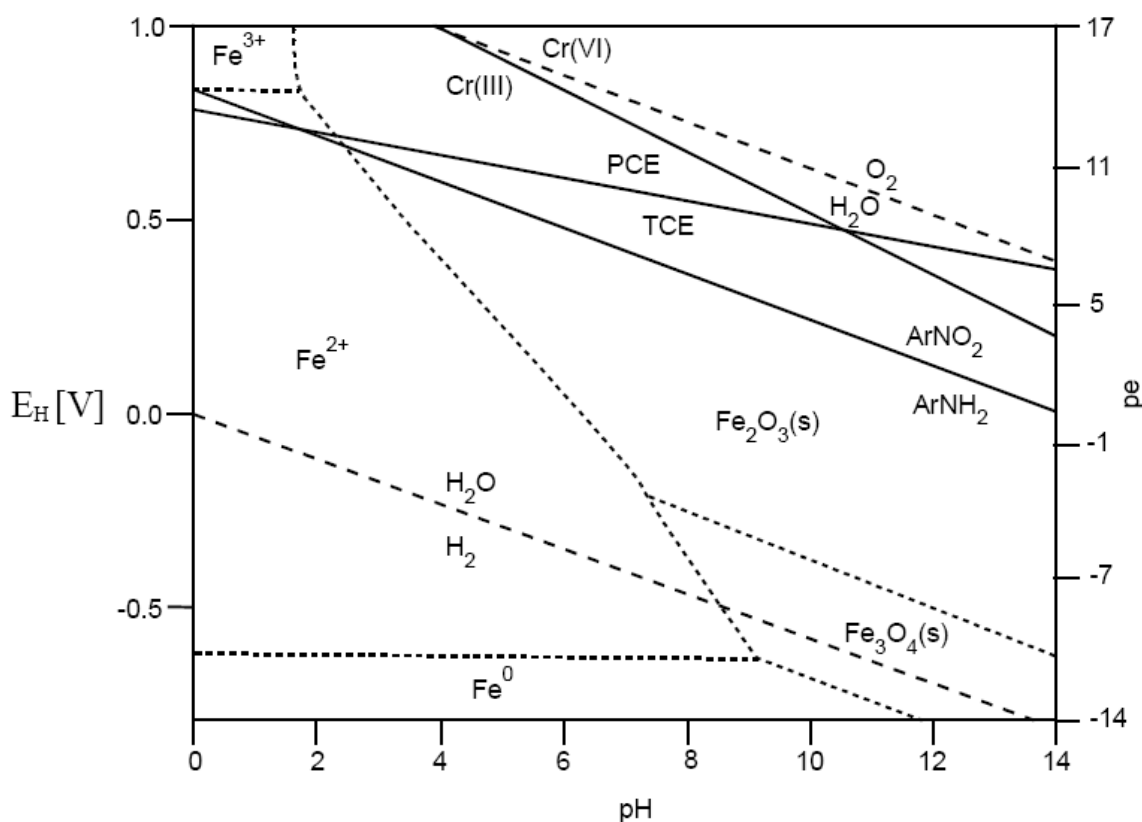


3. ábra. CCl_4 kezdeti koncentrációjának a dehalogénezés kinetikájára való hatása (fajlagos felület: $\text{Fe}^0 = 0,2 \text{ m}^2/\text{g}$, $C_{\text{Fe}^0} = 17 \text{ m}^2/\text{l}$ oldat, Scherer & Tratnyek (1995))

A legtöbb szerző (Orth & Gillham, 1996, Matheson & Tratnyek, 1994, Liang et al., 1995) a vassal való redukzív halogénezést pszeudo elsőrendű reakcióként írja le a lebontandó anyagra vonatkozóan. Ez azt jelenti, hogy a reaktív vas felülete felé irányuló tömegtranszport korlátozza a lebontást, és a dehalogénezési állandó egyenesen arányos az illékony halogénezett szénhidrogének kezdeti koncentrációjával. Scherer & Tratnyek (1995) vizsgálatai viszont azt mutatták, hogy a tetraklórmetán lebontáskinetikája csak alacsony koncentrációnál, mint amilyenek a természetben lezajló reakciók, elsőrendű. Az illékony halogénezett szénhidrogének magasabb kezdeti koncentrációjánál a lebontási sebesség egy platóhoz közeledik (3. ábra), úgyhogy a kémiai reakció sebessége lényegesen kisebb, mint a

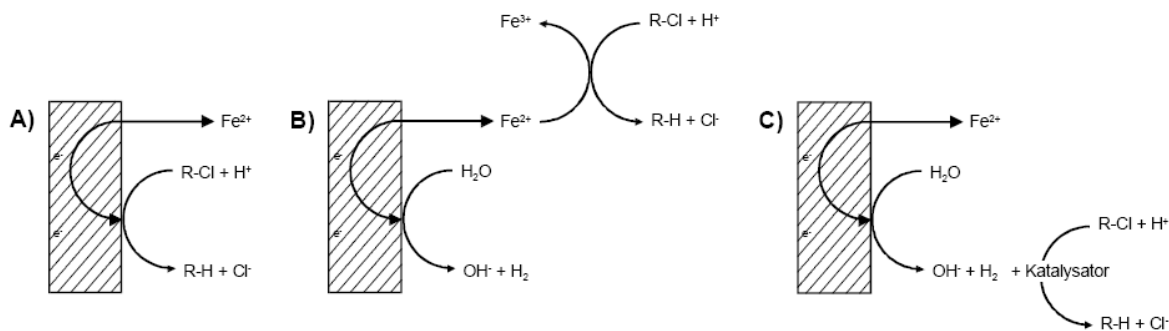
Fe^0 -felület felé irányuló tömegtranszport. Ennek megfelelően egy bizonyos kezdeti koncentrációtól fogva a transzportreakciók helyett felületi reakciók szabnak határt a folyamatnak.

A Fe^0 -val való dehalogénezés reakciómechanizmusában Matheson & Tratnyek (1994) szerint az illékony halogénezett szénhidrogének lebontása egymást követő szukcesszív dehalogenezési lépésekben történik és a lebontási sebesség minden lépés után kisebb lesz. Sivavec & Horney (1995) valamint Cipollone et al. (1995) is az illékony halogénezett szénhidrogének szekvenciális dehalogénezésére következtetett. Ezeknél a vizsgálatoknál viszont csak alacsony koncentrációjú lebontási termékeket találtak ill. azok teljes hiányát állapították meg. Feltehető, hogy a képződött köztesanyagok a végső dehalogénezésig a Fe^0 -felszínen szorbeálva vannak és ott hamarabb lebomlanak, mintha oldatban lennének.



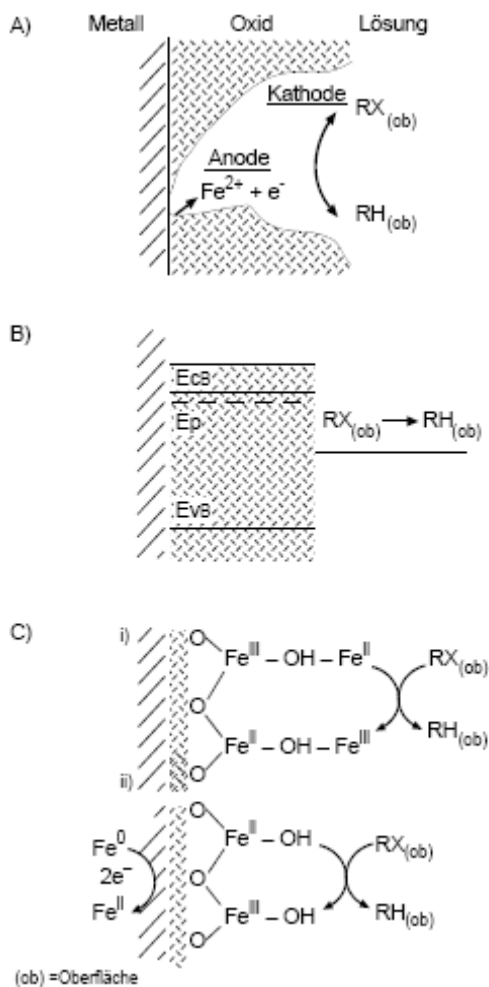
4. ábra. Víz, vas, PCE, ArNO_2 , ArNH_2 és Cr(VI) stabilitásdiagrammja (Scherer et al., 2000)

A 4. ábra víz, vas, PCE (perklóretén), ArNO_2 (nitrobenzol), ArNH_2 (anilin) és Cr(VI) stabilitásdiagrammján (E_{H} -pH) Fe(0) instabilitását mutatja ezen szennyezők jelenlétében (Scherer et al., 2000). A hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) és magnetit (Fe_3O_4) vonalak a vas(II/III)-fázisok oldhatóságát határolják.



5. ábra. Halogénezett szénhidrogének lehetséges lebontási mechanizmusai Fe(0) jelenlétében (Dahmke, 1997; Matheson & Tratnyek, 1994; Ebert, 2004)

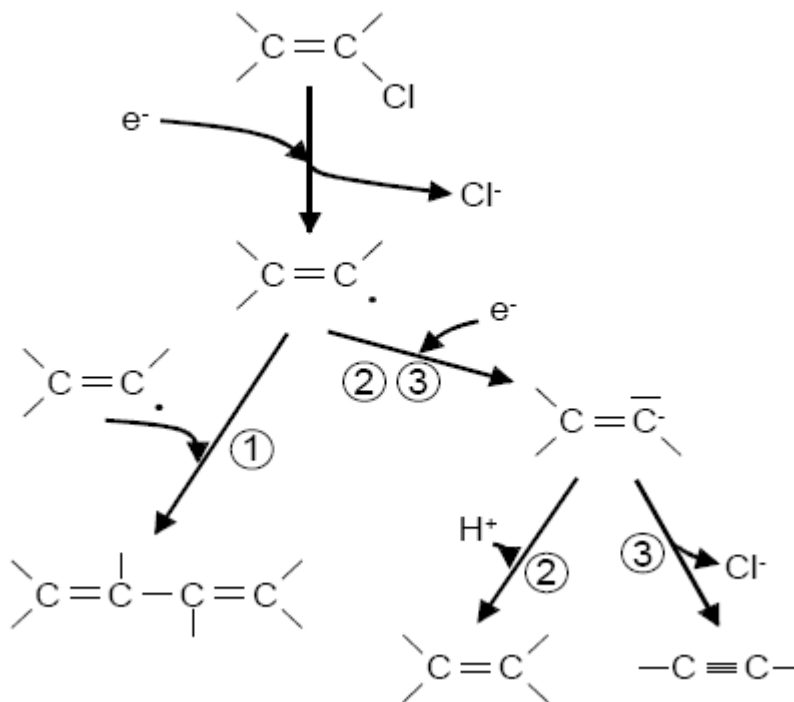
Az 5. ábra halogénezett szénhidrogének lehetséges lebontási mechanizmusait mutatja Fe(0) jelenlétében: A) direkt elektrontranszfer, B) redukció Fe²⁺ segítségével és C) redukció H₂ segítségével (Dahmke, 1997; Matheson & Tratnyek, 1994; Ebert, 2004).



6. ábra. Lehetséges elektrontranszfer mechanizmusok (Scherer et al., 1998b)
Metall: fém, Lösung: oldat, Kathode: katód, Anode: anód, ob=Oberfläche: felület

Matheson & Tratnyek (1994) szerint az elektrontranszfer, ami a redukzív dehalogénezéshez szükséges, közvetlenül a vas felületén történik, közben a pH 8 és 10 közötti értékre emelkedik. A 6. ábra a lehetséges elektrontranszfer-mechanizmusokat mutatja a vas-oxid-víz rétegben: A: elektrontranszfer a fém felületéről (lyuk az oxidrétegben); B: elektrontranszfer egy oxidréteg vezetési sávról; C: elektrontranszfer adszorbeált vagy Fe(II) rács felületi helyeiről (Scherer et al., 1998b)

Hydrogenolizisen kívül, melyet halogénezett metánok fő lebontási módszerének tekintenek (Matheson & Tratnyek, 1994), más dehalogénezési reakciók is lehetségesek. Rifi & Covitz (1974) és Vogel et al. (1987) szerint egyszerű telítetlen klórozott szénhidrogének (PCE vagy TCE) redukciójánál az első lépés egy elektronnak az energetikailag kedvező szabad π -pályára való vitele, melyet egy vinilgyök képződése követ kloridion leválása során. Ezután két gyök dimerizálódhat és hosszabbláncú alifás vegyületek képződhetnek. További elektronfelvétel és protonaddíció egy kloridiont szubsztituálhat (hydrogenolízis), vagy további kloridion leválása mellett háromszorosan telítetlen vegyület képződhet (diklór-elimináció, β -elimináció). A lehetséges lebontási és köztes termékeket a 7. ábra mutatja. Különös figyelmet igényel toxikus vagy nehezen lebontható vegyületek (pl. vinilklorid) képződése (Johnson et al., 1996; Scherer et al., 1998).



7. ábra. A klóreltávolítás reakciómechanizmusai egyszerű telítetlen alifás klórozott szénhidrogéneknél: 1: dimerizáció, 2: hidrogenolízis, 3: diklór-elimináció vagy β -elimináció (Rifi & Covitz, 1974, Ebert, 2004)

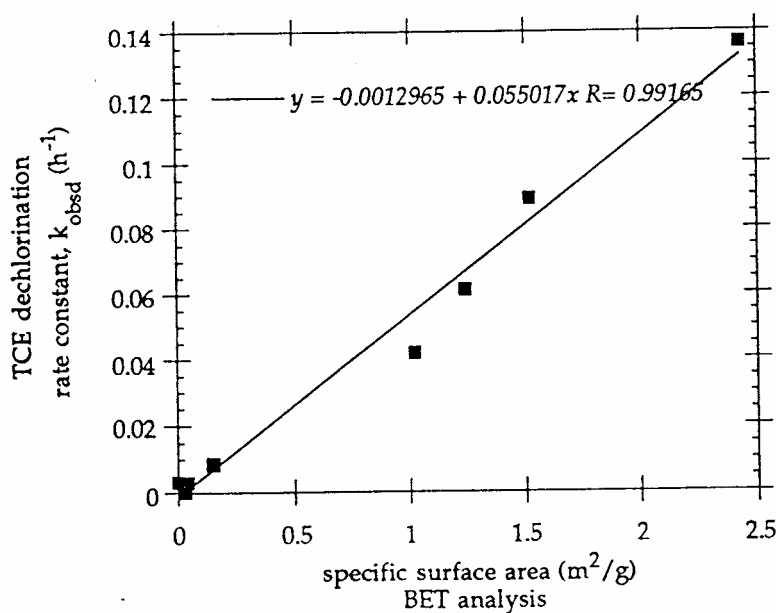
Elemi vassal nem kezelhetők: diklórmetán, diklórétán, klórétán, klórmetán, az összes aromás klórozott szénhidrogén pl. klórbenzolok, klórfenolok, poliklórozott bifénilek (PCB), dioxinok, BTEX, PAH, éter (pl. metil-terc-butiléter, MTBE) alkoholok (glikol, fenolok). Tratnyek et al. (2003) szerint növényvédőszeres szintén nem kezelhetők elemi vassal, mert nem

rendelkeznek redukálható funkciós csoportokkal. Burris et al. (1995), Bell et al. (2003); Köber et al. (2002) és Morkin et al. (2000) viszont azt találták, hogy vasgranulátum számottevő szorpciós kapacitással rendelkezik aromás szénhidrogénekkel szemben.

3.1.2 Fizikai és kémiai határfeltételek hatása az illékony halogénezett szénhidrogének Fe^0 -val való dehalogenezésére

Sivavec & Horney (1995) a fajlagos vasfelületet tekinti a legfontosabb paraméternek, amely az illékony halogénezett szénhidrogének lebontási sebességét döntően befolyásolja. 25-féle különböző kereskedelmileg forgalmazott vastípussal végzett vizsgálatok azt mutatták, hogy a fajlagos felület nagy mértékben változik és a lebontási állandó a pszeudo elsőrendű reakciónak megfelelően egyenesen arányos a fajlagos felülettel (8. ábra).

Matheson & Tratnyek (1994) szerint savas mosással a vas reaktivitása jelentősen fokozható. Eletronmikroszkópos vizsgálatok kimutatták, hogy a rendelkezésre álló reaktív felület a mosással megnőtt, mivel a mosás a nemreaktív kicsapódott termékeket mint pl. vasoxidot a felületről eltávolította.

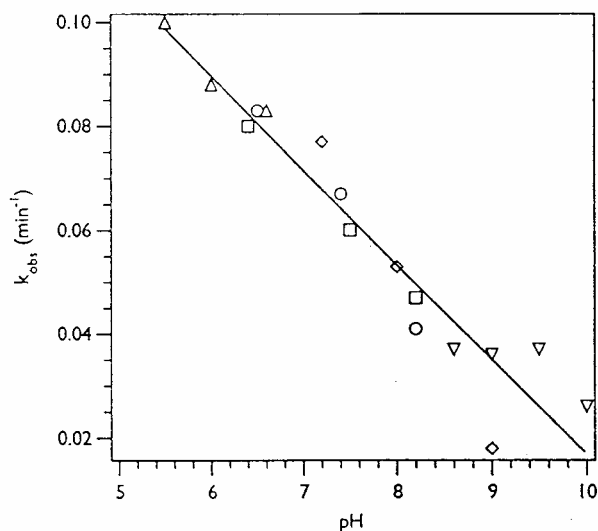


8. ábra. A fajlagos Fe^0 -felület hatása (pszeudo 1. rendű) a triklóretén dehalogenezési reakciósebességi állandójára $C_{\text{Fe}^0} = 250 \text{ g/l}$ -nél és 25°C hőmérsékletnél (Sivavec & Horney, 1995).

A fajlagos vasfelület mellett a pH-érték és a reakciósebességi állandó között szintén lineáris (pszeudo 1. rendű) összefüggést állapítottak meg (Matheson & Tratnyek, 1994). A 9. ábra mutatja a növekvő pH-értékekkel csökkenő dehalogenezési állandót. Ez két különböző folyamattól függ. Egyrészt a dehalogenezés egyensúlya a növekvő hidroxilion-koncentráció miatt a lebontandó illékony halogénezett szénhidrogének irányába tolódik el.

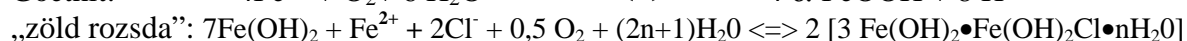
Másrészt a redoxreakció, melynél az illékony halogénezett szénhidrogének redukálódnak, a vas pedig Fe^{2+} -vé oxidálódik, a pH-érték növekedésével jár. Tehát a talajvíz vegyi összetételétől és az O^{2-} , HCO_3^- und CO_3^{2-} -koncentrációtól függően, magasabb pH-nál nehezen oldható vaskarbonátok és/vagy -oxidok képződnek, melyek a vasfelszínt beborítják

(Sivavec, 1996, Vogan et al., 1995). A csapadék csökkenő lebontási sebességet eredményezhet passzíváló hatás és a reaktív fal csökkent permeabilitása miatt. Milburn et al. (1995) vizsgálatait azt mutatják, hogy a dehalogénezés sebessége oxigén jelenlétében és növekvő pH-értékkel csökken. Helland et al. (1995) szerint is a kicsapott vas(III) és a reaktív Fe^0 -felület ezzel járó befedése vezet a tetraklórmetán CCl_4 jelentősen alacsonyabb lebontási sebességéhez oxidáló környezetben.



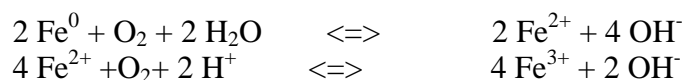
9. ábra. A pH-érték hatása a tetraklórmetán (pszeudó 1. rendű) lebontási állandójára (Matheson & Tratnyek, 1994).

Johnson & Tratnyek (1995) szerint sziderit, goethit és „zöld rozsda” a lehetséges csapadékok, amelyek különböző geokémiai feltételek mellett keletkezhetnek. A következő egyenletek írják le a lehetséges reakciók mechanizmusát:

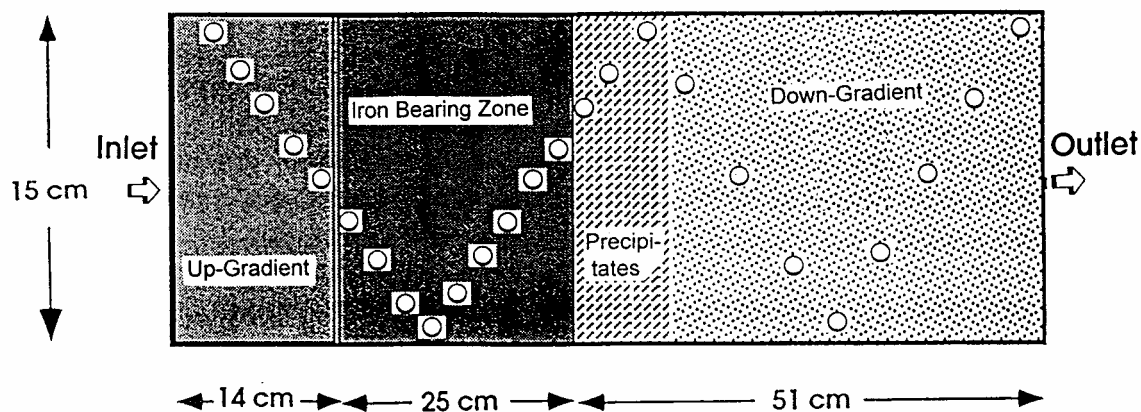


Sziderit karbontartalmú vizekben szokott képződni, míg goethit oxigén jelenlétében Fe^{2+} további Fe^{3+} -má való oxidációjánál keletkezik. A „zöld rozsda” kevert oxid, amely Fe^{2+} -t, Fe^{3+} -t és Cl^- -t tartalmaz. Az anaerób vaskorrózió köztes terméke és tovább reagálhat háromértékű vasoxihidroxidokká ill. -oxidokká.

Johnson & Tratnyek (1994) oszlopkísérletekben vizsgálták a csapadékképződés hatását tetraklórmetán, CCl_4 , lebontására, amivel a Fe^0 -falban lévő korróziót szimulálták. A kísérleti oszlop (10. ábra) egy homokkal töltött fal előtti (Up-Gradient) és utáni (Down-Gradient) zónából és egy reakciós tartományból (Iron Bearing Zone) állt, amelyben Fe^0 (24 tömeg-%) és homok (76 tömeg-%) keveréke volt. A pórúsvízből az egész oszlop mentén vettek mintát, a mintavételi helyeket a 10. ábrán üres körök jelzik. Tetraklórmetánnak az oszlopra való feladása előtt ($c_0 = 1,6 \text{ mmol CCl}_4$) a kísérleti berendezést hosszú időn keresztül (3 hónap) 15°C hőmérsékleten levegővel telített, deionizált vízzel öblítették, úgyhogy a pórúsvízben a reaktív fal előtti részen 15 000 ppb oxigén koncentráció volt. Ezalatt az idő alatt a víz a vasat a reaktív zónák határterületén korrodálta:



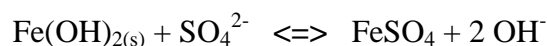
A korrózió hatására már az első vastartalmú mintavételi pontnál az oxigénkoncentráció 10 ppb-ra csökkent és a reaktív fal előtti rész és a reaktív Fe^0 -tartomány közötti határfelületen a csapadék egy narancssárgás-fekete sávot képezett. Az oszlop többi részén a koncentráció a mérhetőség határa (5 ppb) alatt volt.



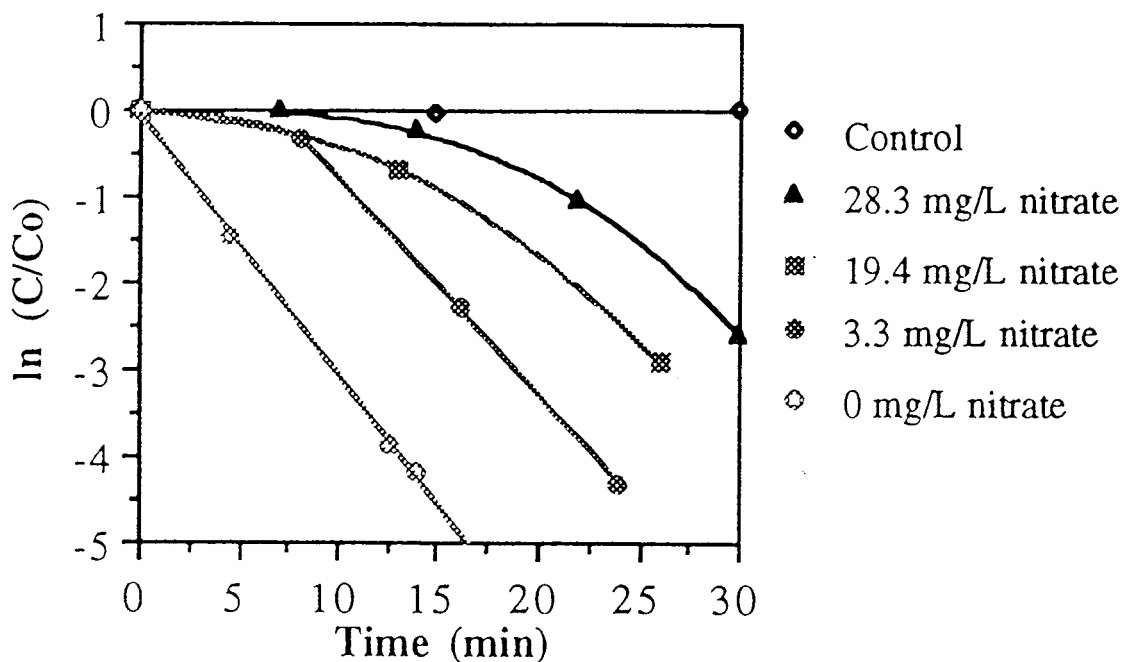
10. ábra. Johnson & Tratnyek, (1994) oszlopkísérleteinek vázlatja, amely egy homokkal töltött fal előtti (Up-Gradient) és utáni (Down-Gradient) zónából és egy Fe^0 -val töltött reaktív tartományból (Iron Bearing Zone) áll (24 % vas und 76 % homok): a csapadékképződés és hatásának vizsgálata a reaktív falban.

A tetraklórmetán-oldat feladása után a pH a fal előtti rész és a reaktív tartomány közötti határfelületen kb. pH=6-ról pH=7-re emelkedett a vaskorrózió és a dehalogénezés miatt. A vassal töltött zónán belül, ami a reaktív falat szimulálta, a pH 9-re emelkedett a dehalogénezés miatt. Egyidejűleg az emelkedő pH-értékkel párhuzamosan, a porusvízben megemelkedett a vaskoncentráció. Közvetlenül a reaktív zóna és down-gradient zóna közötti határfelületen kicsapási reakciók zajlottak le, és egy keskeny zöldes-szürke sáv képződött, amely valószínűleg a „zöld rozsának” felel meg. Egy-két hónappal később a down-gradient zónában barna szín alakult ki, ami $\text{Fe}(\text{OH})_2$ vagy $\text{Fe}(\text{OH})$ kicsapódására utalt. A kicsapási reakciók vaskoncentráció-csökkenést eredményeztek a down-gradient zónában és 45 cm után a pH az eredeti értékre csökkent. Ellentétben a várakozással (korábbi vizsgálatok alapján), hogy a kicsapási reakciók miatt a lebontási sebesség az üzemeltetési idővel csökken, Johnson & Tratnyek (1994) lebontási vizsgálataikban konstans dehalogénezési sebességet állapítottak meg.

A reakció további folyamán, amikor a pH-érték a dehalogénezés miatt nő, a tetraklórmetán felezési ideje a kizárólag Fe^0 -val mért értékhez képest jelentősen csökkent szulfát jelenlétében. A szulfátnak a reakciósebességre való gyorsító hatását magasabb pH-értékeknél az magyarázza, hogy a passzíváló hatású csapadékok könnyen oldható vasszulfát (FeSO_4) formájában eltávoznak vasfelületről:



A nitrát és nitrit hatását az 1,2-dibróm-3-klórpropán (DBCP) Fe^0 -val való lebontására Siantar et al. (1995) pufferezett környezetben (pH=7) vizsgálta. A 11. ábra mutatja, hogy a DBCP lebontásának kezdetét a növekvő nitrátkoncentráció késlelteti. Ezt a jelenséget konkurrens lebontási folyamatokkal magyarázzák. A vizsgálatok azt mutatták, hogy a nitrát elemi vassal is redukálható: 3,3 perc alatt a nitrát kezdeti koncentrációja felére csökkent (kezdeti NO_3^- koncentráció: 56,5 mg/l, vaskoncentráció kb. 36 g/l). A lebontás folyamán a nitrát nitritté redukálódott. A végtermékeket nem azonosították, de feltételezték, hogy a nitrit N_2O -on és ammonián (NH_3) keresztül elemi nitrogénné (N_2) redukálódik. A nitrit csökkentette a DBCP lebontási sebességét: 4,3 mg/l nitrit hozzáadásával a dehalogénezési állandó 15 %-kal csökkent.

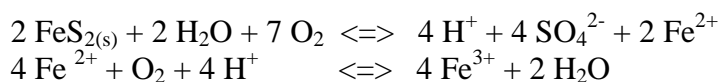


11. ábra. 1,2-dibróm-3-klórpropán (DBCP) lebontása Fe^0 -val különböző nitrát-koncentrációknál (Siantar et al., 1995). Kezdeti koncentrációk: DBCP: 10 $\mu\text{g/l}$ pH=7-nél 0,1 M puffer oldatban, Fe^0 : 36 g/l.

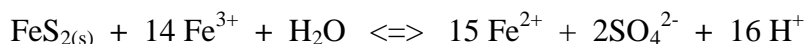
3.1.3 A Fe^0 -val való dehalogénezés fokozása további reaktív anyagokkal

A lebontási sebesség fokozható azzal, hogy a Fe^0 -hoz kéntartalmú adalékokat, főként piritet (FeS_2) kevernek (Holser et al., 1995, Harms et al., 1995). Harms et al. (1995) vizsgálatai szerint a tetraklórmetán dehalogénezési sebessége jelentősen felgyorsul kéntartalmú adalékanyagok mint pl. Na_2SO_4 , HEPES = 4-(2-hidroxietyl)-1-piperacin etánszulfonsav puffer valamint Na_2S , FeS és FeS_2 hatására.

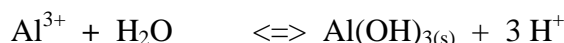
A dehalogénezés nagymértékű felgyorsulása szulfidos anyagokkal többek közt a pH-érték változásával is összefügg. Harms et al. (1995) szerint a pirit (FeS_2) oxigén jelenlétében a következő egyenletek szerint reagál:



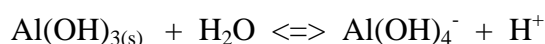
A pirit oxidációja oxigént fogyaszt. Ennek az a következménye, hogy az oxigéntartalmú vascsapadék képződése leáll, s így a vasfelületet passziválása is mérséklődik. A képződő vas(III)ionokat a pirit redukálja, s ezzel egyidejűleg hidrogénionok (H^+) képződnek:



A lebontási sebesség gyorsításának egy további módszere két fém keverékén alapszik. Appleton (1996) triklóretén és perklóretén lebontási sebességét 10-szeresre növelte nikkelezett vassal. Dahmke et al. (1996) a két fém módszerére elemi alumíniumot és vasat alkalmazott. Triklóretén lebontási sebessége ezzel a keverékkel kb. négyszer akkora volt, mint csak vassal. Dahmke (1996) szerint az alumínium pufferező hatása eredményezi a reakciósebesség növekedését.



Ha $pH > 7$:



A legnagyobb lebontási sebességet palládiumozott vassal érték el. Triklóretén lebontási sebességét 100-szorosára növelték (Korte et al. (1995). Ez a módszer nehezen lebontható vegyületek, mint diklórmétán sőt poliklórozott bifenilek (PCB) lebontását is lehetővé tette szobahőmérsékleten.

Cary & Cantrell (1994) a vasrészecskék földbejutattása előtt biológiailag lebontható szerves folyadékokban, mint pl. étolajban való áztatását javasolja. Az olajtól két külön hatást várnak a halogénezett vegyületek Fe^0 -val való lebontásának javítására: Egyrészt a halogénezett anyagokkal szemben szorbensként kell viselkednie. Továbbá az elemi vas hosszútávú stabilitását és reaktivitását növeli, miközben az olaj a heterotróf mikroorganizmusoknak alapanyagul szolgál, melyek a talajvízben oldott oxigénnel táplálkoznak és így az oxigéntartalmú vasvegyületek kicsapását megakadályozzák.

Melzer & Weth (1997) vasszivacsot használt illékony halogénezett szénhidrogének eltávolítására. A szennyezők vegyi tisztításnál keletkező tetraklóreténből és kismennyiségű triklóreténből álltak. Arra a következtetésre jutottak, hogy a felületkezelés a kereskedelemben forgalmazott vasforgácsot részben passziválja, ami a reaktív helyek számát csökkenti. A vasszivacs viszont egy különleges előállítási folyamat révén nagyrészt elemi vasat tartalmaz a felületén, így magas fajlagos reaktivitás érhető el. A vasszivacs 75%-os porozitású, fajlagos felülete $0,63 \text{ m}^2/\text{g}$ és permeabilitása $3 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, ami kedvező reakciós és áramlási viszonyokat biztosít. A sűrűség viszonylag alacsony: 1700 kg/m^3 , ami megkönnyíti az anyag kezelhetőségét. Laboratóriumi és félüzemi vizsgálatok már $0,5 \text{ m}$ átáramlott reaktorhossz után a tetraklóretén és triklóretén teljes lebontását mutatták.

A dehalogénezés egy további módszere mikrobiológiai lebontás és abiotikus folyamatok kombinálása. Weathers et al. (1995) szerint metanogén környezetben két lebontási mechanizmus lehetséges Fe^0 jelenlétében: egyrészt közvetlen abiotikus redukció, másrészt egy indirekt redukció, amelyenél metanotróf mikroorganizmusok biológiailag bontják le a halogénezett vegyületeket. Utóbbinál a vas hidrogént fejleszt, melyet a mikroorganizmusok energiaforrásként használnak.

4. táblázat Elemi vassal kezelhető halogénezett és nitrogéntartalmú szennyezőanyagok és felezési idejük a lebontási sebesség jellemzésére (Gavaskar et al., 2000) (NA: nincs adat).

Szerves vegyületek	Tiszta vas $T_{1/2}$ (h)	Kereskedelmi vas $t_{1/2}$ (h)
<i>Metán</i>		
Tetraklórmetán	0,02, 0,003, 0,023	0,31-0,85
Kloroform	1,49, 0,73	4,8
Bromoform	0,041	
<i>Etán</i>		
Hexaklórétán	0,013	NA
1,1,2,2-tetraklórétán	0,053	NA
1,1,1,2-tetraklórétán	0,049	NA
1,1,1-triklórétán	0,065, 1,4	1,7-4,1
1,1-diklórétán	NA	NA
<i>Etén</i>		
Tetraklórétén	0,28, 5,2	2,1-10,8, 3,2
Triklórétén	0,67, 7,3-9,7, 0,68	1,1-4,6, 2,4, 2,8
1,1-diklórétén	5,5, 2,8	37,4, 15,2
trans-1,2-diklórétén	6,4	4,9, 6,9, 7,6
cis-1,2-diklórétén	19,7	10,8-33,9, 47,6
Vinilklorid	12,6	10,8-12,3, 4,7
<i>Más szerves anyagok</i>		
1,1,2-triklórtrifluoretán (Freon 113)	1,02	NA
1,2,3-triklórpropán	NA	24,0
1,2-diklórpropán	NA	4,5
1,3-diklórpropán	NA	2,2
1,2-dibróm-3-klórpropán	NA	0,72
1,2-dibrómetán	NA	1,5-6,5
n-nitrozodimetilamin (NDMA)	1,83	NA
Nitrobenzol	0,008	NA
<i>Nincs látható lebontás</i>		
Diklórmetán	NA	NA
1,4-diklórbenzol	NA	NA
1,2-diklórétán	NA	NA
Klórmetán	NA	NA

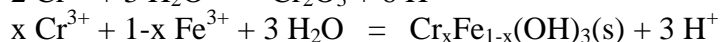
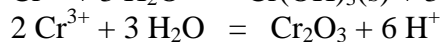
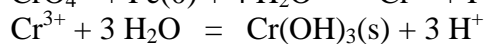
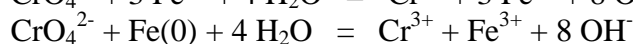
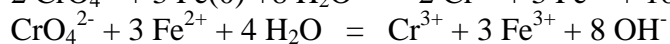
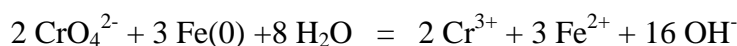
3.1.4 Illékony halogénezett szénhidrogének dehalogénezése más redukáló szerekekkel

Vason kívül más fémek halogénezett vegyületekre való redukáló hatását is vizsgálták. Boronina & Klabunde (1995a, b) laboratóriumi vizsgálatai szerint tetraklórmetán cinkkel és ónnal könnyen lebontható, kettőjük közülük a cink a reaktívabb. A lebontási sebességnél a fém mennyisége mellett a fajlagos felület játszik fontos szerepet. Assaf-Anid & Nies (1995) szerint a cink hatása B 12 vitaminnal erősíthető. Más fémek, mint alumínium és réz (Assaf-Anid & Nies, 1995) vagy magnézium (Boronina & Klabunde, 1995a, b) csak kismértékű vagy semleges hatással voltak a dehalogénezésre.

3.1.5 Szervetlen szennyezők redukciója Fe⁰-val

Clausen et al. (1995) triklóreténnel és technécium(VII)-tel szennyezett talajvizet vizsgáltak (TcO₄⁻ pertechnácion, az urán bomlásánál keletkezik). A vasnak mint redukáló szernek hatására mindkét szennyező koncentrációja a mérhetőség határa alá csökkent. Blowes et al. (1996) vizsgálatai azt mutatták, hogy az oxoanionok, szelén(VI), urán(VI), arzén(V), arzén(III) és króm elemi vassal való kezeléssel eltávolíthatók a vízből. A vasfelületen történő közvetlen elektrontranszferen kívül a katódon keletkező hidrogénnel való redukció is elképzelhető, bár ezt a lehetőséget Powell et al. (1995a) inkább kizártnak tartja. A redukció pszeudó 1. rangú jelleggel zajlik le a krómot illetően, vagyis a redukció sebessége a vas fajlagos felületével együtt növekszik.

Cr(VI)-nak Cr(III)-má való redukciója és vasnak ezzel párhuzamos Fe(III)-má való oxidációja rosszul oldódó keverékhidroxidokat képez [Cr_xFe_(1-x)](OH)_{3(s)} általános képlettel (Blowes & Ptacek, 1992; Blowes et al., 1995, Blowes et al., 1997; Powell et al., 1995; Schlicker, 1999; Anderson et al., 1994; Eary & Rai, 1988; Eary & Rai, 1989; Ebert, 1997; Fendorf & Li, 1996; Patterson et al., 1997; Blowes et al., 2000; Loyaux-Lawniczak et al., 2000; Williams & Scherer, 2001; Bond & Fendorf, 2003). Ezekben a reakciókban a vas mind elemi, mind kétértékű formában részt vesz:



A redukció sebessége agyagásványok jelenlétében növekszik. Powell et al. (1995a) vizsgálataiban 200 óra kísérleti idő alatt sem tudták a króm(VI)-t vízvezető rétegből vett agyagásvány adagolása nélkül eltávolítani. Agyagásványt tartalmazó vízvezető réteg jelenlétében 50 óra után a króm már nem mutatható ki. Az agyagásványok a reakciósebességet a hidroxilionok pufferezése révén fokozzák. Ezért reaktív Fe⁰-falakban a kromátredukcióhoz agyagásványokat adalékolnak.

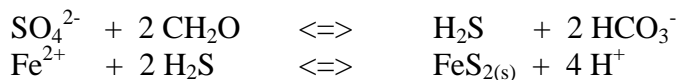
3.1.6 Nitroaromások redukciója Fe⁰-val

Agrawal & Tratnyek (1996) szerint a nitrobenzoltól elemi vassal anaerob környezetben anilin képződik nitrozobenzollal köztes termékként. Robbanóanyagok (pl. TNT (2,4,6-trinitrotoluol) elemi vassal való lebontását Agrawal & Tratnyek, 1996; Devlin et al. és 1998; Singh et al., 1998a) növényvédőszer lebontását Sayles et al., 1997; Eykholt & Davenport, 1998 és Singh et al., 1998b) vizsgálták.

3.1.7 További redukciós folyamatok

Különböző projektek a talajvíz in situ denitrifikációját vizsgálva szerves széntartalmú anyagokat (pl. fűrészpor, cellulóz, szalma, stb.) használnak, melyeket elektrondonorként alkalmaznak a NO₃⁻ elemi N₂-né való redukálására (Charmicael, 1994). A fűrészporos denitrifikációt több reaktív falban hosszabb időn keresztül alkalmazták (Robertson & Cherry, 1995).

Blowes et al. (1996 b) vizsgálatai azt mutatták, hogy meddőhányók csurgalékvizében szulfiddal való indirekt fémkicsapás lehetséges. Szulfátredukáló baktériumok a csurgalékvízben lévő SO_4^{2-} -t H_2S -dá tudják redukálni, amely a fémkationokkal nehezen oldható szulfidokat képez, melyek kicsapódnak. Ehhez a folyamathoz szerves széntartalmú anyagokat használnak, melyek a baktériumok számára energiaforrásként szolgálnak (itt a CH_2O vegyület szolgál szerves széntartalmú anyagként):



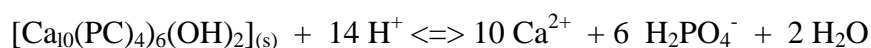
Laboratóriumi kísérletekkel ki lehetett mutatni, hogy a szulfátredukáló baktériumok gyorsan akklimatizálódnak és a kezdeti idő után a szulfátkoncentráció $> 1000 \text{ mg/l}$ -ről $< 20 \text{ mg/l}$ -re lecsökkenthető. A vaskoncentráció a szulfidos kicsapás eredményeként lecsökkent és egyidejűleg más fémekeket (mint pl. nikkel) is el lehetett távolítani szulfidos kicsapással a vízből.

3.2 Kicsapási reakciók

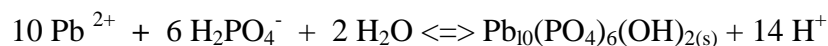
Kicsapási reakciók, melyek nem a redoxpotenciál változtatásán alapulnak, gyakran a reaktív anyagok oldatba menetelén keresztül vezetnek a szennyezők (többnyire fémionok) kicsapásához ásványi fázis formájában. A kicsapás ezenkívül szorpciós folyamatokkal is kapcsolódhat.

A kicsapási reakció egyik tipikus példája ólommal szennyezett talajvíz hidroxipatittal $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2]$ való kezelése. Ma et al. (1993) vizsgálatai szerint a kezdeti $5\text{-}500 \text{ mg/l}$ ólomkoncentrációt hidroxipatittal $18\text{-}19 \text{ }\mu\text{g/l}$ -re lehet csökkenteni. A fő reakciómechanizmus az apatit oldása, amit ólom hidroxipiromorfítként, $\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, való kicsapása követ. Ezenkívül ioncsere (Ca^{2+} helyettesíti a Pb^{2+} -t) és ólomszorpció mint alárendelt mechanizmus játszhatnak szerepet.

Oldási folyamat:



Kicsapási reakció:



Klorid és fluorid jelenlétében hidroxipiromorfit mellett kloropiromorfit $\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{Cl}_2$ és fluoropiromorfit $\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ keletkezik, melyek nagyon nehezen oldható és stabil csapadékok (Xu et al., 1992)). Ma et al. (1994) vizsgálatai szerint az ólom immobilizálását a nitrát NO_3^- , klorid Cl^- , és szulfát SO_4^{2-} anionok változó koncentrációja nem befolyásolja, míg a fluorid F^- és karbonát CO_3^{2-} jelenléte gyengén mérséklő hatást fejt ki.

Ezenkívül a hidroxipatitot használják kadmium Cd^{2+} továbbá cink Zn^{2+} immobilizálására. Xu et al. (1994) a kationok vizsgálatára felületi komplexáló és közös kicsapási reakciókat közöltek, továbbá ioncserét és diffúziós folyamatokat is említették.

Morrison & Spangler (1992) uránnal és molibdénnel szennyezett vizek kezelését vizsgálták. A kísérletek célja, a különböző kereskedelmi termékek reaktív falakra való alkalmazásának vizsgálata volt. A vizsgálatok azt mutatták, hogy az oldott urán ($c_0 = 30 \text{ mg/l}$) több mint

99 %-a oltott mész, pernye, báriumklorid, kalciumfoszfát, titánoxid, tőzeg és barnaszén adalékolásával eltávolítható. A molibdén koncentrációja 96 %-kal csökkent az eredeti érték (8,9 mg/l) alá vas(II)szulfát, vas(III)oxihidroxid, titánoxid, tőzeg, hematit (Fe_2O_3), kalciumklorid és báriumklorid segítségével. Sok alkalmazott anyag kicsapási folyamattal csökkenti a szennyezők koncentrációját (pl. kalciumuranát, kalciummolibdát, vas(II)molibdát vagy báriummolibdát képzésével). Egy további jelentős mechanizmus a szorpció (pl. vas(III)oxihidroxidok, hematit, tőzeg vagy barnaszén mint szorbens).

Urán eltávolítására Biermann (2006) átfogó kísérleteket végzett. Megállapítása szerint az eltávolítás mechanizmusa kisebb részben kicsapás, nagyobb részben adszorpció. Eredményeit ezért az adszorpció címszó alatt tárgyaljuk.

3.3 Szennyezők szorpciója

Az adszorpciós kármentesítésnél a szorbens magas szorpciós kapacitását és megfelelő permeabilitását kell biztosítani az eltávolítandó szennyezőkkel szemben. Ezenkívül a szorpció kinetikájának olyan gyorsnak kell lennie, hogy magas talajvíz áramlási sebességek mellett is lehetőleg teljes szorpció és retardáció jöjjön létre.

3.3.1 Szorbensek

3.3.1.1 Agyagásványok

Az agyagásványok aprószemcsés aluminoszilikátokból ($< 2 \mu\text{m}$) állnak, ezért nagy fajlagos felülettel, idegen ionokkal szemben magas szorpciós kapacitással és alacsony permeabilitással rendelkeznek. Az agyagásványok kristályszerkezete alapvetően tetraéderez és oktaéderez rétegekből tevődik össze. A 2-rétegű ásványok váltakozva tetraéderez és oktaéderez rétegekből, a 3-rétegű ásványok tetraéder, oktaéder, tetraéder rétegekből állnak. Ezenkívül léteznek 4-rétegű és vegyes-rétegű ásványok (Nemecz, 1973).

A szilikátrétegek egymás közötti összetartását 3-rétegű ásványoknál (illit-, klorit, szmektitcsoportok) köztesréteg-kationok (pl. K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) biztosítják, melyek a szilikátrétegek állandó negatív töltéstöbbletét kiegyenlítik. Ez a negatív töltéstöbblet a tetraéderek és oktaéderek központi ionjainak izomorf helyettesítése révén jön létre.

A szerves szennyezők és agyag közötti kölcsönhatásoknál Wienberg (1990a; 1990b) nem specifikus és specifikus kölcsönhatást különböztet meg (Holzlöhner, 1994). A nem specifikus kölcsönhatások az agyagokat csak kolloidkémiai viselkedésükben befolyásolják, míg a specifikusak a szerkezetet és az agyag ásványtartalmát is megváltoztatják. Az agyag szerkezetileg szilárd részecskékből és vízből áll. A negatív felületi töltésű agyagrészecskéket elektromos kettősréteg borítja, melyben magas kationkoncentráció uralkodik (Scheffer & Schachtschabel, 1989). Egy bizonyos távolságtól kezdődik az egyensúlyi oldat, amelyben természetes körülmények között a kation- és anionkoncentráció alacsony. Az egyensúlyi oldat teret biztosít transzportfolyamatok számára.

A fajlagos kölcsönhatások a szilárd fázissal való direkt szorpciós, illetve kémiai kötést vagy mindkettőt magukba foglalják. Wienberg (1990a; 1990b) kétféle szorpciót különböztet meg: kémiai szorpciót, magas kötési energiával 60 kJ/mol-tól 200 kJ/mol-ig, és fizikai szorpciót 4 kJ/mol és 8 kJ/mol közötti entalpiaértékekkel. Utóbbi a van der Waals erőknél és

elektrosztatikai kölcsönhatásokon alapul. A kettő között vannak a hidrogénhíd-kötések, 12 kJ/mol és 40 kJ/mol közötti kötési entalpiával.

Az energiaérték a szorpció tartósságának a mértéke. Deszorpcióhoz ezeknek az energiaértékeknek kell rendelkezésre állniuk. A magas kötési entalpia miatt a kémiai szorpció gyakran irreverzibilis, ami környezeti feltételek mellett azt jelenti, hogy a szorbeált anyag nem megy ismét oldatba. Gyengébb kötési típusok viszont reverzibilisek, ami az anyagok visszadiffúzióját jelenti a pórusvízbe, ha ott alacsonyabb szennyezőkoncentráció uralkodik. Ezt a viszonyt a szorpció izoterma írja le, amelyre példa a Freundlich-féle lineáris izoterma:

$$q_e = K_p C_e$$

Ez az egyenlet leírja a szorbeált hányad, q_e és az oldott rész, C_e közötti egyensúlyt. A K_p lineáris szorpció koefficiensnek vagy megoszlási együtthatónak más-más konstans értékkel rendelkezik mindegyik szennyezőanyag-agyag vagy agyagásvány anyagpárra. Maximális szorpció akkor következik be, amikor a szennyezőanyag a pórusvízben oldatban van. Wienberg (1990a; 1990b) különböző szerves anyagokra és agyagokra számértékeket ad meg.

Hidrofób, apoláris és gyengén poláris szerves szennyezők nem specifikusan az elektromos kettősréteg változtatásán keresztül reagálnak az agyaggal. A szorpció alacsony entalpiaszinten zajlik le és reverzibilis; azaz csak késleltető hatással van az agyag visszatartó képességére. Szerves kationok erősen kötődnek az agyagásványokhoz. Quaternér alkilammónium vegyületek az agyagásványok felületét maradandóan megváltoztatják. Szerves savak feloldhatják az agyag póruscementjét és magát az agyagot is és szerves agyagkomplexeket képezhetnek, melyek magas szerves agyagrészt tartalmaznak (Kohler & Morteani, 1984).

Depónia szigetelésekhez gyakran duzzadó agyagokat használnak a szmektit csoportból (montmorillonitok) erős szorpció és duzzadási képességük miatt. Ezek az agyagok viszont érzékenyek kémia hatásokkal, pl. savakkal, szemben a rétegek közötti térben lévő kettős H_2O -réteg miatt (Burckhardt, 1988). Hosszútávú stabilitásuk termodinamikailag nincs biztosítva (May et al., 1986). Bracke et al. (1991) a szmektites részek erős illitezésén keresztül vegyes-rétegtű szerkezetek képződését állapították meg. Az agyagok szorpciójának javítására organofil bentonitok, zeolitok, aktív szén és más magas szorpció képességű anyagok adagolhatók (Bradl, 1996).

Bár a szmektites csoport agyagai hatásosan visszatartják a nehézfémeket, az apoláris szerves szennyezőket csak kevésbé tudják szorbeálni. Helyettük organofil bentonitokat lehet használni, melyeknek rétegek közötti kationjait teljesen vagy részben ammóniumionokra cserélnék ki. A szerves kationok beilleszkedésével az agyagásvány felülete hidrofílról hidrofóbra változik. A szennyező molekulák clustereket képeznek a kiemelkedő alkiláncok közé illeszkedve. A kereskedelemben forgalmazott organofil bentonitok felületén gyakran quaternér ammóniumionok pl. OBDM (octadecil-benzil-dimetil-ammonium) vannak. Az adszorpció réteg vastagsága a követelményeknek megfelelően különböző lehet. Az alsó inaktív réteg kaolinnal nemesített anyagból áll és a hosszútávú állékonyságot biztosítja (Bradl, 1996).

A szennyezők transzportját agyagbarrieren keresztül a konvekció, diffúzió és szorpció befolyásolja. Ez a három folyamat a transzportegyenletben egymáshoz kapcsolódik. A konvekciót a permeabilitás és a hidraulikus gradiens jellemzi. Agyagásványból álló falaknál a konvekció csak magas gradiens esetén számottevő. Mint már Gray & Weber (1984) kimutatták, a szennyezőtranszport konvektív komponense nagyon alacsony hidraulikus

gradiensnél közel van a diffúzív transzporthoz. A diffúzív transzportot a koncentrációkülönbség hozza létre és az általa szállított anyagmennyiség arányos a koncentrációkülönbséggel. A diffúziós koefficiens az anyag tulajdonságaitól (töltés, kationcserélő kapacitás) és a diffundáló részecskék tulajdonságaitól (ionrádiusz, vegyérték, oldat pH) függ (Czurda, 1994). A diffúziót a Fick törvény írja le (Bradl, 1996).

Az adszorpció, azaz az anyag megtapadása az agyagásvány negatív töltésű szilikátfelületén, a negatív töltésű rácsközi felületeken és a pozitív töltésű éleken és sarkokban történik. A szorpció során a szorbens felülete fázishatárt képez, a szorbeált anyag pedig a felülettel adszorpciós komplexsé egyesül. Az adszorbeálódó egységek atomok, ionok, molekulák és gázok lehetnek (Bradl, 1996).

A szorpció a felület nagyságán kívül a diffúzió kettősrétegtől is függ, amely az állandó negatív töltésű agyagásványfelületen képződik töltéskiegyenlítésként. A szmektitcsoport duzzadó 3-rétegű agyagjai nagy felülettel rendelkeznek (Na-bentonit: $800 \text{ m}^2/\text{g}$), ami magas szorpciós kapacitást eredményez. Ezzel szemben a kaolinitok kis felülettel rendelkeznek $10 - 40 \text{ m}^2/\text{g}$ -os nagyságrendben, ezért szorpciós kapacitásuk sokkal kisebb. A felület töltését az oldott szennyezőanyagok kémiai reakciói (nehezenoldható vegyületek pl. nehézfém-karbonátok kicsapása, stb.) jelentősen befolyásolhatják. Kísérletek azt mutatták, hogy ez a töltés-gátlás kiváltképp duzzadó agyagokat befolyásolja (Bartl, 1993).

3.3.1.2 Organofil bentonitok

Az organofil bentonitokban a szerves kationok helyettesítik a szervetlen köztesréteg kationjait, ami a szerves anyagok szorpcióját javítja. A beépülő szerves vegyületek pl. quaternér ammóniumionok (DMDO dimetil-dioctadecil-ammonium) vagy OBDM (octadecil-benzil-dimetil-ammonium) lehet. Szerves kationok beépülése megváltoztatja az agyagásvány felületi tulajdonságait. Az egyes rétegek közötti távolság megnő, az eredeti hidrophil felület hidrofóbbá változik. A felület szerves molekulákkal vagy szervetlen kationokkal való fedésének sűrűsége szabályozható: organofil bentonitokat úgy lehet előállítani, hogy egyaránt szorbeáljanak mind szervetlen mind szerves szennyezőket. Illékony halogénezett szénhidrogének szorpcióját Schmidt (1993) vizsgálta. Természetes bentonitokban a duzzadást hidrátburok okozza, itt a szabad ionokat vízmolekulák veszik körül, míg organofil bentonitok a szerves vegyületek szorpciója miatt duzzadnak meg. Utóbbiaknál a szabad kationokat szerves kationok (pl. alkilammóniumionok) helyettesítik (Schall & Simmler-Hübenthal, 1994).

3.3.1.3 Zeolitok

A zeolitok víztartalmú alkáliföldfém-aluminoszilikátok $M_{2/z} \cdot Al_2O_3 \cdot x SiO_2 \cdot y H_2O$ általános képlettel, ahol M egy- vagy kétértékű fémion, z a vegyérték. Zeolitok melegítés hatására vizet adnak le a kristályszerkezet megváltozása nélkül, miközben a kristályvíz helyébe más vegyületeket tudnak felvenni. A szerkezet alapegységét SiO_4^- és AlO_4^- tetraéderek képezik, melyeket oxigénhidak kötnek össze. Ezek jellegzetes formájú háromdimenziós csatorna-szerkezetű üregeket képeznek. A molekuláris szűrőhatás a pórusok különböző nagyságától függ. A szilikátszerkezet negatív töltésének kiegyenlítéséhez fontos kationok mozgékonyak a hidratizált rácson belül, ezért más ionokkal könnyen helyettesíthetők.

Zeolitok vulkáni üvegekből keletkeznek hidrotermális átalakulással. Európában Észak-Görögországban, Magyarországon, Franciaországban, Törökországban és Spanyolországban fordulnak elő nagy mennyiségben (Czurda 1994). A bentonitokhoz képest alacsony árak miatt

előnyös adalékanyagok. A szorpciós kapacitás nehézfémekre egy nagyságrendben van az agyagásványokkal. Zeolitok szorpciós tulajdonságait a kritikus üregátmérő szabja meg.

3.3.1.4 Aktívszén

Az aktívszén nagyon finom grafitkristályokból és porózus szerkezetű amorf szénből áll. Nagy széntartalmú állati vagy növényi eredetű anyagokból szénesítéssel vagy tiszta szénből gázaktiválással állítják elő őket. Az aktívszén igen magas fajlagos felülettel (500 - 1500 m²/g) rendelkezik. Szerves anyagokkal szembeni kiváló szorpciós képességük miatt hasznos anyagok a környezetvédelemben, pl. légtisztításban és szűrőanyagként (Grathwohl & Peschik, 1997; Beitinger et al., 1998; Niederbacher, 2000; Schad et al., 2000; Tiehm et al., 2000; Williamson et al., 2000; Niederbacher, 2001; Tiehm et al., 2002; Edel & Voigt, 2001; Hartwiger, 2001; Lorbeer et al., 2002; SAFIRA, 2006; Niederbacher, 2003). A felhasználás szempontjából alapvető tulajdonságok az aktívszén porozitása és permeabilitása.

3.3.1.5 Szervetlen oxidok és hidroxidok

Aluminium-, vas- és mangánoxidok és -hidroxidok szintén képesek nehézfémek szorpciójára. Így pl. goethit (α -FeOOH) és hematit (α -Fe₂O₃) nagyon kis kristályokat (10-100 nm) képez és magas fajlagos 300 - 500 m²/g felülettel rendelkezik (Scheffer & Schachtschabel, 1989). Mivel az oxidok és hidroxidok kizárólag változó felületi töltéssel rendelkeznek, a kationcsere M - OH- és M - OH₂-csoportok protondiszociációján keresztül zajlik le (Bradl, 1996).

3.3.2 Uránszennyezés eltávolítása

Biermann (2006) uránnak a talajvízből való eltávolítására végzett átfogó kísérleteiben fémes vas (Fe⁰) és hidroxiapatit (HAP) hosszútávú viselkedését vizsgálta. A reaktív falakban lejátszódó folyamatokat oszlopkísérletekkel szimulálta és mesterséges talajvizet használt 10 mg/l urán- és 120 mg/l szervetlen karbontartalommal. A reaktív anyagok szürkeöntvény-granulátum és szintetikus hidroxiapatit voltak. Eredményei 99,9%-os uránretardációt mutattak, a szorpciós kapacitás 28,3 mg U/g HAP és 38,4 mg U/g Fe⁰ volt. A vas-granulátummal töltött oszlopokban 2.000 pórusterfogát átáramlása során sem következett be uránáttörés vagy remobilizáció. Az urán analitikai kimutathatósági határa 10 µg/l volt. Ha az oszlopokban a vastartalom 50 térf.-%-nál nagyobb volt, 0,5 l/g Fe karbonátos víz átáramlása a permeabilitást olyan mértékben lecsökkentette, hogy az oszlopok nem tudtak tovább működni. A HAP-oszlopoknál 1.600 pórusterfogát átáramlása után uránáttörés következett be > 20 µg/l koncentrációval az alulfolyásban. 1.860 pórusterfogát után az uránkoncentráció az alulfolyásban a feladás 10%-át, 2.700 pórusterfogát után 50%-át érte el. Az egyik oszlopból az urán 12,2%-a volt remobilizálható 840 pórusterfogát uránmentes mesterséges talajvízzel. HAP és urán kölcsönhatása során a fő mechanizmus adszorpció volt. Viszont ESEM / EDX vizsgálatok 250 mg U/g HAP urántartalmú mintákban urán- és foszfáttartalmú kristályokat mutattak, melyeket röntgendiffrakciós vizsgálat alapján csernikovitként és meta-ankoleitként lehetett azonosítani. Ez azt mutatta, hogy kedvező körülmények között felületi kicsapás is lejátszódik. Az Fe⁰-mintában nem lehetett uránfázist kimutatni, de ESEM-képek alapján vegyes U(IV)/U(VI)-oxid volt feltételezhető. Míg a HAP hosszútávú hatékonyságát a szorpciós kapacitás határozza meg, vas esetében a permeabilitás a korlátozó tényező. A mesterséges talajvíz összetétele, főleg a karbonát- és kalciumtartalom, mindkét rendszer hatékonyságát befolyásolta.

4 Építési eljárások

A reaktív falak fő elrendezései a következők:

- folytonos reaktív falak,
- tölcser és kapu (F&G),
- kútsorok,
- injektált rendszerek.

4.1 Résfalak építése

A résfalépítési eljárások az alábbi módszerek egyikét alkalmazzák (Brauns, 1994; Meggyes, Pye, 1995; Meggyes és Simon, 2000; Simon et al., 2002, Meggyes, 2005, Burmeier et al., 2007)):

- Árokmélyítés támasztó folyadék segítségével, mely megszilárdul és a résfalat alkotja (egyfázisú résfal) vagy amelyet árokmélyítés után eltávolítanak és egy másik anyaggal helyettesítenek és ez az anyag szilárdul meg (kétfázisú résfal).
- Vékony rés kialakítása egy alakos elemnek a talajba való verésével majd eltávolításával és a keletkezett rés sűrű zaggyal való feltöltésével (pl. vékony falak)
- Erős elemeknek a talajba verése (pl. acél szádfal)
- Egymásba hatoló fúrólukak lemélyítése és betonnal való feltöltése, ami összefüggő falat képez
- Reaktív anyag injektálása vagy más módon a talajba juttatása.

A leggyakrabban használt résfal-típusok a 2. táblázatban láthatók.

4.1.1 Résfal-típusok

4.1.1.1 Egyfázisú résfal

Egyfázisú résfalak építésekor 0.4 – 1 m vastag paneleket vágnak ki markolók vagy árokászó gépek segítségével a talajból (Arz, 1988). Az árokba megszilárduló zaggyot szivattyúznak, mely a rés támasztására szolgál, majd megszilárdulva a résfalat képezi. Az ún. „zarándok lépés” módszert alkalmazzák: először az 1, 3, 5 primér paneleket mélyítik ki és töltik fel zaggyal. 36-48 óra múlva, amikor a primér panelek megkötöttek, de még megmunkálható állapotban vannak, a 2, 4, 6 stb. másodlagos panelek kerülnek sorra úgy, hogy 0,3-0,6m átfedéssel belevágnak a primér panelekbe. Így intenzív kapcsolat jön létre a primér és másodlagos panelek között, ami magasfokú vízzáróságot biztosít. Ez kifejezett előny a kétfázisú falakkal szemben, ahol a végcső eltávolítása után folytonossági hiány léphet fel. További előny, hogy nem kell egy másik fázist kiszorítani, ami nem mindig sikerül tökéletesen. Építési hibák nagyban ronthatják a fal vízzáróságát: 1 m² lyuk annyi talajvizet enged át mint 100.000 m² jóminőségű résfal (Düllmann, 1999). Tájékolási, irányítási hibák elégtelen átfedéshez és permeabilitás-növekedéshez vezethetnek (Stahlmann and Scholz, 2004).

4.1.1.2 Kétfázisú résfal

A kétfázisú résfal két lépésben készül: először az árok kimélyítése történik támasztó bentonitsuszpenzió segítségével. Ezt a második lépésben a résfal anyagával kiszorítják. Az egyes hosszanti elemke illeszkedése potenciális gyenge pont. A résfal anyagának 500 kg/m^3 -rel nehezebbnek kell lennie, mint a bentonitsuszpenzióknak. Visszamaradó bentonit szuszpenzió szintén okozhat gyenge helyeket.

4.1.1.3 Kombinált résfalak

Mind egy-, mind kétfázisú résfal tartalmazhat kiegészítő elemeket, melyek a szilárdságot vagy a vízzáróságot javítják. Szádpalló, üveg és műanyag fólia használatosak, utóbbi a leggyakoribb. Ezeket az elemeket a friss szuszpenzióba helyezik megszilárdulás előtt. Kis súlyuk miatt speciális szerkezet szükséges beépítésükhöz, az elemek csatlakoztatása speciális kapcsoló szerkezetekkel történik (Jessberger and Geil, 1992; Düllmann et al., 1993; Meseck, 1987; Stroh and Sasse, 1987; Ghezzi et al., 1999; Fischer, 2002). Többrétegű résfalakat szintén kifejlesztettek (Cavalli, 1992) és monitor-rendszer is elhelyezhető a résfalban.

4.1.1.4 Résfal kamra-rendszerek

A résfal kamra-rendszer két egymástól néhány méterre levő párhuzamos résfalból áll, melyeket kb. 50 méterenként keresztfalak kötnek össze és így kamrákat képeznek. A kamrából ki lehet szivattyúzni a talajvizet. Bécsben a Rautenweg hulladéklerakó környezetét védi egy 70-100 m mély résfal kamra-rendszer (Arz & Weber, 1987; Brandl, 1989). A kamrákban a vízszintet 0,5 m-rel alacsonyabban tartják mint a lerakón kívüli természetes vízszint. Egy másik nagyméretű, 3,7 km hosszú, résfal kamra-rendszer Berlin közelében, Vorketzin-ben épült, ahol éveken keresztül a korábbi Nyugat-Berlinből óriási mennyiségű hulladékot deponáltak (Kellner and Scheibel, 2004). Két, 0,6 m vastag párhuzamos egyfázisú résfal fut egymástól 3,6 m távolságban, 50-180 m-ként keresztfalakkal. A kamrából kiszivattyúzott talajvizet a csurgalékvízzel együtt tisztítják. A belső fal teteje alacsonyab, mint a külső, így a talajvíz a lerakó alatti térbe áramolhat túlfolyás esetén. Az építésnél a 'zarándok lépés' módszert alkalmazták, a másodlagos paneleket három nappal az elsődleges panelek után építették. Összesen 80.000 m^2 résfal készült, mely 2250 panelből állt, minőségbiztosítás céljából 16.000 vizsgálatot végeztek. Az egytengelyű nyomószilárdság 1.042 és 1.732 MN/m^2 között, a permeabilitás pedig 1.4×10^{-10} és $1.7 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ között volt.

4.1.1.5 Vékony falak

Először szádpallókat, majd nehezebb acélgerendákat vibrálnak a talajba és a gerendák visszahúzása után agyag-cement-víz keveréket injektálnak a résbe. A panelek egymásba vágnak és az átfedés biztosítja a vízzáróságot (Arz, 1988). A gerenda talpán egy kés van, mely a gerendát irányítja és biztosítja az átfedést a szomszédos panelekkel. A szokásos mélység 15 - 20 m, a vastagság pedig 60 - 80 mm. A falvastagság megválasztására a réteg tulajdonságai és az injektáló nyomás is befolyással van. Durvaszemcsés rétegekben (homok, kavics) a vibráció egyúttal tömöríti a környező anyagot s így csökkenti a permeabilitást. Az agyag-cement keverék a környező pórusokba is behatol, így a tényleges vastagság nagyobb a névlegesnél. A vékony falak nagyon gazdaságosak, $400\text{-}1000 \text{ m}^2$ állítható elő műszakonként. A jó vízzáróság eléréséhez pontos irányítás és műszerezettség szükséges.

4.1.1.6 Szádfalak

Szádfalak általában acél szádpallókból készülnek, de előregyártott beton, alumínium és fapallók is használatosak. Az acél szádfalakat könnyű előállítani, teherbírásuk nagy (ami előnyös tölcser és kapu rendszerek reaktorjainál), az építési idő rövid, kicsi a helyszükséglet és nem kell szennyezett talaj elhelyezéséről gondoskodni (Roth, 1988; Weber et al., 1990; Jessberger and Geil, 1992; Rodatz, 1994; Berndt, 2002). További előny, hogy a pallók gyárilag készülnek, így minőségük jó és a körülzárás a pallók leverése után rögtön rendelkezésre áll. A szomszédos pallók csatlakozása kritikus pont, de korszerű labirintus-tömítések, tömítő paszták és műanyag tömítések (Hoesch) magas vízzáróságot biztosítanak. A csatlakozások mind elektromosan, mind erőméréssel ellenőrizhetők (Schultze and Mußotter, 2001).

4.1.1.7 Fúrt cölöpös résfal és torkrétozás

Fúrt cölöpös résfalak építése a primér cölöpök (1, 3, 5 stb.) lemélyítésével kezdődik, ezekbe vágnak bele a másodlagos cölöpök (2, 4, 6 stb.) s így szoros kapcsolat és összefüggő résfal jön létre. Résfalak torkrétozással is előállíthatók (Tóth, 1989; Kutzner, 1991; Jessberger, 1992): nagy sűrűségű zagysugár szolgál mind vágó szerszámként mind töltő folyadékként. Földalatti szennyezések Dwyer (1998) eljárásával in situ kezelhetők: először a szennyezett test felett víz- vagy légsugárral üreget képeznek, ahonnan a szennyezetlen anyagot a felszínre szállítják. Ennek helyébe juttatják át földalatti technikával a szennyezett anyagot, mely így a külszínnel nem kerül érintkezésbe.

4.1.1.8 Injektált falak

Injektált falakat úgy építenek, hogy megszilárduló folyadékot injektálnak fúrólukon keresztül a réteg pórusaiba és/vagy repedéseibe. A leggyakrabban használt folyadékok cementszuszpenzió, mesterséges gyanták és vízüveg-alapú anyagok. A fúrólukak közti távolságot a réteg permeabilitása, az injektált anyag viszkozitása és a legnagyobb megengedett nyomás szabja meg (Kutzner, 1991; Jessberger, 1992; Schulze, 1992; German Geotechnical Society, 1993).

4.1.1.9 Fagyasztott falak

A fagyasztott falak hosszú időn keresztül ideiglenes megoldásnak számítottak, de a technológia fejlődése egyre több végleges megoldást hozott létre. Összefüggő vízzáró testet így lehet kialakítani, hogy csöveket helyezünk a talajba és folyékony nitrogént keringetünk bennük. Fagyasztott talaj elérhető permeabilitása 10^{-12} m/s is lehet és a diffuzivitás 10^{-9} cm²/s körüli (Dash et al., 1997; Mageau, 1998), különösen ha termisztoros és elktropotenciál-monitoring módszereket alkalmaznak. Fagyasztott falak létesítése kis vagy semmi talajkiemelést nem kíván és a hűtés leállításával egyszerűen megszüntethetők anélkül, hogy hulladék keletkezne - bár energiabetáplálás nélkül hónapokig is hatékonyak maradnak. Az elérhető mélység több száz méter és mind agyag, mind homok/kavics rétegekben megépíthetők.

4.1.2 Résfal anyagok

Résfalak vízzárósága a résfal anyagának tulajdonságaitól függ. Ásványi-anyag bázisú résfal-anyagok bentonitból, cementből, töltelékanyagból és vízből állnak, egyes résfaltípusoknál vegyi adalékokat is használnak. Az anyag alkalmasságát minden felhasználási esetre egyedileg kell ellenőrizni megfelelő minőségbiztosítási módszer alkalmazásával (Meseck,

1987; Jessberger & Geil, 1991). Mivel sokszor helyi és nem szabványos anyagot használnak, az alkalmassági vizsgálatok eredményei nehezen általánosíthatók. Az anyagokat résfal-típusok szerint különböztethetjük meg:

- vékony-fal anyagok
- egyfázisú anyagok
- kétfázisú anyagok

Vékony-fal anyagoknak magas szilárdanyag-tartalommal kell rendelkezniük, hogy magas sűrűségük legyen. A rés összezáródásának megakadályozására a palló vagy gerenda kihúzásakor 1.600 kg/m^3 sűrűség szükséges. Jól bevált összetétel a következő recept (Arz, 1988):

- 25 kg bentonit
- 175 kg Portland cement
- 800 kg kőzetliszt
- 640 l víz.

Ez az összetétel kb. 10^{-8} m/s permeabilitást biztosít megszilárdulás után. A megkötött zagynak megmunkálhatónak kell lennie a panelek egymásbailleszkedése érdekében, ezért a folyási szilárdság 80 N/m^2 -t nem léphet túl. Ugyanakkor magas vízzáróságot kell biztosítani, amihez magas bentonit és cementtartalom kell. Ezeket a bizonyos mértékig ellentmondó követelményeket a következő összetétel meglehetősen jól kielégíti ($k_f = 5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$):

- 42 kg Na-bentonit
- 200 kg cement
- 917 l víz.

Kalcium-bentonitokat szintén használnak magas szilárdanyag-tartalmú résfal-zagyok előállítására:

- 165 kg Ca-bentonit
- 144 kg cement
- 826 l víz.

Ca-bentonitok kevésbé duzzadnak mint a Na-bentonitok és stabilabb szuszpenziót eredményeznek. Hátrány a nagy vízvesztés és a merevség, ami vegyi adalékokkal ellensúlyozható. Kétfázisú zagyokban magasabb szilárdanyag-tartalom használható (Hitze, 1987), a sűrűség 2.000 kg/m^3 , a permeabilitás pedig $k_f = 5 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ lehet (Seitz, 1987). A megkötött zagyok mechanikai tulajdonságai a hidraulikus kötőanyagtól, a szilárdanyag-tartalomtól és az időtől függenek.

Résfalépítés ellenőrzésére a szilárdság mérését elterjedten alkalmazzák, jóllehet a szilárdságnak akkor van jelentősége, ha a falnak teherviselő funkciója van. Valójában a duktilitás a fő tulajdonság, ami a résfal viselkedését jellemzi.

A vegyi ellenállóképesség különösen fontos környezetvédelmi alkalmazásoknál: ismerni kell, hogy milyen koncentrációk a legveszélyesebbek a gyakran előforduló szennyezők esetében. E tekintetben hasznos információk vehetők át a betontechnológiából. 250 mg/l magnézium koncentráció nagyon erős hatással lehet egyfázisú résfal anyagára. A károsodást erős

magnéziumhidroxid kicsapódás indítja el, ami csökkenti a pH-t a pórusvízben. Dietrich et al. (2004) azt találták, hogy a felpuhuló réteg vastagsága növekszik a magnézium koncentrációjával. Szulfátszennyezés viszont sokkal kevésbé veszélyes: 15.000 mg/l-t elérő koncentráció sem okozott komoly kárt egyfázisú résfal-anyagokban, ami alacsony trikálcium-szilikát tartalmukkal és alacsony permeabilitásukkal magyarázható. A szilárdanyag-tartalom növelése előnyösnek bizonyult szénsav elleni kémiai stabilitás szempontjából, míg mészköliszt adagolása nem befolyásolta a stabilitást (Dietrich et al., 2004).

A cementnek egyes vegyi anyagok iránti érzékenysége vezetett a cementmentes résfal-anyagok kifejlesztéséhez (Seitz, 1987), melyek porított agyagot, vízüveget, homokot, kavicsot és szilikon reagenst tartalmaznak. Sűrűségük akár 2.300 kg/m^3 , permeabilitásuk $k_f = 10^{-11} \text{ m/s}$ is lehet. Merev-hajlékony tulajdonságuk különösen akkor nagyon előnyös, ha süllyedéssel kell számolni (Hitze, 1987; Jessberger & Geil, 1991).

4.2 Reaktív falak építése

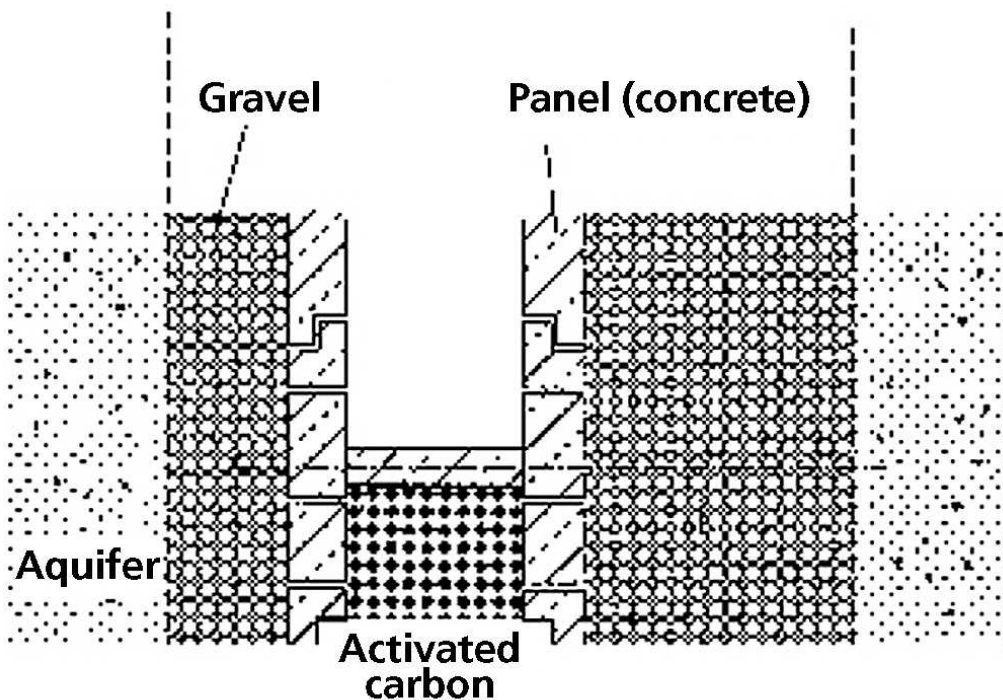
Az alapvető követelmények a reaktív zónával szemben egy reaktív falon belül a következők (Beitinger és Bütow, 1997; Smyth et al., 1997; Beitinger, 1998):

- a reaktív anyag cserélhetősége;
- a környező rétegnél magasabb permeabilitás;
- stabilitás szuffúzióval (finom szemcsék bemosása) szemben;
- hosszú élettartam.

Az építési módszer kiválasztása elsősorban a helyi viszonyoktól függ (Gavaskar, 1999) pl.:

- mélység (a legfontosabb tényező): növekvő mélység speciális gépi berendezéseket és hosszabb építési időt igényel, amivel a költségek növekednek;
- geotechnikai megfontolások: talaj/közet szilárdság, akadályok jelenléte;
- talajkiemelés: (szennyezett) talaj kezelése és learakása;
- egészségvédelem és biztonság építkezés alatt (entry of personnel into excavations).

8 m-nél kisebb mélységek esetén az árokmélyítés és a reaktív anyaggal való feltöltés párhuzamosan történik (Puls, 2001). Komplikáltabb esetekben a reaktív fal egy reaktív anyaggal töltött központi részből és szűrőkavics rétegekből áll (12. ábra), melyek finom szemcséknek a reaktív anyagba való bemosását megakadályozzák. A fal tetejét kispermeabilitású anyag (agyag) fedi, ami az atmoszférikus oxigénnel való érintkezést meggátolja. A reaktív fal eredő permeabilitása a környezet permeabilitásának 50 - 200 szorosa legyen, hogy „by-pass” áramlás ne alakuljon ki a reaktív fal körül.



12. ábra. Reaktív fal szerkezete (Beitinger és Bütow, 1997). Gravel: kavics, aquifer: vízvezető, concrete: beton, activated carbon: aktívszén.

4.2.1 Tervezési szempontok

A tervezésnek megfelelő adatgyűjtést és -kiértékelést kell magába foglalnia, melynek során a releváns műszaki, ökológiai és gazdasági szempontokat gondosan és objektíven értékelik. Hasznos egy tervkonceptációs modell kidolgozása szivattyúzási és kezelési vizsgálatokkal. Üzemeltetési feltételek, hosszútávú viselkedés, hatékonyság, költségek és monitoring alaposan elemezendő. A helyi viszonyok figyelembevétele a hatóságok és az érintett lakosság akceptanciáját előnyösen befolyásolja. Ki kell mutatni, hogy a választott megoldás megfelel a BATNEEC-elvnek (Best Available Technique Not Entailing Excessive Cost = legjobb rendelkezésre álló technológia túlzott költségek okozása nélkül). Az IPPC Iroda BREF honlapjáról (<http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>) letölthetők úgynevezett BREF-ek (BAT referencia dokumentumok) (Beitinger, 2002).

A szennyezett területeken az adatgyűjtés elsősorban a szennyezők azonosítására, a szennyező „felhő” behatárolására és a tiszta fázisok mozgására koncentrál a telítetlen és telített zónákban. A megfelelő remediációs alternatíva kiválasztásához adatok szükségesek a hidrogeológiáról, hidrokémiáról és az oldott és nem oldott vegyületek migrációjáról (5. táblázat). A kezelési technológia által okozott potenciális problémákat, mint pl. vas, mangán, kalcium és magnézium kicsapódását valamint biológiai dugulásokat szintén meg kell vizsgálni. Lényeges szempont a szennyezők eloszlásának, migrációjának, adszorpciójának, lebomlásának, konvekciójának, diffúziójának és egyéb transzport- és retenciómechanizmusok ismerete. Fúróluk-szelvényezés, talajvíz monitoring, próbaszivattyúzás, geofizikai mérések, továbbá heterogén szerkezetek vizsgálata a telítetlen és telített zónában további hasznos információkat szolgáltatnak. Geokémiai és hidrokémiai adatok igen fontosak az in situ

migrációs és lebomlási folyamatok, valamint in situ és felszíni kezelési technológiák szempontjából. A talajvízmintákat szivattyúzással kell nyerni, de mintavételezés csak akkor történhet, ha a pH, elektromos vezetőképesség, redoxpotenciál, oxigéntartalom és hőmérséklet állandó értékeket mutat (Beitinger, 2002). A szennyezők terjedésének monitoringja feltárja az emisszió mértékét, a szennyezés migrációjának sebességét, a szennyezők retardációját és a lebomlási folyamatokat.

5. táblázat. Tervezési adatok (Beitinger, 2002).

Hidrogeológiai adatok	Megjegyzés
Hidrogeológia	Geológia, vízvezetők, vízzáró rétegek, anomáliák általános leírása
Talajvízszint mélysége	[m]
Vízvezető réteg vastagsága	[m]
Talajvízszint áramlási iránya	
Hidraulikus permeabilitás	[k _r , m/s]
Talajvízszint gradiens	[J]
Transmisszivitás	[T]
Vízszüllyedési kúp ?	Nyomás
Felszíni vizek	Leírás, távolság
Időjárási viszonyok	Csapadék, szél
Felszíni viszonyok	Felület letakartsága, növényzet, aszfalt
Geokémiai és hidrokémiai adatok	
Talaj és víz pH-ja	
Elektromos vezetőképesség, TDS (oldott sótartalom a vízben)	
Redoxpotenciál	
Oxigén tartalom	
Hőmérséklet	
Vas	
Mangán	
Kalcium	Keménység
Magnézium	Keménység
Széndioxid	Ca, Mg kicsapódás
Szulfátok, szulfidok	Lehetséges inhibitorok
Nitrogén, TKN (teljes Kjeldahl nitrogén)	Nitrát, nitrit, ammónium
Más vegyületek	'Háttér-szennyezés', fémek
BOI, KOI	Biokémiai és kémiai oxigénigény
Szennyezők eloszlása	
Szennyezők azonosítása	Szennyezők típusa
Szennyező „felhő” behatárolása	Terület, mélység a talajban és talajvízben
Szennyező „felhő” aktivitása	Növekvő / csökkenő, időtényező
Tiszta fázis terjedése	LNAPL / DNAPL
Maradó telítettség [Sr]	Telítetlen zóna
DOC (oldott szerves tartalom)	Oldott szerves anyag koncentrációja a vízben
TOC (teljes szerves tartalom)	(beleértve szuszpendált szemcsés anyagot)
Lehetséges receptorok	Távolság, érzékenység meghatározása
Szennyezők kora	Öregedési / lebomlási folyamatok
Migráció az idő függvényében	
Szennyezés helye / szennyezőforrások	Emissziós pontok

Szennyezők tulajdonságai és transzportjellemzők

Sűrűség	LNAPL / DNAPL
Folyadék viszkozitása	
Határfelületi feszültség vízzel	
Oldékonyság	
Gőznyomás	
Henry-állandó	
Megoszlási együttható	[K _d]
Szervesanyag-tartalom a szilárd anyagban	[f _{oc}]
Oktanol/víz megoszlási együttható	[K _{ow}]
Szerves karbon megoszlási együttható	[K _{oc}]
Ioncserélő kapacitás	Agyagfrakciók
Biológiai lebomlás	
Szemcse-eloszlás	
Vízvezető réteg anyagának térfogat-sűrűsége	
Levegő-permeabilitás a talajban	Talajgőz
Talaj-porozitás	
Víztartalom	
Talaj-heterogenitás	

A tervkoncepciónak a következő információkat kell magába foglalnia (Beitinger, 2002):

- az emissziók típusa és mennyisége a remediáció következtében és az emissziós kontrolintézkedések;
- a kezelt talajvízkibocsátás vagy visszainjektálás mennyiségi és vízminőségi adatai;
- energiaszükséglet (villamos energia, üzemanyag stb.);
- keletkezett hulladékok jellemzése és elhelyezésük részletei;
- anyagfelhasználás mennyisége pl. aktív szén, mész, stb.;
- a remediáció előirányzott szintje;
- a várható össz-hatékonyság;
- a várható karbantartási igény (munkaerő, alkatrészek);
- monitoring követelmények;
- részletes költségbecslés (beruházási, építési, üzemeltetési és felszámolási költségek);
- részletes egészség- és munkavédelmi terv.

4.2.2 Reaktív falak építési technológiái

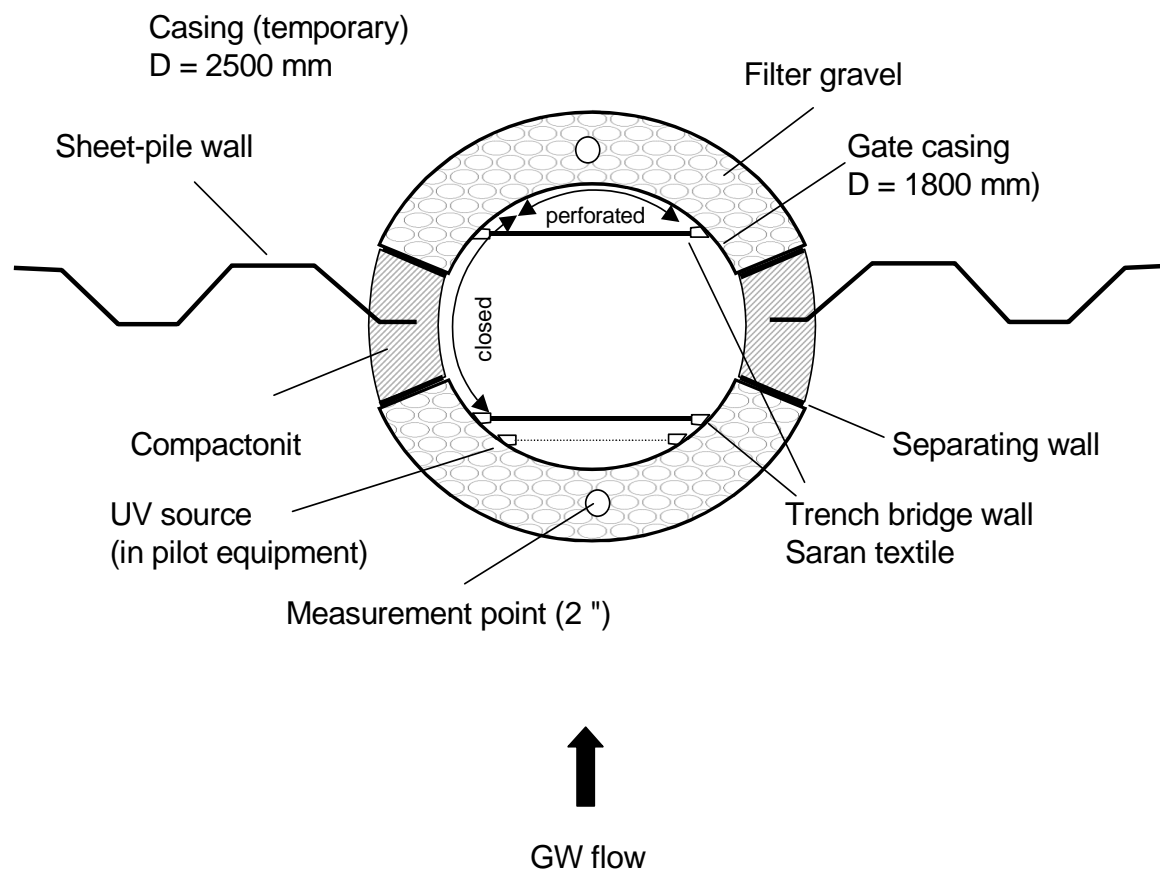
4.2.2.1 Résfal-építés reaktív fal céljára

A 4.1.1 részben leírt építési eljárások talajkiemelési technikai reaktív falakra is alkalmazhatók. A reaktív anyagokat szokványos földmunkagépekkel lehet az árokba helyezni. A tölcser és gát rendszerek tölcser elemei lényegében résfalak. Acél szádpallókat és szádfalakat fokozottan használnak előnyös tulajdonságaik miatt reaktív falaknál (Schultze and Mußotter, 2001; Morrison et al., 2002). Gravelding (1998) egy 400 m hosszú tölcser és gát rendszert ír le, melyet vibrációs módszerrel acél szádpallókból építettek. A volt karlsruhei gázgyár szanálásánál 240 m hosszú és 19 m mély acél szádfal épült szintén tölcser és gát rendszerben (Schultze and Mußotter, 2001). A szádpallókat Silent Piler berendezéssel sajtolták a talajba a környező történelmi épületek megkímélése érdekében.

4.2.2.2 Kapuszerkezetek

A kapuk a tölcser és kapu rendszerek lényeges elemei. Leggyakrabban szádpallókból készült "doboz"-szerkezeteket használnak, melyekben a szádpallókat perforálják vagy réseket hagynak közöttük a talajvíz áramlásának biztosítására. Az építés során ugyancsak szádpallókat használnak talaj, kavics, reaktív anyag stb. különválasztására; ezeket aztán kihúzzák az anyagok elhelyezésének megzavarása nélkül.

Az előbbi 400 m-es tölcser és kapu rendszerben (Gravelding, 1998) négy 12 m-es szádpalló-"doboz" szolgált kapuként, melyekbe elemi vasat helyeztek. A kapuk talpát és tetejét bentonittal és geotextillal bélelték, a reaktív anyagot finom kavics veszi körül. A megkívánt tartózkodási idő alapján (melyet a szennyezők, a reakciósebesség, a tisztítási célok és a talajvíz áramlási sebessége határoznak meg) 0,6 – 1,8 m kapuvastagság adódott (580 tonna vassal). A reaktív fal építési költsége 200 – 250 US\$ /m², a kapué 850 – 1000 US\$ /m² volt. A volt karlsruhei gázgyár szanálása poliaromás szénhidrogének és benzol kezelésére irányul. A kapukat nagy átmérőjű (2.5 m) kutak formájában képezték ki (13. ábra) és aktívszénrel töltötték fel (Schultze and Mußotter, 2001).



13. ábra Kapu keresztmetszete (Schultze és Mußotter, 2001). Casing (temporary): ideiglenes béléscső, filter gravel: szűrőkavics, sheet-pile wall: szádfal, gate casing: kapu béléscső, perforated: perforált, closed: zárt, separating wall: válaszfal, compactonit: tömítőanyag, UV source: ultraibolya forrás, measurement point: mérőhely, GW flow: talajvíz áramlási iránya.

4.2.2.3 Vékony reaktív fal

Vékony reaktív falak a vékony résfalak és a szádfalak előnyeit egyesítik magukban (Jansen and Grooterhorst, 1999). Üres acélgerendát vibrálnak a talajba, a reaktív anyagot betöltik a részbe, majd a gerendát kihúzzák. Több egymás melletti elem képezi a folytonos reaktív falat. A módszer előnye a kis helyigény, nincs szükség talaj vagy talajvíz kiemelésére, minimális a talajvíz áramlásának megzavarása. Az elérhető mélység 25 m körül van. A kis falvastagság miatt azonban a tartózkodási idő rövid, ezért vékony falak csak akkor használhatók, ha a szennyezők eltávolítása gyors.

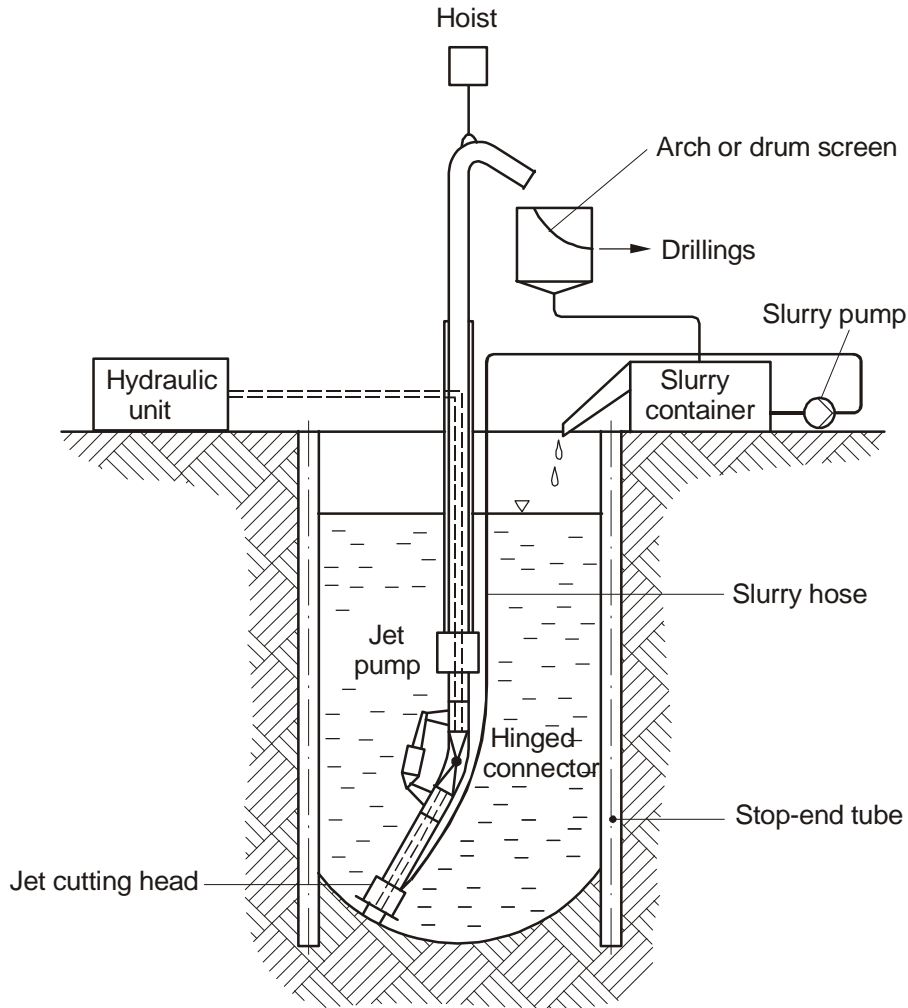
4.2.2.4 Fúrás és deep soil mixing

Reaktív anyaggal töltött egymásba hatoló hengeres oszlopok fúrással vagy földalatti talajkeveréssel (deep soil mixing) is előállíthatók (Dhaay et al., 1999). A fúrásnál lehet keszon technológiát alkalmazni, az oszlopátmérek 0,5 és 2,5 m között vannak. Általában egy nagy hengeres béléscsővet engednek le a talajba, a földet főrök (augerek) eltávolítják és az üreget reaktív anyaggal töltik ki. Béléscső helyett biodegradálódó polimer zagyok (Hubble et al., 1997) vagy nyírásra higuló folyadékok is használhatók (Cantrell et al., 1997) támasztó folyadékként jelentős költségelőnyel. Egy alternatív technológia szerint földalatti talajkeveréssel a talajt és a zagyot talajkiemelés nélkül össze lehet keverni (Gavaskar et al., 2000). Keszont mélyítnek a földbe, többszörös augerek hatolnak be a talajba, a reaktív anyagot pedig zagy formájában a keverő szerszám üreges tengelyén keresztül injektálják be, melyet azután augerek összekernek a talajjal. A helyben maradó talaj 40 - 60%-ban „higítja” a reaktív anyagot.

4.2.2.5 Sugártechnológia

Nagynyomású folyadéksugarak és sugárszivattyú alkalmazásával is építhetők rés- és reaktív falak (Debreczeni és Meggyes, 1999). A sugár-vágó fej, mely egy csuklós csatlakozóval kapcsolódik a fúrócsőhöz, szolgál árokmélyítésre (14. ábra). A fúrócsövet hidraulikus mechanizmus mozgatja az árkon belül ide-oda, így hozható létre a kívánt panel-szélesség. Kiszilárdságú rétegekben nagynyomású folyadéksugár, nagyszilárdságú rétegekben marófej használható talaj/közetaprításra. A furadékot sugárszivattyú szállítja a felszínre a fúrócsövön keresztül. A módszerrel mind egy-, mind kétfázisú falak építhetők. A furadék ív- vagy dobszita ill. hidrociklon segítségével leválasztható és a zagy recirkulálható. A vágófejet és a fúrócsövet emelőmű vagy fúróberendezés tarthatja. Egyes esetekben, különösen amikor mechanikus közetaprítást használunk, mammutozás is szóba jöhet sugárszivattyú helyett.

Egy kombinált nagynyomású sugáreljárás vasszemcséket használ mind közetaprító eszközként az árokmélyítésnél, mind reaktív anyagként (Day et al., 1999). A nagynyomású folyadéksugárba vasszemcséket kevernek: ezek aprítják a közetet, majd a létrejött üregben maradvá a reaktív fal anyagát képezik. Ez a fajta barrier a reaktív fal és injektált rendszer kombinációja.



14. ábra. Nagynyomású sugárszivattyús berendezés résfal vagy reaktív fal építésére. Hoist: emelőmű, arch or drum screen: ív- vagy dobszita, drillings: furadék, slurry pump: zagyszivattyú, hydraulic unit: hidraulika, slurry container: zagytartály, slurry hose: zagytömlő, jet pump: sugárszivattyú, hinged connector: csuklós csatlakozó, jet cutting head: sugár-vágófej, stop-end tube: végcső

4.2.2.6 Kútsor vagy DART

Kútsorok vagy Deep Aquifer Remediation Tool (DART) praktikus alternatívát képviselnek a folytonos reaktív falhoz képest (Wilson and Mackay, 1997; Golder Associates Ltd., 1998; Freethy et al., 2002). Alkalmazásuk olyan esetekben előnyös, amikor folytonos fal építése műszaki vagy gazdasági okok miatt nem célszerű. Kútsor átveheti a kapu szerepét tölcser és kapu rendszerben vagy képezhet in situ reaktorokat, melyek olyan anyagokat bocsátanak ki, melyek biológiai vagy egyéb folyamatokat előmozdítanak. A kútsor lényegében nem folytonos reaktív fal, melyet fúrási technikával lehet előállítani, ami alacsonyabb költségeket és nagyobb mélységet tesz lehetővé. A reaktív anyaggal töltött kút permeabilitása 50 – 200-szerese a környezetének, ezért a talajvíz odaáramlik. A kútsor reaktívanyag-igénye kisebb, mint a folytonos falé. Lényeges szempont a megfelelő reakcióidő biztosítása, ami döntően a talajvíz áramlási sebességétől függ. Az optimális kút-távköz a kútátmérő kétszerese körül van. Ha nagyobb reakcióidőre van szükség, további kútsor szükséges. Amennyiben a kutakból

reaktív anyag kibocsátása történik, a kút-távköz nagyobb is lehet. A DART rendszer fő előnyei:

- anyag, berendezés, kivitelező jól elérhető
- a kútépítés bevált technológia
- nagyobb mélységek (> 50 m) elérhető
- folytonos falakhoz képest az anyagigény kisebb
- az elhasznált reaktív anyag cseréje egyszerű.

DART rendszer épült pl. Fry Canyon, Utah-ban 10 cm átmérőjű kutakkal és elemi vassal. A becsült reakció-idő a kutak szélein 1,4 h és közepén 29,3 h, ami 99% uránium eltávolítást biztosított (Freethy et al., 2002).

4.2.2.7 Reaktor barrier technológia alkalmazása meglévő résfal-rendszerre

Bár a résfaltechnológia magas fejlettségi szintet ért el, a védett vízvezető réteg ennek ellenére sokszor kezelést igényel. A résfal esetleges rosszul záró helyeire javítás helyett reaktív anyaggal töltött kapuk építhetők, amivel a résfal tölcsér és kapu rendszerré alakítható. Ezzel az esetleg átszivárgó talajvíz in situ kezelésével kapcsolatos további szivattyúzási és egyéb költségek jelentősen csökkenthetők (Bradl és Bartl, 1999).

4.2.2.8 Injektált rendszerek

Reaktív anyagok nagy nyomású injektálásával rugalmas kármentesítő rendszer hozható létre. Fontos annak biztosítása, hogy a szennyező „felhőt” hatásosan kezeljük és megkerülő áramlások kialakulását megakadályozzuk. Injektált rendszerek kiterjedt és mélyen levő szennyezéseket tudnak kezelni akkor is, ha kiterjedésük szabálytalan (Golder Associates Ltd., 1998). Az olajipar tapasztalatai rétegrepezítés, másodlagos kitermelés stb. terén jól hasznosíthatók. Ennél a megoldásnál a reaktív anyag nem nyerhető vissza, ezért lebontási folyamatokat célszerű alkalmazni. Két fő építési típus alakult ki eddig:

- meglévő pórusokba való injektálás
- rétegrepezítés.

Az injektálás hatósugara a meglévő pórusoktól nagymértékben függ és finomszemcsés talajban esetleg sűrű kúthálózatot kell kialakítani. Egyes vélemények szerint 10^{-5} m/s alatti permeabilitás esetén csak tiszta folyadékok injektálhatók. Baktérium vagy mikrobuborékok (oxigénutánpótlás) (Duba et al., 1996; Koenigsberg, 1998), vagy kationos felületaktív anyagok injektálását (Burris and Antworth, 1990, 1992) szintén javasolták.

4.2.2.9 Hidraulikus repesztés

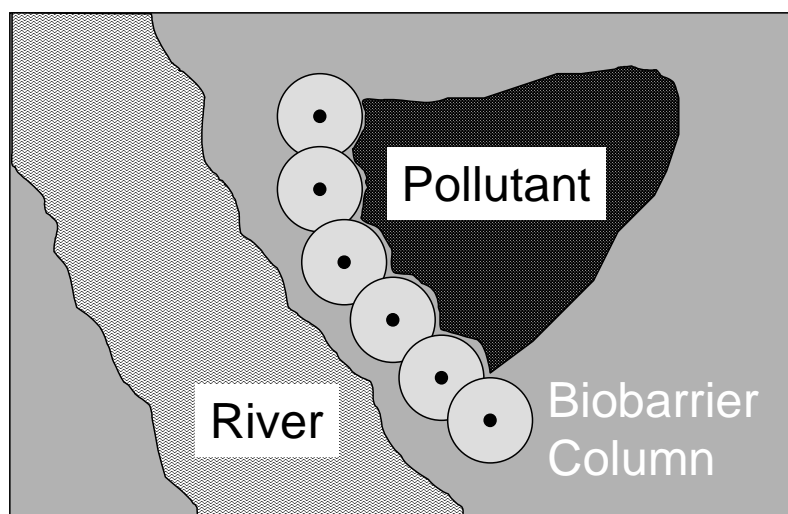
Az olajiparból átvett hidraulikus rétegrepezítés megnöveli a kút körüli zóna permeabilitását egy üreg létrehozásával, melyet homokkal vagy egyéb hasonló szemcsés anyaggal töltenek ki. Ennek az elvnek a barriertechnológiára való alkalmazása azt jelenti, hogy a szemcsés anyag egy része reaktív anyag a szennyezők kezelésére (Murdoch et al., 1997; Gavaskar, 1999). A létrehozott repedések lényegében vízszintesek és a szennyezőforrás után kell őket kialakítani. Repedések a talajvíznek a kapuk felé való terelésére is alkalmazhatók tölcsér és kapu

rendszerekben (Golder Associates Ltd., 1998). A repesztéshez szükséges nyomás a mélységgel növekszik, de meglepően alacsony: maximum 500 kPa 2 m-es mélységben (Murdoch et al., 1997). A repedések többnyire asszimmetrikusak és a haladás irányában emelkednek. 5 - 25 mm repedésvastagságot, 7 - 10 m vízszintes méreteket állapítottak meg iszapos agyagban, a betöltött anyagmennyiség 0,1 – 1,25 m³ volt. A repesztési folyamat a nyomás és deformáció mérésével nyomon követhető, a reaktív anyagok változtatják a redox viszonyokat, adszorbeálják a szennyezőket vagy hasznos anyagokat (oxigén, tápanyagok, porózus kerámiagranulátum stb.) bocsátanak ki. Nagynyomású folyadéksugár alkalmazásával irányított és függőleges repedések is létrehozhatók (Gavaskar, 1999).

4.2.2.10 Biobarrier

Biofilm barrierek vagy biobarrierek polimer filmből, mikroorganizmusok sejtjeiből és befogott szerves vagy szervetlen szemcsékből állnak (Cunningham et al., 1991, 1997; Sharp és Cunningham, 1998). Biobarrierek a rétegek szelektív elzárásával a rétegpermeabilitást befolyásolhatják, a permeabilitás öt nagyságrenddel is csökkenthető. A biobarriertechnológia használható szennyezett talajvíz telerelésére pl. tölcser és kapu rendszerekben.

Biobarrierek létesítésének első lépése megfelelő baktériumok izolálása a kérdéses terepen. Ha sikerült azonosításuk, a baktériumokat beoltják a rétegbe. Olyan baktériumtörzsek előnyösek, melyek sejten kívüli polimereket (extra cellular polymer, eps) termelnek (pl. mucoid phenotip). *Pseudomona* és *Klebsiella* törzsek jól beváltak ilyen célra. Eps termelésén kívül ezek a baktériumok benzol, toluol, xilén (BTEX) vegyületeket biológiailag le tudnak bontani, így kettős funkciót fejtenek ki. Melasz és szeszfőzdei hulladék jó tápláléknak bizonyult. A következő lépés a barrierképzés és permeabilitás-csökkentés laboratóriumi ellenőrzése. Cunningham (1998) kísérleteiben 0,9 m hosszú, 15 cm átmérőjű PVC és rozsdamentes acélcsövekben 1,0 m/m hidraulikus gradiens mellett a permeabilitás 4 cm/min-ről kb. 0,01 cm/min-re csökkent. Hasonló kísérletek folytak 0,3 × 0,9 × 0,15 m³ rozsdamentes acél liziméterben 0,03 m/m gradienssel és a permeabilitás 1 cm/min-ről 10⁻⁵ cm/min-re mérséklődött. Biobarrierek kútsor alkalmazásával hozhatók létre, melyből a mikroorganizmusokat, tápanyagot és oxigént a talajba juttatják. A mikroorganizmusok aktivitása egymásba nyúló oszlopok, s ezzel a barrier kialakulásához vezet (15. ábra).



15. ábra. Biobarrier elrendezés vázlata (Hiebert, 1998).

Pollutant: szennyező, river: folyó, biobarrier column: biobarrier oszlop.

Hiebert (1998) 6,5 – 10,7 millió US \$-t becsült 30 m mély és 3200 m hosszú biobarrierre és 9,8 – 13,5 millió US \$-t injektált „függöny”-re. Ugyanilyen hosszú, de csak 12 m mély szádfal 15 – 17 millió US \$-ba kerül.

Néhány bevált baktérium-törzs: *Burkholderia cepacia* PR1-pTOM31c (triklóretilén lebontása), *Klebsiella oxytoca* és *Burkholderia cepacia* (Komlós et al., 2001). Félüzemi és üzemi méretű kísérletek lényegesek a gyakorlati alkalmazás terén. Cunningham et al. (2003) egy 40 m x 60 m alapterületű és 6 m mély PVC-vel bélelt kísérleti cellában 10 m széles biobarriert alakított ki kiéheztetett *Pseudomonas fluorescens* CPC211a beoltásával, melyet melasz, nitrát és egyéb aditívek adagolása követett. Az eredeti $4,2 \cdot 10^{-4}$ m/s permeabilitást 3 hónap alatt 99%-kal sikerült csökkenteni a tápanyag heti vagy kétheti újraadagolása mellett. A csökkentett permeabilitást háromtól tíz hónapig terjedő időn keresztül sikerült fenntartani. A biobarrier stabilizálása után 100 mg/l nitrát-nitrogént és 100 mg/l klorid nyomjelzőt adagoltak a modellen átáramló talajvízbe. A kifolyásban a kloridkoncentráció 80 mg/l-re nőtt, míg a nitrát koncentráció 0,0 és 6,4 mg/l között változott.

Spinnler et al. (2004) MTBE (metil terc-butil éter) és TBA (terc-butil alkohol) szennyezések biobarrierrel való eltávolításáról számol be. Speciális MTBE-lebontó MC-100 baktériumokat oltottak konszolidálatlan üledékes réteg telített zónájába. Oxigént injektáltak a baktérium-tartalmú zónába, mely az éter-lebontó mikroorganizmusokkal olyan biobarriert hozott létre, mely MTBE-t és egyéb benzinszármazékokat lebontott és a szennyezés mobilitását csökkentette.

4.2.2.11 Reaktív fal és phytoremediáció kombinálása

Phytoremediáció és biodegradáció kombinációja előnyös kreozot kezelésére. A kreozot egy komplex favédelmi vegyszer, mely policiklusos aromás szénhidrogénekből (PAH), fenolokból és nitrogén/kén/oxigén heterociklusos aromásokból áll. Rassmussen (2002) két félüzemi reaktív falat vizsgált 29 hónapon keresztül egy kreozottal szennyezett felhagyott fakezelő telepen Norvégiában. Az egyik reaktív fal egy talaj/homok részből (*Dactylis glomerata* füvel beültetve) és egy tőzeg/homok részből állt. Az első rész feladata bioremediáció volt, a másodiké szorpció és az elsőn átjutó szennyezők lebontása. A második reaktív fal komposzt/homok keverékből állt. Ugyananezen anyagokat párhuzamosan laboratóriumban is vizsgálták. Az elfolyó koncentráció 29 hónapon át alacsony volt, bár a talajvíz hőmérséklete 0,4 és 13°C között volt. A 9 °C hőmérsékleten folytatott laboratóriumi vizsgálatok azt mutatták, hogy szorpció jelentős szerepet játszott PAH és NSO-vegyületek eltávolításában, a biológiai lebontás főleg fenolokra volt hatásos. A terepi vizsgálatban a füvesített talaj/homok rész kevésbé volt hatékony (valószínűleg anaerob viszonyok miatt) és részben telítődött PAH-val. Laboratóriumban a növényzet javította a kezelés hatékonyságát a talaj/homok keverékben, különösen dimetilfenol és trimetilfenol tekintetében. Biodegradáció fontos folyamat kombinált reaktív fal/phytoremediációs rendszerekben, és aerob feltételek mellett a leghatékonyabb. Microbiológiai degradáció növeli a barrier élettartamát.

4.2.2.12 Biopolimeres árokmélyítés

Biopolimereket először stabilizálásra használtak árokmélyítésnél, de a fejlődése révén fokozatosan önálló technológiává alakult (Day et al., 1999; Gavaskar, 1999; Gavaskar et al., 2000; Sivavec et al., 2002). Az eljárás hasonlít a hagyományos zagyos árokmélyítéshez, azzal a különbséggel, hogy biopolimert (pl. guar gumi) adagolnak a támasztó szuszpenzióhoz. Az árok lemélyítése után csövön keresztül juttatják a reaktív anyagot az árokba. Sivavec et al., (2002) egy 7,6 m hosszú és 10,4 m mély kísérleti reaktív falról számol be, melyben 90/10%

vas/homok keveréket helyeztek el. A következő lépésben magas pH-jú enzim-törő adalékot juttattak a szuszpenzióba a maradék biopolimer megtörésére és a falat agyaggal fedték le az oxigénnel való érintkezés kiküszöbölésére.

4.3 Költségek

Bár reaktív falak költségei nagymértékben függenek a helyszíntől, általában igaz, hogy a költségek a mélység függvényében növekednek. Az is igaz, hogy iparilag szennyezett területeken, ahol általában reaktív falakat építenek, a költségek magasabbak, mint „zöld mezőn” való létesítés esetén, mivel meglévő csövek, kábelek és egyéb közművek nehezítik az építést. A rendelkezésre álló tapasztalatok bizonyos korlátozott következtetések levonására adnak lehetőséget. Néhány adat 6. táblázatban található.

6. táblázat. Reaktív falak építési költségei a 1990-es évek végén (Gavaskar et al., 2000).

Építési technológia	Maximális mélység (m)	Költségek ¹
Keszon-bázisú építés	> 15	120 - 700 euró/m
Fúróső-bázisú építés	12 - 15	80 - 200 euró/m ²
Folyamatos árokmélyítés	8	40 - 100 euró/m ²
Jet technológia	60	300 - 1600 euró/m ²
Deep soil mixing	50	80 - 200 euró/m ³
Hidraulikus repesztés	25 - 40	1800 euró per repesztés
Vibrációs rúd	30	60 euró/m ²

¹ Mobilizálási költség nélkül, 1 € = 1,25 \$

7. táblázat jellegzetes költségtényezőket mutat, melyeket költségbecslésnél figyelembe kell venni. A 8. táblázat példát mutat költségbecslésre.

7. táblázat. Költségtényezők (Beitinger, 2002).

Beruházás

- Vásárlások (adóval együtt)
- Szállítás / szerelés
- Üzembehelyezési költségek
- Kamatok

Üzemeltetési és karbantartási költségek

- Személyi költségek
- Energiaköltségek (elektromos energia, üzemanyag)
- Fogyóanyag (aktívszén, mész stb.)
- Karbantartás
- Monitoring (mintavétel, vegyi elemzések, jelentések)
- Kibocsátási költségek
- Maradékanyagok, hulladékelhelyezési költségek
- Üzemeltetési idő (év)
- Díjak és adók

8. táblázat. Költségpélda (Beitinger, 2002).

Méretezési és költségtényezők	PRB
Vízvezetőréteg	10 m
Permeabilitás	10^{-4} m/s
Hidraulikus gradiens	0,001
Pórushányad	0,2
Talajvíz-kapacitás	20 m ³ /h
Beépítettség	3 kapu (10 x 15m), tölcsérhossz: 270 m
CHC szennyezés	1 mg/l
Aktívszén-terhelés	1% CHC/súly
Aktívszén-térfogat	150 m ³
Terhelési idő	~3,5 év
Beruházás	1 millió euró
Leírási idő	20 év
Leírási költségek	50 000 euró/év
Kamatláb	
Kamatköltségek	50 000 euró/év
Tőkeköltségek	100 000 euró/év
Elektromos energia (10 Watt/h)	-
Üzemeltetés (személyzet)	-
Aktívszén	40 000 euró/év
Javítás, karbantartás	10 000 euró/év
Talajvíz-kibocsátás (0,50 euró/m ³)	-
Monitoring	10 000 euró/év
Üzemeltetési költségek	60 000 euró/év
Összköltség	160 000 euró/év
Fajlagos költség térfogategységre vonatkoztatva (175 200 m³/év)	0.91 euró/m³

5. Reaktív falak alkalmazása

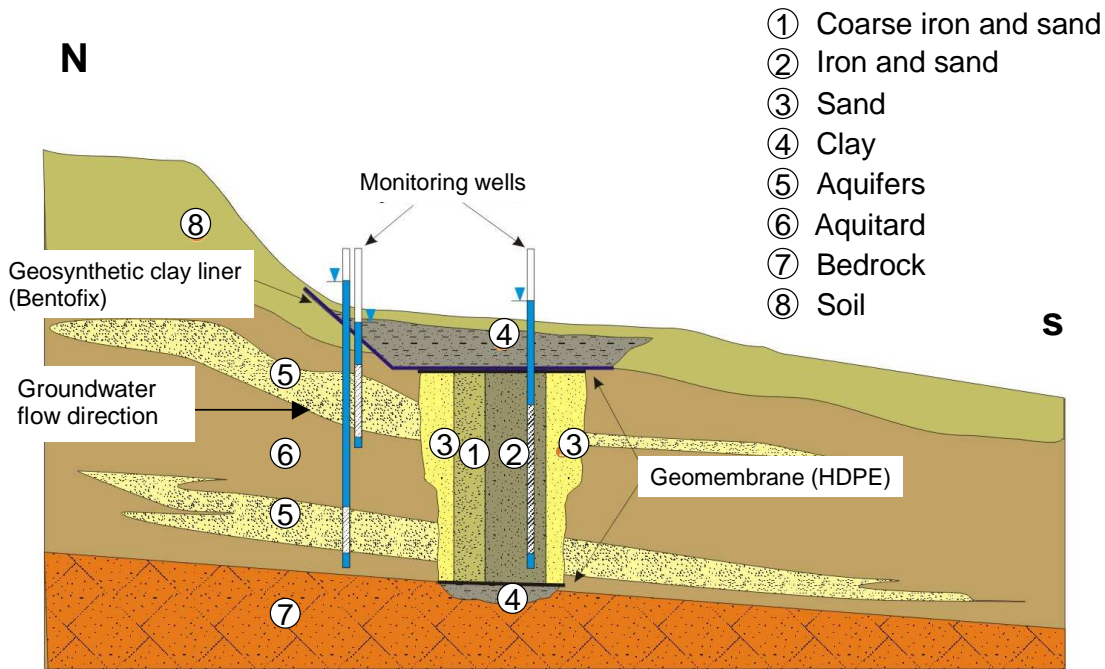
A reaktív falak terjedését jellemzi, hogy 2005-ig körülbelül 200 reaktív fal épült világszerte, ebből egyedül az USA-ban 120. A technológia európai fejlődését Németország példáján keresztül mutatjuk be a 9. táblázatban (Weiß et al., 1997; Weiß et al., 1999; Weiß et al., 2002; SAFIRA, 2006, Burmeier et al., 2002; Birke et al., 2002a; Birke et al., 2002b; Birke et al., 2003a; Birke et al., 2003b; Birke et al., 2004b; Birke & Burmeier, 2005; RUBIN, 2006, Burmeier et al., 2007).

Magyarországon 2002-ben Pécs közelében épült reaktív fal a mecseki uránbányászat által szennyezett talajvíz tisztítására (16.-20. ábrák).

9. táblázat. Reaktív falak Németországban (R: Rubin projekt, S: SAFIRA projekt)

Kezdés	Helyszín	Szennyező	Állapot	Konstrukció	Reaktor/reaktív anyag	Költségek, pénzforrás
98 máj	Edenkoben (autóalkatr. gyár)	Illék. halog. szénhidr. (cis-DCE, 1,1,1-TCA, TCE, PCE)	Félüzemi	F&G, 1 kapu hossz 30 m, mélys. 15 m,	Vasreszelék, 2 hidr. komm. kamra, passzív függ. áramlás	Nincs adat, privát
01 febr			Üzemi	F&G, 6 kapu hossz 440 m, mélys. 15 m		Nincs adat, privát
98 jun	Rheine (tisztító és mosoda)	Illék. halog. szénhidr. (PCE, TCE, cis-DCE)	Félüzemi (R)	Folyt. fal, áth. fúrt cölöpök (átm. 0,88 m, hossz 22,5 m	Szürkeöntvény granulátum – kavics, vasszivacs	170.000 €, + RUBIN 200.000 €
98 okt	Tübingen (ipari terület)	Illék. halog. szénhidr. (TCE, cis-DCE)	Üzemi (R)	F&G, 3 kapu, hossz 200 m, mélys. 10 m,	Szürkeöntvény granulátum áth. fúrt cölöpökben	450.000 € privát
99 okt	Bitterfeld (óriás vegyipari terület)	Klórbenzolok, Illék. halog. szénhidr., fenolok	Félüzemi (S)	5 akna, függesztett acélreaktorok, mélys. 24 m, függ. áraml.	Aktívszén, vas, palládium, mikrobiológia	6.000.000 €, állami
99	Kraichgau	Illék. halog. szénhidr.	Üzemi	Résfal, reaktor	Aktívszén	Nincs adat, privát
00 jan	Reichenbach (gépgyár)	Illék. halog. szénhidr. (PCE, TCE, cis-DCE)	Üzemi	Folyt. fal, fúrt cölöpök, hossz 20 m, mélys. 7 m	Savkondicionált aktívszén	200.000 €, privát
01 jan	Karlsruhe (felhagyott gázgyár)	Poliarom. szénh., VC	Üzemi	F&G, 8 kapu hossz 240 m, mélys. 17 m,	Aktívszén	3.300.000 €, állami
01 aug	Denkendorf (ipari park)	Illék. halog. szénhidr. (PCE, TCE, TCA, cis-DCE, VC)	Üzemi	D&G, 1 kapu akna+reaktor, mélys. 6 m, függ. áraml, drén hossz 90 m	Aktívszén	Nincs adat, privát
01 szept	Bernau (volt szovjet katonai mosoda)	Illék. halog. szénhidr. (magas konc. TCE két rétegben)	Félüzemi (R)	Speciális F&G, 18 reaktor, zárt tölcser, aktív vízbetáplálás	Szürkeöntvény granulátum, vasszivacs (mikrobiol és palládium terv.)	1.500.000 €, 50 % állami
02 szept	Denkendorf (ipari park)	Illék. halog. szénhidr. (főleg VC)	Félüzemi (R)	Oszlopkísérlet az aknában az aktívszén-reaktor mellett	Palládium zeoliton, hidrogén	120.000 €, állami
02 jan	Oberursel (ipari terület)	Illék. halog. szénhidr.	Üzemi	F&G, 1 kapu, hossz 175 m, mélys. 4-17 m	Vas	Nincs adat, privát
04 dec	München-Moosach	Poliaromás szénhidr., fenolok, BTEX	Üzemi	In situ reaktorok 4 kamrában, vízsz. drén. és résfal, 1,4 km	Aktívszén	6.000.000 €, állami

A PEREBAR EU-projekt keretében intenzív vizsgálatok folytak uránnal szennyezett talajvíz tisztítására (Roehl et al., 2005). A mecseki uránbányászat által szennyezett talajvízben 1000 $\mu\text{g/l}$ -t meghaladó uránkoncentrációt mértek. Előzetes in situ oszlopkísérletek alapján egy 6,8 m hosszú, 2,5 m széles és 3,8 m mély kísérleti reaktív fal épült Pécs közelében (Csővári et al., 2005). A fal két zónából áll, melyek vas/homok-keveréket tartalmaznak: az I zóna 50 cm vastag és 12 térf.-% 1 – 3 mm-es vasszemcséket tartalmaz, a II zóna 1 m vastag és 41 térf.-% 0,2 - 3 mm-es vasszemcséket tartalmaz. A teljes vasmennyiség 38 t, ebből 5 t a nagyobb szemcséjű anyag (16. ábra).

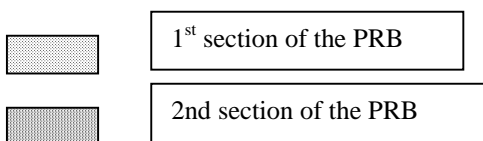


16. ábra. Kísérleti reaktív fal a mecseki uránbányászat által szennyezett talajvíz tisztítására (Csővári et al., 2005).
 1: durva vas és homok, 2: vas és homok, 3: homok, 4: agyag, 5: vízvezető réteg, 6: vízzáró réteg, 7: alaphegység, 8: talaj.
 Monitoring wells: megfigyelő kutak, geosynthetic clay liner (Bentofix): geoszintetikus agyagszigetelés (bentofix), groundwater flow direction: talajvíz áramlási iránya, geomembrane (HDPE): geofólia (kemény polietilén)

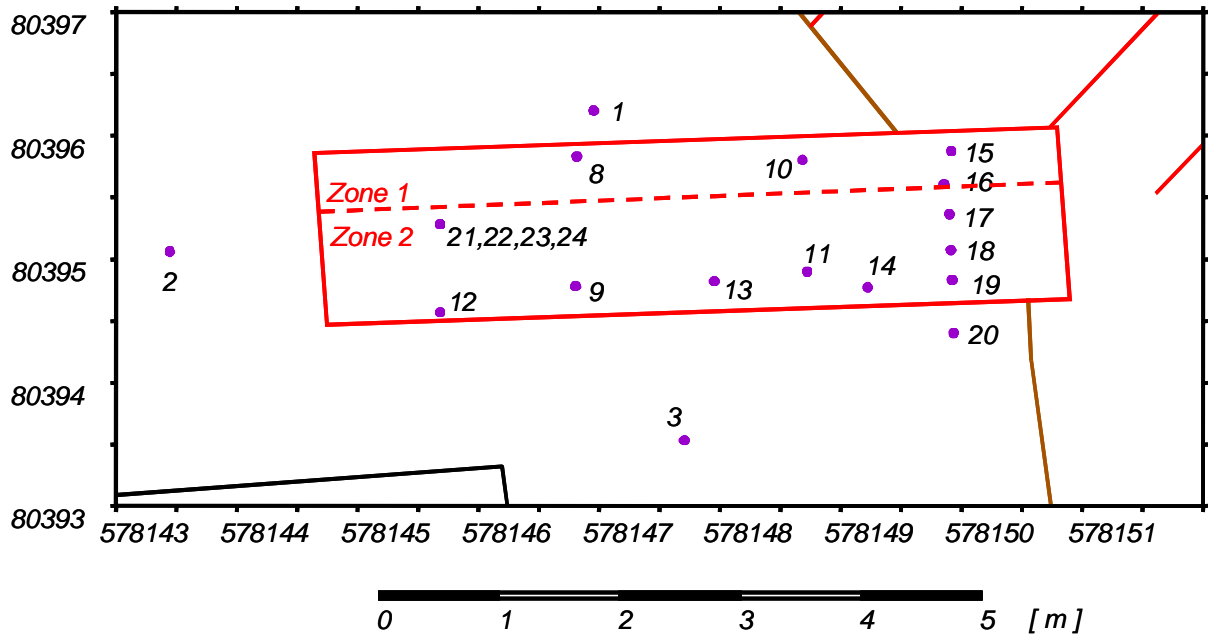
24 megfigyelő kút létesült a fal előtt, után és magában a falban. A fal megépülte, 2002. óta jelentős mennyiségű mérési adat gyűlt össze (17., 18., 19. és 20. ábra). Az uránkoncentráció a kezelés előtti 1.040 $\mu\text{g/l}$ körüli értékről a reaktív fal hatására rögtön 100 $\mu\text{g/l}$ alá esett (2002 augusztus), a következő években pedig tartósan 10 $\mu\text{g/l}$ alatt maradt, miközben a fal előtti koncentráció tovább növekedett 1.400 $\mu\text{g/l}$ -re. Az összes oldott szilárdanyag-tartalom (TDS) szintén jelentősen csökkent a pH növekedése és a kalciumkarbonát kicsapása miatt: 1200 mg/l-ről 400 mg/l körüli értékre. Érdekes megfigyelés, hogy a vas az első zónában oldatba ment és karbonát formájában kicsapódott a második zónában. A mecseki reaktív fal látványos eredményei meggyőzően igazolják az eljárás hatékonyságát.

Monitoring wells	Upstream	pH	Eh	U	TDS	HCO ₃	Ca	Mg	Fe	SO ₄
			mV	μg/l	mg/l					
Pe-4				1480						
PRB-1		7.1	255	1690	1075	534	139	44.5	0.002	350
PRB-15				440					15	
PRB-16				49					11.4	
PRB-17				<10					1.76	
PRB-18				<10					0.82	
PRB-19				11					0.54	
PRB-20				<10					<0.002	
PRB-3		9	278	<10	450	299	5	33.8	0.024	99
	Downstream									
PRB-26		9	104	32	510	281	6	38	0.073	130
Hb1/1		8.2		30	448	265	15.6	33.5	0.052	135

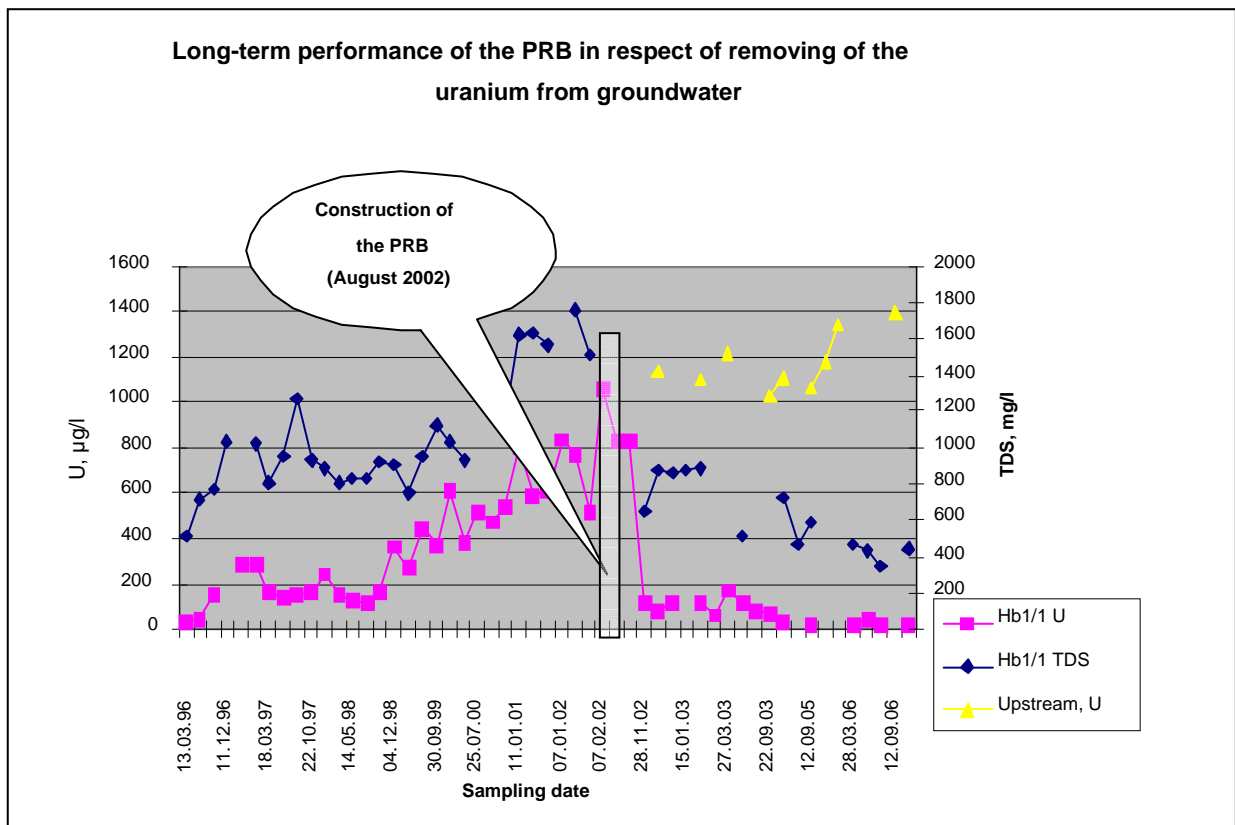
Legend: Pe , PRB, Hb1/1 monitoring wells and their app. locations



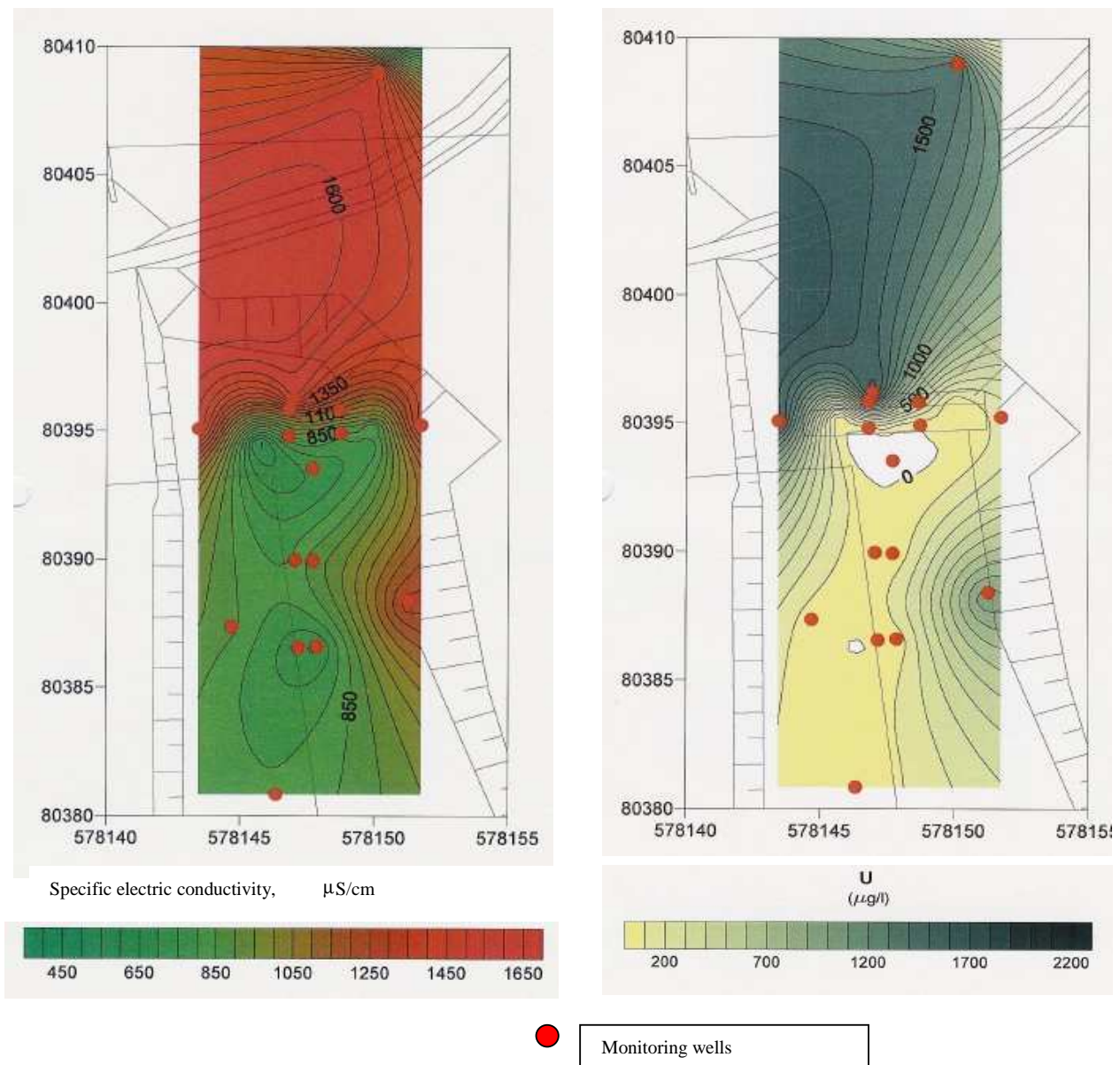
17. ábra. A talajvíz paramétereit és komponenseit a mecseki reaktív falban és fal körül (2006) Monitoring wells: megfigyelő kutak, upstream: a fal előtt, downstream: a fal után, 1st section: I zóna, 2nd section: II zóna



18. ábra. Megfigyelő kutak a mecseki reaktív falban és fal körül (Csóvári et al., 2005)



19. ábra. A mecseki reaktív fal uráneltávolítási eredményei hosszú távon: urántartalom és összes oldott szilárdanyag-tartalom (TDS) a Hb1/1 kútban (MECSEK-ÖKO Zrt). Construction of PRB: reaktív fal építése, upstream: a fal előtt, sampling date: mintavételi idő



20. ábra. Fajlagos elektromos vezetőképesség (a TDS jellemzésére) és uránkoncentráció a mecseki reaktív falban.
 Specific electric conductivity: fajlagos elektromos vezetőképesség, monitoring wells: megfigyelő kutak. (Reaktív fal helye: a 80395 koordináta „magasságában”)

6. Irodalom

Az "Irodalom" a hivatkozásokon kívül számos további informatív publikációt tartalmaz.

Abdelouas A., Lu Y., Lutze W., Nuttall H. E. (1998): Reduction of U(VI) to U(IV) by indigenous bacteria in contaminated ground water. *Journal of Contaminant Hydrology* 35(1-3): 217-233.

Abdelouas A., Lutze W., Nuttall E., Gong W. (1999a): Réduction de l'U(VI) par le fer métallique: application à la dépollution des eaux (Remediation of U(VI)-contaminated water using zero-valent iron). *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* 328(5): 315-319.

Abdelouas A., Lutze W., Nuttall E., Gong W., Fritz B., Crovisier J.-L. (1999b): Réduction enzymatique de U(VI) dans des eaux souterraines. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* 328(5): 321-326.

Abdelouas A., Lutze W., Gong W., Nuttall E. H., Strietelmeier B. A., Travis B. J. (2000): Biological reduction of uranium in groundwater and subsurface soil. *The Science of the Total Environment* 250(1-3): 21-35.

Achten C., Altenbockum M. (2003): Natürliche Immobilisierung von Schwermetallen im Grundwasser auch bei niedrigen pH-Werten - NA bei anorganischen Stoffen? *Altlasten spektrum* 12(1): 5-12.

Adams B., Yancey N., Conca J., Wright J. (2006): PRB Containing Processed Fish Bones Sequesters Metals from Ground Water. *Technology News and Trends* (23): 5-7.

Admassu W., Breese T. (1999): Feasibility of using natural fishbone apatite as a substitute for hydroxyapatite in remediating aqueous heavy metals. *Journal of Hazardous Materials* 69(2): 187-196.

AFCEE (2003): Mulch biowall at Altus Air Force Base, Landfill 3, Oklahoma. Air Force Center for Environmental Excellence, Cost and performance summary report.

Agrawal, A., Tratnyek, P.G., Stoffin-Egli, P., Liang, L. (1995): Process Affecting Nitro Reduction by Iron Metal: Mineralogical Consequences of Precipitation in Aqueous Carbonate Environments. 209th American Chemical Society National Meeting. Anaheim, C.A. Division of Environmental Chemistry Preprints of Papers, Vol. 35, No. 1, 720-723.

Agrawal, A. & Tratnyek, P.G. (1996): Reduction of Nitro Aromatic Compounds by Zero Valent Iron Metal. *Environ. Sci. Technol.*, 30, No. 1, 153-160.

Agrawal A., Ferguson W. J., Gardner B. O., Christ J. A., Bandstra J. Z., Tratnyek P. G. (2002): Effects of Carbonate Species on the Kinetics of Dechlorination of 1,1,1-Trichloroethane by Zero-Valent Iron. *Environmental Science & Technology* 36(20): 4326-4333.

Ainsworth, C. C., Girvin, D. C., Zachara, J. M., Smith, S. C. (1989): Chromate adsorption on goethite: effects of aluminum substitution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53, 411-418.

Aklil A., Mouflih M., Sebti S. (2004): Removal of heavy metal ions from water by using calcined phosphate as a new adsorbent. *Journal of Hazardous Materials* 112(3): 183-190.

Allen G. C., Scott T. B., Lee D. F., Randall M. G. (2004): The extraction of uranium from groundwaters on iron surfaces. *Philosophical Magazine Letters* 84(11): 691-696.

Allen-King, R. M., Burris, D. R., Specht, J. A. (1997): Effect of iron 'aging' on reduction kinetics in a batch metallic iron/water system. Preprints of Extended Abstracts, 213th ACS National Meeting, San Francisco, American Chemical Society, Division of Environmental Chemistry, Inc., 37 (1), 147-149.

Allen-King, R. M., Halket, R. M., Burris, D. R. (1997): Reductive transformation and sorption of cis- and trans-1,2-dichloroethene in a metallic iron-water system. *Environ. Toxicol. Chem.*, 16(3), 424-429.

Allison J. D., Brown D. S., Novo-Gradac K. J. (1991): MINTEQA2 / PRODEFA2, A geochemical assessment model for environmental systems: Version 3.0 user's manual. U.S. Environmental Protection Agency, Database of computer programme, EPA/600/3-91/021, Athens, GA, USA.

Alowitz M. J., Scherer M. M. (2002): Kinetics of nitrate, nitrite, and Cr(VI) reduction by iron metal. *Environ. Sci. Technol.* 36, 299-306.

Alvarez, P. J. J., Vogel, T. M. (1995): Degradation of BTEX and their aerobic metabolites by indigenous microorganisms under nitrate reducing conditions. *Wat. Sci. Tech.*, 31, 15-28.

Alvarez-Cohen, L., McCarthy, P.L., Roberts, P.V. (1993): Sorption of Trichlorethylene Onto a Zeolite Accompanied of Methanotrophic Biotransformation. *Environ. Sci. Technol.*, 27, No. 10, S. 2141-2148.

- Amonette, J.E., Szecsődy, J.E., Schaef, H.T., Templeton, J.C., Gorby, Y.A., Fruchter, J.S. (1994): Abiotic Reduction of an Aquifer Material by Dithionite: A Promising In-Situ Remediation Technology. In: Gee, G.W., Wing, N.R. (Hrsg.). In-Situ Remediation: Scientific Basis for Current and Future Technologies. Part 2, S. 851-881. Thirty-Third Hanford Symposium on Health and Environment, Batelle Press.
- Amrhein C., Hunt M. L., Roberson J. A., Yarmoff S. R., Qui S. R., and Lai H.-F. (1998): The use of XANES, STM, and XPS to identify the precipitation products formed during the reaction of U, Cr, and Se with zero-valent iron. Goldschmidt Conference, Toulouse: 51-52.
- Anderson L. D., Kent D. B., Davis J. A. (1994): Batch experiments characterizing the reduction of Cr(VI) using suboxic material from a midley reduced sand and gravel aquifer. *Environ. Sci. Technol.* 28, 178-185.
- Anderson, W. C. (Hrsg.) (1994): Innovative Site Remediation Technology, Vol. 2. Chemical Treatment. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 200 S.
- Anid, P. J., Alvarez, P. J. J., Vogel, T. M. (1993): Biodegradation of monoaromatic hydrocarbons in aquifer columns amended with hydrogen peroxide and nitrate. *Water Res.*, 27, 685-691.
- Anonymus (1995): Remedial Treatment for Contaminated Land. Volume IX: In Situ Methods of Remediation. Ciria, Special Publication 109, 173 S.
- Aoki, T., Munemori, M. (1982): Recovery of chromium(VI) from wastewaters with iron(III) hydroxide-I: Adsorption mechanism of chromium(VI) on iron(III) hydroxide. *Water Res.*, 16(6), 793-796.
- Appleton, E. L. (1996): A nickel-iron wall against contaminated groundwater. *Environ. Sci. Technol.*, 30(12), 536A-539A.
- Arcadis GmbH (2002): <<http://www.arcadis.de>> (September 2002)
- Arcadis GmbH (2004): Mitteilungen an die RUBIN-Koordinierungsstelle, Foliensatz, Unterlagen etc.
- Arey S. J., Seaman J. C., Bertsch P. M. (1999): Immobilization of Uranium in Contaminated Sediments by Hydroxyapatite Additon. *Environmental Science & Technology* 33(2): 337-342.
- Arnold W. A., Ball W. P., Roberts A. L. (1999): Polychlorinated ethane reaction with zero-valent zinc: pathways and rate control. *J. Contam. Hydrol.* 40, 183-200.
- Arnold, W. A., Roberts, A. L. (1997): Development of a quantitative model for chlorinated ethylene reduction by zero-valent metals. Preprints of Extended Abstracts, 213th ACS National Meeting, San Francisco, American Chemical Society, Division of Environmental Chemistry, Inc., 37 (1), 76-77.
- Arnold, W. A., Roberts, A. L. (1998): Pathways of chlorinated ethylene and chlorinated acetylene reaction with Zn(0): *Environ. Sci. Technol.*, 32(19), 3017-3025.
- Arnold, W. A., Roberts, A. L. (2000): Inter- and intraspecies competitive effects in reactions of chlorinated ethylenes with zero-valent iron in column reactors. *Environ. Eng. Sci.*, 17(5), 291-302.
- Arnold, W. A., Roberts, A. L. (2000): Kinetics of chlorinated ethylene reaction with zerovalent iron in column reactors. Preprints of Extended Abstracts presented at the ACS National Meeting, American Chemical Society, Division of Environmental Chemistry, 40(1), 135-137
- Arnold, W. A., Roberts, A. L. (2000): Pathways and kinetics of chlorinated ethylene and chlorinated acetylene reaction with Fe(0) particles. *Environ. Sci. Technol.*, 34(9), 1794-1805.
- Arz, P. (1988), Dichtwandtechnik für seitliche Umschließungen. *Bauwirtschaft*, 110 (B42), 831-835.
- Arz, P. and Weber, G. (1987), Altlastensanierung durch Umschließung mit einem doppelwandigen Dichtungssystem und deren Kontrollmöglichkeit. *VDI-Berichte*, 628, 357-384.
- Assaf-Anid, N. & Nies, L. (1995): Reductive Dechlorination of Carbon Tetrachloride and Hexachlorbenzene by Zero-Valent-Metals. 209th American Chemical Society National Meeting. Anaheim, C.A. Division of Environmental Chemistry Preprints of Papers, Vol. 35, No. 1 7 S. 809-811.
- Astrup T., Stipp S. L. S., Christensen T. H. (2000): Imobilization of chromate from coal fly ash leachate using an attenuation barrier containing zero-valent iron. *Environ. Sci. Technol.* 34, 4163-4168.
- Atlas, R. M., Bartha, R. (1993): *Microbial Ecology*. Benjamin Cummings, New York, 563 p.
- ATSDR (1999): Toxicological profile for uranium. U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Toxicological profile, Atlanta, Georgia.
- Bachmann, T. (1990): Untersuchungen zum reduktiven Abbau von umweltbelastenden chlorierten Kohlenwasserstoffen. Dissertation, Johann Wolfgang Goethe-University, Frankfurt am Main, Germany.

- Bagchi, A. (1990): Design, Construction & Monitoring of Sanitary Landfill. John Wiley & Sons. New York. 284.
- Baker, M. J., Blowes, D. W., Ptacek, C. J. (1998): Laboratory development of permeable reactive mixtures for the removal of phosphorous from onsite wastewater disposal systems. *Environ. Sci. Technol.*, 32(15), 2308-2316.
- Balcke, G. U. (2000): Anthropogene Huminstoffe als Sorbentien and Reagenzien zur Immobilisierung von organischen Schadstoffen in Grundwässern. PhD thesis, University of Leipzig, Leipzig, Germany.
- Balko, B. A., Tratnyek, P. G. (1998): Photoeffects on the Reduction of Carbon Tetrachloride by Zerovalent Iron. *J. Phys. Chem. B*, 102(8), 1459-1465.
- Bank, M. (2000): Basiswissen Umwelttechnik. Vogel, Würzburg, 315-328, 653-657.
- Barczewski, B., Luckner, L. (2000): Method and apparatus for groundwater remediation using a containment wall and lift reactor. Patent No. DE 19859862 A1, Dec. 23, 1998.
- Barczewski, B., Memminger, B. (2002): Das Heber-Reaktor-Verfahren – eine innovative und kostengünstige Technologie zur Grundwassersanierung – dargestellt an Praxisbeispielen. Boden und Altlasten SYMPOSIUM 2002, Berlin.
- Bargar J. R., Fuller C. C., Davis J. A. (2002): Mechanism of uranium sorption by apatite materials from a permeable reactive barrier demonstration at Fry Canyon, Utah. *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 83(47): Abstract B51B-0715.
- Bargar J. R., Reitmeyer R. L., Fuller C. C., Redden G. D., Davis J. A., Piana M. J. (1997): Remediation and Reactive Transport of Uranium (VI) in Groundwaters, SSRL Activity Report, Bd. 7 - Experimental Progress Reports, Stanford Synchrotron Radiation Laboratory, Standford, Kalifornien, 311-315.
- Bargar J. R., Reitmeyer R., Davis J. A. (1999): Spectroscopic Confirmation of Uranium(VI)-Carbonato Adsorption Complexes on Hematite. *Environmental Science & Technology* 33(14): 2481-2484.
- Bargar J. R., Reitmeyer R., Lenhart J. J., Davis J. A. (2000): Characterization of U(VI)-carbonato ternary complexes on hematite: EXAFS and electrophoretic mobility measurements. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64(16): 2737-2749.
- Barnett M. O., Jardine P. M., Brooks S. C. (2002): U(VI) Adsorption to Heterogeneous Subsurface Media: Application of a Surface Complexation Model. *Environmental Science & Technology* 36(5): 937-942.
- Bartl, H. (1993): Kolloidchemische Wechselwirkungen von Schwermetall-Fällungsprodukten mit Tonen. Diss. TH Darmstadt, 123 S., Darmstadt.
- Bastiaens, L., Vos, J., Maesen, M., Kinnaer, L., Diels, L., Weytingh, K., van de Velde, A., Berndsen, E., Peene, A., O'Hannesin, S.F. (2002): Feasibility Study, Design, and Implementation of a European Permeable Reactive Iron Barrier. Proc. of the 3rd Int. Conf. on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey, CA, A. R. Gavaskar and A. S. C. Chen, eds., Battelle Press, Columbus, Ohio, computer optical disk.
- Bayer P. (2003): Modelling, economic assessment and optimisation of in-situ groundwater remediation systems. PhD Thesis, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften, Universität Tübingen.
- Bayer, P., Heuer, E., Karl, U., M. Finkel (2005): Economical and ecological comparison of granular activated carbon (GAC) adsorber refill strategies. *Water Research* 39, 1719-1728.
- Bayer, P., M. Finkel (2005): Modeling of sequential groundwater treatment with zero valent iron and granular activated carbon. *Journal of Contaminant Hydrology*, 78, 129-146.
- BBodSchG (Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17.03.1998) (1998): Bundesgesetzblatt. Teil I, 502.
- BBodSchV (Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12.07.1999) (1999): Bundesgesetzblatt. Teil I, 1554.
- Beitinger E. (1998): Permeable Treatment Walls - Design, Construction and Costs, NATO/CCMS Pilot Study. Evaluation of Demonstrated and Emerging Technologies for the Treatment of Contaminated Land and Groundwater (Phase III). 1998 Special Session. Treatment Walls and Permeable Reactive Barriers., 229, Vienna, Austria, 6-16.
- Beitinger, E. & Bütow, E. (1997): Konstruktive und herstellungstechnische Anforderungen an unterirdische, durchströmte Reinigungswände zur in-situ Dekontamination. Grundwassersanierung 1997, Berlin. 19. und 29. Februar 1997. Wiss. Leitung: H.-P. Lühr. Erich Schmidt Berlin. ISBN 3 503 04333 0. S. 342-356.

- Beitinger, E. (2002): Engineering and operation of groundwater treatment systems: pump and treat versus permeable reactive barriers. In: Simon, F.-G., Meggyes, T. and McDonald, C. (ed.), *Advanced groundwater remediation - Active and passive technologies*, Thomas Telford, London, 283-302.
- Beitinger, E., Bütow, E. (1996): Möglichkeiten des Einsatzes von Adsorberwänden zur Sicherung und Sanierung von Altlasten. Kongreß Grundwassersanierung 1996, Berlin, IWSSchriftenreihe, Vol. 27, H.-P. Lühr, ed., Erich Schmidt, Berlin, 333-351.
- Beitinger, E., End, C., Koppe, S. (1996): Durchströmte Wände zur in situ Grundwassersanierung. *TerraTech*, 2/1996, 48-51.
- Beitinger, E., Tarnowski, F., Gehrke, M., Burmeier, H. (1998): Permeable treatment walls for in-situ groundwater remediation – how to avoid precipitation and bio-clogging. *Proc., 6th Int. FZK/TNO Conf. on Contaminated Soil*, Edinburgh, UK, 585-598.
- Bell L. S., Devlin J. F., Gillham R. W., Binning P. J. (2003): A sequential zero valent iron and aerobic biodegradation treatment system for nitrobenzene. *J. Contam. Hydrol.* 66, 201-217.
- Benner, S. G., Blowes, D. W., Ptacek, C. J. (1997): A full-scale porous reactive wall for prevention of acid mine drainage. *Ground Water Monitor. Remed.*, 17(4), 99-107.
- Benner S. G., Blowes D. W., Gould W. D., Herbert R. B., Ptacek C. J. (1999): Geochemistry of a permeable reactive barrier for metals and Acid mine drainage. *Environmental Science & Technology* 33(16): 2793-2799.
- Benner, S.G., Blowes, D.W., Molson, J.W.H. (2001): Modeling Preferential Flow in Reactive Barriers: Implications for Performance and Design. – *Ground Water*, 39 (3), 371-379.
- Benner, S. G., Blowes, D. W., Ptacek C. J., Mayer, K. U., 2002. Rates of sulfate reduction and sulfide mineral precipitation in a permeable reactive barrier, *Appl. Geochem.*, 17, 301-320.
- Bennett T. A. (1997): An in-situ reactive barrier for the treatment of hexavalent chromium and trichloroethylene in groundwater. M. Sc. Thesis, Department of Earth Sciences, University of Waterloo. 203.
- Bermejo-Barrera A., Yebra-Biurrun M. C., Fraga-Trillo L. M. (1990): Spectrophotometric determination of uranium in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 239: 321-323.
- Berndt, F. (2002): Dichtwände aus Stahlspundbohlen zur Sicherung von Altlasten. 10. Braunschweiger Deponieseminar 2002. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Vol. 69, Technische Universität Braunschweig. 353-371.
- Betcher R. N., Gascoyne M., Brown D. (1988): Uranium in groundwaters of southeastern Manitoba, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences* 25: 2089-2103.
- Beyenal H., Sani R. K., Peyton B. M., Dohnalkova A. C., Amonette J. E., Lewandowski Z. (2004): Uranium Immobilization by Sulfate-Reducing Biofilms. *Environmental Science & Technology* 38(7): 2067-2074.
- BfS (2003): Strahlung, Strahlenschutz. 2, Bundesamt für Strahlenschutz Salzgitter.
- Bianchi-Mosquera, G. C., Allen-King, R. M., Mackay, D. M. (1994): Enhanced degradation of dissolved benzene and toluene using a solid oxygen-releasing compound. *Ground Water Monitor. Rem.*, 14(1), 120-128.
- Biermann V., Simon F. G., Csövári M., Csicsák J., Földing G., Simoncsics G. (2005): Long-term performance of reactive materials in PRBs for uranium remediation, in: Merkel B. J., Hasche-Berger A. (ed.), *Uranium in the environment - mining impact and consequences*, Springer, Berlin, 275-285.
- Biermann, V. (2006): Langzeitverhalten von elementarem Eisen und Hydroxyapatit in permeablen reaktiven Wänden zur Grundwassersanierung. Dissertation. Technische Universität Berlin.
- Bilbrey, L.C., Sedivy, R.C., Shafer, J.M. (2001): Funnel-and-gate performance in a moderately heterogeneous flow domain. – *Ground Water Monitoring & Remediation*, 21 (3), 144-151.
- Birke V., Burmeier H., Rosenau D. (2003): Design, Construction and Operation of Tailored Pemeable Reactive Barriers, in: Prokop G., Bittens M., Cofalka P., Roehl K. E., Schamann M., Younger P. L. (ed.), *Summary Report of the 1st IMAGE-TRAIN Advanced Study Course "Innovative Groundwater Management Technologies"*, Katowice, June 24-28 2002, *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten (TGA)*, Bd. TGA C68, Zenrum für Angewandte Geowissenschaften der Universität Tübingen, Tübingen, 64-94.
- Birke, V., Burmeier, H., Rosenau, D. (2002a): Sanierung kontaminierter Grundwasserleiter mittels durchströmter Reinigungswände: Stand der Entwicklung in Deutschland 2002. *Altlasten Spektrum*, 6/2002, 304-311.

- Birke, V., Burmeier, H., Rosenau, D. (2002b): PRB technologies in Germany: recent progress and new developments. Proc. of the 3rd Int. Conf. on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey, CA, A. R. Gavaskar and A. S. C. Chen, eds., Battelle Press, Columbus, Ohio, computer optical disk.
- Birke, V., Burmeier, H., Rosenau, D. (2003a): Design, Construction and Operation of Tailored Permeable Reactive Barriers. Pract. Periodical of Haz., Toxic, and Radioactive Mgmt., ASCE, 7(4), 264-280.
- Birke, V., Burmeier, H., Rosenau, D. (2003b): Aquifersanierung mit durchströmten Reinigungswänden. Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement, V. Franzius, K. Wolf, E. Brandt, and M. Altenbockum, eds., Vol. 5958, 56 pp.
- Birke V., Burmeier H., Rosenau D. (2003c): Permeable reactive barriers (PRBs) in Germany and Austria: State-of-the-art report 2003. Consoil 2003: 8th International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil. 12.-16. Mai 2003, Gent, Belgien: 1572-1581.
- Birke, V., Rosenau, D., Burmeier, H. (2004a): Praxisrelevante Aspekte, Erfahrungen zur Leistungsfähigkeit sowie Trends bei Reinigungswänden in Deutschland und Österreich an 12 Standorten nach 6 Jahren. Altlasten 2004: Fünf Jahre Bundesbodenschutzgesetz- und Altlastenverordnung in Deutschland, Modell für Europa? – Beiträge zum Seminar 16.-17.06.04 in Karlsruhe, T. Egloffstein, G. Burkhardt, K. Czurda, Hrsg., ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Karlsruhe, Band 7 (ISBN 3-9806840-6-7), 147-206
- Birke, V., Burmeier, H., Niederbacher, P., Hermanns Stengele, R., Koehler, S., Wegner, M., Maier, D., Eggers, J., Maier, J., Hofmann, B., Kühlers, D., Weindl, J. Koch, M. (2004c): PRBs in Germany, Austria, and Switzerland: Mainstreams, Lessons Learned, and New Developments at 13 Sites After Six Years. Paper 3A-14, in: A.R. Gavaskar and A.S.C. Chen (eds.), Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds — 2004. Proceedings of the Fourth International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds (Monterey, CA; May 2004). ISBN 1-57477-145-0, Battelle Press, Columbus, OH, www.battelle.org/bookstore
- Birke, V., Burmeier, H., Niederbacher, P., Wegner, M., Maier, M., Kühlers, D., Eggers, J., Maier, D., Weindl, J. Koch, M. (2004b): Zur Abreinigungsleistung durchströmter Reinigungswände (PRB): Hinweise und Rückschlüsse für die Sanierungspraxis und weitere Entwicklung. Altlasten Spektrum, 6/2004, 301-317
- Birke, V., Burmeier, H. (2005): Praxisrelevante Aspekte zur Errichtung durchströmter Reinigungswände in Deutschland – Stand der Entwicklung sowie grundlegende planerische und rechtliche Voraussetzungen. Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement, V. Franzius, K. Wolf, E. Brandt, M. Altenbockum (Hrsg.), 85 P
- Birke, V., Burmeier, H., Dahmke, A., Ebert, M. (2005). The German Permeable Reactive Barrier (PRB) Network „Rubin“: Temporary Overall Results and Lessons Learned after five Years of Work“, CONSOIL 2005 (9th International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil), Bordeaux, France, 03-07 October 2005 (computer optical disk), 2865-2887
- Birke, V., Jungbauer H. (2005). Remediation strategies for soil and groundwater remediation in Germany: history, current status and perspectives“, CONSOIL 2005 (9th International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil), Bordeaux, France, 03-07 October 2005 (computer optical disk), 90-101
- Birke, V., Parbs, A. (2005): State-of-the-Art Report and Inventory on Already Demonstrated Innovative Remediation Technologies. EURODEMO Report, Project No. (GOCE) 003985, Acronym: EuroDemo, 180 pp., <<http://www.eurodemo.info>> (1. Mai 2006)
- Blowes D. W., Gillham R. W., Ptacek C. J., Puls R. W., Bennett T. A., O'Hannesin S. F., Hanton-Fong C. J., Bain J. G. (1999): An in situ permeable reactive barrier for the treatment of hexavalent chromium and trichloroethylene in ground water: Vol. 1 design and installation, pp. 111. EPA - Office of Research and Development, Washington, DC. Sep. 1999. EPA/600/R-99/095a.
- Blowes D. W., Ptacek C. J. (1992): Geochemical remediation of groundwater by permeable reactive walls: Removal of chromate by reduction with iron-bearing solids. Subsurface Restoration Conference, Third International Conference on Groundwater Quality Research. June 21-24, Dallas, TX: 214-216.
- Blowes D. W., Ptacek C. J., Benner S. G., McRae C. W. T., Bennett T. A., Puls R. W. (2000): Treatment of inorganic contaminants using permeable reactive barriers. J. Contam. Hydrol. 45, 123-137.
- Blowes D. W., Ptacek C. J., Benner S. G., McRae C. W. T., Puls R. W. (1998): Treatment of dissolved metals using permeable reactive barriers. Groundwater Quality '98. September 1998, Tübingen. IAHS-Publication, 250: 483-490.
- Blowes, D. W., Ptacek, C. J., Cherry, J. A., Gillham, R. W., Robertson, W. D. (1995): Passive remediation of groundwater using in situ treatment curtains. Geoenvironment 2000, Characterization, Containment,

- Remediation, and Performance in Environmental Geotechnics (Vol. 2), Y. B. Acar and D. E. Daniel, eds., ASCE, New York, 1608-1621.
- Blowes, D. W., Ptacek, C. J., Jambor, J. L. (1997): In-situ Remediation of Cr(VI)-Contaminated Groundwater Using Permeable Reactive Walls: Laboratory Studies. *Environ. Sci. Technol.*, 31(12), 3348-3357.
- Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Benner, S.G., Waybrant, K.R., Bain, J.G. (1996 b): Treatment of Mine Drainage Water Using In-Situ Permeable Reactive Walls. In: *Passive Systeme zur In-Situ-Sanierung von Boden und Grundwasser*. S. 38-41. Workshop - Extended Abstracts, Dresden, Mai 2-3.
- Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Hanton-Fong, C.J., Baker, M.J., Mcrae, C.W.T., Robertson, W.D. (1996 a): Passive In-Situ Remediation of Metals, Arsenic and Nutrients Using Permeable Reactive Walls. In: *Passive Systeme zur In-Situ-Sanierung von Boden und Grundwasser*. S. 26-30. Workshop - Extended Abstracts, Dresden, Mai 2-3.
- BMBF Endbericht Nr. 0271262, Biologische Prozesse in einer reaktiven Wand mit Fe(0) Auswertungen zum Langzeitverhalten einer Fe(0)-Reaktiven Wand am Beispiel des Standortes Rheine, TU Berlin, 2003.
- BMBF Endbericht Nr. 02WR0293, Entwicklung und Erprobung eines Funnel-and-Gate-Systems mit Biosorptionsreaktor zur Fassung und Abreinigung von Grundwasserkontaminationen mit BTEX-Aromaten und PAK am Standort der ehemaligen Teerfabrik Lang in Offenbach, HIM GmbH, 2005.
- BMBF Endbericht Nr. 02WR0307, Entwicklung und Erprobung von Reaktionswandsystemen im An- und Abstrom einer Arsenaltlast am Standort der ehemalige Chemische Fabrik Lembach und Schleicher, Wiesbaden, HIM GmbH, 2004. BMBF-Forschungsvorhaben 02WT9730/1
- Böhm, E., Hillenbrand, T., Liebert, J., Schleich, J., Walz, R. (2002): Kosten-Wirksamkeitsanalyse von nachhaltigen Maßnahmen im Gewässerschutz. UBA-Texte 12/02, Umweltbundesamt Berlin, 364 p.
- Bohn, H. L., McNeal, B. L., O'Connor, G. A. (1985): *Soil Chemistry*, John Wiley and Sons, NY, 341 p.
- Bond D. L., Fendorf S. (2003): Kinetics and structural constraints of chromate reduction by green rusts. *Environ. Sci. Technol.* 37, 2750-2757.
- Borden, R. C., Goin, R. T., Kao, C.-M. (1997): Control of BTEX Migration Using a Biologically Enhanced Permeable Barrier. *Ground Water Monit. Rem.*, 17(1), 70-80.
- Boronina, T. & Klabunde, K.J. (1995 a): Destruction of Organohalides in Water Using Metal Particles: Carbon Tetrachloride Water Reactions with Magnesium, Tin and Zinc. *Environ. Sci. Technol.*, 29, No. 6, S. 1511-1517.
- Boronina, T. & Klabunde, K.J. (1995 b): Destruction of Organohalides in Water Using Metal Particles. Carbon Tetrachloride Water Reactions with Magnesium, Tin and Zinc. 209th American Chemical Society National Meeting. Anaheim, C.A. Division of Environmental Chemistry Preprints of Papers, Vol. 35, No. 1, S. 759-762.
- Boronina, T. N., Lagadic, I., Klabunde, K. J. (1998): Activated and Nonactivated Forms of Zinc Powder: Reactivity toward Chlorocarbons in Water and AFM Studies of Surface Morphologies. *Environ. Sci. Technol.*, 32(17), 2614-2622.
- Bostick W. D., Jarabek R. J., Fiedor J. N., Farrell J., Helferich R. (1997): Zero-valent iron for the removal of soluble uranium in simulated DOE site groundwater, International Containment Technology Conference and Exhibition, St. Petersburg, Florida, USA, 767-773.
- Bostick W. D., Shoemaker J. L., Osborne P. E., Evans-Brown B. (1990): Treatment and disposal options for a heavy metals waste containing soluble technetium-99. In *Am. Chem. Soc. Symp. Ser.*, Vol. 422 (ed. D. W. Tedder & F. G. Pohland), pp. 345-367.
- Bostick W. D., Stevenson R. J., Jarabek R. J., Conca J. L. (2000): Use of Apatite and bone char for the removal of soluble radionuclides in authentic and simulated DoE groundwater. *Advances in Environmental Research* 3(4): 488-498.
- Bouwer, E. J., Rittmann, B. E., McCarty, P. L. (1981): Anaerobic degradation of halogenated 1- and 2-carbon organic compounds. *Environ. Sci Technol.*, 15, 596-599.
- Bowman, R. S., Haggerty, G. M., Huddleston, R. G., Neel, D., Flynn, M. M. (1995): Sorption of nonpolar organic compounds, inorganic cations, and inorganic oxyanions by surfactantmodified zeolites. *Surfactant-Enhanced Remediation of Subsurface Contamination (ACS Symp. Ser. 594)*: D. A. Sabatini, R. C. Knox, and J. H. Harwell, eds., American Chemical Society, Washington, D.C., 54-64.
- Bracke, R., Hagemann, H.W., Echle, W. & Düllmann, W. (1991): Geochemische Veränderungen in der Tonbasisabdichtung der Deponie Geldern-Pont nach achtjährigem Deponiebetrieb. *Müll und Abfall* 7: 409 - 420, Berlin.

- Bradl, H.B. (1994): Die doppelte mineralische Basisabdichtung Teil 2. Unveröff. Forschungsbericht, Bilfinger + Berger Bauaktiengesellschaft, 90 p, Mannheim.
- Bradl, H.B. (1996): Mehrschichtige multiminerale Tonabdichtungen. 12. Nürnberger Deponieseminar. LGA-Grundbauinstitut, Heft 75. Nürnberg. p 301 - 321.
- Bradl, H.B. and Bartl, U. (1999): Reactive Walls - A Possible Solution to the Remediation of Old Landfills? In: Christensen, T.H., Cossu, R. and Stegmann, R. (ed.), Sardinia 99, 7th International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Sardinia, Italy, CISA Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italy, Conference Proceedings Vol. IV, 525-532.
- Bradley P. M. (2003): History and ecology of chloroethene biodegradation: A review. *Biorem. J.* 7, 81-109.
- Brandl, H. (1989): Doppelte Umschließung von Deponien mittels des Dichtwand-Kammersystems. In: Gartung, E. (ed.), Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien 5. Nürnberger Deponieseminar, Grundbauinstitut der Landesgewerbeanstalt Bayern, Nürnberg, 163-189.
- Brauns (1994): Personal communication
- Bronstein K. (2005): Permeable Reactive Barriers for Inorganic and Radionuclide Contamination. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, Student paper, Washington, DC.
- Brooks S. C., Fredrickson J. K., Carroll S. L., Kennedy D. W., Zachara J. M., Plymale A. E., Kelly S. D., Kemner K. M., Fendorf S. (2003): Inhibition of Bacterial U(VI) Reduction by Calcium. *Environmental Science & Technology* 37(9): 1850-1858.
- Brown J. R., Fyfe W. S., Murray F., Kronberg B. I. (1981): Immobilization of U-Th-Ra in mine wastes. *Canadian Mining Journal* 102(3): 71-76.
- Brown, G. E. (1990): Spectroscopic studies of chemisorption reaction mechanisms at oxide-water interfaces. *Mineral-Water Interface Geochemistry (Reviews in Mineralogy, Vol. 23)*, M. F. Hochella, Jr. and A. F. White, eds., Mineralogical Society of America, Washington, D.C., 309-363.
- Brownawell, B. J., Chen, H., Collier, J. M., Westall, J. C. (1990): Adsorption of organic cations to natural materials. *Environ. Sci. Technol.*, 24, 1234-1241.
- Brunauer S., Emmet P. H., Teller E. (1938): Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. Am. Chem. Soc.* 60, 309-319.
- Bruno J., De Pablo J., Duro L., Figuerola E. (1995): Experimental study and modeling of the U(VI)-Fe(OH)₃ surface precipitation/coprecipitation equilibria. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59(20): 4113-4123.
- Buck E. C., Brown N. R., Dietz N. L. (1996): Contaminant uranium phases and leaching at the Fernald Site in Ohio. *Environmental Science & Technology* 30(1): 81-88.
- Buffle, J., Altmann, R. S. (1987): Interpretation of metal complexation by heterogeneous complexants. *Aquatic Surface Chemistry*, W. Stumm, ed., John Wiley and Sons, NY, 351- 383.
- Burckhardt, A.-C. (1988): Untersuchungen zur Destabilisierung von Tonmineralen durch experimentelle Behandlung mit Säuren. Diss. TH Karlsruhe, 167 pp., Karlsruhe.
- Bürger C., Finkel M., Teutsch G. (2003): Reaktionswandsysteme und Pump-and-Treat - Ein Kostenvergleich. *Grundwasser* 3, 169-180.
- Bürger, C., Bayer, P., M. Finkel (2006) Algorithmic F&G-System design optimization. - In preparation for submittal to Water Resources Research.
- Bürger, C., M. Finkel (2005), Performance of multiple gate F&G-Systems in three-dimensional, anisotropic, heterogeneous aquifers. - *IAHS Publ.*, 298, 125-135.
- Bürger, C.M., M. Finkel, G. Teutsch (2003), Technical and economic evaluation of multiple gate F&G-Systems under homogeneous and heterogeneous aquifer conditions. - *IAHS Publ.*, 277, 448-455.
- Burmeier H, Birke, V., Ebert, M., Finkel, M., Rosenau, D., Schad, H. (2007): Anwendung von durchströmten Reinigungswänden zur Sanierung von Altlasten. Universität Lüneburg, Suderburg.
- Burmeier, H. (1997): Die Bedeutung des Innovationspotentials von durchströmten Reinigungswänden für die Sanierung von Altlastenstandorten in Deutschland. Sanierung von Altlasten mittels durchströmter Reinigungswände, Vorträge und Diskussionsbeiträge des Fachgesprächs am 27.10.1997 im Umweltbundesamt in Berlin, Umweltbundesamt, Berlin, 6-21.

- Burmeier, H. (1998): General Overview. Evaluation of Demonstrated and Emerging Technologies for the Treatment of Contaminated Land and Groundwater — Phase III. SPECIAL SESSION ON Treatment Walls and Removable Reactive Barriers. Rep. No. EPA 542-R-98-003, University of Vienna, Austria.
- Burmeier, H., Birke, V., Rosenau, D. (2002): Current R&D Needs and Tailored Projects for Solving Technical, Administrative and Other Issues Concerning Permeable Reactive Barrier Implementation in Germany. Advanced Groundwater Remediation Active and Passive Technologies, F. G. Simon, T. Meggyes, and C. McDonald, eds., Thomas Telford Ltd., London, 45-73.
- Burns P. C. (1999): The crystal chemistry of uranium, in: Burns P. C., Finch R. J. (ed.), Uranium: mineralogy, geochemistry and the environment, Reviews in Mineralogy. 38, American Chemical Society, Washington, D.C., 23-89.
- Burris, D.R. and Antworth, C.P. (1990): Potential for Subsurface in situ Sorbent Systems. Groundwater Management, 4, 527-538.
- Burris, D. R., Antworth, C. P. (1992): In situ Modification of an Aquifer Material by a Cationic Surfactant to Enhance Retardation of Organic Contaminants. J. Contam. Hydrol., 10, 325-337.
- Burris D. R., T. J. C., Manoranjan V. S. (1995): Sorption of trichloroethene and tetrachloroethene in a batch reactive metallic iron-water system. Environ. Sci. Technol. 29, 2850-2855.
- Burris D. R., Roberts A. L., Hering J. G. (1997): Redox reactions in natural and engineered aqueous systems. 213th Am. Chem. Soc. Nat. Meeting, San Francisco, CA. Division of Environmental Chemistry, 37(1): 177-180.
- Burris, D. R., Allen-King, R. M., Manoranjan, V. S., Campbell, T. J., Loraine, G. A., Deng, B. (1998): Chlorinated ethene reduction by cast iron: sorption and mass transfer. J. Environ. Eng., 124(10), 1012-1019.
- Burris, D. R., Campbell, T. J., Manoranjan, V. S. (1995): Sorption of trichloroethylene and tetrachloroethylene in a batch reactive metallic iron-water system. Environ. Sci. Technol., 29(11), 2850-2855.
- Burrow P. D., Aflatooni K., Gallup G. A. (2000): Dechlorination rate constants on iron and the correlation with electron attachment energies. Environ. Sci. Technol. 34, 3368-3371.
- Butler, L. C., Staiff, D. C., Sovocool, G. W., Davis, J. E. (1981): Field disposal of methyl parathion using acidified powdered zinc. J. Environ. Sci. Health, B16(1), 49-58.
- Butler, E. C., Hayes, K. F. (1998): Effects of Solution Composition and pH on the Reductive Dechlorination of Hexachloroethane by Iron Sulfide. Environ. Sci. Technol., 32(9), 1276-1284.
- Butler E. C., Hayes K. F. (1999): Kinetics of the transformation of trichloroethylene and tetrachloroethylene by iron sulfide. Environ. Sci. Technol. 33, 2021-2027.
- Butler E. C., Hayes K. F. (2000): Kinetics of the transformation of halogenated aliphatic compounds by iron sulfide. Environ. Sci. Technol. 34, 422-429.
- Butler E. C., Hayes K. F. (2001): Factors influencing rates and products in the transformation of trichloroethylene by iron sulfide and iron metal. Environ. Sci. Technol. 35, 3884-3891.
- Campbell T. J., Burris D. R., Roberts A. L., Wells J. R. (1997): Degradation of TCE and formation of chlorinated intermediates in a batch reactive metallic iron-water system. Environ. Tox. Chem. 16, 625-630.
- Cantrell, K.J., Martin, P.F., Szecsödy, J.E. (1994): Clinoptilolite as an In-Situ Permeable Barrier to Strontium Migration in Ground Water. In: Gee, G.W., Wing, N.R. (eds.). In-Situ Remediation: Scientific Basis for Current and Future Technologies. Part 2, 839-850. Thirty-Third Hanford Symposium on Health and Environment, Battelle Press.
- Cantrell K. J., Kaplan D. I., Wietsma T. W. (1995): Zero-Valent Iron for the in situ remediation of selected metals in groundwater. Journal of Hazardous Materials 42(2): 201-212.
- Cantrell, K. J., Kaplan, D. I. (1997): Zero-valent iron colloid emplacement in sand columns. J. Environ. Eng., 123(5), 499-505.
- Cantrell, K.J., Kaplan, D.I. and Gilmore, T.J. (1997): Injection of Colloidal Size Particles of Fe₀ in Porous Media with Shearthinning Fluids as a Method to Emplace a Permeable Reactive Zone. International Containment Technology Conference, St. Petersburg, FA, USA, 774-780.
- Cao J., Wei L., Huang Q., Wang L., Han S. (1999): Reducing degradation of azo dyes by zero-valent iron in aqueous solution. Chemosphere 38, 565-571.
- Carey, M. A., Fretwell, B. A., Mosley, N. G., Smith, J. W. N. (2002): Guidance on the use of permeable reactive barriers for remediating contaminated groundwater. National Groundwater & Contaminated Land Centre report

NC/01/51, Environment Agency, National Groundwater & Contaminated Land Centre (NGWCLC), Olton, Solihull.

Cary, J.W. & Cantrell, K.J. (1994): Innocuous Oil as an Additive for Reductive Reactions Involving Zero-Valence Iron. In: Gee, G.W., Wing, N.R. (Hrsg.). *In-Situ Remediation: Scientific Basis for Current and Future Technologies*. Part 2, p 1033-1044. Thirty-Third Hanford Symposium on Health and Environment, Batelle Press.

Casey F. X. M., Ong S. K., Horton R. (2000): Degradation and transformation of trichloroethylene in miscible-displacement experiments through zerovalent metals. *Environ. Sci. Technol.* 34, 5023-5029.

Catalano J. G., Trainor T. P., Eng P. J., Waychunas G. A., Brown J., Gordon E. (2005): CTR diffraction and grazing-incidence EXAFS study of U(VI) adsorption onto $[\alpha]$ -Al₂O₃ and $[\alpha]$ -Fe₂O₃ (11̄02) surfaces. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69(14): 3555-3572.

Cavalli, N.J. (1992): Composite Barrier Slurry Wall. In: Paul, D.B., Davidson, R.R. and Cavalli, N.J. (eds), *Slurry Walls: Design, Construction and Quality Control*, ASTM STP 111129, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.

Chandar, P., Somasundaran, P., Turro, N.J. (1987): Fluorescence probe studies on the structure of the adsorbed layer of dodecylsulfate at the alumina-water interface. *J. Coll. Inter. Sci.*, 117(1), 31-46.

Charlet L., Manceau A. A. (1992): X-Ray absorption spectroscopic study of the sorption of Cr(III) at the oxide-water interface. *J. Colloid Interface Sci.* 148, 443-458.

Charmicael, P.A. (1994): Using Wood Chips as a Source of Carbon in Denitrification: a Column Experiment and Field Study Implementing The Funnel and Gate Design. M.Sc. Thesis, Univ. of Waterloo, 156 S, Waterloo, Ontario.

Chen X., Wright J. V., Conca J. L., Peurrung L. M. (1997a): Effects of pH on Heavy Metal Sorption on Mineral Apatite. *Environmental Science & Technology* 31(3): 624-631.

Chen X., Wright J. V., Conca J. L., Peurrung L. M. (1997b): Evaluation of heavy metal remediation using mineral apatite. *Water, Air and Soil Pollution* 98: 57-78.

Cheng I. F., Muftikian R., Fernando Q. (1997): Reduction of nitrate to ammonia by zerovalent iron. 213th Am. Chem. Soc. Nat. Meeting, San Fransisco, CA. Division of Environmental Chemistry, 37(1): 165-166.

Cheng T. C., Barnett M. O., Roden E. E., Zhuang J. (2004): Effects of Phosphate on Uranium(VI) Adsorption to Goethite-Coated Sand. *Environmental Science & Technology* 38(22): 6059-6065.

Cheng, I. F., Fernando, Q., Korte, N. (1997): Electrochemical dechlorination of 4-chlorophenol to phenol. *Environ. Sci. Technol.*, 31(4), 074-1078.

Cherry J. A., Vales E. S., Gillham R. W. (1993): System for treating polluted groundwater, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 11.11.1993

Cherry, J. A., Vales, E. S., Gillham, R. W. (1992): System for Treating Polluted Groundwater. Patent No. WO 1993022241 A1, Apr 23, 1992.

Cheung C. W., Chan C. K., Porter J. F., McKay G. (2001): Combined Diffusion Model for the Sorption of Cadmium, Copper, and Zinc Ions onto Bone Char. *Environmental Science & Technology* 35(7): 1511-1522.

Chiang, W.-H., W. Kinzelbach (2001): 3D-Groundwater Modeling with PMWIN, A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution. Inkl. CD-ROM, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.

Choe S., Chang Y. Y., Hwang K. Y., Khim J. (2000): Kinetics of reductive denitrification by nanoscale zero-valen iron. *Chemosphere* 41, 1307-1311.

Cipollone M. G., Wolfe N. L., Hassan S. M. (1995): Kinetic studies on the use of metallic iron to reduce organic compounds in water under environmental conditions. 209th American Chemical Society National Meeting, Anaheim, CA., 35(1): 812-814.

Cipollone, M.G., Wolfe, N.L., Hassan, S.M. (1995): Kinetic Studies on the Use of Metallic Iron to Reduce Organic Compounds in Water under Environmental Conditions. 209th American Chemical Society National Meeting. Anaheim, C.A. Division of Environmental Chemistry Preprints of Papers, Vol. 35, No. 1, p 812-814.

Cirpka, O. A., Bürger, C. M., Nowak, W., M. Finkel (2004): Uncertainty and data worth analysis for the hydraulic design of F&G-Systems in heterogeneous aquifers. *Water Resources Research* 40(11): W11502, doi:10.1029/2004WR003352, 2004.

- Clark D. L., Hobart D. E., Neu M. P. (1995): Actinide Carbonate Complexes and Their Importance in Actinide Environmental Chemistry. *Chemical Reviews* 95(1): 25-48.
- Clausen, C. M., Filipek, L. B., Geiger, C. L., Clausen, C. A. (2002): Kinetic studies of nano-scale and micro-scale zero valent iron emulsions. Preprints of Extended Abstracts presented at the ACS National Meeting, American Chemical Society, Division of Environmental Chemistry, 42(1), 62-66.
- Clausen, J.L., Richards, W.L., Korte, N.E., Liang, L. (1995): ORNL/MMES Research into Remedial Applications of Zero-Valence-Metals: 3) Removal of TCE, Cis-1,2-DCE, Vinylchloride and Technetium. 209th American Chemical Society National Meeting. Anaheim, C.A. Div. of Environmental Chemistry Preprints of Papers, Vol. 35, No. 1, 755-758.
- Coetzee H., Wade P., Winde F. (2002): Reliance on existing wetlands for pollution control around the Witwatersrand gold/uranium mines of South Africa - Are they sufficient?, in: Merkel B. J., Planer-Friedrich B., Wolkersdorfer C. (ed.), Uranium in the Aquatic Environment, Springer, Berlin, 59-64.
- Cohen A. D. (1991): Method for in-situ removal of hydrocarbon contaminants from groundwater, University of South Carolina, Columbia, S. C., USA
- Colonna, M. (1995): Barriere zur Altlastensicherung auf Basis von Huminstoffen. Diplomarbeit, Märkische Fachhochschule, Iserlohn.
- Committee on Ground Water Cleanup Alternatives: Alternatives for Ground Water Cleanup, National Academy Press 1994, 315 p.
- Conca J. L., Wright J. (2006): An Apatite II permeable reactive barrier to remediate groundwater containing Zn, Pb and Cd. *Applied Geochemistry* 21(8): 1288-1300.
- Conner, J. R. (1990): Chemical Fixtion and Solidification of Hazardong Wastes. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Cord-Ruwisch R., Seitz H.-J., Conrad R. (1988): The capacity of hydrogenotrophic anaerobic bacteria to compete for traces of hydrogen depends on the redox potential of the terminal electron acceptor. *Arch. Microbiol.* 149, 350-357.
- Cornell R. M., Schwertmann U. (1996): The Iron Oxides, VCH Verlagsgesellschaft Weinheim.
- Couillard, D. (1994): The use of peat in wastewater treatment. *Water Res.*, 28(6), 1261-1274.
- Crist, R. H., Martin, J. R., Chonko, J. (1996): Uptake of metals on peat moss: an ion-exchange process. *Environ. Sci Technol.*, 30, 2456-2461.
- Crittenden, J. C.; Hutzler, N. J.; Geyer, D. G.; Oravitz J. L.; Friedman, G. (1986) Transport of Organic Compounds with Saturated Groundwater Flow: Model Development and Parameter Sensitivity. *Water Resour. Res.* 22 (3), 271-284.
- Csővári M., Csicsák J., Földing G., Simoncsics G. (2005): Experimental iron barrier in Pécs, Hungary case study, in: Roehl K. E., Meggyes T., Simon F. G., Stewart D. I. (ed.), Long-term performance of permeable reactive barriers, Trace metals and other contaminants in the environment, Bd. 7, Elsevier, Amsterdam, 265-283.
- Csővári, M., Csicsák, J., Földing, G. (2002): Investigation into calcium oxide-based reactive barriers to attenuate uranium migration. *Advanced Groundwater Remediation Active and Passive Technologies*, F. G. Simon, T. Meggyes, and C. McDonald, eds., Thomas Telford Publishing, London, 223-235.
- Cui D., Spahiu K. (2002): The reduction of U(VI) on corroded iron under anoxic conditions. *Radiochimica Acta* 90(09-11): 623-628.
- Cunningham, A., Warwood, B., Sturmman, P., Horrigan, K., James, G., Costerton, J.W. et al. (1997): Biofilm Processes in Porous Media - Practical Applications. In: Amy, P.S. and Haldeman, D.L. (ed.), *The Microbiology of the Terrestrial Deep Surface*, 325-344, Lewis Publishers, Boca Raton, New York.
- Cunningham, A.B., Characklis, W.G., Abedeen, F. and Crawford, D. (1991): Influence of Biofilm Accumulation on Porous Media Hydrodynamics. *Environmental Science and Technology*, 25(7), 1305-1311.
- Cunningham, A.B., Sharp, R.R., Hiebert, R. and James, G. (2003): Subsurface Biofilm Barriers for the Containment and Remediation of Contaminated Groundwater. *Bioremediation Journal*, 7 (3-4), 151-164.
- Czurda, K., Huttenloch, P., Gregolec, G., Roehl, K. E. (2002): Electrokinetic techniques and new materials for reactive barriers. *Advanced Groundwater Remediation Active and Passive Technologies.*, F. G. Simon, T. Meggyes, and C. McDonald, eds., Thomas Telford Publishing, London, 173-192.

- Czurda, K.A. (1994): Multimineralische Abdichtung. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe 30: 4 - 21, Karlsruhe.
- da Rocha N. C. C., de Campos R. C., Rossi A. M., Moreira E. L., Barbosa A. d. F., Moure G. T. (2002): Cadmium Uptake by Hydroxyapatite Synthesized in Different Conditions and Submitted to Thermal Treatment. *Environmental Science & Technology* 36(7): 1630-1635.
- Dahlkamp F. J. (1993): Uranium ore deposits, Springer-Verlag Berlin.
- Dahmke, A., Lensing, H.J., Schäfer, D., Schäfer, W., Wüst, W. (1996): Perspektiven der Nutzung geochemischer Barrieren: Ein Konzept zur In-situ Sanierung und Sicherung von Grundwasserkontaminationen. *Geowissenschaften*, 14, Heft 15, p 186-195
- Dahmke, A. (1996): Literaturstudie Reaktive Wände - pH-Redox-reaktive Wände. Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung. Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg, 51 p
- Dahmke, A., Bremstahler, F., Schlicker, O., Wüst, W. (1997): Grundwasserelevante Inhibierungsprozesse der LHKW-Dehalogenierung in Fe⁰-Reaktionswänden. IWS-Schriftenreihe (Kongreß Grundwassersanierung 1997), 28, 324-341.
- Dahmke A. (1997): Aktualisierung der Literaturstudie Reaktive Wände pH-Redox-reaktive Wände, pp. 72. Landesanstalt für Umweltschutz, Karlsruhe.
- Dahmke A., Ebert M., Schäfer D. (2000): Permeable Wände zur in situ-Grundwassersanierung. In *Wasserkalender 2001: Jahrbuch für das gesamte Wasserfach* (ed. R. Wagner), pp. 82-109. Erich Schmidt Verlag.
- Dahmke, A., Ebert, M., Köber, R., Schäfer, D., Schlicker, O., Wüst, W. (2000): „Konstruktion und Optimierung passiver geochemischer Barrieren zur in-situ-Sanierung und Sicherung CKW-kontaminierter Aquifere.“ Abschlußbericht zum BMBF Forschungsvorhaben 02- WT9546/2, 245
- Dahmke A., Schäfer D., Köber R., Plagentz V. (2002): Entwicklung von gekoppelten in situ-Reaktoren und Optimierung der geochemischen Prozesse im Abstrom von verschiedenen in situ-Reaktor-Systemen, pp. 90. Institut für Geowissenschaften, Kiel. Dez. 2002. Abschlußbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben 02WT9938/0.
- Dahmke, A., Ebert, M., Dethlefsen, F., Köber, R., Parbs, A., Plagentz, V., Schäfer, D., Silva-Send, N. (2005): Bewertung und Weiterentwicklung von Voruntersuchungs-, Monitoring und Qualitätsmanagementansätze für Reaktionswände - eine vergleichende Labor- und Standortstudie unter besonderer Berücksichtigung vollständiger, stoffspezifische Bilanzen des Schadstoffumsatzes beim Einsatz reaktiver Wände.- BMBF Forschungsvorhaben No. 02WR0208, Endbericht, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, Germany.
- Daniels, L., Belay, N., Rajagopal, B. S., Weimer, P. J. (1987): Bacterial methanogenesis and growth from CO₂ with elemental iron as the sole source of electrons. *Science*, 237, 509-511.
- Danish National Railway Agency and Danish State Railways (2000a): Environmental/Economic Evaluation and Optimising of Contaminated Sites Remediation. Site report Copenhagen Freight Yard 1 Reactive Wall.“ Copenhagen, ScanRail Consult, Report (EU LIFE Project No. 96ENV/DK/0016, Danish Environmental Protection Agency), 40 pages.
- Danish National Railway Agency and Danish State Railways (2000b): Environmental/Economic Evaluation and Optimising of Contaminated Sites Remediation. Site report Copenhagen Freight Yard 2 Biological Wall. Copenhagen, ScanRail Consult, Report (EU LIFE Project No. 96ENV/DK/0016, Danish Environmental Protection Agency), 45 pages.
- Dash, J.G., Fu, H.Y. and Leger, R. (1997): Frozen Soil Barriers for Hazardous Waste Confinement. International Containment Technology Conference, St. Petersburg, FA, USA, 607-613.
- Davis, A., Eary, L. E., Helgen, S. (1999): Assessing the efficacy of lime amendment to geochemically stabilize mine tailings. *Environ. Sci. Technol.*, 33, 2626-2632.
- Day S. R., O'Hannesin S. F., Marsden L. (1999): Geotechnical techniques for the construction of reactive barriers. *Journal of Hazardous Materials B67*: 285-297.
- Debreczeni, E., Meggyes, T. (1999): Construction of Cut-Off Walls and Reactive Barriers Using Jet Technology. In: Christensen, T.H., Cossu, R. and Stegmann, R. (ed.), Sardinia 99, 7th International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Sardinia, Italy, CISA Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italy, Conference Proceedings Vol. IV, 533-540.

- Dejournett, T., Alvarez, P. J. J. (1999): Combined Microbial-Fe(0) system to treat nitratecontaminated groundwater. *Bioremediation of Metals and Inorganic Compounds*, A. Leeson and B. C. Alleman, eds., Battelle Press, 79-84.
- Del Cul G. D., Bostick W. D., Trotter D. R., Osborne P. E. (1993): Technetium-99 removal from process solutions and contaminated groundwater. *Sep. Sci. Technol.* 28, 551-564.
- Deng B., Burris D. R., Campbell T. J. (1999): Reduction of vinyl chloride in metallic iron-water systems. *Environ. Sci. Technol.* 33, 2651-2656.
- Deng B., Campbell T. J., Burris D. R. (1997): Hydrocarbon formation in metallic iron/water systems. *Environ. Sci. Technol.* 31, 1185-1190.
- Devlin J. F., Morkin M., Repta C. (2000): Incorporating surface saturation effects into iron wall design calculations. *The Second International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds*. May 22-25, Monterey, CA. Battelle Press: 393-400.
- Devlin, J. F., Klausen, J., Schwarzenbach, R. P. (1998): Kinetics of nitroaromatic reduction on granular iron in recirculating batch experiments. *Environ. Sci. Technol.*, 32(13), 1941-1947.
- Deydier E., Guilet R., Sharrock P. (2003): Beneficial use of meat and bone meal combustion residue: "an efficient low cost material to remove lead from aqueous effluent". *Journal of Hazardous Materials* 101(1): 55-64.
- DGQ (Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V.) (1995): Begriffe zum Qualitätsmanagement. DGQ-Schrift 11-04, Frankfurt.
- Dietrich, J., Märten, A. and Feeser, V. (2004): Chemische Beständigkeit von Dichtwandmassen gegenüber schadstoffhaltigen Sickerwässern. 11. Braunschweiger Deponie- und Dichtwandseminar 2004. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Vol. 74, 335-353, Technische Universität Braunschweig.
- DIN 18130-1 (1996), Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts, Teil 1: Laborversuche. Norm, Beuth Verlag
- DIN 32645 (1994), Chemische Analytik: Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenze. Norm, DIN: Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN ISO 8402 (1995-08): Qualitätsmanagement – Begriffe. Mit Beiblatt 1: Anmerkungen zu Begriffen. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 9000, 9001, 9004 (2000-12): Normen zum Qualitätsmanagement und zur Qualitätssicherung/QM-Darlegung. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO/IEC 17025 (2000-04): Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien. Beuth Verlag, Berlin.
- Dodge C. J., Francis A. J., Gillow J. B., Halada G. P., Eng C., Clayton C. R. (2002): Association of Uranium with Iron Oxides Typically Formed on Corroding Steel Surfaces. *Environmental Science & Technology* 36(16): 3504-3511.
- Domenico, P.A., Schwartz, F.W.(1998): *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley & Sons, New York, 506.
- Dorozhkin S. V., Epple M. (2002): Biological and Medical Significance of Calcium Phosphates. *Angewandte Chemie International Edition* 41(17): 3130-3146.
- Dreschmann, P. (2000): Anforderungen an eine Sanierungsuntersuchung unter Berücksichtigung von Nutzen-Kosten-Aspekten. *LUA-Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz*, Vol. 11, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen, 261 p.
- Dreschmann, P., Odensaß, M. (1999): Einfluß von Nutzen Kosten auf die Sanierungsentscheidung. *TerraTech*, 5/1999, 54-60.
- Dries J., Geuens S., Bastiaens L., Springael D., Agathos S. N., Diels L. (2003): Multibarrier, a technologic concept for the in-situ remediation of mixed groundwater pollution. *Consoil 2003: 8th International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil*. 12.-16. Mai 2003, Gent, Belgien: 1650-1656.
- Drissi S. H., Refait P., Abdelmoula M., Genin J. M. R. (1995): The preparation and thermodynamic properties of Fe(II)-Fe(III) hydroxide-carbonate (green rust 1); Pourbaix diagram of iron in carbonate-containing aqueous media. *Corrosion Science* 37(12): 2025-2041.

- Drot R., Simoni E., Alnot M., Ehrhardt J. J. (1998): Structural Environment of Uranium (VI) and Europium (III) Species Sorbed onto Phosphate Surfaces: XPS and Optical Spectroscopy Studies. *Journal of Colloid and Interface Science* 205(2): 410-416.
- Duba, A. G., Jackson, K. J., Jovanovich, M. C., Knapp, R. B., Taylor, R. T. (1996): TCE Remediation Using In Situ, Resting-State Bioaugmentation. *Environ. Sci Technol.*, 30(6), 1982-1989.
- Duff M. C., Coughlin J. U., Hunter D. B. (2002): Uranium co-precipitation with iron oxide minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66(20): 3533-3547.
- Düllmann, H. (1999): Geotechnical Bureau Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann, Aachen, Germany, Statement on Cut-off Walls. Sardinia 99, 7th International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Sardinia, Italy.
- Duran J. M., Vogan J., Stening J. R. (2000): Reactive barrier performance in a complex contaminant and geochemical environment. In *Chemical oxidation and reactive barriers: remediation of chlorinated and recalcitrant compounds* (ed. G. B. Wickramanayake, A. R. Gavaskar & A. S. C. Chen), pp. 401-408. Battelle Press.
- Durant N., Cox E., Zhang W.-X., Dworatzek S., Neville S., Fennessy C. (2003): Remediation of perchlorate, NDMA, and chlorinated solvents in groundwater using nanoscale zero valent iron. RTDF Permeable Reactive Barriers (PRBs) Action Team Meeting, October 15-16, 2003, Niagara Falls, NY: 277, <http://www.rtdf.org/public/permbarr/minutes/101603/index.htm>.
- Dürr, R., Rakel, K. (1999): Pilotversuch zur Grundwasserreinigung an einer früheren Verarbeitungsstätte von Gaswerkteer. *TerraTech*, 1/1999, 53-54.
- Dwyer B. P., Marozas D. C., Cantrell K., Stewart W. (1996): Laboratory and field scale demonstration of reactive barrier systems. Sandia National Laboratory, Technical Report, SAND--96-2500, Albuquerque, New Mexico.
- Dwyer, B. (1998): Remediation of Deep Soil and Groundwater Contamination Using Jet Grouting and Innovative Materials. *Subsurface Barrier Technologies Conference*, Tucson, AZ, USA, International Business Communications.
- Dzombak, D. A., Morel, F. M. M. (1990): Surface complexation modeling – Hydrous ferric oxide. John Wiley and Sons, NY, 393 p.
- Eary L. E., Rai D. (1988): Chromate removal from aqueous wastes by reduction of ferrous iron. *Environ. Sci. Technol.* 22, 972-977.
- Eary L. E., Rai D. (1989): Kinetics of chromate reduction by ferrous ions derived from hematite and biotite. *Am. J. Sci.* 289, 180-213.
- Ebert M. (1997): Der Einfluß des Redoxmilieus auf die Mobilität von Chrom im durchströmten Aquifer. Dissertation. Berichte Fachbereich Geowissenschaften Nr. 101, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Bremen. 135.
- Ebert M., Dahmke A., Silva-Send N. (2002): Inhibiting substances as tracers for the reactivity assessment of Fe(0) PRB's. In *Proceedings of the Third International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds* (electronic resource) (ed. A. R. Gavaskar & A. S. C. Chen), pp. Paper 2A-10. Battelle.
- Ebert M., Hencke J., Isenbeck-Schröter M. (1995): Modellierung von Transportprozessen dargestellt am Beispiel Chrom(III)/Chrom(VI). *Z. dt. geol. Ges.* 146, 138-145.
- Ebert, M. (2004): Elementares Eisen in permeablen reaktiven Barrieren zur in situ-Grundwasseranierung – Kenntnisstand nach zehn Jahren Technologieentwicklung.- Habilitationsschrift an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Fachbereich Geologie Paläontologie, 409 S.
- Ebert, M., Dahmke, A., Dethlefsen, F., Parbs, A., Plagentz, V. (2004a): Bewertung und Weiterentwicklung von Voruntersuchungs- Monitoring- und Qualitätsmanagementansätze für Reinigungswände - eine vergleichende Labor- und Standortstudie unter besonderer Berücksichtigung vollständiger, stoffspezifische Bilanzen des Schadstoffumsatzes beim Einsatz reaktiver Wände. Unveröffentlicher Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben 02WR0208, Universität Kiel.
- Ebert, M., Dahmke, A., Köber, R., Silva-Send, N., Parbs, A., Plagentz, V., T. Stender (2003c): Bewertung und Weiterentwicklung von Voruntersuchungs- Monitoring- und Qualitätsmanagementansätze für Reinigungswände - eine vergleichende Labor- und Standortstudie unter besonderer Berücksichtigung vollständiger, stoffspezifische Bilanzen des Schadstoffumsatzes beim Einsatz reaktiver Wände. Unveröffentlicher Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben 02WR0208, Universität Kiel.

- Ebert, M., Hümmer, O., Mayer, M., Schlicker, O., Dahmke, A. (2000): Degradation of organic groundwater contaminants: redox processes and EH-Values. - In Redox: fundamentals, processes and applications, J. Schüring, H. D. Schulz, W. R. Fischer, J. Böttcher, and W. H. M. Duijnsveld, eds., Springer-Verlag, Heidelberg, 217-227.
- Ebert, M., Köber, R., Parbs, A., Plagentz, V., Schäfer, D., A. Dahmke (2006): Assessing Degradation Rates of Chlorinated Ethylenes in Column Experiments with Commercial Iron Materials Used in Permeable Reactive Barriers.- *Environ. Sci. Technol.*, 40 (6): 2004-2010.
- Ebert, M., Köber, R., Parbs, A., Schäfer, D., Dahmke, A. (2003a): Ionic Tracers for the Reactivity Assessment of Fe(0) PRB's. *Consoil 2003: 8th International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil*, 1582-1590.
- Ebert, M., Möller, W., M. Wegner (1999a): Abiotischer Abbau von chlorierten Kohlenwasserstoffen in Eisengranulaten.- Abschlußbericht über das F+E-Fördervorhaben AZ 07837 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, S. 1-48, Mull-und-Partner-Ingenieurgesellschaft mbH Garbsen, November 1999.
- Ebert, M., Möller, W., Wegner, M. (1999b): F+E-Vorhaben Reaktive Wand in Rheine – aktuelle Ergebnisse. *Altlasten Spektrum*, 2/1999, 109-112.
- Ebert, M., Schäfer, D., A. Dahmke (2000): Erfahrungen mit dem Einsatz einer Fe(0)-Reinigungswand - Geochemische Wechselwirkungen im Aquifer und Reinigungsleistung am Fallbeispiel der Pilotanlage Rheine.- Vortrag am 3.10.00 in Heidelberg für HydroGeoEvent 2000 Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen vom 29.09.-4.10.00, publ. In *Schriftenr. D. Dtsch.-Geol. Ges.* (Herausg. M. Herbert, M. Isenbeck-Schröter, Chr. Scholz), No 12, S. 177, Kurzfassung 2000.
- Ebert, M., Schäfer, D., Köber, R. (2001): The use of column experiments to predict performance and long term stability of iron treatment walls. 3rd Int. Containment Technology Conf., 10-13 June, 2001, Florida State University, Tallahassee, Orlando, FL, <<http://www.containment.fsu.edu/cd/content/>>.
- Ebert, M., Köber, R., Schäfer, D., Silva-Send, N., A. Dahmke (2002): The usability of laboratory experiments for long term performance prediction.- Remediation of chlorinated and recalcitrant compounds: The third International Conference, 20.-23. May 2002, Monterey, California, Battelle. (Abstract).
- Ebert, M., Dahmke, A., N. Silva-Send (2002): Inhibiting Substances as Tracers for the Reactivity Assessment of Fe(0) PRB's.- Paper for Proceedings of the Third Intern. Conf. on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds (electronic resource) (ed. Gavaskar, A.R. & Chen, A.S.C.) in Monterey, 20-23 May 2002, Battelle.
- Ebert, M., Wegner, M., Parbs, A., Plagentz, V., Schäfer, D., Köber, R., Dahmke, A. (2003b): Prognostizierte und tatsächliche Langzeitstabilität von Fe(0)-Reinigungswänden - Am Beispiel der Reinigungswand am Standort Rheine nach 5-jähriger Betriebszeit. *Grundwasser* 3, 157-168
- Ebert, M., Parbs, A., Plagentz, V., Schäfer, D., Dahmke, A. (2005): Long Term Monitoring and Performance Assessment of PRB's in Germany. In: Gavaskar, A. R., and Chen, A. S. C., eds., (2005): Remediation of chlorinated and recalcitrant compounds - 2004 (CD-Rom), Battelle Press, Columbus, Ohio
- eco.carbon GmbH (2002): <<http://www.ecocarbon.de>> (December 2002):
- Edel, H.-G., Voigt, T. (2001): Aktive und passive Grundwassersanierung – ein Verfahrens- und Kostenvergleich. *TerraTech*, 1/2001, 40-44.
- Eighmy T. T., Eusden Jr. D. J. (2004): Phosphate stabilization of municipal solid waste combustion residues: geochemical principles, in: Gieré R., Stille P. (ed.), *Energy, Waste, and the Environment: a Geochemical Perspective*, Special Publications, Bd. 236, Geological Society, London, 435-473.
- Elder, C.R., Benson, C.H., Eykholt, G.R. (2002): Effects of heterogeneity on influent and effluent concentrations from horizontal permeable reactive barriers. – *Water Resources Research*, 38 (8), doi:10.1029/2001WR001259.
- Elliott D., Zhang W.-X. (2001): Field assessment of nanoparticles for groundwater treatment. *Environ. Sci. Technol.* 35, 4922-4926.
- Elovitz M. S., Weber E. J. (1999): Sediment-mediated reduction of 2,4,6-trinitrotoluene and fate of the resulting aromatic (poly)amines. *Environ. Sci. Technol.* 33, 2617-2625.
- Engelmann, M. D., Doyle, J. G., Cheng, I. F. (2001): The complete dechlorination of DDT by magnesium/palladium bimetallic particles. *Chemosphere*, 43(2), 195-198.
- EPA. (2001): National primary drinking water regulations; Arsenic and clarifications to compliance and new source contaminants monitoring. *Federal Register* 66, 6976-7066. ETI. (2003): <<http://www.eti.ca>> (18. Dezember 2003):

- ESTCP (2003): In-situ bioremediation of MTBE in groundwater. Environmental Security Technology Certification Program, US Department of Defense, ESTPC Cost and Performance Report, CU-0013.
- EU (1980): Richtlinie 80/68/EWG des Rates vom 17. Dezember 1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe. Amtsblatt Nr. L 020 vom 26.01.1980: 43-48.
- EU (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Amtsblatt Nr. L 327 vom 22.12.2000: 1-73.
- Eykholt, G. R., Baghel, S.S., Sivavec, T.M., Mackenzie, P.D., Haitko, D., D. Horney (1995): Conservative Flow Tracers for Iron Column Studies. 209th American Chemical Society National Meeting, 818-821.
- Eykholt, G. R., Davenport, D. T. (1998): Dechlorination of the chloroacetanilide herbicides alachlor and metolachlor by iron metal. *Environ. Sci. Technol.*, 32(10), 1482-1487.
- Falbe, J., Regitz, M. (1992): *Römpp Chemie Lexikon (Vol. 5):* Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 4218.
- Farahbakhsh, M., Wienberg, R. (2005): Vollständige, stoffspezifische Bilanzen des Schadstoffumsatzes beim Einsatz reaktiver Fe-Wände mit Hilfe 14C-markierter LCKW – Anlage 1 zu Dahmke, A., Ebert, M., Dethlefsen, F., Köber, R., Parbs, A., Plagentz, V., Schäfer, D., Silva-Send, N. (2005): Bewertung und Weiterentwicklung von Voruntersuchungs-, Monitoring- und Qualitätsmanagementansätze für Reinigungswände - eine vergleichende Labor- und Standortstudie unter besonderer Berücksichtigung vollständiger, stoffspezifische Bilanzen des Schadstoffumsatzes beim Einsatz reaktiver Wände.- BMBF Forschungsvorhaben No. 02WR0208, Endbericht, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, Germany.
- Farrell J., Bostick W. D., Jarabek R. J., Fiedor J. N. (1999): Uranium removal from groundwater using zero valent iron media. *Ground Water* 37(4): 618- 624.
- Farrell J., Wang J., O'Day P., Conklin M. (2001): Electrochemical and spectroscopic study of arsenate removal from water using zero-valent iron media. *Environ. Sci. Technol.* 35, 2026-2032.
- Fendorf S. E., Li G. (1996): Kinetics of chromate reduction by ferrous iron. *Environ. Sci. Technol.* 30, 1614-1617.
- Fennelly J. P., Roberts A. L. (1998): Reaction of 1,1,1-Trichloroethane with zero-valent metals and bimetallic reductants. *Environ. Sci. Technol.* 32, 1980-1988.
- Festa, K.D., Arnold, R.G., Betterton, E.A. (1995): Kinetics and Free Energy Change During the Reductive Dehalogenation of Carbon Tetrachloride by Elemental Iron. 209th American Chemical Society National Meeting. Anaheim, C.A. Division of Environmental Chemistry Preprints of Papers, Vol. 35, No. 1, p 745-748.
- Fetter C. W. (1999): *Contaminant hydrogeology. 2*, Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey.
- Fetter, C. W. (1999): *Contaminant Hydrogeology*. Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 121.
- Fiedor J. N., Bostick W. D., Jarabek R. J., Farrell J. (1998): Understanding the mechanism of uranium removal from groundwater by zero-valent iron using x-ray photoelectron spectroscopy. *Environmental Science & Technology* 32(10): 1466-1473.
- Finch R. J., Murakami T. (1999): Systematics and paragenesis of uranium minerals, in: Burns P. C., Finch R. J. (ed.), *Uranium: mineralogy, geochemistry and the environment*, Reviews in Mineralogy, Bd. 38, American Chemical Society, Washington, D.C., 91-179.
- Finkel, M., R. Liedl, G. Teutsch (1998): A modelling study on the efficiency of groundwater treatment walls in heterogeneous aquifers. *Groundwater Quality 1998*, Tübingen, Germany, Sept 1998, IAHS Publ. No. 250, 467-474.
- Finkel, M., R. Liedl, G. Teutsch (2002): Modelling Reactive Transport of Organic Solutes in Groundwater With a Lagrangian Streamtube Approach. - In: H. Schulz & G. Teutsch (eds.): *Geochemical Processes - Concepts for Modelling Reactive Transport in Soils and Groundwater*, DFG Research Report, Wiley-VCH, Weinheim, 115-134.
- Fischer, J. (2002): Dichtwände gegen hohes Schadstoffpotential. *Entwicklung, Einsatz, Aussichten*. 10. Braunschweiger Deponieseminar 2002. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Vol. 69, 337-352, Technische Universität Braunschweig.
- Focht, R. M., Vogan, J.L., O'Hannesin, S.F (1997): Hydraulic Studies of In-Situ Permeable Reactive Barriers. International Containment Technology Conference and Exhibition, St. Petersburg, FL, 975-981.

- Focon-PROBIOTEC. (2000): Eisen-Reaktive Wand zum Abbau von CKW im Grundwasser. Focon-PROBIOTEC-Testbericht, Düren, Deutschland.
- Ford, R. G., Bertsch, P. M., Farley, K. J. (1997): Changes in transition and heavy metal partitioning during hydrous iron oxide aging. *Environ. Sci. Technol.*, 31(7), 2028-2033.
- Förstner, U., Grathwohl, P. (2003): *Ingenieurgeochemie*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 392 p.
- Freethy, G.W., Naftz, D.L., Rowland, R.C. and Davis, J.A. (2002): Deep Aquifer Remediation Tools: Theory, Design, and Performance Modeling. In: Naftz, D.L., Morrison, S.J., Davis, J.A. and Fuller, C.C. (eds.): *Handbook of Groundwater Remediation Using Permeable Reactive Barriers*, Academic Press, San Diego, CA, 133-161.
- Frengstad B., Midtgard Skrede A. K., Banks D., Reidar Krog J., Siewers U. (2000): The chemistry of Norwegian groundwaters: III. The distribution of trace elements in 476 crystalline bedrock groundwaters, as analysed by ICP-MS techniques. *The Science of The Total Environment* 246(1): 21-40.
- Friedrich, W., Müller-Kirchenbauer, H., Schlötzer, C., Rogner, J. (1995): *Sicherung von Altlasten mit Schlitz- oder Schmalwänden*. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe, 192 p.
- Frimmel, F. H., Christman, R. F. (1988): *Humic substances and their role in the environment*. John Wiley and Sons, Chichester, 271 p. FRTR (2002): Evaluation of Permeable Reactive Barrier Performance. F. R. T. Roundtable, 45, <http://www.frtr.gov>.
- FRTR (2004a): Abstracts of remediation case studies, volume 8. Federal Remediation Technologies Roundtable, U.S. Environmental Protection Agency, U.S. Department of Defense, U.S. Department of Energy, U.S. Department of Interior und National Aeronautics and Space Administration, EPA-542-R-04-012.
- FRTR (2004b): Evaluation of permeable reactive barrier performance. Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR), Tri-Agency Permeable Barrier Initiative, EPA-542-R-04-004.
- Fruchter J. S., Cole C. R., Williams M. D., Vermeul V. R., Teel S. S., Amonette J. E., Szecsody J. E., Yabusaki S. B. (1997): Creation of a subsurface permeable treatment barrier using in situ redox manipulation, International Containment Technology Conference and Exhibition, St. Petersburg, Florida, USA, 704-710.
- Fruchter, J. S., Amonette, J. E., Cole, C. R., Gorby, Y. A., Humphrey, M. D., Istok, J. D., Olsen, K. B., Spane, F. A., Szecsödy, J. E., Teel, S. S., Vermeul, V. R., Williams, M. D., Yabusaki, S. B. (1996): *In Situ Redox Manipulation Field Injection Test Report – Hanford 100H Area*. Rep. No. PNNL-11372, Department of Energy, Washington, D.C., 336 p.
- Fuller C. C., Bargar J. R., Davis J. A. (2003a): Fry Canyon Site, Fry Canyon, UT. Permeable Reactive Barriers Action Team, U.S. Environmental Protection Agency, Remediation Technologies Development Forum, letzter Zugriff am 09.11.2005.
- Fuller C. C., Bargar J. R., Davis J. A. (2003b): Molecular-Scale Characterization of Uranium Sorption by Bone Apatite Materials for a Permeable Reactive Barrier Demonstration. *Environmental Science & Technology* 37(20): 4642-4649.
- Fuller C. C., Bargar J. R., Davis J. A. (2003c): Remediation of Uranium-contaminated Ground Water at Fry Canyon, Utah. Stanford Synchrotron Radiation Laboratory, SLAC, Stanford University, Stanford, CA, letzter Zugriff am 09.11.2005.
- Fuller C. C., Bargar J. R., Davis J. A., Piana M. J. (2002a): Mechanisms of Uranium Interactions with Hydroxyapatite: Implications for Groundwater Remediation. *Environmental Science & Technology* 36(2): 158-165.
- Fuller C. C., Piana M. J., Bargar J. R., Davis J. A., Kohler M. (2002b): Evaluation of apatite materials for use in permeable reactive barriers for the remediation of uranium-contaminated groundwater, in: Naftz D. L., Morrison S. J., Davis J. A., Fuller C. C. (ed.), *Handbook of groundwater remediation using permeable reactive barriers*, Academic Press, San Diego, 255-280.
- Furukawa Y., Kim J.-w., Watkins J., Wilkin R. T. (2002): Formation of Ferrihydrite and Associated Iron Corrosion Products in Permeable Reactive Barriers of Zero-Valent Iron. *Environmental Science & Technology* 36(24): 5469-5475.
- Gabriel U., Gaudet J.-P., Spadini L., Charlet L. (1998): Reactive transport of uranyl in a goethite column: an experimental and modelling study. *Chemical Geology* 151(1-4): 107-128.

- Gandhi S., Oh B.-T., Schnoor J. L., Alvarez P. J. J. (2002): Degradation of TCE, Cr(VI), sulfate, and nitrate mixtures by granular iron in flow-through columns under different microbial conditions. *Wat. Res.* 36, 1973-1983.
- Garrod, G., Willis, K. G. (1999): *Economic valuation of the environment: methods and case studies*, Edward Elgar Publishing Limited, Cheltenham, 400 p.
- Gauglitz R., Holterdorf M., Franke W., Marx G. (1992): Immobilization of Heavy Metals by Hydroxylapatite. *Radiochimica Acta* 58/59: 253-257.
- Gauglitz R., Holterdorf M., Franke W., Marx G. (1993): Untersuchung der Verstärkung der Rückhaltewirkung des Nahbereichs eines Endlagers in einem Salzdom gegenüber mehrwertigen Kationen durch Hydroxylapatit. Freie Universität Berlin, Institut für Anorganische und Analytische Chemie, Fachgebiet Radiochemie, Abschlussbericht, Projekt 02 E 8030 3, Berlin.
- Gauglitz R., Müller-Hoepe N. (1999): Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren im Endlager (02 E 9087). Grundlagen der Bewertung von Hydroxyapatit als chemische Barriere gegenüber Schwermetallen. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH Peine (DBE). Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Bonn, Abschlussbericht. Technischer Anhang 3, 02 E 9087.
- Gavaskar A., Gupta N., Sass B., Janosy R., Hicks J. (2000): Design guidance for application of permeable reactive barriers for groundwater remediation, pp. 167 + Appendices. Battelle, Columbus, Ohio. March 2000. Final Report.
- Gavaskar A., Sass B., Gupta N., Drescher E., Yoon W.-S., Sminchak J., Hicks J., Condit W. (2002): Evaluating the longevity and hydraulic performance of permeable reactive barriers at department of defense sites, pp. 239, 5 Appendices. Battelle, Columbus, Ohio. April 24, 2002. Final Report.
- Gavaskar, A. R., Gupta, N., Sass, B. M., Janosy, R. J., O'Sullivan, D. (1998a): *Permeable Barriers for Groundwater Remediation: Design, Construction, and Monitoring*. Battelle Press, Columbus, Ohio, U.S.A., 176 p.
- Gavaskar, A., Gupta, N., Sass, B., Fox, T., Janosy, R., Cantrell, K., Olfenbuttel, R. (1997): *Design Guidance for Application of Permeable Barriers to Remediate Dissolved Chlorinated Solvents*. - Report DG 1110-345-117, Battelle Columbus, (Ohio), U.S.A., February 1997.
- Gavaskar, A., Sass, B., Gupta, N., Hicks, J., Yoon, S., Fox, T., Sminchak, J. (1998b): *Performance Evaluation of a Pilot-Scale Permeable Reactive Barrier at Former Naval Air Station Moffett Field, Mountain View, California*. Battelle Press, Columbus, Ohio, U.S.A., 172.
- Gavaskar, A.R. (1999): Design and construction techniques for permeable reactive barriers. *Journal of Hazardous Materials*, 68, 41-71.
- GefStoffV (Verordnung zum Schutz vor gefährlichen Stoffen v. 15.11.1999) (1999): *Bundesgesetzblatt*. Teil T, 2233.
- Geiger C. L., Clausen C. A., Reinhard D., Brooks K., Clausen C., Huntley C., Filipek L., Krug T., O'Hara S., Majors D., Quinn J. (2002): Reductive dehalogenation of DNAPLs using emulsified zero-valent iron. In *Remediation of chlorinated and recalcitrant compounds - 2002*. [Electronic Resource] Proceedings of the third international conference on remediation of chlorinated and recalcitrant compounds (Monterey, CA, May 2002) (ed. A. Gavaskar & A. S. C. Chen), pp. Paper 2C-32. Battelle Press.
- Geiger, C. L., Clausen, C. A., Brooks, K., Major, D. (2001): Nanoscale and microscale iron emulsions for treating DNAPL. Preprints of Extended Abstracts presented at the ACS National Meeting, American Chemical Society, Division of Environmental Chemistry, 41(1), 1028-1033.
- Geiger, C. L., Clausen, C. A., Reinhart, D. R., Brooks, K., Major, D., Quinn, J. (2001): The in situ treatment of DNAPL with zero-valent iron emulsions. 3rd Int. Containment Technology Conf., 10-13 June, 2001, Florida State University, Tallahassee, Orlando, FL, <[http://www.containment.fsu.edu\(cd/content/](http://www.containment.fsu.edu(cd/content/)>.
- Genc O., Yalcinkaya Y., Buyuktuncel E., Denizli A., Arica M. Y., Bektas S. (2003): Uranium recovery by immobilized and dried powdered biomass: characterization and comparison. *International Journal of Mineral Processing* 68(1-4): 93-107.
- Gerlach R., Cunningham A. R., Caccavo F. J. (2000): Dissimilatory iron-reducing bacteria can influence the reduction of carbon tetrachloride by iron metal. *Environ. Sci. Technol.* 34, 2461-2464.

- German Geotechnical Society (1993): *Geotechnics of Landfills and Contaminated Land: Technical Recommendations "GLC" for the International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Verlag Ernst und Sohn, Berlin.
- Gerritse J., Kloetstra G., Borger A., Dalstra G., Alphenaar A., Gottschal J. C. (1997): Complete degradation of tetrachloroethene in coupled anoxic and oxic chemostats. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 48, 553-562.
- Gerritse J., Kloetstra G., Wiersum L., Lawson P. A., Collins M. D., Alphenaar A., Gottschal J. C. (1996a): Reductive dechlorination of chloroethenes or chlorophenols by two novel *Desulfitobacterium* spp. grown in batch and chemostat cultures. *UIB-GBF-CSI-TUB Symposium, Palma de Mallorca, Spanien*: 171.
- Gerritse J., Renard V., Pedro Gomes T. M., Lawson P. A., Collins M. D., Gottschal J. C. (1996b): *Desulfitobacterium* sp. strain PCE1, an anaerobic bacterium that can grow by reductive dechlorination of tetrachloroethene or ortho-chlorinated phenols. *Arch. Microbiol.* 165, 132-140.
- Ghauch A. (2001): Degradation of benomyl, picloram, and dicamba in a conical apparatus by zero-valent iron powder. *Chemosphere* 43, 1109-1117.
- Ghauch A., Gallet C., Charef A., Rima J., Martin-Bouyer M. (2001): Reductive degradation of carbaryl in water by zero-valent iron. *Chemosphere* 42, 419-424.
- Ghezzi, G., Ghezzi, P. and Pellegrini, M. (1999): Use of a Cement-Bentonite-Slurry Plastic Diaphragm with HDPE Membrane for MSW Landfill, In: Christensen, T.H., Cossu, R. and Stegmann, R. (ed.), *Sardinia 99, 7th International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Sardinia, Italy, CISA Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italy, Conference Proceedings Vol. IV, 549-554.*
- Ghosh, R. S., Dzombak, D. A., Luthy, R. G., Smith, J. R. (1999): In situ treatment of cyanide-contaminated groundwater by iron cyanide precipitation. *Water Environ. Res.*, 71 (6), 1217-1228.
- Giammar D. (2001): *Geochemistry of uranium at mineral-water interfaces: rates of sorption-desorption and dissolution-precipitation reaction*, California Institute of Technology, Ph. D. Thesis
- Giammar D. E., Hering J. G. (2001): Time Scales for Sorption - Desorption and Surface Precipitation of Uranyl on Goethite. *Environmental Science & Technology* 35(16): 3332-3337.
- Gillham R. W. (1993): *Cleaning halogenated contaminants from groundwater*
- Gillham R. W., O'Hannesin S. F. (1992): *Metal-catalysed abiotic degradation of halogenated organic compounds*, IAH Conference Modern Trends in Hydrogeology, Hamilton, Ontario, Canada, 94-103.
- Gillham R. W., O'Hannesin S. F. (1994): Enhanced degradation of halogenated aliphatics by zero-valent iron. *Ground Water* 32, 958-967.
- Gillham, R. W. & Burris, D.R. (1995): *Recent Developments in Permeable In Situ Treatment Walls for Remediation of Contaminated Groundwater*. Subsurface Restoration Conference, 3rd International Conference on Groundwater Quality Research, Dallas, Texas.
- Gillham, R. W., Ritter, K., Zhang, Y., Odziemkowi, M. S. (2001): Factors in the longterm performance of granular iron PRBs. 3rd Int. Containment Technology Conf., 10-13 June, 2001, Florida State University, Tallahassee, Orlando, FL, <[http://www.containment.fsu.edu\(cd/content/](http://www.containment.fsu.edu(cd/content/)>
- Gilman A. P., Villeneuve D. C., Secours V. E., Yagminas A. P., Tracy B. L., Quinn J. M., Valli V. E., Moss M. A. (1998a): Uranyl nitrate: 91-day toxicity studies in the New Zealand white rabbit. *Toxicological Sciences* 41(1): 129-137.
- Gilman A. P., Villeneuve D. C., Secours V. E., Yagminas A. P., Tracy B. L., Quinn J. M., Valli V. E., Willes R. J., Moss M. A. (1998b): Uranyl nitrate: 28-day and 91-day toxicity studies in the Sprague-Dawley rat. *Toxicological Sciences* 41(1): 117-128.
- Glazier R., Venkatakrishnan R., Gheorghiu F., Walata L., Nash R., Zhang W.-X. (2003): Nanotechnology takes root. *Civil Engineering* 73, 64-69.
- Gmelin L., Pietsch E. (1936): Uran, Isotope: mit einem Anhang über Transurane. 8. Gmelins Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. U: Uran: System-Nummer 55 mit 34 Ergänzungsbänden, Gmelin-Institut für anorganische Chemie der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften, Verlag Chemie, Berlin.
- Golder Associates Ltd. (1998): *Active Containment: Combined Treatment and Containment Systems*. Department of the Environment, Transport and the Regions, ISBN 185112 114 5, London.

- Gosset, T., Trancart, J., Thevenot, D. R. (1986): Batch metal removal by peat. Kinetics and thermodynamics. *Wat. Res.*, 20(1), 21-26.
- Gotpagar J. K., Grulke E. A., Bhattacharyya D. (1997): Reductive dehalogenation of trichloroethylene using zero-valent iron. *Environ. Prog.* 16.
- Gotpagar J. K., Grulke E. A., Bhattacharyya D. (1998): Reductive dehalogenation of trichloroethylene: kinetic models and experimental verification. *J. Hazard. Mater.* 62, 243-264.
- Gotpagar, J., Lyuksyutov, S., Cohn, R., Grulke, E., Bhattacharyya, D. (1999): Reductive Dehalogenation of Trichloroethylene with Zero-Valent Iron: Surface Profiling Microscopy and Rate Enhancement Studies. *Langmuir*, 15(24), 8412-8420.
- Graham L. J., Jovanovic G. (1999): Dechlorination of p-chlorophenol on Pd/Fe catalyst in a magnetically stabilized fluidized bed; Implications for sludge and liquid remediation. *Chem. Eng. Sci.* 54, 3085-3093.
- Grathwohl, P., Peschik, G. (1997): Permeable sorptive walls for treatment of hydrophobic organic contaminant plumes in groundwater. International Containment Technology Conference, St. Petersburg, Florida, U.S.A., 711-717.
- Grauer R. (1997): Solubility limitations: an "old timer's" view, in: Grenthe I., Puigdomenech I. (ed.), *Modelling in aquatic chemistry*, OECD, Paris, 131-143.
- Graveling, D. (1998): Design and Construction of a 1200 ft Funnel & Gate System. Subsurface Barrier Technology Conference, Tucson, AZ, USA, International Business Communications.
- Gray, D.H. & Weber, W.J. (1984): Diffusional Transport of hazardous waste leachate across clay barriers. Municipal and industrial waste. 7th Annual Madison Waste Conference: 373-389, Madison, Wisconsin.
- Grenthe I., Fuger J., Konings R. J. M., Lemire R. J., Muller A. B., Nguyen-Trung C., Wanner H. (1992): *Chemical Thermodynamics of Uranium*. Chemical Thermodynamics, OECD N. E. A. Bd. 1, North-Holland Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, London, New York, Tokyo.
- Grittini C., Malcomson M., Fernando Q., Korte N. (1995): Rapid dechlorination of polychlorinated biphenyls on the surface of a Pd/Fe bimetallic system. *Environ. Sci. Technol.* 29, 2898-2900.
- Ground-Water Remediation Analysis Center, Pittsburg, PA (1996): Remediation Technology Status Report: Treatment Walls. GWMR, Winter, p 120-128.
- Groundwater. 3rd Int. Containment Technology Conf., 10-13 June, 2001, Florida State University, Tallahassee, Orlando, FL, <<http://www.containment.fsu.edu/cd/content/>>.
- Gu B., Liang L., Dickey M. J., Yin X., Dai S. (1998): Reductive precipitation of uranium(VI) by zero-valent iron. *Environmental Science & Technology* 32(21): 3366-3373.
- Gu B., Phelps T. J., Liang L., Dickey M. J., Roh Y., Kinsall B. L., Palumbo A. V., Jacobs G. K. (1999): Biochemical dynamics in zero-valent iron columns: Implications for permeable reactive barriers. *Environmental Science & Technology* 33(13): 2170-2177.
- Gu B., Watson D. B., Phillips D. H., Liang L. (2002): Biogeochemical, mineralogical, and hydrological characteristics of an iron reactive barrier used for treatment of uranium and nitrate, in: Naftz D. L., Morrison S. J., Davis J. A., Fuller C. C. (ed.), *Handbook of groundwater remediation using permeable reactive barriers*, Academic Press, San Diego, 305-342.
- Gu B., Watson D. B., Wu L., Phillips D. H., White D. C., Zhou J. (2002): Microbiological characteristics in a zero-valent iron reactive barrier. *Environ. Monit. Assess.* 77. Gu, B., Liang, L., Dickey, M. J., Yin, X., Dai, S. (1998): Reductive precipitation of uranium(VI) by zero-valent iron. *Environ. Sci. Technol.*, 32(21), 3366-3373.
- Gu B., Chen J. (2003): Enhanced microbial reduction of Cr(VI) and U(VI) by different natural organic matter fractions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67(19): 3575-3582.
- Gu B., Yan H., Zhou P., Watson D. B., Park M., Istok J. (2005): Natural Humics Impact Uranium Bioreduction and Oxidation. *Environmental Science & Technology* 39(14): 5268-5275.
- Gui J., Devine T. M. (1994): The influence of sulfate ions on the surface enhanced raman spectra of passive films formed on iron. *Corrosion Science* 36(3): 441-462.
- Gui J., Gillham R. W., Odziemkowski M. S. (2000): Reduction of N-nitrosodimethylamin with granular iron and nickel-enhanced iron. 1. Pathways and kinetics. *Environ. Sci. Technol.* 34, 3489-3494.

- Gui, L., Gillham, R. W. (2001): Preparation and regeneration of nickel-iron for reduction of organic contaminants. Preprints of Extended Abstracts presented at the ACS National Meeting, American Chemical Society, Division of Environmental Chemistry, 41(1), 1132-1137.
- Guillaumont R., Fanghänel T., Fuger J., Grenthe I., Neck V., Palmer D. A., Rand M. H. (2003): Update on the Chemical Thermodynamics of Uranium, Neptunium, Plutonium, Americium and Technetium. Chemical Thermodynamics, OECD N. E. A. Bd. 5, Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, London, New York, Tokyo.
- Gupta, N., Sass, B., Gavaskar, A., Sminchak, J., Fox, T., Snyder, F. (1998): Hydraulic Evaluation of a Permeable Barrier Using Tracer Tests, Velocity Measurements, and Modeling. Proc. of the 1rd Int. Conf. on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey, Battelle Press, Columbus, Ohio, 157-162.
- Gupta, N., Gavaskar, A., Sminchak, J., Sass, B., Yoon, W.-S., Reeter, C., White, S. (2002): Designing and Verifying the Hydraulic Performance of Permeable Barriers. Proc. of the 3rd Int. Conf. on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey, A. R. Gavaskar and A. S. C. Chen, eds., Battelle Press, Columbus, Ohio, computer optical disk.
- GWRTAC Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center (1997): Treatment walls: a status update. TP-97-02, Pittsburgh, PA, <<http://www.gwrtac.org>> (Jan 1, 2003):
- Haberer, K., Böttcher, U. (1996): Das Verhalten von Umweltchemikalien in Boden und Grundwasser. Zivilschutzforschung (Schriftenreihe der Schutzkommission beim Bundesminister des Innern Herausgegeben vom Bundesverwaltungsamt – Zentralstelle für Zivilschutz – im Auftrag des Bundesministerium des Innern), Neue Folge Band 23, Bonn, 225 P.
- Haderlein, S. B., Pecher, K. (1998): Pollutant reduction in heterogeneous Fe(II)-Fe(III) systems. Mineral-Water Interfacial Reactions (ACS Symp. Ser. 715), American Chemical Society, Washington, D.C., 342-357.
- Haderlein, S.B. & Schwarzenbach (1995): Environmental Processes Influencing the Rate of Abiotic Reduction of Nitroaromatic Compounds in the Subsurface. In: J.C. Spain (Hrsg.): Biodegradation of Nitroaromatic Compounds. Plenum Press. p 199-225.
- Haggerty, G. M., Bowman, R. S. (1994): Sorption of chromate and other inorganic anions by organo-zeolite. Environ. Sci. Technol., 28(3), 452-458.
- Haitko, D.A. & Baghei, S.S. (1995): Enhanced Trichloroethylene Dechlorination by Fe⁰. 209th American Chemical Society National Meeting. Anaheim, C.A. Division of Environmental Chemistry Preprints of Papers, Vol. 35, No. 1, p 807-808.
- Hakonson-Hayes A. C., Fresquez P. R., Whicker F. W. (2002): Assessing potential risks from exposure to natural uranium in well water. Journal of Environmental Radioactivity 59(1): 29-40.
- Hamer, K. & Sieger, R. (1994): Anwendung des Modells COTAM zur Simulation von Stofftransport und geochemischen Reaktionen. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 186 p
- Hansen, H. C. B., Koch, C. B., Nancke-Krogh, H., Borggaard, O. K., Sorensen, J. (1996): Abiotic nitrate reduction to ammonium: key role of green rust. Environ. Sci. Technol., 30(6), 2053-2056.
- Hanstein, P., Jungbauer, H., Melzer, R. (1999): Biologische In-situ-Sanierung durch Eingabe von reinem Sauerstoff in das Grundwasser. TerraTech, 2/1999, 46-48.
- Hantsch K.-U., Ullrich B., Ullrich B. (2005): Verwahrung von Altablagerungen des Uranerzbergbaus unter Nutzung reaktiver Materialien zur Uran- und Arsenimmobilisierung. Mineralogische Charakterisierung von Fällungsprodukten aus Batch- und Säulenversuchen. Altlasten spektrum 14(2): 87-97.
- Hardy L. I., Gillham R. W. (1996): Formation of hydrocarbons from the reduction of aqueous CO₂ by zero-valent iron. Environ. Sci. Technol. 30, 57-65.
- Haring, V., Conrad, R. (1991): Kinetics of H₂-oxidation in respiring and denitrifying paracoccus denitrificans. FEMS Microbiol. Lett., 78(2-3), 259-264.
- Harms, S., Lipczynska-Kochany, E., Milburn, R., Sprah, G., Nadarajah, N. (1995): Degradation of Carbon Tetrachloride in the Presence of Iron and Sulphur Containing Compounds. 209th American Chemical Society National Meeting. Anaheim, C.A. Division of Environmental Chemistry Preprints of Papers, Vol. 35, No. 1, p 825-828.
- Hart, S., Powers, B. (2002): Performance Monitoring of The Spill Site 7 ZVI Permeable Reactive Barrier. <<http://www.rtdf.org/public/permbarr/minutes/110702/summary.html>> (Jan 1st, 2004).

- Hartwiger, P. (2001): Full-scale-Anlage mit Aktivkohle am Standort Reichenbach. ITVA Fachtagung: Reinigungswände auf dem Vormarsch, Magdeburg, Germany.
- Hayworth, J. S., Burris, D. R. (1997): Nonionic Surfactant-Enhanced Solubilization and Recovery of Organic Contaminants from within Cationic Surfactant-Enhanced Sorbent Zones. 1. Experiments. *Environ. Sci. Technol.*, 31(5), 1277-1283.
- He J., Sung Y., Dollhope M. E., Fathepure B. Z., Tiedje J. M., Löffler F. E. (2002): Acetate versus hydrogen as direct electron donors to stimulate the microbial reductive dechlorination process at chloroethene-contaminated sites. *Environ. Sci. Technol.* 36, 3945-3952.
- Health Canada (1999): Uranium, Guidelines for Canadian Drinking Water Quality: Supporting Documentation. Health Canada, Supporting Documentation, Ottawa, Canada.
- Heath, R. C. (1988): Einführung in die Grundwasserhydrologie. Oldenbourg, München.
- Hedin R. S., Watzlaf G. R., Nairn R. W. (1994): Passive treatment of acid mine drainage with lime stone. *Journal of Environmental Quality* 23: 1338-1345.
- Hein, P., Butler, J., Weiss, H.-J., Vigelahn, L. (2001): Horizontales Fe(0)-Reinigungswandsystem zur In-situ-Abreinigung von LHKW-verunreinigtem Grundwasser in Bernau, 3. Teil: Anwendung innovativer Erkundungstechniken – Methodik, Ergebnisse und Schlussfolgerungen für die Anwendung einer Reinigungswand am Standort Bernau. *Wasser Luft und Boden*, 10/2002, Supplement TerraTech, 22-24.
- Hein, P., Freygang, M., Vigelahn, L. (2001): Horizontales Fe(0)-Reinigungswandsystem zur In-situ-Abreinigung von LHKW-verunreinigtem Grundwasser in Bernau, 1. Teil: Vorstellung des FuE-Projektes Bernau im BMBF-Verbundvorhaben „RUBIN – Anwendung von Reinigungswänden zur Sanierung von Altlasten“. *TerraTech* 5/2001, 54-56.
- Hein, P., Freygang, M., Vigelahn, L. (2002): Horizontaler Eisengranulatreaktor zur In-Situ- Abreinigung von LHKW-kontaminiertem GW in Bernau bei Bernau. *Altlastenspektrum*, 4/2002, 89.
- Hein, P., Vigelahn, L., Hutmacher, M., Oviedo, I. (2002): Horizontales Fe(0)-Reinigungswandsystem zur In-situ-Abreinigung von LHKW-verunreinigtem Grundwasser in Bernau, 2. Teil: Prognose abiotischer Abbauleistungen, Optimierung von Durchsatz und Verweilzeit am Fe(0)-Horizontalreaktor, erste Ergebnisse. *TerraTech*, 3/2002.
- Helland, B. R., Alvarez, P. J. J., Schnoor, J. L. (1995): Reductive dechlorination of carbon tetrachloride with elemental iron. *J. Hazard. Mater.*, 41(2-3), 205-216.
- Helland, B.R., Alvarez, P.J.J., Schnoor, J.L. (1995): Oxygen Controlled Product Formation in CCl₄ Dechlorination Using Zero-Valent-Iron. 209th American Chemical Society National Meeting. Anaheim, C.A. Division of Environmental Chemistry Preprints of Papers, Vol. 35, No. 1, p 732-734.
- Herbert Jr. R. B., Benner S. G., Blowes D. W. (2000): Solid phase iron-sulfur geochemistry of a reactive barrier for treatment of mine drainage. *Applied Geochemistry* 15(9): 1331-1343.
- Hiebert, R. (1998): Using Biological Barriers to Control Movement of Contaminated Groundwater. *Subsurface Barrier Technologies Conference*, Tucson, AZ, USA, International Business Communications.
- Hill C. G. J. (1977): An introduction to chemical engineering kinetics and reactor design. John Wiley & Sons, New York.
- Hitze, R. (1987): Einsatz der schadstoffresistenten DynagROUT-Abdichtungsmaterialien, geschildert an konkreten Beispielen der Schadstoff-Umschließung durch Schlitzwandbau und Injektionstechnik. Seminar über Altlasten und kontaminierte Standorte, Ruhr-Universität Bochum.
- Ho C. H., Miller N. H. (1986): Adsorption of uranyl species from bicarbonate solution onto hematite particles. *Journal of Colloid and Interface Science* 110(1): 165-171.
- Ho, Y. S., Wase, D. A. J., Forster, C. F. (1995): Batch nickel removal from aqueous solution by sphagnum moss peat. *Wat. Res.*, 29(5), 1327-1332.
- Hodson M. E., Valsami-Jones É., Cotter-Howells J. D. (2000): Bonemeal Additions as a Remediation Treatment for Metal Contaminated Soil. *Environmental Science & Technology* 34(16): 3501-3507.
- Hofstetter T. B., Heijman C. G., Schwarzenbach R. P. (1999): Complete reduction of TNT and other (poly)nitroaromatic compounds under iron-reducing subsurface conditions. *Environ. Sci. Technol.* 33, 1479-1487.

- Höll W. H. (2004): Ionenaustausch, in: DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (ed.), Wasseraufbereitung - Grundlagen und Verfahren, Lehr- und Handbuch Wasserversorgung, Bd. 6, Oldenbourg Industrieverlag, München, 239-273.
- Holliger C., Schraa G., Stams A. J. M., Zehnder A. J. B. (1993): A highly purified enrichment culture couples the reductive dechlorination of tetrachloroethene to growth. *Appl. Environ. Microbiol.* 59, 2991-2997.
- Holsen, T. M., Taylor, E. R., Seo, Y.-C., Anderson, P. R. (1991): Removal of sparingly soluble organic chemicals from aqueous solutions with surfactant-coated ferrihydrite. *Environ. Sci. Technol.*, 25(9), 1585-1589.
- Hölting, B. (1996): Hydrogeologie, Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. Enke, Stuttgart, 441 P.
- Hölting B. (2005): Hydrogeologie. Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie. 6. Auflage, Elsevier München.
- Holzlöhrer, U. (1994): Chemische und physikalische Einwirkungen auf mineralische Abdichtungsmaterialien, innovative Baustoffe. In: Holzlöhrer, U., August, H., Meggyes, T., Brune, M. (Hrsg.) Deponieabdichtungssysteme. Statusbericht. Forschungsbericht 201. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. ISBN 3-89429-475-2. p 105 - 115.
- Holzlöhrer, U., Meggyes, T. (1996): Schutz vor Kontamination durch Deponien. In: Blume, H.-P., Felix-Henningsen, P., Fischer, W. R., Frede, H.-G., Horn, R., Stahr, K. (Hrsg.): Handbuch der Bodenkunde. Ecomed. Kapitel 7.6.7. p 1-19.
- Hsi C.-K. D., Langmuir D. (1985): Adsorption of uranyl onto ferric oxyhydroxides: Application of the surface complexation site-binding model. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49(9): 1931-1941.
- <http://www.rubin-online.de/deutsch/bibliothek/downloads/index.html>
- Huang, C.-P., Wang, H.-W., Chiu, P.-C. (1998): Nitrate reduction by metallic iron. *Water Res.*, 32(8), 2257-2264.
- Hubble, D.W., Gillham, R.W. and Cherry, J.A. (1997): Emplacement of Zero-valent Metal for Remediation of Deep Contaminant Plumes. International Containment Technology Conference, St. Petersburg, FA, USA, 872-878.
- Hughes, R. (2001): Development of an Automatic Modeling Tool for the Efficiency-Analysis and Optimization of Reactive Barrier Systems for Groundwater Remediation. Master Thesis, Center for Applied Geosciences, University of Tübingen.
- Huikuri P., Salonen L. (2000): Removal of Uranium from Finnish Groundwaters in Domestic Use with a Strong Base Anion Resin. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 245(2): 385-393.
- Huikuri P., Salonen L., Raff O. (1998): Removal of natural radionuclides from drinking water by point of entry reverse osmosis. *Desalination* 119(1-3): 235-239.
- Hung H.-M., Hoffmann M. R. (1998): Kinetics and mechanism of the enhanced reductive degradation of CCl_4 by elemental iron in the presence of ultrasound. *Environ. Sci. Technol.* 32, 3011-3016.
- Hunter, W. J. (2002): Using barriers containing soybean oil to remediate chlorate-contaminated water. Proc. of the 3rd Int. Conf. on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey, CA, A. R. Gavaskar and A. S. C. Chen, eds., Battelle Press, Columbus, Ohio, computer optical disk.
- Hutchins, S. R., Sewell, G. W., Kovacs, D. A., Srnith, G. A. (1991): Biodegradation of aromatic hydrocarbons by aquifer microorganisms under denitrifying conditions. *Environ. Sci. Technol.*, 25, 68-76.
- Huttenloch, P., Roehl, K. E., Czurda, K. (2001): Oberflächenmodifizierung natürlicher Minerale mit Chlorsilanen zur Sorption unpolarer aromatischer Schadstoffe. *Berichte der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe e.V., Tone in der industriellen Anwendung*, Vol. 8, K. Czurda and A. Wefer-Roehl, eds., Karlsruhe, 95-109.
- Huttenloch, P., Roehl, K. E., Czurda, K. (2001): Sorption of Nonpolar Aromatic Contaminants by Chlorosilane Surface Modified Natural Minerals. *Environ. Sci. Technol.*, 35, 4260-4264.
- IAEA (1993): Uranium extraction technology. International Atomic Energy Agency, Technical Report, 359, Wien.
- IAEA (2001a): Analysis of Uranium Supply to 2050. International Atomic Energy Agency, Wien.
- IAEA (2001b): Assessment of Uranium Deposit Types and Resources — A Worldwide Perspective. International Atomic Energy Agency, IAEA TECDOC Series, 1258, Wien.

- IAEA (2002): Technologies for the Treatment of Effluents from Uranium Mines, Mills and Tailings. International Atomic Energy Agency, IAEA TECDOC Series, 1296, Wien.
- IAEA (2004): Treatment of liquid effluent from uranium mines and mills. International Atomic Energy Agency, IAEA TECDOC Series, 1419, Wien.
- IAEA (2005a): Developments in Uranium Resources, Production, Demand and the Environment. International Atomic Energy Agency, IAEA TECDOC Series, 1425, Wien.
- IAEA (2005b): Recent Developments in Uranium Exploration, Production and Environmental Issues. International Atomic Energy Agency, IAEA TECDOC Series, 1463, Wien.
- Ioannidis T. A., Zouboulis A. I. (2003): Detoxification of a highly toxic lead-loaded industrial solid waste by stabilization using apatites. *Journal of Hazardous Materials* 97(1-3): 173-191.
- Iron Reference Database (2002): <<http://cgr.ese.ogi.edu/ironrefs>> (Dezember 2002)
- Isenbeck-Schröter, M. (1995): Transportverhalten von Schwermetallkationen und Oxoanionen - Laborversuche in Säulen und ihre Modellierung. *Berichte Fachbereich Geowissenschaften, Univ. Bremen*, Nr. 67, 182 p
- ISPAT (datum nékül): Zur Direktreduktionsanlage der ISPAT Hamburger Stahlwerke GmbH, Firmenbroschüre der ISPAT Hamburger Stahlwerke GmbH, Process Technology.
- Istok J. D., Senko J. M., Krumholz L. R., Watson D., Bogle M. A., Peacock A., Chang Y.-J., White D. C. (2004): In Situ Bioreduction of Technetium and Uranium in a Nitrate-Contaminated Aquifer. *Environmental Science & Technology* 38(2): 468 -475.
- ITRC (1999): Regulatory guidance for permeable reactive barriers designed to remediate inorganic and radionuclide contamination. Interstate Technology and Regulatory Cooperation, Permeable Reactive Barriers Work Team, Technical / Regulatory Guideline, PRB-3.
- ITRC (1999): Technical/Regulatory Guidelines for Permeable Reactive Barriers Designed to Remediate Chlorinated Solvents. <<http://www.itrcweb.org/common/content.asp?en=TA549175&sea=Yes&set=Both&sca=Yes&sct=Long>> (Januar 2003)
- ITRC (2005): Permeable Reactive Barriers: Lessons Learned/New Directions. PRB-4. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Permeable Reactive Barriers Team - <<http://www.itrcweb.org>> – (Februar 2005)
- ITVA (Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V.) (1995): Sicherung durch vertikale Abdichtung. *Arbeitshilfe H 1-4*, Berlin.
- ITVA (Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V.) (2003): Nachsorge und Überwachung von sanierten Altlasten. *Handlungsempfehlung H 1-1*, Berlin.
- Jacobs, P. H., Förstner, U. (1999): Concept of subaqueous capping of contaminated sediments with Active Barrier Systems (ABS) using natural and modified zeolites. *Water Res.*, 33(9), 2083-2087.
- Jafvert, C. T., Valentine, R. L. (1992): Reaction scheme for the chlorination of ammoniacal water. *Environ. Sci. Technol.*, 26(3), 577-586.
- Jansen, T., Grooterhorst, A. (1999): Reaktive Schmalwände zur passiven Grundwasserreinigung. *TerraTech* (3), 46-48.
- Jarvis A. P., Moustafa M., Orme P. H. A., Younger P. L. (2006): Effective remediation of grossly polluted acidic, and metal-rich, spoil heap drainage using a novel, low-cost, permeable reactive barrier in Northumberland, UK. *Environmental Pollution* 143(2): 261-268.
- Jeanjean J., Rouchaud J. C., Tran L., Fedoroff M. (1995): Sorption of uranium and other heavy metals on hydroxyapatite. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Letters* 201(6): 529-539.
- Jefferis, S.A., Norris, G.H., Thomas A.O. (1997): Developments in Permeable and Low Permeability Barriers. *Proceedings of International Containment Technology Conference*. 9.-12. Februar 1997. St. Petersburg, Florida, USA. p 817 - 826.
- Jekel M. (2004): Flockung, Sedimentation und Flotation, in: DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (ed.), *Wasseraufbereitung - Grundlagen und Verfahren, Lehr- und Handbuch Wasserversorgung*, Bd. 6, Oldenbourg Industrieverlag, München, 63-114.
- Jekel M., Haberer K. (2004): Entfernung anorganischer Mikroverunreinigungen und von Radionukliden, in: DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (ed.), *Wasseraufbereitung - Grundlagen und Verfahren, Lehr- und Handbuch Wasserversorgung*, Bd. 6, Oldenbourg Industrieverlag, München, 551-587.

- Jekel M., Van Dyck-Jekel H., Haberer K. (1989): Entfernung von anorganischen Spurenstoffen einschließlich Radionukliden bei der Trinkwasseraufbereitung. DVGW-Schriftenreihe Wasser, DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. Bd. 62, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser Bonn.
- Jenk, U., Schreyer, J., Klinger, C. (2003): Fe(0)/Lignitic Coal: An Efficient and Mechanically Stable Reactive Material for Purification of Water Containing Heavy Metals, Radionuclides, and Nitroaromatics. *Environ. Sci. Technol.*, 37(3), 644-651.
- Jerden J., James L., Sinha A. K. (2003): Phosphate based immobilization of uranium in an oxidizing bedrock aquifer. *Applied Geochemistry* 18(6): 823-843.
- Jessberger, H.L. (1992): ITVA Arbeitspapier Dichtwände.
- Jessberger, H.L. and Geil, M. (1992): Einsatz von Spundwänden bei Deponien und Altlasten. *Geotechnik* (4), 237-242.
- Jianguo Z., Shaoqiang C., Jing Q., Song R. (2004): Study on the technology for the development of macroporous resin adsorption for high purification of uranium effluent, in: IAEA International Atomic Energy Agency (ed.), *Treatment of liquid effluent from uranium mines and mills*, IAEA, Wien, 75-87.
- Johnson, T. L., Tratnyek, P. G. (1994): A column study of carbon tetrachloride dehalogenation by iron metal. *Proc. of the 33rd Hanford Symposium on Health & the Environment. In-Situ Remediation: Scientific Basis for Current and Future Technologies.*, G. W. Gee and N. R. Wing, eds., Battelle Pacific Northwest Laboratories, Pasco, WA, 931-947.
- Johnson, T.L. & Tratnyek, P.G. (1994): A Column Study of Geochemical Factors Affecting Reductive Dechlorination of Chlorinated Solvents by Zero-Valent Iron. In: Gee, G.W., Wing, N.R. (Hrsg.): *In-Situ Remediation: Scientific Basis for Current and Future Technologies. Part 2*, p 931-947. Thirty-Third Hanford Symposium on Health and Environment, Batelle Press.
- Johnson, T.L. & Tratnyek, P.G. (1995): Dechlorination of Carbon Tetrachloride by Iron Metal: The Role of Competing Corrosion Reactions. 209th American Chemical Society National Meeting. Anaheim, C.A. Division of Environmental Chemistry Preprints of Papers, Vol. 35, No. 1, p 699-701.
- Johnson, T. L., Scherer, M. M., Tratnyek, P. G. (1996): Kinetics of halogenated organic compound degradation by iron metal. *Environ. Sci. Technol.*, 30(8), 2634-2640.
- Johnson, T. L., Fish, W., Gorby, Y. A., Tratnyek, P. G. (1998): Degradation of carbon tetrachloride by iron metal: Complexation effects on the oxide surface. *J. Contam. Hydrol.*, 29(4), 377-396.
- Johnson P. C., Miller K. D., Bruce C. L. (2004): A practical approach to the design, monitoring, and optimization of in situ MTBE aerobic biobarriers. Naval Facilities Engineering Service Center, Technical Report, TR-2257-ENV, Port Hueneme, Kalifornien.
- Jonas, A. (2002): Braunkohle in Reaktiven Wänden – erste Erfahrungen mit einer neuen Technologie. *Altlasten Spektrum*, 1/2002, 42.
- Joye J. L., Naftz D. L., Davis J. A., Freethy G. W., Rowland R. C. (2002): Development and performance of an iron oxide / phosphate reactive barrier for the remediation of uranium-contaminated groundwater, in: Naftz D. L., Morrison S. J., Davis J. A., Fuller C. C. (ed.), *Handbook of groundwater remediation using permeable reactive barriers*, Academic Press, San Diego, 195-219.
- Juhasz, A. (2001): Field and Numerical Experiments to Determine the Hydraulic Properties of Gates Applied at the Funnel and Gate System at the Beka Site in Tübingen. Master Thesis, Universität Tübingen, 72.
- Kaesche H. (1990): *Korrosion der Metalle*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Kalin M., Kießig G., Kuchler A. (2002): Ecological water treatment processes for underground uranium mine water: progress after three years of operating a constructed wetland, in: Merkel B. J., Planer-Friedrich B. und Wolkersdorfer C. (ed.), *Uranium in the Aquatic Environment*, Springer, Berlin, 587-596.
- Kalin M., Wheeler W. N., Meinrath G. (2004): The removal of uranium from mining waste water using algal/microbial biomass. *Journal of Environmental Radioactivity* 78(2): 151-177.
- Kalin R. M. (2004): Engineered passive bioreactive barriers: risk-managing the legacy of industrial soil and groundwater pollution. *Current Opinion in Microbiology* 7(3): 227-238.
- Kamolpornwijit W., Liang L., West O. R., Moline G. R., Sullivan A. B. (2003): Preferential flow path development and its influence on long-term PRB performance: column study. *Journal of Contaminant Hydrology* 66(3-4): 161-178.

- Kao, C.-M., Borden, R. C. (1997): Enhanced TEX biodegradation in nutrient briquet-peat barrier system. *J. Environ. Eng.*, 123(1), 18-24.
- Kaplan D. I., Serkiz S. M. (2001): Quantification of thorium and uranium sorption to contaminated sediments. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 248(3): 529-535.
- Kaplan, D. I., Cantrell, K. J., Wietsma, T. W., Potter, M. A. (1996): Retention of zero-valent iron colloids by sand columns: application to chemical barrier formation. *J. Environ. Qual.*, 25(5), 1086-1094.
- Kapoor, A., Viraraghavan, T. (1997): Nitrate removal from drinking water – review. *J. Environ. Eng.*, 123(4), 371-380.
- Karickhoff, S. W. (1984): Organic pollutant sorption in aquatic systems. *J. Hydra. Eng. ASCE*, 10(6), 707-735.
- Kellner, C. and Scheibel, B. (2004): Innovative Sicherungsmaßnahmen für Deponien - Ausführung der Kammerdichtwand Vorketzin. 11. Braunschweiger Deponie- und Dichtwandseminar 2004. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Vol. 74, Technische Universität Braunschweig 363-380.
- Kesraoui-Ouki, S., Cheeseman, C., Perry, R. (1993): Effects of Conditioning and treatment of chabazite and clinoptilolite prior to lead and cadmium removal. *Environ. Sci. Technol.*, 27, 1108-1116.
- Kiilerich, O., Larsen, J.W., Nielsen, C., Deigaard, L. (2000): Field Results from the Use of a Permeable Reactive Wall. *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds*, Monterey, Battelle Press, Columbus, Ohio, 377-384.
- Kim, Y. H., Carraway, E. R. (1999): Dechlorination of chlorinated ethenes and acetylenes by zero valent bimetals. Preprints of Extended Abstracts presented at the ACS National Meeting, American Chemical Society, Division of Environmental Chemistry, 39(1), 351-353.
- Kjeldsen P., Fuglsang I. A. (2000): Demonstration program on reactive barrier technologies using zero-valent iron. *ConSoil 2000*. 18.-22. Sept. 2000, Leipzig.
- Kjeldsen, P., Lai, C. K., Lo, I. M. C. (2004): Evaluation of the Hydraulic Performance of a Full Scale Permeable Reactive Barrier by a Tracer Test. *First International Symposium on Permeable Reactive Barrier*, Belfast, Northern Ireland.
- Kjeldsen, P., Loch, T., Karvonen, A.P. (2001): Removal of TCE and Chromate in a Permeable Reactive Barrier using Zero-Valent Iron. *3rd Int. Containment Technology Conf.*, 10-13 June, 2001, Florida State University, Tallahassee, Orlando, FL, <<http://www.containment.fsu.edu/cd/content/>>
- Klas H., Steinrath H. (1974): *Die Korrosion des Eisens und ihre Verhütung*. pp. 632. Stahleisen, Düsseldorf.
- Klausen, J., Trüber, S. P., Haderlein, S. B., Schwarzenbach, R. P. (1995): Reduction of substituted nitrobenzenes by Fe(II) in aqueous mineral suspensions. *Environ. Sci. Technol.*, 29(9), 2396-2404.
- Klausen J., Ranke J., Schwarzenbach R. P. (2001): Influence of solution composition and column aging on the reduction of nitroaromatic compounds by zero-valent iron. *Chemosphere* 44, 511-517.
- Klausen J., Vikesland P. J., Kohn T., Burris D. R., Ball W. P., Roberts A. L. (2003): Longevity of granular iron in groundwater treatment processes: Solution composition effects on reduction of organohalides and nitroaromatic compounds. *Environ. Sci. Technol.* 37, 1208-1218.
- Klein, R. H. Schad (2000): Results from a full scale F&G-System at the Beka site in Tübingen (Germany) using zero-valent iron, *ConSoil 2000*, 18-22 September 2000, Leipzig, p 917-924
- Klens J., Graves D., Rogers R., Chytil J., Streckfuss T. (2002): Coupled permeable reactive barrier and natural attenuation remediates chlorinated solvents. In *Remediation of chlorinated and recalcitrant compounds-2002*. [Electronic Resource] *Proceedings of the third international conference on remediation of chlorinated and recalcitrant compounds* (Monterey, CA, May 2002) (ed. A. Gavaskar & A. S. C. Chen), pp. Paper 2F-06. Battelle Press.
- Klinger, C., Jenk, U., Schreyer, J. (2001): Applicability of Zero-Valent Iron With Lignite Additives as Geochemical In Situ Barrier for Acid Mine Water. *3rd Int. Containment Technology Conf.*, 10-13 June, 2001, Florida State University, Tallahassee, Orlando, FL, <<http://www.containment.fsu.edu/cd/content/>>.
- Köber R. (2001): *Passivierungsprozesse in Fe(0)-Reinigungswänden und Kombinationen von Fe(0) mit Aktivkohle oder ORC zur Behandlung von Mischkontaminationen*. Dissertation, Institut für Geowissenschaften, CAU Kiel. 112 P.

- Köber, R., Dethlefsen, F., Plagentz, V., Ebert, M., Schäfer, D., Dahmke, A. (2001): Kombination von Eisen-Reaktionswänden und ORC® zur Behandlung komplexer Mischkontaminationen im Grundwasser. *TerraTech*, 3/2001, 54-59.
- Köber, R., Ebert, M., Schäfer, D., Dahmke, A. (2001): Kombination von Fe(0) und Aktivkohle in Reaktionswänden zur Sanierung komplexer Mischkontaminationen im Grundwasser. *Altlasten Spektrum*, 2/2001, 91-95.
- Köber R., Plagentz V., Dethlefsen F., Schäfer D., Ebert M., Dahmke A. (2002): Combining Fe0 with GAC or ORC and resulting downstream processes of such PRBs. In *Remediation of chlorinated and recalcitrant compounds-2002*. [Electronic Resource] Proceedings of the third international conference on remediation of chlorinated and recalcitrant compounds (Monterey, CA, May 2002) (ed. A. Gavaskar & A. S. C. Chen), pp. Paper 2F-01. Battelle Press.
- Köber R., Schlicker O., Ebert M., Dahmke A. (2002): Degradation of chlorinated ethylenes by Fe0: inhibition processes and mineral precipitation. *Environmental Geology* 41(6): 644-652.
- Köber, R., Dahmke, A., Giarolli, F. (2004a): Up- and downstream PRBs for remediation of arsenic and VOC. *Proc. of the 4rd Int. Conf. on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds*, Monterey, A. R. Gavaskar and A. S. C. Chen, eds., Battelle Press, Columbus, Ohio, computer optical disk, Paper 3A-22.
- Köber, R., Giarolli, F., Ebert, M., Dahmke, A. (2004b): Long-term performance of Fe(0)- PRBs to treat As and 1,2-DCE(cis) under different geochemical conditions. *First International Symposium on Permeable Reactive Barrier*, Belfast, Northern Ireland.
- Köber, R., Daus, B., Ebert, M., Mattusch, J., Welter, E., A. Dahmke (2005): Compost based permeable reactive barriers for source treatment of arsenic contaminations in aquifers: Column studies and solid phase investigations.- *Environ. Sci. Technol.*, 39(19): 7650-7655.
- Köber, R., Welter, E., Ebert, M., A. Dahmke (2005): Removal of arsenic from ground water by zero-valent iron and the role of sulfide. *Environ. Sci. Technol.*, 39(20): 8038-8044.
- Koch R. (1995): *Umweltchemikalien. Physikalische-chemische Daten, Toxizitäten, Grenz- und Richtwerte, Umweltverhalten*. pp. 421. VCH, Weinheim.
- Koenigsberg, S. (1998): *The Formation of Oxygen Barriers with ORC. Subsurface Barrier Technologies Conference*, Tucson, Arizona, USA.
- Köhler R. (1999): *Elektrochemische und katalytische Dechlorierung von Chlorkohlenwasserstoffen im Grundwasser*. Dissertation, Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik, Otto-von-Guericke Universität.
- Kohler, E.; Morteani, G. (1984): *Bewertung des Tonbarrierenkonzeptes unter besonderer Berücksichtigung der Permeabilität und den chemischen Reaktionen zwischen Tonmineralen und organischen Lösungen. - Literaturstudie*. Umweltbundesamt. Forschungsbericht 1002 03 409/01. Berlin.
- Köhler, S. (1997): *Reaktive Wände*. Studienarbeit. Technische Universität Braunschweig, Institut für Grundbau und Bodenmechanik. 157 p
- Kohn T., Livi K. J. T., Roberts A. L., Vikesland P. J. (2005): Longevity of Granular Iron in Groundwater Treatment Processes: Corrosion Product Development. *Environ. Sci. Technol.* 39(8): 2867-2879.
- Kölling, M. (1986): Vergleich verschiedener Methoden zur Bestimmung des Redoxpotentials natürlicher Wässer. – *Meyniana*, 38: 1-9
- Komlós, J., Cunningham, A. and Camper, A. (2001): Varying Substrate Concentration to Enhance TCE Degradation in Dual-Species Bioreactors. In: Magar, V.S., Fennel, D.E., Morse, J.J., Alleman, B.C. and Leeson, A. (ed.), *Anaerobic Degradation of Chlorinated Solvents. The Sixth International In-Situ and On-Site Bio-remediation Symposium*, San Diego, California, June 4-7, 2001, Battelle Press, Columbus, Richland, 117-124.
- Kopinke, F., Köhler, R., Mackenzie, K. (2000): Dechlorination of chlorohydrocarbons in groundwater by electrochemical and catalytic reactions. *SAFIRA Abstracts of the Workshop of November 17-18, 1999 at Bitterfeld/Germany*. UFZ-Bericht Nr. 23, H. Weiß, H. Rijnaarts, S. Staps, and P. Merkel, eds., Department of Remediation Research, UFZ-Centre for Environmental Research Leipzig-Halle, Leipzig, Germany, 62-72.
- Kopinke, F.-D., Georgi, A., Mackenzie, M., Kumke, M. (2001): Sorption and chemical reactions of PAHs with dissolved humic substances and related model polymers. *Refractory Organic Substances in the Environment*, F. H. Frimmel, ed., John Wiley and Sons, NY, Chapter 4.6.
- Kopinke, F.-D., Köhler, R., Mackenzie, K., Borsdorf, H., Schüth, C. (2002): Katalytische Dechlorierung von Chlorkohlenwasserstoffen aus kontaminierten Grundwässern. *Grundwasser*, 7(3), 140-145.

- Korkisch J., Hecht F., Sorantin H. (1972): Handbuch der Analytischen Chemie, Dritter Teil: Quantitative Bestimmungs- und Trennungsmethoden, Elemente der sechsten Nebengruppe, Band VI bß: Uran. Handbuch der Analytischen Chemie, Bd. 3, Fresenius W., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Korte N., Muftikian R., Grittini C., Fernando Q., Liang L., Clausen J. (1995): The use of palladized iron as a means of treating chlorinated contaminants. Special Symposium of the American Chemical Society: Emerging Technologies in Hazardous Waste Management VII, Atlanta Georgia, 51-53.
- Korte, N., Muftikian, R., Clausen, J., Liang, L. (1995 a): ORLN/MMES Research into Remedial Applications of Zero-Valence Metals. 2: Bimetallic Enhancements. 209th American Chemical Society National Meeting, Anaheim, C.A. Division of Environmental Chemistry Preprints of Papers, Vol. 35, No. 1, p 752-754.
- Korte, N., Muftikian, R., Grittini, C., Fernando, Q., Liang, L., Clausen, J. (1995 b): The Use of Palladized Iron as a Means of Treating Chlorinated Contaminants. Special Symposium of the American Chemical Society: Emerging Technologies in Hazardous Waste Management VII, Atlanta Georgia, Extended Abstracts, p 51-53.
- Korte, N., West, O. R., Liang, L., Pelfrey, M. J., and Houk, T. C. (1997): A field-scale test facility for permeable reactive barriers at the Portsmouth Gaseous Diffusion Plant. Fed. Facil. Environ. J., 8(3), 105-114.
- Korte N. E. (2001): Zero-valent iron permeable reactive barriers: a review of performance. Oak Ridge National Laboratory, Environmental Sciences Division, Technical Report / Environmental Sciences Division Publication, ORNL/TM-2000/345, Oak Ridge, Tennessee.
- Koß V. (1993): Zur Modellierung der Metalladsorption im natürlichen Sediment-Grundwasser-System. Wissenschaftliche Schriftenreihe Umwelttechnik. Bd. 1, Köster Berlin.
- Kouznetsova, I., Bayer, P., M. Finkel (2003): Long-term performance of permeable reactive barriers using zero-valent iron: cost-efficient design and maintenance. Paper presented at the NGWA Remediation Conference: Site Closure and the Cost of Cleanup in New Orleans, 2003.
- Krestou A., Xenidis A., Panias D. (2004): Mechanism of aqueous uranium(VI) uptake by hydroxyapatite. Minerals Engineering 17(3): 373-381.
- Kriegman-King, M. R., Reinhard, M. (1991): Reduction of Hexachloroethane and Carbon Tetrachloride at Surfaces of Biotite, Vermiculite, Pyrite, and Marcasite. Organic Substances and Sediments in Water (Vol. 2): R. A. Baker, ed., Lewis Publishers, Chelsea, MI, 349-364.
- Kriegman-King, M. R., Reinhard, M. (1992): Transformation of carbon tetrachloride in the presence of sulfide, biotite, and vermiculite. Environ. Sci. Technol., 26(11), 2198-2206.
- Kriegman-King, M. R., Reinhard, M. (1994): Transformation of Carbon Tetrachloride by Pyrite in Aqueous Solution. Environ. Sci. Technol., 28(4), 692-700.
- Krummholz L. R. (1997): Desulfuromonas chloroethenica sp. nov. uses tetrachloroethylene and trichloroethylene as electron acceptors. International J. Syst. Microbiol. 47, 1262-1263.
- Krummholz L. R., Sharp R., Fishbain S. S. (1996): A freshwater anaerobe coupling acetate oxidation to tetrachloroethylene dehalogenation. Appl. Environ. Microbiol. 62, 4108-4113.
- Kryvoruchko A. P., Yurlova L. Y., Atamanenko I. D., Kornilovich B. Y. (2004): Ultrafiltration removal of U(VI) from contaminated water. Desalination 162: 229-236.
- Kühlers, D., M. Schönthal, M. Maier (2005): Funnel&Gate Karlsruhe - Erfolgreiche Sanierung des Gaswerkstandortes Karlsruhe-Ost, in Egloffstein, Burkhardt und Czurda: Tagungsband Altlasten 2005, ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Karlsruhe, S. 125-132
- Kurt, M., Dunn, I. J., Bourne, J. R. (1987): Biological denitrification of drinking-water using autotrophic organisms with H₂ in a fluidized-bed biofilm reactor. Biotechnol. and Bioeng., 29(4), 493-501.
- Kutzner, C. (1991): Injektionen im Baugrund, Enke Verlag Stuttgart.
- Laase, A. D., Korte, N. E., Baker, J. L., Dieckmann, P., Vogan, J. L., Focht, R. L. (2000): Evaluation of the Kansas City Plant Iron Wall. Proc. of the 2nd Int. Conf. on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey, Battelle Press, Columbus, Ohio, 417-424.
- Lackovic J. A., Nikolaidis N. P., Dobbs G. M. (2000): Inorganic arsenic removal by zero-valent iron. Environ. Sci. Technol. 17, 29-39.
- Lai, C. K., Lo, I. M. C., Kjeldsen, P. (2004): Investigation of Flow Pattern of Groundwater through a Fe(0) PRB. Proc. of the 4rd Int. Conf. on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey, A. R. Gavaskar and A. S. C. Chen, eds., Battelle Press, Columbus, Ohio, computer optical disk.

- Lampron K. J., Chiu P. C., Cha D. K. (1998): Biological reduction of trichloroethene supported by Fe⁰. *Biorem. J.* 2, 175-181.
- Lampron K. J., Chiu P. C., Cha D. K. (2001): Reductive dehalogenation of chlorinated ethenes with elemental iron: the role of microorganisms. *Wat. Res.* 35, 3077-3084.
- Landis R. L., Gillham R. W., Reardon E. J., Fagan R., Focht R. M., Vogan J. (2001): An examination of zero-valent iron sources used in permeable reactive barriers. 2001 International Containment & Remediation Technology Conference and Exhibition. 10-13 June 2001, Orlando, Florida, USA. DOE/EM Report Number 0620: Paper-ID 420.
- Langmuir D. (1978): Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42(6): 547-569.
- Langmuir D. (1997): *Aqueous Environmental Geochemistry*, Prentice-Hall Inc. Upper Saddle River.
- LAWA-Arbeitskreis. (1998): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien): Kulturbuchverlag Berlin GmbH, Berlin, 182 p.; siehe auch: LAWA) (2005): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien), 7. Auflage, Kulturbuchverlag Berlin GmbH, Berlin.
- Lee S. Y., Bondiotti E. A. (1983): Removing uranium from drinking water by metal hydroxides and anion exchange resin. *Journal of the American Water Works Association* 75: 536-540.
- Lee W., Batchelor B. (2002): Abiotic reductive dechlorination of chlorinated ethylenes by iron-bearing soil minerals. 1. Pyrite and Magnetite. *Environ. Sci. Technol.* 36, 5147-5154.
- Lee Y. J., Elzinga E. J., Reeder R. J. (2005): Sorption Mechanisms of Zinc on Hydroxyapatite: Systematic Uptake Studies and EXAFS Spectroscopy Analysis. *Environmental Science & Technology* 39(11): 4042-4048.
- Lee, D. R., Hartwig, D.S. (2001): Wall-and-Curtain for Subsurface Treatment of Contaminated
- Lee, I-F., Crum, J. R., Boyd, S. A. (1989): Enhanced retention of organic contaminants by soil exchanged with organic cations. *Environ. Sci Technol.*, 23, 1365-1372.
- Lee, M., Thomas, J., Borden, R., Bedient, P., Ward, C., Wilson, J. (1988): Bioremediation of aquifers contaminated with organic compounds. *CRC Crit. Rev. Environ. Contr.*, 18(1), 29-89.
- Lemser, B., Tillmann, A. (1997): Wirtschaftlichkeit von Bodensanierungen: Ansätze zur ökonomischen Bewertung von Altlastensanierungen im privaten und öffentlichen Bereich. *Bodenschutz und Altlasten*, Vol.1, Erich Schmidt, Berlin, 315 p.
- Lenhart J. J., Honeyman B. D. (1999): Uranium(VI) sorption to hematite in the presence of humic acid. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63(19-20): 2891-2901.
- Lennie A. R. (2004): Apatite [Ca₅(PO₄)₃F]. mineral web - a web site for 3-D display of mineral structures, <http://www.minweb.co.uk/phosphates/apatite.html>, letzter Zugriff am 11.09.2006.
- Lerner, D. N., Tellam, J. H., Thornton, S. F.; Bright, M. I. (1994): Maximising the Attenuation of Leachate by Landfill Liners. Hydrogeology Research Group, School of Earth Sciences, The University of Birmingham. 30 p
- Leventhal, J. S. (1980): Organic geochemistry and uranium in Grants mineral belt. *Memoir 38 —Geology and mineral technology of the Grants uranium region 1979*, C. A. Rautman, ed., The New Mexico Bureau of Mines & Mineral Resources, 75-85.
- Leyva A. G., Marrero J., Smichowski P., Cicerone D. (2001): Sorption of Antimony onto Hydroxyapatite. *Environmental Science & Technology* 35: 3669-3675.
- LfU - Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1995): Sicherung von Altlasten mit Schlitz- oder Schmalwänden. – *Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle*, Band 23, November 1995.
- LfU - Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1997): Aktualisierung der Literaturstudie Reaktive Wände pH-Redox-Reaktiv Wände Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung, Band 33/97.
- Li L., Benson C. H. (2005): Impact of fouling on the long-term hydraulic behaviour of permeable reactive barriers, in: Boshoff G. A., Bone B. D. (ed.), *Permeable Reactive Barriers*, IAHS Series of Proceedings and Reports, IAHS Press, Wallingford, Oxfordshire, UK, 23-31.
- Li, Z., Anghel, I., Bowman, R. S. (1998): Sorption of oxyanions by surfactant-modified zeolite. *J. Disp. Sci. Tech.*, 19, 843-857.

- Liang L., Korte N. E., Moline G. R., West O. R. (2001): Long-term monitoring of permeable reactive barriers - progress report. Oak Ridge National Laboratory, Environmental Sciences Division, Oak Ridge National Laboratory Report, Environmental Sciences Division Publication, ORNL/TM-2001/1, Oak Ridge, Tennessee.
- Liang L., Korte N., Gu B., Puls R. W., Reeter C. (2000): Geochemical and microbial reactions affecting the long-term performance of in situ iron barriers. *Adv. Environ. Res.* 4, 273-286.
- Liang L., Moline G. R., Kamolpornwijit W., West O. R. (2005): Influence of hydrogeochemical processes on zero-valent iron reactive barrier performance: A field investigation. *Journal of Contaminant Hydrology* 78(4): 291-312.
- Liang, L., Goodlaxson, J.D., Korte, N.E., Clausen, J.L., Davenport, D.T. (1995): ORNL/MMES Research into Remedial Applications of Zero-Valence Metals: Laboratory Analysis of Reductive Dechlorination of Trichloroethylene. 209th American Chemical Society National Meeting. Anaheim, C.A. Division of Environmental Chemistry Preprints of Papers, Vol. 35, No. 1, p 728-731.
- Liang, L., Gu, B., Yin, X. (1996): Removal of technetium-99 from contaminated groundwater with sorbents and reductive materials. *Separat. Technol.*, 6, 111-122.
- Liang, L., Korte, N., Goodlaxson, J. D., Clausen, J., Fernando, Q., Muftikian, R. (1997): Byproduct formation during the reduction of TCE by zero-valent iron and palladized iron. *Ground Water Monitoring and Review*, Winter, 122-127.
- Liang, L., West, O., Korte, N., Goodlaxson, J. D., Pickering, D., Zutman, J., Anderson, F., Welch, C., Pelfrey, M. (1997): The X-625 Groundwater Treatment Facility: A Field-Scale Test of Trichloroethylene Dechlorination Using Iron Filings for the X-120/X-749 Groundwater Plume. Rep. No. PB99-114829, ORNL/TM-13410, ORNL/PUB-4667, Oak Ridge Inst. for Science and Education, TN, 92 p.
- Liedl, R., M. Finkel, G. Teutsch (1999): Modellierung von Abbaureaktionen in In-situ-Sanierungsreaktoren. - In: H. Weiß, G. Teutsch & B. Daus (Hrsg.): SAFIRA - 2. Statusbericht - Modellstandort, Mobile Testeinheit, Pilotanlage, UfZ-Bericht 17/1997, ISSN 0948-9452, S. 84-91.
- Lien, H.-L., Zhang, W. (2002): Enhanced dehalogenation of halogenated methanes by bimetallic Cu/Al. *Chemosphere*, 49(4), 371-378.
- Liessens, J., Vanbrabant, J., De Vos, P., Kersters, K., Verstraete, W. (1992): Mixed culture hydrogenotrophic nitrate reduction in drinking water. *Microb. Ecol.*, 24, 271-290.
- Liger E., Charlet L., Van Cappellen P. (1999): Surface catalysis of uranium(VI) reduction by iron(II). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63(19-20): 2939-2955.
- Lin Z., Puls R. W. (2003): Potential indicators for the assessment of arsenic natural attenuation in the subsurface. *Advances in Environmental Research* 7(4): 825-834.
- Lindberg, J., Sterneland, J., Johansson, P.-O., Gustafsson, J. P. (1997): Spodic material for in situ treatment of arsenic in ground water. *Ground Water Monit. Rem.*, 17(4), 125-130.
- Lindberg, R.D. Runnells, D.D (1984): Ground water redox reactions: An analysis of equilibrium state applied to Eh measurements and geochemical modeling. - *Science*, 225: 925-927
- Lipczynska-Kochany, E., Harms, S., Milburn, R., Sprah, G., Nadarajah, N. (1994): Degradation of carbon tetrachloride in the presence of iron and sulphur containing compounds. *Chemosphere*, 29(7), 1477-1489.
- Löffler F. E., Tiedje J. M., Sanford R. A. (1999): Fraction of electrons consumed in electron acceptor reduction and hydrogen thresholds as indicator of halorispiratory physiology. *Appl. Environ. Microbiol.* 65, 4049-4056.
- Logue B. A., Smith R. W., Westall J. C. (2004): U(VI) adsorption on natural iron-coated sands: comparison of approaches for modeling adsorption on heterogeneous environmental materials. *Applied Geochemistry* 19(12): 1937-1951.
- Long G. G., Kruger J., Black D. R., Kuriyama M. (1983): EXFAS study of the passive film on iron. *J. Electrochem. Soc.* 130, 240-242.
- Longtin J. (1990): Occurrence of radionuclides in drinking water, a national study, in: Cothorn C. R., Rebers P. A. (ed.), Radon, radium, and uranium in drinking water, Lewis Publishers Inc., Chelsea, Michigan, U.S.A., 97-139.
- Lorbeer, H., Starke, S., Gozan, M., Tiehm, A., Werner, P. (2002): Bioremediation of Chlorobenzene-contaminated Groundwater on Granular Activated Carbon Barriers. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 2, 183-193.

- Lovley D. R. (1985): Minimum threshold for hydrogen metabolism in methanogenic bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 49, 1530-1531.
- Lovley D. R., Chapelle F. H., Woodward J. C. (1994): Use of dissolved H₂ concentrations to determine distribution of microbially catalyzed redox reactions in anaerobic groundwater. *Environ. Sci. Technol.* 28, 1205-1210.
- Lovley D. R., Phillips E. J. P. (1992a): Bioremediation of uranium contamination with enzymatic uranium reduction. *Environmental Science & Technology* 26(11): 2228-2234.
- Lovley D. R., Phillips E. J. P. (1992b): Reduction of uranium by *Desulfovibrio desulfuricans*. *Applied and Environmental Microbiology* 58(3): 850-856.
- Lovley, D. R., Goodwin, S. (1988): Hydrogen concentrations as an indicator of the predominant terminal electron-accepting reactions in aquatic sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, 2993-3003.
- Lovley, D. R., Phillips, E. J. P., Gorby, Y. A., Landa, E. R. (1991): Microbial reduction of uranium. *Nature*, 350, 413-416.
- Lower S. K., Maurice P. A., Traina S. J. (1998a): Simultaneous dissolution of hydroxylapatite and precipitation of hydroxypyromorphite: direct evidence of homogeneous nucleation. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62(10): 1773-1780.
- Lower S. K., Maurice P. A., Traina S. J., Carlson E. H. (1998b): Aqueous Pb sorption by hydroxylapatite: Applications of atomic force microscopy to dissolution, nucleation, and growth studies. *American Mineralogist* 83(1-2): 147.
- Loyaux-Lawniczak S., Refait P., Ehrhardt J.-J., Lecomte P., Génin J.-M. R. (2000): Trapping of Cr by formation of ferrihydrite during the reduction of chromate ions by Fe(II)-Fe(III) hydroxysalt green rust. *Environ. Sci. Technol.* 34, 438-443.
- LUA - Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (1998): Leistungsbuch Altlastensanierung und Flächenentwicklung 97/98. - Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz, Band 5, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen.
- LUA - Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2000): Anforderungen an eine Sanierungsuntersuchung unter Berücksichtigung von Nutzen-Kosten-Aspekten. - Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz, Band 11, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen.
- LUA - Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2004): Überwachung, Nachsorge und Eigenkontrolle bei der Altlastenbearbeitung – Ein Leitfaden für die praktische Arbeit in NRW. Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz, LUA NRW, Essen.
- Lühr, H.-P., Schulz-Terfloth, G., Balzereit, F., Wegener, I. (1996): Abschätzung des Transferverhaltens von Stoffen im ungesättigten und gesättigten Untergrund. Kongreß Grundwassersanierung 1996: rechtliche Fragen, Fallbeispiele, Großprojekte, H.-P. Lühr, ed., Erich Schmidt, Berlin, 97-117.
- Lusvardi G., Malavasi G., Menabue L., Saladini M. (2002): Removal of cadmium ion by means of synthetic hydroxyapatite. *Waste Management* 22(8): 853-857.
- Lutze W., Gong W., Nuttall E. H. (2002): Microbially mediated reduction and immobilization of uranium in groundwater, in: Merkel B., Planer-Friedrich B., Wolkersdorfer C. (ed.), *Uranium in the aquatic environment*, Springer, Berlin, 437-446.
- Ma Q. Y., Logan T. J., Traina S. J. (1995): Lead Immobilization from Aqueous Solutions and Contaminated Soils Using Phosphate Rocks. *Environmental Science & Technology* 29(4): 1118 - 1126.
- Ma Q. Y., Logan T. J., Traina S. J., Ryan J. A. (1994a): Effects of NO₃⁻, Cl⁻, F⁻, SO₄²⁻ and CO₃²⁻ on Pb²⁺ Immobilization by Hydroxyapatite. *Environmental Science & Technology* 28(3): 408-418.
- Ma Q. Y., Traina S. J., Logan T. J. (1993): In Situ Lead Immobilization by Apatite. *Environmental Science & Technology* 27(9): 1803-1810.
- Ma Q. Y., Traina S. J., Logan T. J., Ryan J. A. (1994b): Effects of Aqueous Al, Cd, Cu, Fe(II), Ni, and Zn on Pb Immobilization by Hydroxyapatite. *Environmental Science & Technology* 28(7): 1219-1228.
- Macalady D. L., Tratnyek P. G. (1986): Abiotic reduction reactions of anthropogenic organic chemicals in anaerobic systems. *J. Contam. Hydrol.* 1, 1-28.
- Macaskie L. E. (1997): Bioaccumulation of heavy metals, and application to the remediation of acid mine drainage water containing uranium. *Research in Microbiology* 148(6): 528-530.

- Mackay D. M., Cherry J. A. (1989): Groundwater contamination: pump-and-treat remediation. *Environmental Science & Technology* 23(6): 630-636.
- Mackenzie P. D., Horney D. P., Sivavec T. M. (1999): Mineral precipitation and porosity losses in granular iron columns. *Journal of Hazardous Materials* 68(1-2): 1-17.
- Mackenzie, K., Köhler, R., Weiß, H., Kopinke, F. D. (2000): Dechlorination of chlorohydrocarbons in groundwater using novel membrane-supported Pd catalysts. Proc. of the 2nd Int. Conf. on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey, CA, C2-6, G. B. Wickramanayake, A. R. Gavaskar and A. S. C. Chen, eds., Batelle Press, Columbus, Ohio, 331-338.
- Mackenzie, P. D., Sivavec, T. M., Horney, D. P. (1997): Mineral precipitation and porosity losses in iron treatment zones. Preprints of Extended Abstracts presented at the ACS National Meeting, American Chemical Society, Division of Environmental Chemistry, 37(1), 154-157.
- Mackenzie, P.D., Baghel, S.S., Eykholt, G.R., Horney, D.P., Salvo, J.J., Sivavec, T.M. (1995): Pilot Scale Demonstration of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethenes by Iron Metal. 209th American Chemical Society National Meeting. Anaheim, C.A. Division of Environmental Chemistry, Preprints of Papers, Vol. 35, No. 1, p 796-799.
- Mageau, D. (1998): Use of a Frozen Ground Barrier to Contain Groundwater Contamination. Subsurface Barrier Technologies Conference, Tucson, AZ, USA, International Business Communications.
- Maithreepala R. A., Doong R.-A. (2004): Synergistic effect of copper ion on the reductive dechlorination of carbon tetrachloride by surface-bound Fe(II) associated with goethite. *Environ. Sci. Technol.* 38, 260-268.
- Manning B. A., Hunt M. L., Amrhein C., Yarmoff J. A. (2002): Arsenic(III) and arsenic(V) reactions with zero valent iron corrosion products. *Environ. Sci. Technol.* 36, 5455-5461.
- Mantha R., Taylor K. E., Biswas N., Bewtra J. K. (2001): A continuous system for Fe⁰ reduction of nitrobenzene in synthetic wastewater. *Environ. Sci. Technol.* 35, 3231-3236.
- Marchat D., Bernache-Assollant D., Champion E. (2006): Cadmium fixation by synthetic hydroxyapatite in aqueous solution--Thermal behaviour. *Journal of Hazardous Materials* In Press, Corrected Proof.
- Matheson L. J., Goldberg W. C., Bostick W. D., Harris L. (2002): Analysis of uranium-contaminated zero valent iron media sampled from permeable reactive barriers installed at U.S. Department of Energy sites in Oak Ridge, Tennessee, and Durango, Colorado, in: Naftz D. L., Morrison S. J., Davis J. A., Fuller C. C. (ed.), *Handbook of groundwater remediation using permeable reactive barriers*, Academic Press, San Diego, 343-367.
- Matheson L. J., Tratnyek P. G. (1994): Reductive Dehalogenation of Chlorinated Methanes by Iron Metal. *Environmental Science & Technology* 28(12): 2045-2053.
- Matheson, L. J. (1994): Abiotic and Biotic Reductive Dehalogenation of Halogenated Methanes. PhD thesis, Oregon Graduate Institute of Science and Technology, Beaverton, OR.
- Mattheß, G. (1994): Die Beschaffenheit des Grundwassers (Lehrbuch der Hydrogeologie Band 2, Mattheß, G. (Hrsg.)): Gebrüder Bornträger, Berlin, Stuttgart, 499 P.
- Maurice P. A. (1998): Atomic force microscopy as a tool for studying the reactivities of environmental particles, in: Sparks D. L., Grundl T. J. (ed.), *Mineral-water interfacial reactions: kinetics and mechanisms*, ACS Symposium Series, American Chemical Society, Washington DC, 57-66.
- Mavropoulos E., Rossi A. M., Costa A. M., Perez C. A. C., Moreira J. C., Saldanha M. (2002): Studies on the Mechanisms of Lead Immobilization by Hydroxyapatite. *Environmental Science & Technology* 36(7): 1625-1629.
- May, H.M., Kinniburgh, D.G., Helmke, P.A. & Jackson, M.L. (1986): Aqueous dissolution, solubilities and thermodynamic stabilities of common aluminosilicate clay minerals: kaolinites and smectites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 50: 1667 - 1677,
- Mayer, K. U., Blowes, D. W., Frind, E. O., 2001. Reactive transport modelling of groundwater remediation by an in situ reactive barrier for the treatment of hexavalent chromium and trichloroethylene, *Water Resour. Res.*, 37, 3091-3103.
- McGregor R., Benner S., Ludwig R., Blowes D., Ptacek C. (2002): Sulfate reduction permeable reactive barrier to treat acidity, cadmium, copper, nickel, and zinc: two case studies, in: Naftz D. L., Morrison S. J., Davis J. A., Fuller C. C. (ed.), *Handbook of groundwater remediation using permeable reactive barriers*, Academic Press, San Diego, 495-522.

- McGrellis S., Serafini J.-N., JeanJean J., Pastol J.-L., Fedoroff M. (2001): Influence of the sorption protocol on the uptake of cadmium ions in calcium hydroxyapatite. *Separation and Purification Technology* 24(1-2): 129-138.
- McLellan, J. K., Rock, C. A. (1988): Pretreating landfill leachate with peat to remove metals. *Water Air Soil Pollut.*, 37, 203-215.
- McMahon, P. B., Cdennehy, K. F., Sanstrom, M. W. (1999): Hydraulic and Geochemical Performance of a Permeable Reactive Barrier Containing Zero-Valent Iron, Denver Federal Center. *Ground Water*, 37, 396-404.
- McNab W. W., Ruiz R. (1998): Palladium-catalyzed reductive dehalogenation of dissolved chlorinated aliphatics using electrolytically generated hydrogen. *Chemosphere* 37, 925-936.
- McRae C. W. T. (1999): Evaluation of reactive materials for in situ treatment of arsenic(III), arsenic(V) and selenium(VI) using permeable reactive barriers: Laboratory study. MSc Thesis, University of Waterloo.
- McRae C. W. T., Blowes D. W., Ptacek C. J. (1997): Laboratory-scale investigation of remediation of As and Se using iron oxides. 6th Symposium and Exhibition on Groundwater and Soil Remediation. 18.-21. Mrz. 1997, Montreal: 167-168.
- Meggyes, T. (1994): Dichtwände. In: Holzlöhner, U., August, H., Meggyes, T., Brune, M. (Hrsg.) *Deponieabdichtungssysteme. Statusbericht. Forschungsbericht 201. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. ISBN 3-89429-475-2. p 153 - 171.*
- Meggyes, T., Pye, N. (1995): Cut-off Walls. In: Holzlöhner, U., August, H., Meggyes, T. and Brune, M. (ed.): *Landfill Liner Systems, N1-28, Federal Institute of Materials Research and Testing (BAM), Berlin, Solid and Hazardous Waste Research Unit, The University of Newcastle, Penshaw Press, Sunderland, UK.*
- Meggyes, T. (1997): Reaktive Wände oder Einkapselung? *Umwelttechnologie Aktuell*. 2. April. 144-148.
- Meggyes, T. and Simon, F.-G. (2000): Removal of organic and inorganic pollutants from groundwater using permeable reactive barriers. Part 2. Engineering of permeable reactive barriers. *Land Contamination & Reclamation*, 8 (3), 175-187.
- Meggyes, T.; Simon, F.-G.; Debreczeni, E. (2001): New Developments in Reactive Barrier Technology. In: Sarsby, R. W.; Meggyes, T. (eds.): *Proceedings Green 3, The Exploitation of Natural Resources and the Consequences. 3rd International Symposium on Geotechnics Related to the European Environment. June 21-23, 2000. p. 474-483. Thomas Telford, London*
- Meggyes, T.; Simon, F.-G.; Tünnermeier T. (2001): Innovative Baumethoden für reaktive Wände. *Geotechnik, Sonderband zur 13. Nationalen Tagung für Ingenieurgeologie Karlsruhe 2001*, p. 149-155
- Meggyes, T.; Tünnermeier, T.; Simon, F.-G. (2001): Einführung in die Technologie der reaktiven Wände. In: Burkhardt, G.; Egloffstein, Th.; Czurda, K. (eds.): *Altlasten 2001. Neue Verfahren zur Sicherung und Sanierung. Arbeitskreis Grundwasserschutz e. V., Überwachungsgemeinschaft "Bauen für den Umweltschutz" e. V. p. 1-25*
- Meggyes, T., Simon, F.-G., Tünnermeier, T., Debreczeni, Á. (2002): Fortschritte in der Bautechnik der reaktiven Wände. 10. Braunschweiger Deponieseminar 2002. *Qualitätssicherung und Innovation. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. No. 69. p. 453 – 474.*
- Meggyes T. (2005): Construction methods of permeable reactive barriers, in: Roehl K. E., Meggyes T., Simon F. G., Stewart D. I. (ed.), *Long-term performance of permeable reactive barriers, Trace metals and other contaminants in the environment, Bd. 7, Elsevier, Amsterdam, 27-52.*
- Meinrath G., Volke P., Helling C., Dudel E. G., Merkel B. J. (1999): Determination and interpretation of environmental watersamples contaminated by uranium mining activities. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry* 364(3): 191-202.
- Melitas N., Conklin M., Farrell J. (2002a): Electrochemical study of arsenate and water reduction of iron media used for arsenic removal from potable water. *Environ. Sci. Technol.* 36, 3188-3193.
- Melitas N., Wang J., Conklin M., O'Day P., Farrell J. (2002b): Understanding soluble arsenate removal kinetics by zerovalent iron media. *Environ. Sci. Technol.* 36, 2074-2081.
- Melzer, R. & Weth, D. (1997): Einsatz einer reaktiver Wand zur Sanierung eines LKWH-Schadens in Nordrhein-Westfalen - Statusbericht zum Verlauf des Sanierungsvorhabens. *Grundwassersanierung 1997, Berlin. 19. und 29. Februar 1997. Wiss. Leitung: H.-P. Lühr. Erich Schmidt Berlin. ISBN 3 503 04333 0. p 357-361.*
- Merkel B., Sperling B. (1998): Hydrogeochemische Stoffsysteme II. Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK). Bd. 117, DVWK Bonn.

- Mertz, K. A.; Gobin, F.; Hand, D. W.; Hokanson, D. R.; Crittenden, J. C. (1994) Manual of the Adsorption Design Software for Windows. (AdDesignSTM); MichiganTech, 152 p.
- Meseck, H. (1987): Dichtwände mit eingestellten Kunststoffbahnen (Kombinationsdichtwände). In: Meseck, H. (ed.), Dichtwände und Dichtsohlen, Fachseminar 02./03. Juni 1987, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Vol. 23, 155-170, Technische Universität Braunschweig.
- Middeldorp P. J. M., Luijten M. L. G. C., van de Pas B. A., van Eekert M. H. A., Kengen S. W. M., Schraa G., Stams A. J. M. (1999): Anaerobic microbial reductive dehalogenation of chlorinated ethenes. *Biorem. J.* 3, 151-169.
- Miehr R., Tratnyek P. G., Bandstra J. Z., Scherer M. M., Alowitz M. J., Bylaska E. J. (2004): Diversity of contaminant reduction reactions by zerovalent iron: Role of the reductate. *Environ. Sci. Technol.* 38, 139-147.
- Milburn R., Harms S., Lipczynska-Kochany E., Ravary C., Sprah G. (1995): Iron (Fe⁰) induced dehalogenation of polychlorinated aliphatic compounds. 209th American Chemical Society National Meeting, Anaheim, CA. Division of Environmental Chemistry, 35: 822-824.
- Mill, T., Su, M. (1997): Zero valent metal promoted oxidation of organic compounds. Preprints of Extended Abstracts presented at the ACS National Meeting, American Chemical Society, Division of Environmental Chemistry, 37(1), 88-90.
- Miller E., Wohlfarth G., Diekert G. (1996): Studies on tetrachloroethene respiration in *Dehalospirillum multivorans*. *Arch. Microbiol.* 166, 379-387.
- Mirvish, S. (1985): Gastric cancer and salivary nitrate and nitrite. *Nature*, 315, 461-462.
- Missana T., Garcia-Gutierrez M. und Fernandez V. (2003): Uranium (VI) sorption on colloidal magnetite under anoxic environment: experimental study and surface complexation modelling. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67(14): 2543-2550.
- Mitani, T., Fukumuro, N., Yoshimoto, C., Ishii, H. (1991): Effects of counter ions (SO₄²⁻ and Cl⁻) on the adsorption of copper and nickel ions by swollen chitosan beads. *Agric. Biol. Chem.*, 55(9), 2419.
- Möller W. (1998): Bau einer Reaktiven Wand als F+E-Vorhaben in Rheine. TerraTech 4.
- Möller, W. (2000): F+E-Vorhaben reaktive Wand 'Rheine' – Erfahrungsbericht. Seminar Grundwassersanierung mit F&G-Systemen. Akademie für Bauen und Umwelt e. V., Darmstadt, 17.02.2000.
- Molyan, J. (2003): Evaluation of the Permeable Reactive Wall at the Northeast Corner Operable Unit, Lake City Army Ammunition Plant (LCCAP), Missouri. RTDF Permeable Reactive Barriers (PRBs) Action Team Meeting, 25-41
- Moore J., Limson-Zamora M., Whiteduck L., Schwartz H. M. (1996): Elevated uranium levels in groundwater and the potential bioeffects, 7th National Conference on Drinking Water, Charlottetown.
- Morgan, P., Watkinson, R. J. (1992): Factors limiting the supply and efficiency of nutrient and oxygen supplements for the in situ biotreatment of contaminated soil and groundwater. *Wat. Res.*, 26(1), 73-78.
- Morkin M., Devlin J. F., Barker J. F., Butler B. J. (2000): In situ sequential treatment of a mixed contaminant plume. *J. Contam. Hydrol.* 45, 283-302.
- Morrison S. J., Spangler R. R. (1992): Extraction of Uranium and Molybdenum from Aqueous Solutions: A Survey of Industrial Materials for Use in Chemical Barriers for Uranium Mill Tailings. *Environmental Science & Technology* 26(10): 1922-1931.
- Morrison, S. J., Spangler, R. R. (1993): Chemical barriers for controlling groundwater contamination. *Environ. Prog.*, 12(3), 175-181.
- Morrison S. J., Spangler R. R., Tripathi V. S. (1995): Adsorption of uranium(VI) on amorphous ferric oxyhydroxide at high concentrations of dissolved carbon(IV) and sulfur(VI). *Journal of Contaminant Hydrology* 17: 333-346.
- Morrison, S. J., Spangler, R. R., Morris, S. A. (1996): Subsurface Injection of Dissolved Ferric Chloride to Form a Chemical Barrier: Laboratory Investigations. *Ground Water Monitor. Rem.*, 34(1), 75-83.
- Morrison S. J. (1998): Field treatability studies: Permeable reactive treatment wall project - Monitcelle, Utah. RTDF Permeable Reactive Barriers Action Team Meeting. 17.-19. Nov. 1998, Oak Ridge, TN: 69-82.
- Morrison S. J., Metzler D. R., Carpenter C. E. (2001): Uranium Precipitation in a Permeable Reactive Barrier by Progressive Irreversible Dissolution of Zerovalent Iron. *Environmental Science & Technology* 35(2): 385-390.

- Morrison S. J., Carpenter C. E., Metzler D. R., Bartlett T. R., Morris S. A. (2002a): Design and performance of a permeable reactive barrier for containment of uranium, arsenic, selenium, vanadium, molybdenum, and nitrate at Monticello, Utah, in: Naftz D. L., Morrison S. J., Davis J. A., Fuller C. C. (ed.), Handbook of groundwater remediation using permeable reactive barriers, Academic Press, San Diego, 371-399.
- Morrison S. J., Metzler D. R., Dwyer B. P. (2002b): Collection drain and permeable reactive barrier for treating uranium and metals from mill tailings near Durango, Colorado, in: Naftz D. L., Morrison S. J., Davis J. A., Fuller C. C. (ed.), Handbook of groundwater remediation using permeable reactive barriers, Academic Press, San Diego, 435-463.
- Morrison S. J., Metzler D. R., Dwyer B. P. (2002c): Removal of As, Mn, Mo, Se, U, V and Zn from groundwater by zero-valent iron in a passive treatment cell: reaction progress modeling. *Journal of Contaminant Hydrology* 56(1-2): 99-116.
- Morrison S. J., Naftz D. L., Davis J. A., Fuller C. C. (2002d): Introduction to groundwater remediation of metals, radionuclides, and nutrients with permeable reactive barriers, in: Naftz D. L., Morrison S. J., Davis J. A., Fuller C. C. (ed.), Handbook of groundwater remediation using permeable reactive barriers, Academic Press, San Diego, 1-15.
- Morrison S. J. (2003): Performance Evaluation of a Permeable Reactive Barrier Using Reaction Products as Tracers. *Environmental Science & Technology* 37(10): 2302-2309.
- Moyes L. N., Parkman R. H., Charnock J. M., Vaughan D. J., Livens F. R., Hughes C. R., Braithwaite A. (2000): Uranium Uptake from Aqueous Solution by Interaction with Goethite, Lepidocrocite, Muscovite, and Mackinawite: An X-ray Absorption Spectroscopy Study. *Environmental Science & Technology* 34(6): 1062 - 1068.
- Muftikian, R., Fernando, Q., Korte, N. (1995): A method for the rapid dechlorination of low molecular weight chlorinated hydrocarbons in water. *Water Res.*, 29(10), 2434-2439.
- Muftikian, R., Nebesny, K., Fernando, Q., Korte, N. (1996): X-ray photoelectron spectra of the palladium-iron bimetallic surface used for the rapid dechlorination of chlorinated organic environmental contaminants. *Environ. Sci. Technol.*, 30(12), 3593-3596.
- Müller, A., A. Tiehm, S. Alt, J. Weiss, H. Schad, R. Klein, B. Schmitt-Biegel (2005): Biosorption barrier at a former tar factory in Offenbach - (2) Pilot field study on operation parameters of the bioreactor, *Proceedings ConSoil 2005 in Bordeaux, LeS D.5 Permeable Reactive Barriers - 1*, S. 2361-2364.
- Mulligan C. N., Yong R. N. (2004): Natural attenuation of contaminated soils. *Environment International* 30(4): 587-601.
- Munakata N., Cunningham A. R., Reinhard M., Ruiz R., Lebron C. (2002): Palladium catalysis in horizontal-flow treatment wells: Field-scale design and laboratory study. In *Remediation of chlorinated and recalcitrant compounds-2002*. [Electronic Resource] *Proceedings of the third international conference on remediation of chlorinated and recalcitrant compounds (Monterey, CA, May 2002)* (ed. A. Gavaskar & A. S. C. Chen), pp. Paper 2H-33. Battelle Press.
- Murakami T., Ohnuki T., Isobe H., Sato T. (1997): Mobility of uranium during weathering. *American Mineralogist* 82: 888-899.
- Murdoch, L., Slack, B., Siegrist, B., Vesper, S. and Meiggs, T. (1997): Advanced Hydraulic Fracturing Methods to Create In Situ Reactive Barriers. *International Containment Technology Conference, St. Petersburg, FA, USA*, 445-451.
- Mushovic P., Bartlett T., Morrison S. (2006): Hydraulic Conductivity Loss at the Monticello PRB Leads to Trial Use of Ex-Situ Treatment Cell. *Technology News and Trends* (23): 1-3.
- Naftz D. L., Fuller C. C., Davis J. A., Morrison S. J., Feltcorn E. M., Freethey G. W., Rowland R. C., Wilkowske C., Piana M. J. (2002a): Field demonstration of three permeable reactive barriers to control uranium contamination in groundwater, Fry Canyon, Utah, in: Naftz D. L., Morrison S. J., Davis J. A., Fuller C. C. (ed.), Handbook of groundwater remediation using permeable reactive barriers, Application to Radionuclides, Trace Metals and Nutrients, Academic Press, San Diego, 401-434.
- Naftz D. L., Fuller C. C., Davis J. A., Piana M. J., Morrison S. J., Freethey G. W., Rowland R. C. (2000a): Field demonstration of permeable reactive barriers to control uranium contamination in groundwater, in: Wickramanayake G. B., Gavaskar A. R., Chen A. S. C. (ed.), *Chemical Oxidation and Reactive Barriers - Remediation of chlorinated and recalcitrant compounds*, Battelle Press, Columbus, Richland, 281-289.

- Naftz D. L., Morrison S. J., Davis J. A., Fuller C. C. (2002b): Handbook of groundwater remediation using permeable reactive barriers, Application to Radionuclides, Trace Metals and Nutrients, Academic Press, San Diego.
- Naftz D. L., Morrison S. J., Felcorn E. M., Freethey G. W., Fuller C. C., Piana M. J., Wilhelm R. G., Rowland R. C., Davis J. A., Blue J. E. (2000b): Field demonstration of permeable reactive barriers to remove dissolved uranium from groundwater, Fry Canyon, Utah. U.S. Environmental Protection Agency und US Geological Survey, Water Resources of Utah, Interim Report September 1997 through September 1998, EPA 402-C-00-001, Washington, D.C.
- Nam, S., Tratnyek, P. G. (2000): Reduction of dyes with zero-valent iron. *Water Res.*, 34(6), 1837-1845.
- National Research Council. (1994): Alternatives for Groundwater Clean up/Committee on Groundwater Clean up Alternatives., National Academy Press, Washington, D.C., 336 p.
- Nelson D. K., Hozalski R. M., Clapp L. W., Semmens M. J., Novak P. J. (2002): Effect of nitrate and sulfate on dechlorination by a mixed hydrogen-fed culture. *Biorem. J.* 6, 225-236.
- Nemecz, E. (1973): *Agyagásványok*. Akadémiai Kiadó. Budapest. 507 p.
- Neurath, S. K., Ferguson, W. J., Dean, S. B., Foose, D., Agrawal, A. (1997): Rapid and complete dehalogenation of chlorinated phenols by Fe-Pd bimetallic reductants in bench-scale reactors: Implications for soil and ground water remediation. Preprints of Extended Abstracts presented at the ACS National Meeting, American Chemical Society, Division of Environmental Chemistry, 37(1), 159-161.
- Niederbacher (2003): <<http://www.geol.at/>> (11. November 2003)
- Niederbacher P., Nahold M. (2005): Installation and operation of an adsorptive reactor and barrier (AR&B) system in Brunn am Gebirge, Austria, in: Roehl K. E., Meggyes T., Simon F. G., Stewart D. I. (ed.), Long-term performance of permeable reactive barriers, Trace metals and other contaminants in the environment, Bd. 7, Elsevier, Amsterdam, 283-309.
- Niederbacher, P. (2000): Site Adapted Solutions, In-situ Groundwater Remediation Brunn a. G., Austria. ETCA Workshop on the Protection of European Water Resources: Contaminated Sites-Landfills-Sediments, Progress Review, June 21-23, 2000, Venice, Italy, J. Büsing, P. Cortesi, P. Krejsa and P. Maggiorotti, eds., 253-254.
- Niederbacher, P. (2001): Monitoring Long-term Performance of Permeable Reactive Barriers Used for the Remediation of Contaminated Groundwater. SENSOPOL Workshop Sensing Technologies for Contaminated Sites and Groundwater, May 9-11, 2001, University of Alcalá, Madrid, Spain, 193-208.
- Nikolaidis N. P., Dobbs G. M., Lackovic J. A. (2003): Arsenic removal by zero-valent iron: field, laboratory and modeling studies. *Water Research* 37(6): 1417-1425.
- Nolan, B. T., Ruddy, B. C., Hit, K. J., Helsel, D. R. (1997): Risk of nitrate in groundwaters of the United States - a national perspective. *Environ. Sci. Technol.*, 31(8), 2229-2236.
- Nordlohne, L., Wienberg, R., Friedrich, W. (1997): Als Sicherungssysteme geeignete Sorptions- oder Reaktionswände sowie neuere Sanierungskonzepte nach dem "Funnel and Gate"-Prinzip. Vorgutachten zu neuen, angepassten Sanierungstechniken im Fall Essenrode. Studie für die Volkswagen Aktiengesellschaft. 59 p
- Noubactep C. (2003): Untersuchungen zur passiven in-situ-Immobilisierung von U(VI) aus Wasser. Wissenschaftliche Mitteilungen des Instituts für Geologie der TU Bergakademie Freiberg. Bd. Band 21, Institut für Geologie Freiberg.
- Noubactep C., Meinrath G., Dietrich P., Merkel B. (2003): Mitigating Uranium in Groundwater: Prospects and Limitations. *Environmental Science & Technology* 37(18): 4304-4308.
- Noubactep C., Meinrath G., Merkel B. J. (2005): Investigating the mechanism of uranium removal by zerovalent iron. *Environmental Chemistry* 2(3): 235-242.
- Noubactep C., Schöner A., Meinrath G. (2006): Mechanism of uranium removal from the aqueous solution by elemental iron. *Journal of Hazardous Materials B132(2-3)*: 202-212.
- Novak, P. J., Daniels, L., Parkin, G. F. (1998b): Enhanced dechlorination of carbon tetrachloride and chloroform in the presence of elemental iron and *Methanosarcina barkeri*, *Methanosarcina thermophila*, or *Methanosaeta concillii*. *Environ. Sci. Technol.*, 32(10), 1438-1443.
- Novak, P. J., Daniels, L., und Parkin, G. F. (1998a): Rapid dechlorination of carbon tetrachloride and chloroform by extracellular agents in cultures *Methanosarcina thermophila*. *Environ.Sci. Technol.*, 32, 3132-3136.
- Nriagu J. O., Moore P. B. (1984): *Phosphate Minerals*, Springer-Verlag, Berlin.

- Odziemkowski M. S., Gui L., Gillham R. W. (2000): Reduction of N-nitrosodimethylamine with granular iron and nickel-enhanced iron. 2. Mechanistic studies. *Environ. Sci. Technol.* 34, 3495-3500.
- Odziemkowski M. S., Schuhmacher T. T., Gillham R. W., Reardon E. J. (1998): Mechanism of oxide film formation on iron in simulating groundwater solutions: raman spectroscopic studies. *Corros. Sci.* 40, 371-389.
- OECD / NEA (2001): Uranium 2001: Resources, Production and Demand; A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency, OECD Publications Paris.
- Oeste, F. D., Kempfert, J. (1994): Barriere und Verfahren zu ihrer Herstellung. Patent No. DE 4443828 A1, Dec. 9, 1994.
- Oh B.-T., Just C. L., Alvarez P. J. J. (2001): Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine mineralization by zerovalent iron and mixed anaerobic cultures. *Environ. Sci. Technol.* 35, 4341-4346.
- O'Hannesin S. F., Gillham R. W. (1998): Long-term performance of an in situ "iron wall" for remediation of VOCs. *Ground Water* 36(1/2): 164.
- O'Hannesin, S. F. (2002): In Situ Monitoring of the Ten-Year Old PRB at CFB Borden, Ontario. <<http://www.rtdf.org/public/permbarr/minutes/110702/summary.html>> (Jan 1st, 2004)
- O'Hannesin, S. F., Gillham, R. W. (1998): Long-term Performance of an In Situ Iron Wall for Remediation of VOCs. *Ground Water Monitor. Rem.*, 36(1), 164-170.
- O'Hara S., Krug T., Major D., Quinn J., Geiger C., Clausen C., Yoon S. (2003): Performance evaluation of dehalogenation of DNAPLs using emulsified zero-valent iron. RTDF Permeable Reactive Barriers (PRBs) Action Team Meeting. Oct. 15-16, 2003, Niagara Falls, NY: 211-228, <http://www.rtdf.org/public/permbarr/minutes/101603/index.htm>.
- Ohnuki T., Kozai N., Samadfam M., Yasuda R., Yamamoto S., Narumi K., Naramoto H., Murakami T. (2004): The formation of autunite (Ca(UO₂)₂(PO₄)₂.nH₂O) within the leached layer of dissolving apatite: incorporation mechanism of uranium by apatite. *Chemical Geology* 211(1-2): 1-14.
- O'Loughlin E. J., Kelly S. D., Cook R. E., Csencsits R., Kemner K. M. (2003): Reduction of Uranium(VI) by Mixed Iron(II)/Iron(III) Hydroxide (Green Rust): Formation of UO₂ Nanoparticles. *Environmental Science & Technology* 37(4): 721 -727.
- Olowe A. A., Genin J. M. R. (1991): The mechanism of oxidation of ferrous hydroxide in sulphated aqueous media: Importance of the initial ratio of the reactants. *Corrosion Science* 32(9): 965-984.
- Orth W. S., Gillham R. W. (1996): Dechlorination of trichloroethene in aqueous solution using Fe⁰. *Environ. Sci. Technol.* 30, 66-71.
- Orth, R. G., Dauda, T., McKenzie, D. E. (1998): Reductive dechlorination of trichloroethylene by iron bimetallics. *Water Resources and the Urban Environment-98. Proc., Nat. Conf. on Environ. Eng., T. S. Wilson, ed., ASCE, Chicago, IL, 122-127.*
- Orth, W.S. & Gillham, R.W. (1995): Chloride and Carbon Balances for Iron-Enhanced Degradation of Trichloroethylene. 209th American Chemical Society National Meeting. Anaheim, C.A. Division of Environmental Chemistry Preprints of Papers, Vol. 35, No. 13 p 815-817.
- Ott N. (2000): Permeable Reactive Barriers for Inorganics. U.S. Environmental Protection Agency, Internet Report, [tdott_prb.pdf on http://www.clu-in.org](http://www.clu-in.org), Washington, DC.
- Overall R. A., Parry D. L. (2004): The uptake of uranium by *Eleocharis dulcis* (Chinese water chestnut) in the Ranger Uranium Mine constructed wetland filter. *Environmental Pollution* 132(2): 307-320.
- Owen D. E., Otton J. K. (1995): Mountain wetlands: Efficient uranium filters -- potential impacts. *Ecological Engineering* 5(1): 77-93.
- Pabalan R. T., Turner D. R., Bertetti F. P., Prikryl J. D. (1998): Uranium(IV) sorption onto selected mineral surfaces, in: Jenne E. A. (ed.), *Adsorption of Metals by Geomedia: Variables, Mechanisms and Model Applications*, Academic Press, San Diego, 99-130.
- Panias D., Xenidis A., Krestou A. (2005): Materials and processes for uranium removal from contaminated water, in: Roehl K. E., Meggyes T., Simon F. G., Stewart D. I. (ed.), *Long-term performance of permeable reactive barriers, Trace metals and other contaminants in the environment*, Bd. 7, Elsevier, Amsterdam, 53-75.
- Parbs, A., (2005): Dissertation, Universität Kiel.
- Parbs, A., Ebert, M., Dahmke, A. (sajtó alatt): Investigation of the Long-Term Influence of Carbonate Species on the Kinetics and Reactivity of Granular Iron in Column experiments. *Environ. Sci. Technol.*

- Parbs, A., Ebert, M., Köber, R., Plagentz, V., Dahmke, A. (2005): Field application of reactive tracers for performance assessment of Fe(0) PRBs. In: Gavaskar, A. R., und Chen, A. S. C., eds., (2005): Remediation of chlorinated and recalcitrant compounds - 2004 (CD-Rom), Battelle Press, Columbus, Ohio, 3A-31.
- Parbs, A., Ebert, M., Köber, R., Plagentz, V., Schad, H., Dahmke, A. (2003): Einsatz reaktiver Tracer zur Bewertung der Langzeitstabilität und Reaktivität von Fe(0)-Reinigungswänden. Grundwasser 3, 146-156.
- Parkhurst D. L., Appelo C. A. J. (1999): User Guide to Phreeqc (version 2), A Computer Program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations. US Geological Survey, Water-Resources Investigations Report, 99-4529, Denver.
- Patterson R. R., Fendorf S., Fendorf M. (1997): Reduction of hexavalent chromium by amorphous iron sulfide. Environ. Sci. Technol. 31, 2039-2044.
- Paul C. J., McNeil M. S., Beck F. P. J., Clark P. J., Wilkin R. T., Puls R. W. (2003): Capstone Report on the Application, Monitoring, and Performance of Permeable Reactive Barriers for Ground-Water Remediation: Volume 2 - Long-Term Monitoring of PRBs: Soil and Ground Water Sampling. U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-03/045b, Cincinnati, Ohio.
- Payne T. E. (1999): Uranium (VI) interactions with mineral surfaces :controlling factors and surface complexation modelling, University of New South Wales, PhD Thesis, <http://www.library.unsw.edu.au/~thesis/adt-NUN/public/adt-NUN20001215.143254/index.html>
- Payne T. E., Davis J. A., Waite T. D. (1996): Uranium adsorption on ferrihydrite - effects of phosphate and humic acid. Radiochimica Acta 74: 239-243.
- Payne T. E., Lumpkin G. R., Waite T. D. (1998): Uranium VI adsorption on model minerals: controlling factors and surface complexation modeling, in: Jenne E. A. (ed.), Adsorption of Metals by Geomedia: Variables, Mechanisms and Model Applications, Academic Press, San Diego, 75-97.
- Payne T. E., Waite T. D. (1991): Surface complexation modeling of uranium sorption data obtained by isotope exchange techniques. Radiochimica Acta 52/53(2): 487-493.
- Pearson F. H., McDonnell A. J. (1975): Limestone barriers to neutralize acid streams. Journal of the Environmental Engineering Division EE3: 425-441.
- Pecher K., Haderlein S. B., Schwarzenbach R. P. (2002): Reduction of polyhalogenated methanes by surface-bound Fe(II) in aqueous suspension of iron oxides. Environ. Sci. Technol. 36, 1734-1741.
- Pecher, K., Haderlein, S. B., Schwarzenbach, R. P. (1997): Transformation of polyhalogenated alkanes in suspensions of ferrous iron oxides. Preprints of Extended Abstracts presented at the ACS National Meeting, American Chemical Society, Division of Environmental Chemistry, 37(1):
- Peld M., Tonsuaadu K., Bender V. (2004): Sorption and Desorption of Cd²⁺ and Zn²⁺ Ions in Apatite-Aqueous Systems. Environmental Science & Technology 38(21): 5626-5631.
- PEREBAR (2002): <<http://www.perebar.bam.de>, http://www.agk.unikarlsruhe.de/projekte/projekte_ing/roehl/perebar.html> (September 2002)
- Perey J. R., Chiu P. C., Huang C.-P., Cha D. K. (2002): Enhanced biodegradability of azodyes through pretreatment with elemental iron. In: Remediation of chlorinated and recalcitrant compounds-2002. [Electronic Resource] Proceedings of the third international conference on remediation of chlorinated and recalcitrant compounds. (Monterey, CA, May 2002) (ed. A. Gavaskar & A. S. C. Chen), pp. Paper 2F-07. Battelle Press.
- Peterson, M. L., White, A. F., Brown, G. E., Parks, G. A. (1997): Surface passivation of magnetite by reaction with aqueous Cr(VI): XAFS and TEM results. Environ. Sci. Technol., 31(5), 1573-1576.
- Phillips D. H., Gu B., Watson D. B., Roh Y. (2003): Impact of sample preparation on mineralogical analysis of zero-valent iron reactive barrier materials. J. Environ. Qual. 32, 1299-1305.
- Phillips D. H., Gu B., Watson D. B., Roh Y., Liang L., Lee S. Y. (2000): Performance Evaluation of a Zerovalent Iron Reactive Barrier: Mineralogical Characteristics. Environmental Science & Technology 34(19): 4169-4176.
- Plagentz V., Schäfer D., Ebert M., Köber R., Dahmke A. (2004): Potential for natural attenuation processes downstream of permeable reactive barriers. Permeable Reactive Barriers - First International Symposium. 14.-16. Mrz. 2004, Belfast.
- Plagentz, V. (2005): Ansätze zur Erweiterung des Anwendungsspektrums reaktiver Wände – Optimierung von Kombinationsreaktionswänden und Nutzung schadstoffabbauender Prozesse im abstromigen Aquifer. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, p 80.

- Plagentz, V., Ebert, M., Dahmke, A. (2005): CKW-Abbaupotential im Abstrom von Fe(0)-Reinigungswänden. *Grundwasser*, 10 (4), 216-226
- Plagentz, V., Ebert, M., Dahmke, A. (2006): Remediation of ground water containing chlorinated and brominated hydrocarbons, benzene and chromate by sequential treatment using ZVI and GAC. - *Environmental Geology*, 49 (5), 684-695.
- Plagentz, V., Schäfer, D., Ebert, M., Köber, R., Dahmke, A. (2005): Potential for natural attenuation processes downgradient of permeable reactive barriers. In: Gavaskar, A. R., and Chen, A. S. C., eds., (2005): Remediation of chlorinated and recalcitrant compounds – 2004 (CD-Rom), Battelle Press, Columbus.
- Plagentz, V., Schäfer, D., Köber, R., Dethlefsen, F., Ebert, M., Dahmke, A. (sajtó alatt): pH-Wertpufferung im Abstrom von Reinigungswänden. *Grundwasser*.
- Plant J., Simpson P. R., Smith B., Windley B. F. (1999): Uranium ore deposits: products of the radioactive earth, in: Burns P. C., Finch R. J. (ed.), *Uranium: mineralogy, geochemistry and the environment*, Reviews in Mineralogy, Bd. 38, American Chemical Society, Washington, D.C., 255-319.
- Pollmann K., Raff J., Merroun M., Fahmy K., Selenska-Pobell S. (2006): Metal binding by bacteria from uranium mining waste piles and its technological applications. *Biotechnology Advances* 24(1): 58-68.
- Pon G., Hyman M. R., Semprini L. (2003): Acetylene inhibition of trichloroethene and vinyl chloride reductive dechlorination. *Environ. Sci. Technol.* 37, 3181-3188.
- Ponder S. M., Darab J. G., Mallouk T. E. (2000): Remediation of Cr(VI) and Pb(II) aqueous solutions using supported nanoscale zero-valent iron. *Environ. Sci. Technol.* 34, 2564-2569.
- Posner A., Blumenthal N. C., Betts F. (1984): Chemistry and structure of precipitated hydroxyapatites, in: Nriagu J. O., Moore P. B. (ed.), *Phosphate Minerals*, Springer-Verlag, Berlin, 330-350.
- Powell, R.M., Puls, R.W., Hightower, S.K., Sabatini, D.A. (1995 a): Coupled Iron Corrosion and Chromate Reduction: Mechanisms for Subsurface Remediation. *Environ. Sci. Technol.*, 29, No. 8, p 1913-1922.
- Powell, R.M., Puls, R.W., Hightower, S.K., Clark, D.A. (1995 b): Corrosive and Geochemical Mechanisms Influencing In Situ Chromate Reduction by Metallic Iron. 209th American Chemical Society National Meeting, Anaheim, C.A. Division of Environmental Chemistry Preprints of Papers, Vol. 35, No. 1, p 784-787.
- Powell, R. M., Puls, R. W., Hightower, S. K., Sabatini, D. A. (1997): Proton generation by dissolution of intrinsic or augmented aluminosilicate minerals for in situ contaminant remediation by zero-valence-state iron. *Environ. Sci. Technol.*, 31(8), 2244-2251.
- Powell R. M., Puls R. W., Blowes D. W., Vogan J. L., Gillham R. W., Powell P. D., Schultz D., Landis R., Sivavec T. (1998): Permeable reactive barrier technology for contaminant remediation, pp. 94. U.S. EPA, Ada, OK. Sept. 1998. EPA/600/R-98/125.
- Powell, R. M., Powell, P. D. (1998): Iron metal for subsurface remediation. *Encyclopedia of Environmental Analysis and Remediation*, R. A. Myers, ed., John Wiley and Sons, NY, 4729-4761.
- Powell, R. M., Puls, R. W. (1997): Permeable Reactive Subsurface Barriers for the Interception and Remediation of Chlorinated Hydrocarbon and Chromium(VI) Plumes in Ground Water. Report No. EPA/600/F-97/008.
- Powell & Associates (2002): <<http://www.powellassociates.com/sciserv/reftable/refzone.html>> (Dezember 2002)
- Powell R. M., Powell P. D., Puls R. W. (2002): Economic analysis of the implementation of permeable reactive barriers for remediation of contaminated groundwater, pp. 31. U.S. EPA, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH. Jun. 2002. EPA/600/R-02/034.
- Pratt A. R., Blowes D. W., Ptacek C. J. (1997): Products of Chromate Reduction on Proposed Subsurface Remediation Material. *Environmental Science & Technology* 31(9): 2492-2498.
- Prinz, H. (1997): *Abriss der Ingenieurgeologie*. Enke-Verlag, Stuttgart.
- Prommer, H. (2003): A Reactive Multicomponent Transport Model for Saturated Porous Media. User's Manual Version 1.0, 141 p
- Ptak, T., Schwarz, R., Holder, T., Teutsch, G. (2000): "Ein neues integrales Verfahren zur Quantifizierung der Grundwasserimmission, Teil II: Numerische Lösung und Anwendung in Eppelheim". *Grundwasser*, 4.
- Puls, R.W., Powell, R.M., Paul, C.J. (1995): In Situ Remediation of Ground Water Contaminated with Chromate and Chlorinated Solvents Using Zero-Valent-Iron: A Field Study. 209th American Chemical Society National Meeting. Anaheim, C.A. Division of Environmental Chemistry Preprints of Papers, Vol. 35, No. 1, p 788-791.

- Puls R. W., Paul C. J., Clark D. A. (1997): Remediation of chromate-contaminated groundwater using an in situ permeable reactive mixture: Field pilot test. Elizabeth City, North Carolina. 213th American Chemical Society National Meeting, Anaheim, CA. Division of Environmental Chemistry, 37: 241-243.
- Puls, R. W., Blowes, D. W., Gillham, R. W. (1999): Long-term performance monitoring for a permeable reactive barrier at the U.S. Coast Guard Support Center, Elizabeth City, North Carolina. *J. Hazard. Mater.*, 68(1-2), 109-124.
- Puls, R.W. (1996): The Application of Passive Groundwater Remediation Technologies in the U. In: *Passive Systeme zur In-situ-Sanierung von Boden und Grundwasser*. p 13-14. Workshop - Extended Abstracts, Dresden, Mai 2-3.
- Puls, R.W. (2001): Personal Communication
- Qafoku N. P., Zachara J. M., Liu C., Gassman P. L., Qafoku O. S., Smith S. C. (2005): Kinetic Desorption and Sorption of U(VI) during Reactive Transport in a Contaminated Hanford Sediment. *Environmental Science & Technology* 39(9): 3157-3165.
- Qiu S. R., Amrhein C., Hunt M. L., Pfeffer R., Yakshinskiy B., Zhang L., Madey T. E., Yarmoff J. A. (2001): Characterization of uranium oxide thin films grown from solution onto Fe surfaces. *Applied Surface Science* 181: 211-224.
- Qiu S. R., Lai H.-F., Roberson M. J., Hunt M. L., Amrhein C., Giancarlo L. C., Flynn G. W., Yarmoff J. A. (2000): Removal of Contaminants from Aqueous Solution by Reaction with Iron Surfaces. *Langmuir* 16(5): 2230-2236.
- Rabideau, A. J., Shen, P., Khandelwal, A. (1999): Feasibility of amending slurry walls with zero-valent iron. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 125(4), 330-333.
- Rael, J., Sheiton, S., Dayaye, R. (1995): Permeable Barriers to Remove Benzene: Candidate Media Evaluation. *J. of Environ. Engineering*, 121, No. 5, p 411-415.
- Raff O., Wilken R.-D. (1999): Removal of dissolved uranium by nanofiltration. *Desalination* 122(2-3): 147-150.
- Rahman A., Agrawal A. (1997): Reduction of nitrate and nitrite by iron metal: implications for groundwater remediation. 213th Am. Chem. Soc. Nat. Meeting: 157-159.
- Rai D., Sass B. M., Moore D. A. (1987): Chromium(III) hydrolysis constants and solubility of chromium(III) hydroxide. *Inorg. Chem.* 26, 345-349.
- Raicevic S., Kaludjerovic-Radoicic T., Zouboulis A. I. (2005): In situ stabilization of toxic metals in polluted soils using phosphates: theoretical prediction and experimental verification. *Journal of Hazardous Materials* 117(1): 41-53.
- Raicevic S., Wright J. V., Veljkovic V., Conca J. L. (2006): Theoretical stability assessment of uranyl phosphates and apatites: Selection of amendments for in situ remediation of uranium. *Science of The Total Environment* 355(1-3): 13-24.
- Rajagopal, B. S., Legall, J. (1989): Utilization of cathodic hydrogen by hydrogen-oxidizing bacteria. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 31(4), 406-412.
- Rajagopal, V. K., Burris, D. R. (1999): Reduction of 1,2-dibromoethane in the presence of zero-valent iron. *Environ. Toxicol. Chem.*, 18(8), 1779-1782.
- Rakovan J., Reeder R. J., Elzinga E. J., Cherniak D. J., Tait C. D., Morris D. E. (2002): Structural Characterization of U(VI) in Apatite by X-ray Absorption Spectroscopy. *Environmental Science & Technology* 36(14): 3114-3117.
- Rangsivek R., Jekel M. R. (2005): Removal of dissolved metals by zero-valent iron (ZVI): Kinetics, equilibria, processes and implications for stormwater runoff treatment. *Water Research* 39(17): 4153-4163.
- Raphael, T. (2001): Beschleunigte natürliche Selbstreinigung beim Einsatz von "Slow Release Compounds. 2. Symposium Natural Attenuation – Neue Erkenntnisse, Konflikte, Anwendungen, G. Kreysa, T. Track, J. Michels, J. Wiesner, eds., DECHEMA Ges. f. Chem. Technik und Biotechnologie e.V., Frankfurt am Main, 139-144.
- Rasmussen, G. (2002): Sorption and biodegradation of creosote compounds in permeable barriers. Doctor scientiarum thesis, Agricultural University of Norway, Ås.
- Raven, K. P., Jain, A., Loeppert, R. H. (1998): Arsenite and arsenate adsorption on ferrihydrite: kinetics, equilibrium, and adsorption envelopes. *Environ. Sci. Technol.*, 32(3), 344-349.

- Reardon E. J. (1995): Anaerobic corrosion of granular iron: measurement and interpretation of hydrogen evolution rates. *Environ. Sci. Technol.* 29, 2936-2945.
- Reincke H., Hurst S., Schneider P. (2002): Strategy Concept Elbe, in: Merkel B. J., Planer-Friedrich B., Wolkersdorfer C. (ed.), *Uranium in the Aquatic Environment*, Springer, Berlin, 41-47.
- Reynolds, G. W., Hoff, J. T., Gillham, R. W. (1990): Sampling bias caused by materials used to monitor halocarbons in groundwater. *Environ. Sci. Technol.*, 24(1), 135-142.
- Rhodes, F. H., Carty, J. T. (1925): The corrosion of certain metals by carbon tetrachloride. *Ind. Eng. Chem.*, 17, 909-911.
- Riche, A. (1862): *Ann. Chem. Pharm.*, 121, 357-361.
- Rifi M. R., Covitz F. H. (1974): *Introduction to organic chemistry*. Marcel Decker, New York.
- Rinehart K. L. J. (1973): *Oxidation and reduction of organic compounds*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Ring R. J., Holden P., McCulloch J. K., Tapsell G. J., Collier D. E., Russell R., Macnaughton S., Marshall K., Stimson D. (2004): Treatment of liquid effluent from uranium mines and mills during and after operation, in: IAEA International Atomic Energy Agency (ed.), *Treatment of liquid effluent from uranium mines and mills*, IAEA, Wien, 7-44.
- Ritter K., Odziemkowski M. S., Simpraga R., Gillham R. W., Irish D. E. (2003): An in situ study of the effect of nitrate on the reduction of trichloroethylene by granular iron. *J. Contam. Hydrol.* 65, 121-136.
- Ritter, K., Odziemkowski, M. S., Gillham, R. W. (2002): An in situ study of the role of surface films on granular iron in the permeable iron wall technology. *J. Contam. Hydrol.*, 55, 87-111.
- Rittmann E. B., Van Briesen J. M. (1996): Microbiological processes in reactive modeling. In *Reviews in Mineralogy - Reactive Transport in Porous Media*, Vol. 34 (ed. P. C. Lichtner, C. I. Steefel, E. H. Oelkers), pp. 311-334. The Mineralogical Society of America.
- Roberts, A. L., Totten, L. A., Arnold, W. A., Burris, D. R., Campbell, T. J. (1996): Reductive elimination of chlorinated ethylenes by zero-valent metals. *Environ. Sci. Technol.*, 30(8), 2654-2659.
- Robertson W. D., Blowes D. W., Ptacek C. J., Cherry J. A. (2000): Long-Term Performance of In Situ Reactive Barriers for Nitrate Remediation. *Ground Water* 38(5): 689-695.
- Robertson, A. P. and Leckie, J. O. (1998): Acid/base, copper binding, and $\text{Cu}^{2+}/\text{H}^{+}$ exchange properties of goethite, an experimental modeling study. *Environ. Sci. Technol.*, 32(17), 2519-2530.
- Robertson, W. D., Cherry, J. A. (1995): In situ denitrification of septic-system nitrate using reactive porous media barriers: Field trials. *Ground Water Monitor. Rem.*, 33(1), 99-111.
- Robertson, W. D., Jerry, J. A., Sudicky, E. A. (1991): Groundwater contamination from two small septic systems on sand aquifers. *Ground Water Monitor. Rem.*, 29, 82-92.
- Rochmes, M. (2000): Erste Erfahrungen mit Reaktiven Wänden und Adsorberwänden in Deutschland. *Boden und Altlasten Symposium 2000*, V. Franzius, H.-P. Lühr, und G. Bachmann, eds., Erich Schmidt Verlag, Berlin, 225-245.
- Rodatz, W. (1994): *Grundbau, Bodenmechanik, Unterirdisches Bauen*. Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Braunschweig.
- Roehl K. E., Czurda K., Meggyes T., Simon F. G., Stewart D. I. (2005a): Permeable reactive barriers, in: Roehl K. E., Meggyes T., Simon F. G., Stewart D. I. (ed.), *Long-term performance of permeable reactive barriers, Trace metals and other contaminants in the environment*, Bd. 7, Elsevier, Amsterdam, 1-25.
- Roehl, K. E., Czurda, K. (2001): Reaktive Wände - Langzeitverhalten und Standzeiten. *Altlasten 2001 – Neue Verfahren zur Sicherung und Sanierung, Beiträge zum Seminar 20.-21.06.01 in Karlsruhe*, Vol. 4, G. Burkhardt, T. Egloffstein, K. Czurda, eds., ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Karlsruhe, 27-36.
- Roehl, K. E., Czurda, K., Meggyes, T., Simon, F.-G., Stewart, D. I. (2005): Permeable Reactive Barriers. In: Roehl, K. E., Meggyes, T., Simon, F.-G., Stewart, D. I. (eds.): *Long-term performance of permeable reactive barriers*. 1 – 25.
- Roehl, K. E., Meggyes, T., Simon, F.-G., Stewart, D. I. (2005 - eds): *Long-term performance of permeable reactive barriers. Trace metals and other contaminants in the environment*. Vol. 7. (Series editor: J. O. Nriagu). Amsterdam – Boston – Heidelberg -London. Elsevier. p 326. ISBN: 0-444-52536-4

- Roehl, K. E.; Czurda, K.; Simon F.-G.; Meggyes, T. (2000): Long-term performance of permeable reactive barriers used for the remediation of contaminated groundwater (PEREBAR) – Objectives and Approaches. ETCA Workshop on the Protection of European Water Resources: Contaminated Sites-Landfills-Sediments. Progress Review. Venice, Italy, 21.-23. June 2000. p. 179-185
- Roig M. G., Manzano T., Diaz M. (1997): Biochemical process for the removal of uranium from acid mine drainages. *Water Research* 31(8): 2073-2083.
- Roig M. G., Manzano T., Diaz M., Pascual M. J., Paterson M., Kennedy J. F. (1995): Enzymically-enhanced extraction of uranium from biologically leached solutions. *International Biodeterioration & Biodegradation* 35(1-3): 93-127.
- Rosen, J. B. (1952): Kinetics of a fixed bed system for solid diffusion into spherical particles.- *The Journal of chemical physics*, 20 (3), 387-394.
- Rosen, M. J. (1989): *Surfactants and Interfacial Phenomena*. John Wiley and Sons, NY, 431 p.
- Rosenthal, H., 2004. *Biologische Prozesse in reaktiven Systemen mit elementarem Eisen und Tetrachlorethen*. Dissertation, TU Berlin, Berlin.
- Rosenthal, H., Adrian, L., Steiof, M. (2004): Dechlorination of PCE in the presence of Fe(0) enhanced by a mixed culture containing two Dehalococcoides strains. *Chemosphere*, 55(5), 661-669
- Rosentreter J. J., Quarder H. S., Smith R. W., McLing T. (1998): Uranium sorption onto natural sands as a function of sediment characteristics and solution pH, in: Jenne E. A. (ed.), *Adsorption of Metals by Geomedia: Variables, Mechanisms and Model Applications*, Academic Press, San Diego, 181-192.
- Roth, S. (1988): Eignung von Stahlspundwänden für Einkapselung von Altlasten. In: Franzius, V., Stegmann, R., Wolf, K. and Brandt, E. (ed.): *Handbuch der Altlastensanierung*, R. v. Deckers, Heidelberg.
- RTDF (2001): Permeable reactive barrier installation profiles. Remediation Technologies Development Forum, Permeable Reactive Barriers Action Team, <http://www.rtdf.org/public/permbarr/prbsumms/default.cfm>, letzter Zugriff am 11.09.2006.
- RUBIN (2006): <<http://www.rubin-online.de>> (1. Januar 2006):
- Ruby M. V., Davis A., Nicholson A. (1994): In Situ Formation of Lead Phosphates in Soils as a Method to Immobilize Lead. *Environmental Science & Technology* 28(4): 646 - 654.
- Rügner H., Finkel M., Kaschl A., Bittens M. (2006): Application of monitored natural attenuation in contaminated land management--A review and recommended approach for Europe. *Environmental Science & Policy* 9(6): 568-576.
- Ryan J. A., Zhang P., Hesterberg D., Chou J., Sayers D. E. (2001): Formation of Chloropyromorphite in a Lead-Contaminated Soil Amended with Hydroxyapatite. *Environmental Science & Technology* 35(18): 3798-3803.
- SAFIRA (2006): <<http://safira.ufz.de>> (1. Januar 2006)
- Sani R. K., Peyton B. M., Amonette J. E., Geesey G. G. (2004): Reduction of uranium(VI) under sulfate-reducing conditions in the presence of Fe(III)-(hydr)oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68(12): 2639-2648.
- Satapanajaru T., Shea P. J., Comfort S. D., Roh Y. (2003): Green rust and iron oxide formation influences metalochlor dechlorination during zerovalent iron treatment. *Environ. Sci. Technol.* 37, 5219-5227.
- Savvin S. B. (1961): Analytical use of arsenazo III, determination of thorium, zirconium, uranium and rare earth elements. *Talanta* 8: 673-685.
- Schad, H. (1996a): Prinzip und Vorteile von passiven Systemen zur Grundwassersanierung. In: *Passive Systeme zur In-situ-Sanierung von Boden und Grundwasser*. p 8-10. Workshop - Extended Abstracts, Dresden, Mai 2-3.
- Schad, H. (1996a): Prinzip und Vorteile von passiven Systemen zur Grundwassersanierung. Workshop: *Passive Systeme zur in-situ-Sanierung von Boden- und Grundwasser*, Dresden, Extended Abstract.
- Schad, H. (1996b): Gang durch den Trichter. *Entsorga-Mazin Entsorgungswirtschaft*. 5/96. p 100-105.
- Schad, H. (1996b): Praktische Fallbeispiele für die Anwendung passiver Sanierungstechnologien. 2. Workshop: *Passive Systeme zur in-situ Sanierung von Boden- und Grundwasser*, Tübingen, Extended Abstract, 29-34.
- Schad H., Teutsch G. (1998): Reaktive Wände - Aktueller Stand der Praxisanwendung. *Geotechnik* 21, 73-82.

- Schad, H., Grathwohl, P. (1998): Funnel-and-Gate systems for in-situ treatment for contaminated groundwater at former manufactured gas plant sites. NATO/CCMS Phase III meeting in Vienna, February 23 and 24, 1998 – Session on Treatment Walls, 56-65.
- Schad, H., Haist-Gulde, B., Klein, R., Maier, D., Maier, M., Schulze, B. (2000): Funnel-and-gate at the former manufactured gas plant in Karlsruhe: Sorption test results, hydraulic and technical design, construction. Proc., 7th Int. FZK/TNO Conf. on Contaminated Soil, Leipzig, Germany, 951-959.
- Schad, H. (2001): Innovative Abstromsanierung auf dem Gelände des Gewerbeparks Denkendorf. – Posterpräsentation, ITVA-Fachtagung „Reinigungswände im Vormarsch“ in Magdeburg.
- Schad, H., Klein, R., Stiehl, M., Schüth, C. (2003): Katalytische Hydrodechlorierung von LCKW im Rahmen der Abstromsicherung mittels D&G am Standort Denkendorf. - Grundwasser, 8(3), 140-145.
- Schad, H. (2005a): Performance of a full scale PRB in Germany: The Karlsruhe F&G System, Proceedings ConSoil 2005 in Bordeaux: Special Session (SpS) 6 Permeable Reactive Barriers (PRBs) p 2869.
- Schad H. (2004): Lessons Learned after 5 Years Application of PRBs in Germany. First International Symposium on Permeable Reactive Barrier, Belfast, Northern Ireland, 14-16 March, 2004.
- Schad, H. (2005b): Reaktive Wände - Praxiserfahrungen mit unterschiedlichen Systemen, in Egloffstein, Burkhardt Czurda: Tagungsband Altlasten 2005, ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Karlsruhe, p 115-124
- Schad, H., Klein, R., Alt, S., Weiss, J., Tiehm, A., Müller, A., Schmitt-Biegel, B. (2005): Biosorption barrier at a former tar factory in Offenbach - (1) An innovative concept for long-term in situ treatment of highly contaminated groundwater, Proceedings ConSoil 2005 in Bordeaux, LeS D.5 Permeable Reactive Barriers - 1, p 1482-1486.
- Schäfer, D., Schäfer, W., W. Kinzelbach (1998): Simulation of Reactive Processes Related to Biodegradation in Aquifers. 1. Structure of the 3D Reactive Transport Model.- J. Contaminant Hydrol. 31(1/2), 167-186.
- Schäfer D., Dahmke A., Kolditz O., Teutsch G. (2002): The Virtual Aquifers - concept as a tool for evaluating of exploration, remediation and monitoring strategies. In DFG Geochemical processes, conceptual models for reactive transport in soil and groundwater (ed. H. D. Schulz & G. Teutsch), pp. 154-172. Wiley-VCH.
- Schäfer D., Köber R., Ebert M., Dahmke A. (2002): Numerical modelling of the simultaneous degradation of TCE and cis-DCE by zero-valent iron. In Groundwater Quality: Natural and Enhanced Restoration of Groundwater Pollution (Proceedings of the Groundwater Quality 2001 Conference held at Sheffield, UK, June 2001), Vol. 275 (ed. S. F. Thornton & S. E. Oswald), pp. 441-445. IAHS Press.
- Schäfer D., Köber R., Dahmke A. (2003): Competing TCE and cis-DCE degradation kinetics by zero-valent iron - experimental results and numerical simulation. J. Contam. Hydrol. 65, 183-202.
- Schall, N. & Simmler-Hübenthal, H. (1994): Organophile Bentonite zur Sicherung von Altlasten. In: H.L. Jessberger (Hrsg.): 10. Bochumer Altlastenseminar: Sicherung von Altlasten p 203 - 212, Balkema, Rotterdam.
- Scheffer, F. & Schachtschabel, P. (1989): Lehrbuch der Bodenkunde. 491 p, Enke Verlag, Stuttgart.
- Scherer M. M., Tratnyek P. G. (1995): Dechlorination of carbon tetrachloride by iron metal: effect of reactant concentration. 209th American Chemical Society National Meeting, Anaheim, C. A., 35 (1): 805-806.
- Scherer, M. M., Westall, J. C., Ziomek-Moroz, M., Tratnyek, P. G. (1997): Kinetics of carbon tetrachloride reduction at an oxide-free iron electrode. Environ. Sci. Technol., 31(8), 2385-2391.
- Scherer M. M., Balko B. A., Tratnyek P. G. (1998): The role of oxides in reduction reactions at the metal-water interface. In Kinetics and mechanisms of reactions at the mineral/water interface, Vol. 715 (ed. D. L. Sparks & T. Grundl), pp. 301-322. American Chemical Society.
- Scherer, M. M., Balko, B. A., Gallagher, D. A., Tratnyek, P. G. (1998): Correlation Analysis of Rate Constants for Dechlorination by Zero-Valent Iron. Environ. Sci. Technol., 32(19), 3026-3033.
- Scherer, M. M., Westall, J. C., Tratnyek, P. G. (1999): The kinetics of nitro reduction by iron metal: A case of mixed control. Preprints of Extended Abstracts presented at the ACS National Meeting, American Chemical Society, Division of Environmental Chemistry, 39(1), 346-348.
- Scherer M. M., Richter S., Valentine R. L., Alvarez P. J. J. (2000): Chemistry and microbiology of permeable reactive barriers for in situ groundwater clean up. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 30, 363-411.
- Scherer M. M., Johnson K. M., Westall J. C., Tratnyek P. G. (2001): Mass transport effects on the kinetics of nitrobenzene reduction by iron metal. Environ. Sci. Technol. 35, 2804-2811.

- Schimmelpfennig S. (2003): Entwicklung einer Durchflussmethode zur photometrischen Uranbestimmung. Institut für Technischen Umweltschutz, Fachgebiet Umweltchemie, Technische Universität Berlin, Studienarbeit
- Schimmelpfennig S. (2004): Untersuchungen zur Uranadsorption an Metalloxiden. Institut für Technischen Umweltschutz, Fachgebiet Wasserreinhaltung, Technische Universität Berlin, Diplomarbeit
- Schindler, P. W. (1990): Co-adsorption of metal ions and organic ligands: formation of ternary surface complexes. Mineral-water interface geochemistry, M. J. Hochella and A. F. White, eds., Mineralogical Society of America, Washington, D.C., 281-307.
- Schipper L. A., Barkle G. F., Hadfield J. C., Vojvodic-Vukovic M., Burgess C. P. (2004): Hydraulic constraints on the performance of a groundwater denitrification wall for nitrate removal from shallow groundwater. *Journal of Contaminant Hydrology* 69(3-4): 263-279.
- Schipper L. A., Vojvodic-Vukovic M. (2001): Five years of nitrate removal, denitrification and carbon dynamics in a denitrification wall. *Water Research* 35(14): 3473-3477.
- Schipper, L., Vojvodic-Vukovic, M. (1998): Nitrate removal from groundwater using a denitrification wall amended with sawdust: field trial. *J. Environ. Qual.*, 27(3), 664-668.
- Schlegel H. G. (1992): Allgemeine Mikrobiologie. pp. 634. Thieme, Stuttgart. Schlicker O. (1999): Der Einfluß von Grundwasserinhaltsstoffen auf die Reaktivität und Langzeitstabilität von Fe(0)-Reinigungswänden. Dissertation, Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität. 89 P.
- Schlicker O., Ebert M., Fruth M., Weidner M., Wüst W., Dahmke A. (2000): Degradation of TCE with iron: The role of competing chromate and nitrate reduction. *Groundwater* 38, 403-409.
- Schlicker O., Ebert M., Schad, H., Wüst W., Dahmke A. (1998): Geochemische Modellierungen zur Abschätzung der Gewässergüte im Abstrom von Fe0-Reaktionswänden. *Terra-Tech*, 1/1998, 43-46.
- Schlimm, C. (1995): Reduktive Dehalogenierung chlorierter Kohlenwasserstoffe mit Metallen in wäßrigen Medien. Dissertation, Universität Frankfurt am Main.
- Schlimm, C., Heitz, E. (1996): Development of a wastewater treatment process: Reductive dehalogenation of chlorinated hydrocarbons by metals. *Environ. Prog.*, 15(1), 38-47.
- Schmidt, B. (1993): Adsorption von leichtflüchtigen Chlorkohlenwasserstoffen (LCKW) an organophilisierten Bentoniten. Diss. TH Karlsruhe, 189 p, Karlsruhe.
- Schneider, M. (2002): Remediation of chromium-contaminated groundwater in subsurface Eisen reactor systems. *Advanced Groundwater Remediation Active and Passive Technologies*, F. G. Simon, T. Meggyes, C. McDonald, eds., Thomas Telford Publishing, London, 37-44.
- Schnoor, J. L. (1996): *Environmental Modeling*. John Wiley and Sons, NY, 682 p.
- Scholz-Muramatsu H., Neumann A., Messmer M., Moore E., Diekert G. (1995): Isolation and characterization of *Dehalospirillum multivorgans* gen. nov., sp. nov., a tetrachloroethaneutilizing, strictly anaerobic bacterium. *Arch. Microbiol.* 163, 48-56.
- Schreier, C.G. & Reinhard, M. (1995a): Catalytic Hydrodehalogenation of Chlorinated Ethylenes Using Palladium and Hydrogen for Treatment of Contaminated Water. *Chemosphere*, 31, No. 6, p 3475- 3487.
- Schreier, C.G. & Reinhard, M. (1995b): Transformation of Chlorinated Ethylenes by Iron Powder in 4-(2-Hydroxyethyl)-1-Piperazineethansulfonic Acid (HEPES) Buffer. 209th American Chemical Society National Meeting. Anaheim, C.A. Division of Environmental Chemistry Preprints of Papers, Vol. 35, No. 1, p 833-835.
- Schultze, B. and Mußotter, T. (2001): Sanierung des ehemaligen Gaswerksgeländes Karlsruhe-Ost mit funnel-and-gate (Aktivkohle). In: Burkhardt, G., Egloffstein, T., Czurda, K. (ed.), *ALTLASTEN 2001 - Neue Verfahren zur Sicherung und Sanierung*, Conference Proceedings Vol. 4, ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Karlsruhe, 47-58.
- Schulze, B. (1992): Injektionssohlen - Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit. Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Report, No. 126.
- Schüth, C., Kummer, S., Kraft, S. (2000): Zeolite based catalysts for the hydrodehalogenation of chlorinated compounds in groundwater. *SAFIRA Abstracts of the Workshop of November 17-18, 1999, Bitterfeld/Germany*. UFZ-Bericht 23, H. Weiß, H. Rijnaarts, S. Staps, P. Merkel, eds., Leipzig, Germany, 58-61.
- Schüth, C., Reinhard, M. (1998): Hydrodechlorination and Hydrogenation of Aromatic Compounds over Palladium on Alumina in Hydrogen-saturated Water. *Appl. Catal. B: Environ.*, 18(3-4), 215-221.

- Schwarzenbach, R. P., Gschwend, P. M., Imboden, D. M. (1993): *Environmental Organic Chemistry*, John Wiley and Sons, NY, 255-341.
- Schwarzenbach, R. P., Westall, J. (1981): Transport of nonpolar organic compounds from surface water to groundwater. Laboratory sorption studies. *Environ. Sci. Technol.*, 15(11), 1360-1367.
- Seaman J. C., Meehan T., Bertsch P. M. (2001): Immobilization of Cesium-137 and Uranium in Contaminated Sediments Using Soil Amendments. *Journal of Environmental Quality* 30(4): 1206-1213.
- Seitz, J. (1987): Zementfreie Dichtwandmasse. Großversuch zur baupraktischen Anwendung. *Baustoff-Recycling*, 5, 2-3.
- Selim H. M., Amacher M. C. (1988): A second-order kinetic approach for modelling solute retention and transport in soils. *Wat. Res. Res.* 24, 2061-2075.
- Selim H. M., Amacher M. C., Iskandar I. K. (1990): Modeling the transport of heavy metals in soils. U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Res. and Engineering Lab 90, 157.
- Senko J. M., Istok J. D., Suflita J. M., Krumholz L. R. (2002): In-Situ Evidence for Uranium Immobilization and Remobilization. *Environmental Science & Technology* 36(7): 1491-1496.
- Sharma, D. C., Forster, C. F. (1993): Removal of hexavalent chromium using sphagnum moss peat. *Wat. Res.*, 27(7), 1201-1208.
- Sharp, R.R. and Cunningham, A. (1998): *Fundamentals of Biobarriers, Design, Development and Activity*. Subsurface Barrier Technology Conference, Tucson, AZ, USA, International Business Communications.
- Shelp, G. S., Chesworth, W., Spiers, G. (1995): The amelioration of acid mine drainage by an in situ electrochemical method – I. Employing scrap iron as the sacrificial anode. *Appl. Geochem.*, 10(6), 705-713.
- Sheng, G., Xu, S., Boyd, S. (1996): Mechanism(s) controlling sorption of neutral organic contaminants by surfactant-derived and natural organic matter. *Environ. Sci. Technol.*, 30(5), 1553-1557.
- Shevade A. V., Erickson L., Pierzynski G., Jiang S. (2001): Formation and Stability of Substituted Pyromorphite: A Molecular Modeling Study. *Journal of Hazardous Substance Research* 3(2): 1-12.
- Shoemaker, S.H., Greiner, J.F., Gillham, R.W., Blowes, D., Burris, D.R., Grathwohl, P., Jefferis, S., Mackenzie, P., Marozas, D.C., McCutcheon, S., Morrison, S., Orth, R., Paulson, S., Phifer, M., Puls, R.W., Schultz, D., Teutsch, G., Thomson, B., Warner, S.D. (1995): Permeable Reactive Barriers. In: Rumer, R.R., Mitchell, J.K. (Hrsg.). *Assessment of Barrier Containment Technologies: A Comprehensive Treatment for Environmental Remediation Applications*. p 301-353. International Containment Technology Workshop, Baltimore, Maryland, August 29-31.
- Shokes T. E., Möller G. (1999): Removal of Dissolved Heavy Metals from Acid Rock Drainage Using Iron Metal. *Environmental Science & Technology* 33(2): 282-287.
- Siantar, D.P., Schreier, C.G., Reinhard, M. (1995): Transformation of the Pesticide 1,2-Dibromo-3-Chloropropane (DBCP) and Nitrate by Iron-Powder and by H₂/Pd/A'203. 209th American Chemical Society National Meeting. Anaheim, C.A. Division of Environmental Chemistry Preprints of Papers, Vol. 35, No. 1, p 745-748.
- Sigg, L., Stumm, W. (1996): *Aquatische Chemie*, Vdf Hochschulverlag AG, Zürich, 498 p
- Simon F.-G., Biermann V., Csövári M., Csicsák J. (2003a): Uranium removal using elemental iron and hydroxyapatite in permeable reactive barriers, 8th International Mine Water Association Congress, Johannesburg, Republic of South Africa, Armstrong D., Villiers d., Abraham B., Kleinmann R. L. P., McCarthy T. S., Norton P. J. (ed.), IMWA, 43-55.
- Simon F.-G., Meggyes T. (2000): Removal of Organic and Inorganic Pollutants from Groundwater Using Permeable Reactive Barriers, Part 1. Treatment processes for pollutants. *Land Contamination & Reclamation* 8(2): 103-116.
- Simon F.-G., Segebade C., Hedrich M. (2003b): Behaviour of uranium in iron-bearing permeable reactive barriers: investigation with ²³⁷U as a radioindicator. *The Science of The Total Environment* 307(1-3): 231-238.
- Simon, F.-G., Ludwig, S., Meggyes, T., Stewart, D. I., Roehl, K. E. (2005): Regulatory and Economic Aspects. In: Roehl, K. E., Meggyes, T., Simon, F.-G., Stewart, D. I. (eds.): *Long-term performance of permeable reactive barriers*. 311 – 321.

- Simon, F.-G., Meggyes, T., Czurda, K., Roehl, K. E. (2003): Langzeitbeständigkeit von permeablen reaktiven Wänden zur Sanierung kontaminierter Grundwässer (Long-term performance of permeable reactive barriers for groundwater remediation). *Altlasten (Contaminated land)*. 12. 2003. No. 6. 283 – 290.
- Simon, F.-G., Meggyes, T., McDonald, C. (2002 - eds.): *Advanced groundwater remediation. Active and passive technologies*. London: Thomas Telford. 2002, p. 356 (www.ttbooks.co.uk/advanced-groundwater-remediation)
- Simon, F.-G., Meggyes, T., Tünnermeier, T. (2001): Evaluation of long-term aspects of passive groundwater remediation techniques. *Proceedings IMAGE-TRAIN Cluster Meeting, Karlsruhe, 6.-9. November 2001*. p. 145-150.
- Simon, F.-G., Meggyes, T., Tünnermeier, T. (2002): Groundwater remediation using active and passive processes. In: Simon, F.-G., Meggyes, T. and McDonald, C. (ed.), *Advanced groundwater remediation - Active and passive technologies*, Thomas Telford, London, 3-34.
- Simon, F.-G., Meggyes, T., Tünnermeier, T., Czurda, K., Roehl, K. E. (2001): Long-term Behaviour of Permeable Reactive Barriers used for the Remediation of Contaminated Groundwater. *Radioactive Waste Management and Environmental Remediation – ASME 2001 (ICEM'01 Proc. 8th Int. Conf.)*, A. Taboas, R. VanBrabant, G. Benda, eds., The American Society of Mechanical Engineers, New York., Bruges, Belgium, 637-641.
- Simon, F.-G.; Meggyes, T. (2001): Permeable reactive barriers for pollutant removal from groundwater. *Forschungsbericht 245. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Berlin. Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft. Bremerhaven*. p. 30.
- Singer E., Matucha M. (1962): Erfahrungen mit der Bestimmung von Uran in Erzen und Gesteinen mit Arsenazo III. *Zur Analytischen Chemie* 191: 248-253.
- Singh J., Comfort S. D., Shea P. J. (1999): Iron-mediated remediation of RDX-contaminated water and soil under controlled Eh/pH. *Environ. Sci. Technol.* 33, 1488-1494.
- Singh, J., Comfort, S. D., Shea, P. J. (1998): Remediating RDX-contaminated water and soil using zero-valent iron. *J. Environ. Qual.*, 27(5), 1240-1245.
- Singh, J., Shea, P. J., Hundal, L. S., Comfort, S. D., Zhang, T. C., Hage, D. S. (1998): Iron-enhanced remediation of water and soil containing atrazine. *Weed Sci.*, 46(3), 381-388.
- Sivavec T. M., Horney D. P. (1995): Reductive dechlorination of chlorinated ethenes by iron metal. 209th American Chemical Society National Meeting, Anaheim, CA., 35(1): 695-698.
- Sivavec, T.M. (1996): Research on Passive Groundwater Remediation Technologies at General Electric. Motivation and Results. In: *Passive Systeme zur In-situ-Sanierung von Boden und Grundwasser*. p 24-25. Workshop - Extended Abstracts, Dresden, Mai 2-3.
- Sivavec, T. M., Horney, D. P. (1997): Reduction of chlorinated solvents by Fe(II) minerals. Preprints of Extended Abstracts presented at the ACS National Meeting, American Chemical Society, Division of Environmental Chemistry, 37(1), 115-117.
- Sivavec, T. M., Horney, D. P., Baghel, S. S. (1995): Reductive dechlorination of chlorinated ethenes by iron metal and iron sulfide minerals. *Emerging Technologies in Hazardous Waste Management VII, Extended Abstracts for the Special Symposium*, D. W. Tedder, ed., Industrial & Engineering Chemistry Division, Atlanta, GA, 42-45.
- Sivavec, T., Krug, T., Berry-Spark, K. and Focht, R. (2002): Performance monitoring of a permeable reactive barrier at the Somersworth, NH Landfill Superfund Site. In: Simon, F.G., Meggyes, T. and McDonald, C. (ed.): *Advanced groundwater remediation - Active and passive technologies*, Thomas Telford, London, 87-100.
- Smiciklas I., Dimovic S., Plecas I., Mitric M. (2006): Removal of Co²⁺ from aqueous solutions by hydroxyapatite. *Water Research* 40(12): 2267-2274.
- Smith, J. A., Galan, A. (1995): Sorption of nonionic organic contaminants to single and dual organic carbon bentonites from water. *Environ. Sci. Technol.*, 29(3), 685-692.
- Smith, J. A., Jaffe, P. R. (1994): Adsorptive selectivity of organic-cation-modified bentonite for nonionic organic contaminants. *Water Air Soil Pollut.*, 72, 205-211.
- Smith, J. A., Jaffe, P. R., Chiou, C. T. (1990): Effect of ten quaternary ammonium cations on tetrachloromethane sorption to clay from water. *Environ. Sci. Technol.*, 24(8), 1167-1172.
- Smyth, D. A., Shikaze, S. G., Cherry, J. A. (1997): Hydraulic performance of permeable barriers for the in situ treatment of contaminated groundwater. *Land Contam. Reclam.*, 5(3), 131-137.

- Smyth, D. J. A., Blowes, D. W., Benner, S. G., Hulshof, A. H. M. (2001): In Situ Treatment of Acid Mine Drainage in Groundwater Using Permeable Reactive Materials. 3rd Int. Containment Technology Conf., 10-13 June, 2001, Florida State University, Tallahassee, Orlando, FL <[http://www.containment.fsu.edu\(cd/content/](http://www.containment.fsu.edu(cd/content/)>.
- Sneddon I. R., Orueetxebarria M., Hodson M. E., Schofield P. F., Valsami-Jones E. (2006): Use of bone meal amendments to immobilise Pb, Zn and Cd in soil: A leaching column study. *Environmental Pollution* In Press, Corrected Proof.
- Soares, M. I. M., Belkin, S., Abeliovich, A. (1988): Biological groundwater denitrification: laboratory studies. *Wat. Sci. Technol.*, 20(3), 189-195.
- Soares, M. I. M., Belkin, S., Abeliovich, A. (1989): Clogging of microbial denitrification sand columns: gas bubbles or biomass accumulation? *Zentrum für Wasser- und Abwasser-Forschung*, 22, 20-24.
- Soares, M. I. M., Braester, C., Belkin, S., Abeliovich, A. (1991): Denitrification in laboratory sand columns: carbon regime, gas accumulation and hydraulic properties. *Wat. Res.*, 25(3), 325-332.
- Søgaard E. G., Christensen S. R., Bro C. (2002): Combined biological and chemical treatment of groundwater contaminated with chlorinated solvents. In *Remediation of chlorinated and recalcitrant compounds-2002*. [Electronic Resource] Proceedings of the third international conference on remediation of chlorinated and recalcitrant compounds (Monterey, CA, May 2002) (ed. A. Gavaskar & A. S. C. Chen), pp. Paper 2F-03. Battelle Press.
- Song, H., Kim, Y.-H., Carraway, E., Batchelor, B. (1999): Effects of hydroxyapatite on PCE degradation by zero valent zinc. Preprints of Extended Abstracts presented at the ACS National Meeting, American Chemical Society, Division of Environmental Chemistry, 39(1):
- Sorg T. J. (1988): Methods for removing uranium from drinking water. *Journal of the American Water Works Association* 80: 105-111.
- Sorg T. J. (1990): Removal of uranium from drinking water by conventional treatment methods, in: Cothorn C. R., Rebers P. A. (ed.), *Radon, radium, and uranium in drinking water*, Lewis Publishers Inc., Chelsea, Michigan, U.S.A., 173-191.
- Sowder A. G., Clark S. B., Fjeld R. A. (2001): The impact of mineralogy in the U(VI)-Ca-PO₄ system on the environmental availability of uranium. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 248(3): 517-524.
- Spengler, T., Geldermann, J., Rentz, O. (1997): Multikriterielle Entscheidungsverfahren zur ganzheitlichen Bewertung von Investitionsalternativen – dargestellt am Beispiel von Oberflächenreinigungssystemen. *Zeitschrift für Planung*, 8, 55-79.
- Spinnler, G.E., Salanitro, J.P. and Manner, P.M. (2004): In Situ Remediation of Groundwater Contaminated with MTBE and TBA Using a Biobarrier. 1st International Symposium on Permeable Reactive Barriers, PRB-Net 2004, Belfast 14-16 March, Abstracts Proceedings.
- Sposito, G. (1995): Adsorption as a problem in coordination chemistry. The concept of the surface complex. *Aquatic Chemistry: Interfacial and Interspecies Processes*, C. P. Huang, C. R. O'Melia, J. J. Morgan, eds., American Chemical Society, Washington, D.C.
- Stadwerke Karlsruhe (2004): Auskunft über geplante und tatsächliche Kosten des F&G-Systems Karlsruhe Gaswerk-Ost. – M. Schleyer, März 2004.
- Stahlmann, J. and Scholz, Chr. (2004): Ursachen und Auswirkungen von Imperfektionen bei Dichtwänden. 11. Braunschweiger Deponie- und Dichtwandseminar 2004, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Vol. 74, 363-380, Technische Universität Braunschweig.
- Starr, R. C., Cherry, J. A. (1994): In situ remediation of contaminated groundwater: the funnel-and-gate system. *Ground Water Monit. Rem.*, 32(3), 465-476.
- Steele H. M., Wright K., Hillier I. H. (2002): Modelling the adsorption of uranyl on the surface of goethite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66(8): 1305-1310.
- Stender, T. (2002): Vergleichende Untersuchung von Graugusseisengranulat- und Eisenschwammproben aus der Reaktionswand Rheine. Diplomarbeit, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. 99 S.
- Stetter D. (2004): Enthärtung und Entkarbonisierung, in: DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (ed.), *Wasseraufbereitung - Grundlagen und Verfahren, Lehr- und Handbuch Wasserversorgung*, Bd. 6, Oldenbourg Industrieverlag, München, 517-550.

- Stone A. T., Morgan J. J. (1990): Kinetics of chemical transformation in the environment. In *Aquatic chemical kinetics: Reaction rates of processes in natural waters* (ed. W. Stumm), pp. 1-43. John Wiley & Sons.
- Strahlenschutzkommission (1993): Strahlenschutzkriterien für die Nutzung von möglicherweise durch den Uranbergbau beeinflussten Wässern als Trinkwasser. Bundesanzeiger Nr. 94 vom 22. Mai 1993: 1-3.
- Stratmann M., Müller J. (1994): The mechanism of the oxygen reduction on rust-covered metal substrates. *Corros. Sci.* 36, 327-359.
- Stroh, T. and Sasse, D. (1987): Beispiele für die Herstellung von Dichtwänden im Schlitzverfahren. In: Meseck, H. (ed.), *Dichtwände und Dichtsohlen*, Fachseminar 02./03. Juni 1987, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Vol. 23, 35-38, Technische Universität Braunschweig.
- Stucki, J. W. (1988): Structural iron in smectites. *Iron in soils and clay minerals*, J. W. Stucki, B. A. Goodman, und U. Schwertmann, eds., D. Reidel, Dordrecht, The Netherlands, 625-675.
- Stumm W., Morgan J. J. (1996): *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. pp. 1022. John Wiley & Sons Inc.
- Stumm, W. (1992): *Chemistry of the solid-water interface: processes at the mineral-water and particle-water interface in natural systems*. John Wiley and Sons, New York, 87-155.
- Su, C., Puls, R. W. (1999): Kinetics of trichloroethene reduction by zerovalent iron and tin: pretreatment effect, apparent activation energy, and intermediate products. *Environ. Sci. Technol.*, 33(1), 163-168.
- Su C., Puls R. W. (2001a): Arsenate and arsenite removal by zerovalent iron: Kinetics, redox transformation, and implications for in situ groundwater remediation. *Environ. Sci. Technol.* 35, 1487-1492.
- Su C., Puls R. W. (2001b): Arsenate and arsenite removal by zerovalent iron: Effects of phosphate, silicate, carbonate, borate, chromate molybdate, and nitrate, relative to chloride. *Environ. Sci. Technol.* 35, 4562-4568.
- Su, C., Puls, R. W. (2003): In Situ Remediation of Arsenic in Simulated Groundwater Using Zerovalent Iron: Laboratory Column Tests on Combined Effects of Phosphate and Silicate. *Environ. Sci. Technol.*, 37(11), 2582-2587.
- Sullivan, E. J., Hunter, D. B., Bowman, R. S. (1998): Fourier transform raman spectroscopy of sorbed HDTMA and the mechanism of chromate sorption to surfactant-modified clinoptilolite. *Environ. Sci. Technol.*, 32(13), 1948-1955.
- Suthersan, S. S. (1997): *Remediation Engineering*. CRC Press, Inc., Boca Raton, New York, London, Tokyo, 362 p.
- Sweeny, K. H. (1981a): *The Reductive Treatment of Industrial Wastewaters: I. Process Description*. American Institute of Chemical Engineers, Symposium Series, Water-1980, 77(209), G. F. Bennett, ed., 67-71.
- Sweeny, K. H. (1981b): *The Reductive Treatment of Industrial Wastewaters: II. Process Description*. American Institute of Chemical Engineers, Symposium Series, Water-1980, 77(209), G. F. Bennett, ed., 72-88.
- Sweeny, K. H., Fischer, J. R. (1972): *Reductive Degradation of Halogenated Pesticides*. Patent No. US 0003640821 A, Dec. 23, 1970.
- Sweeny, K. H., Fischer, J. R. (1973): *Decomposition of halogenated organic compounds using metallic couples*. Patent No. US 0003737384 A, Dec. 23 1970.
- Tamara M. L., Butler E. C. (2004): Effects of iron purity and groundwater characteristics on rates and products in the degradation of carbon tetrachloride by iron metal. *Environ. Sci. Technol.* 38, 1866-1876.
- Tamm T., Peld M. (2006): Computational study of cation substitutions in apatites. *Journal of Solid State Chemistry* 179(5): 1581-1587.
- Taylor L. E., Brown T. J., Benham A. J., Lusty P. A. J., Minchin D. J. (2006): *World Mineral Production 2000-04*, British Geological Survey Keyworth, Nottingham.
- Taylor, R. T., Hanna, M. L., Shah, N. N., Shonnard, D. R., Duba, A. G., Durham, W. B., Jackson, K. J., Knapp, R. B., Wijesinghe, A. M., Knezowich, J. P., Jovanovich, M. C. (1993): In situ bioremediation of trichloroethylene-contaminated water by a resting-cell methanotrophic microbial filter. *Hydrol. Sci. J.*, 38(4), 323-342.
- Taylor, S. W., Jaffe, P. R. (1990): Biofilm growth and the related changes in the physical properties of a porous media I. – Experimental investigation. *Wat. Res. Res.*, 26(9), 2153-2159.

- TBG (Tiefbau-Berufsgenossenschaft) (2000): Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und gesundheit bei der Arbeit. BG-regeln, kontaminierte Bereiche (BGR 128):
- Teutsch, G., Grathwohl, P., Schad, H., Werner, P. (1996): In situ reactive wall systems. A new approach for passive remediation of soil and groundwater pollution. *Grundwasser*, 1(1), 12-20.
- Teutsch, G., Grathwohl, P., Schad, H., Werner, P. (1996): In-situ-Reaktionswände - Ein neuer Ansatz zur passiven Sanierung von Boden- und Grundwasserverunreinigungen. *Grundwasser*, 1/96, p 12-19.
- Teutsch, G., Ptak, T., Schwarz, R., Holder, T. (2000): Ein neues integrales Verfahren der Grundwasserimmission, Teil 1: Beschreibung der Grundlagen: *Grundwasser*, 4, 170-175.
- Teutsch, G., Schüth, C., Melzer, R. (1999): Reaktive Wände – Stand der Technik, Planung und Implementierung. – Altlastenforum Baden-Württemberg e.V., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Teutsch, G., Tolksdorff, J., Schad, H. (1997): The design of in situ reactive wall systems – a combined hydraulical-geochemical-economical simulation study. – *Land Contamination & Reclamation*, 5 (3), 125-130.
- Thauer R. K., Jungermann K., Decker K. (1977): Energy conservation in chemotrophic anaerobic bacteria. *Bacteriol. Rev.* 41, 100-180.
- Thomas, A.O., Drury, D.M., Norris, G., O'Hannesin, S.F., Vogan, J.L. (1995): The In-Situ-Treatment of Trichloroethene-Contaminated Groundwater Using a Reactive Barrier - Results of Laboratory Feasibility Studies and Preliminary Design Considerations. In: Van den Brink, W.J. Rosman, R. and Ahrend, F. (Hrsg.). *Contaminated Soil*. p 1083-1091.
- Thomas, G. W. (1977): Historical developments in soil chemistry: ion exchange. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41, 230-238.
- Thomson B. M., Smith C. L., Busch R. D., Siegel M. D., Baldwin C. (2003): Removal of Metals and Radionuclides Using Apatite and Other Natural Sorbents. *Journal of Environmental Engineering* 129(6): 492-499.
- Tiehm, A., Gozan, M., Müller, A., Schell, H., Lorbeer, H., Werner, P. (2002): Sequential anaerobic/aerobic biodegradation of chlorinated hydrocarbons in activated carbon barriers. *Water Sci. Technol.: Water Supply*, 2(2), 51-58.
- Tiehm, A., Schulze, S., Böckle, K., Müller, A., Lorbeer, H., Werner, P. (2000): Elimination of chloroorganics in a reactive wall system by biodegradation on activated carbon. *Proc., 7th Int. FZK/TNO Conf. on Contaminated Soil*, Leipzig, Germany, 924-931.
- Till, B. A., Weathers, L. J., Alvarez, P. J. J. (1998): Fe(0)-supported autotrophic denitrification. *Environ. Sci. Technol.*, 32(5), 634-639.
- Tödt F. (1961): *Korrosion und Korrosionsschutz*. pp. 1427. de Gruyter, Berlin.
- Tolksdorff, J. (1997): Ein hydraulisch-geochemisches Modell zur Kostenanalyse permeabler reaktiver Wände. Diplomarbeit, Universität Tübingen.
- Totten L. A., Roberts A. L. (2001): Calculated one- and two-electron reduction potentials and related molecular descriptors for reduction of alkyl and vinyl halides in water. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 31, 175-221.
- Tratnyek, P. G., Johnson, T. L., Scherer, M. M., Eykholt, G. R. (1997): Remediating groundwater with zero-valent metals: Kinetic considerations in barrier design. *Ground Water Monitor. Rem.*, 17(4), 108-114.
- Tratnyek P. G., Macalady D. L. (2000): Oxidation-reduction reactions in the aquatic environment. In *Handbook of Property Estimation Methods for Chemicals, Environmental and Health Sciences* (ed. R. S. Boethling & D. Mackay), pp. 383-415. Lewis.
- Tratnyek P. G., Scherer M. M., Deng B., Hu S. (2001): Effects of natural organic matter, anthropogene surfactants, and model quinones on the reduction of contaminants by zero-valent iron. *Wat. Res.* 35, 4435-4443.
- Tratnyek P. G., Miehr R., Bandstra J. Z. (2002): Kinetics of reduction of TNT by iron metal. In *Groundwater Quality: Natural and Enhanced Restoration of Groundwater Pollution* (Proceedings of the Goundwater Quality 2001 Conference held at Sheffield, UK, June 2001), Vol. 275 (ed. S. F. Thornton & S. E. Oswald), pp. 427-433. IAHS Press.
- Tratnyek P. G., Scherer M. M., Johnson T. L., Matheson L. J. (2003): Permeable reactive barriers of iron and other zero-valent metals. In *Chemical degradation methods for wastes and pollutants. Environmental and industrial applications* (ed. M. A. Tarr), pp. 371-421. Marcel Dekker.

- TrinkwV (2001): Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung (TrinkwV). Bundesgesetzblatt Teil I Jahrgang 2001(Nr. 24, 28.05.2001): 959-980.
- Tünnermeier, T., Simon, F.-G., Meggyes, T. (2001): Untersuchungen zum Langzeitverhalten von permeablen reaktiven Wänden (PRB). Geomwelt-Kolloquium Kontaminationen aus der Nutzung von Ressourcen – Probleme und Lösungen. Freiberg. 07. December 2001.
- Tünnermeier, T.; Simon, F.-G.; Meggyes, T. (2001): Longevity of Permeable Reactive Barriers. PRB-Net Workshop, 26 – 27 April 2001. Belfast, Northern Ireland, UK. (Poster)
- Turner, D., McCoy, D. (1990): Anoxic Alkaline Drain Treatment System, a Low Cost Acid Mine Drainage Treatment Alternative. Proc., Nat. Symp. on Mining, University of Kentucky, Lexington, 73-75.
- U.S. Department of Defense (1999): Permeable Reactive Wall Remediation of Chlorinated Hydrocarbons in Groundwater. – Environmental Security technology Certification Program (ESTCP) Cost and Performance Report, July 1999.
- U.S. DOE (2004): Performance of a permeable reactive barrier using granular zero-valent iron: FY 2004 Annual Report. U.S. Department of Energy, Environmental Sciences Laboratory, Annual Report, DOE-LM/GJ719-2004 bzw. ESL-RPT-2004-06, Grand Junction, Colorado.
- U.S. DOE (2005a): Alternatives for mending a permeable reactive barrier at a former uranium milling site: Monticello, Utah. U.S. Department of Energy, Environmental Sciences Laboratory, DOE-LM/GJ850-2005 bzw. ESL-RPT-2005-03, Grand Junction, Colorado.
- U.S. DOE (2005b): Construction summary and as-built report for ground water treatment system Monticello, Utah, permeable reactive barrier site. U.S. Department of Energy, Environmental Sciences Laboratory, DOE-LM/GJ930-2005 bzw. ESL-RPT-2005-05, Grand Junction, Colorado.
- U.S. DOE (2005c): Gamma survey of a permeable reactive barrier at Monticello, Utah. U.S. Department of Energy, Environmental Sciences Laboratory, DOE-LM/GJ989-2005 bzw. ESL-RPT-2005-07, Grand Junction, Colorado.
- U.S. DOE (2005d): Performance assessment and recommendations for rejuvenation of a permeable reactive barrier: Cotter Corporation's Canon City, Colorado, Uranium Mill. U.S. Department of Energy, Environmental Sciences Laboratory, DOE-LM/GJ816-2005 bzw. ESL-RPT-2005-02, Grand Junction, Colorado.
- U.S. DOE (2005e): Variations in hydraulic conductivity over time at the Monticello permeable reactive barrier. U.S. Department of Energy, Environmental Sciences Laboratory, DOE-LM/GJ812-2005 bzw. ESL-RPT-2005-01, Grand Junction, Colorado.
- U.S. DOE (2006): Hydraulic conductivity of the Monticello permeable reactive barrier - November 2005 update. U.S. Department of Energy, Environmental Sciences Laboratory, DOE-LM/GJ1086-2006 bzw. ESL-RPT-2006-01, Grand Junction, Colorado.
- U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Technology Innovation Office, Washington, DC 20460 (1995): In Situ Technology Status Report: Treatment Walls, Development, EPA 542-K-94-004.
- U.S. EPA, Technology Innovation Office (1996): A Citizen's Guide to Treatment Walls. Solid Waste and Emergency Response (5102G): Rep. No. EPA 542-F-96-016.
- U.S. EPA, National Risk Management Research Laboratory (1997): Permeable Reactive Subsurface Barrier for the Interception und Remediation of Chlorinated Hydrocarbon and Chromium(VI) Plumes in Ground Water. Rep. No. EPA/600/F-97/008, Ada, OK 74820.
- U.S. EPA (1998): Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation. - United States Environmental Protection Agency, Washington DC, Rep. No. EPA/600/R- 98/125, September 1998.
- U.S. EPA (1999): Field Applications of In Situ Remediation Technologies: Permeable Reactive Barriers. Rep. No. EPA 542-R-99-002, April 1999.
- U.S. EPA (2000): National Primary Drinking Water Regulations: Radionuclides; Final Rule. Federal Register, Part II 40 CFR Parts 9, 141, and 142.
- U.S. EPA (2001): Remediation Technology Cost Compendium – Year 2000. - United States Environmental Protection Agency, Washington DC, Rep. No. EPA/542/R-01/009, September 2001.
- U.S. EPA (2002a), Field Applications of in Situ Remediation Technologies: Permeable Reactive Barriers, Contract 68-W-00-084, Office of Solid Waste and Emergency Response, Environmental Protection Agency, Washington, DC.

- U.S. EPA (2002b): Permeable Reactive Barriers Interim Summary Report: Permeable Reactive Barriers Using a Funnel and Gate Configuration. - Cost and Performance Report. - <http://www.frtr.gov/>, May 2002.
- U.S. EPA (2002c): Economic Analysis of the Implementation of Permeable Reactive Barriers for Remediation of Contaminated Groundwater. - United States Environmental Protection Agency, Washington DC, Report EPA/600/R-02/034, June 2002.
- U.S. EPA (2003): Capstone report on the application, monitoring, and performance of permeable reactive barriers for ground-water remediation: Volume 1 - Performance evaluation at two sites, pp. 140. U.S. EPA, Cincinnati, OH 45268, Rep. No. EPA/600/R-03/045a.
- U.S.-National Research Council (1994): Alternatives for groundwater clean-up. – 315 p; Washington, U.S.A..
- UBA (Umweltbundesamt) (1999): Erarbeitung von Programmen zur Überwachung von altlastverdächtigen Flächen und Altlasten. ARCADIS Trischler und Partner mbH. UBA-Texte 96/99, Hrsg.: Umweltbundesamt, Berlin.
- Ulrich, H.-J., Stumm, W. (1988): Adsorption of aliphatic fatty acids on aquatic interfaces. Comparison between two model surfaces: Their mercury electrode and Al₂O₃ colloids. *Environ. Sci. Technol.*, 22(1), 37-41.
- Valsami-Jones E., Ragnarsdottir K. V., Putnis A., Bosbach D., Kemp A. J., Cressey G. (1998): The dissolution of apatite in the presence of aqueous metal cations at pH 2-7. *Chemical Geology* 151(1-4): 215-233.
- Van Cappellen P., Gaillard J.-F. (1996): Biogeochemical dynamics in aquatic sediments. In *Reviews in Mineralogy - Reactive Transport in Porous Media*, Vol. 34 (ed. P. C. Lichtner, C. I. Steefel & E. H. Oelkers), pp. 335-376. The Mineralogical Society of America.
- van Eekert M., Draaisma C., Diels L., Schraa G. (2003): Treatment of multiple component pollution in a multibarrier system. *Consoil 2003: 8th International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil*. 12.-16. Mai 2003, Gent, Belgien: 1666-1674.
- Vandevivere P., Baveye P. (1992): Relationship between Transport of Bacteria and Their Clogging Efficiency in Sand Columns. *Applied and Environmental Microbiology* 58(8): 2523-2530.
- Vega E. D., Pedregosa J. C., Narda G. E., Morando P. J. (2003): Removal of oxovanadium(IV) from aqueous solutions by using commercial crystalline calcium hydroxyapatite. *Water Research* 37(8): 1776-1782.
- Venkatapathy R., Bessingpas D. G., Canonica S., Perlinger J. A. (2002): Kinetics models for trichloroethylene transformation by zero-valent iron. *Appl. Catal. B* 37, 139-159.
- Vermeul V. R., Williams M. D., Szecsody J. E., Fruchter J. S., Cole C. R., Amonette J. E. (2002): Creation of a subsurface permeable reactive barrier using in situ redox manipulation, in: Naftz D. L., Morrison S. J., Davis J. A., Fuller C. C. (ed.), *Handbook of groundwater remediation using permeable reactive barriers*, Academic Press, San Diego, 163-192.
- Vidic, R. D. (2001): Permeable Reactive Barriers: Case Study Review. TE-01-01, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center (GWRTAC), Pittsburgh, PA.
- Vidic, R. D., Pohland, F. G. (1996): Treatment Walls. Report No. TE-96-01, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center (GWRTAC), Pittsburgh, PA.
- Vidumsky J. E. (2003): Enhancement of biodegradation processes downgradient of a zero valent iron PRB. RTDF Permeable Reactive Barriers (PRBs) Action Team Meeting. October 15-16, 2003, Niagara Falls, NY: <http://www.rtdf.org/public/permbarr/minutes/101603/index.htm>.
- Vidumsky J. E., Landis R. C. (2001): Probabilistic design of a combined permeable barrier and natural biodegradation remedy. 2001 International Containment & Remediation Technology Conference and Exhibition. 10-13 June 2001, Orlando, FL. Department of Energy (DOE), DOE Document Number: DOE/EM-0620: Paper-ID 159.
- Vikesland, P. J., Klausen, J., Zimmermann, H., Roberts, A. L., Ball, W. P. (2003): "Longevity of granular iron in groundwater treatment processes: changes in solute transport properties over time". *J. Cont. Hydrol.*, 64, 3-33.
- Villalobos M., Trotz M. A., Leckie J. O. (2001): Surface Complexation Modeling of Carbonate Effects on the Adsorption of Cr(VI), Pb(II), and U(VI) on Goethite. *Environmental Science & Technology* 35(19): 3849-3856.
- VOB. (1992): *Verdingungsordnung für Bauleistungen*. Beuth Verlag, Berlin/Köln.
- Vogan J. L. (2003): Summary of field performance of PRB systems, Summary of the Remediation Technologies Development Forum, Permeable Reactive Barriers Action Team Meeting, Niagara Falls, New York, <http://www.rtdf.org/public/permbarr/minutes/101603/index.htm>, 1-2.

- Vogan J. L., Focht R. M., Clark D. K., Graham S. L. (1999): Performance evaluation of a permeable reactive barrier for remediation of dissolved chlorinated solvents in groundwater. *J. Hazard. Mater.* 68, 97-108.
- Vogan, J.L., Gillham, R.W., O'Hannesin, S.F. (1995): Site Specific Degradation of VOCs in Groundwater Using Zero Valent Iron. 209th American Chemical Society National Meeting. Anaheim, C.A. Division of Environmental Chemistry Preprints of Papers, Vol. 35, No. 19 p 800-804.
- Vogel T. M., Criddle C. S., Carty P. L. M. (1987): Transformations of halogenated aliphatic compounds. *Environ. Sci. Technol.* 21, 722-735.
- Vollhardt K. P. C., Schore N. E. (2000): *Organische Chemie*. 3.Auflage. pp. 1445. Wiley-VCH, Weinheim.
- Volnov, I. I. (1966): Peroxides, Superoxides, and Ozonides of Alkali and Alkaline Earth Metals. Plenum Press, NY, 148 p.
- Wagner, J., Chen, H., Brownawell, B. J., and Westall, J. C. (1994): Use of Cationic Surfactants to Modify Soil Surfaces to Promote Sorption and Retard Migration of Hydrophobic Organic Compounds. *Environ. Sci. Technol.*, 28(2), 231-237.
- Wagner, J.-F. (1991): F&E-Projekt Zwischen Bilfinger + Berger Mannheim und Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe: Bericht Phase 1: Durchführung von statischen Batchversuchen mit ausgewählten Mineralphasen. Unveröff. Bericht, 31 p, Karlsruhe.
- Wagner, J.-F. (1992a): F&E-Projekt Zwischen Bilfinger + Berger Mannheim und Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe: Bericht Phase 2: Durchführung von Säulenversuchen an vier Materialgemischen zur Optimierung der Sorptions- und Dichtungsschicht. Unveröff. Bericht, 34 p, Karlsruhe.
- Wagner, J.-F. (1992b): F&E-Projekt Zwischen Bilfinger + Berger Mannheim und Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe. Bericht Phase 3: Durchführung von Batch- und Säulenversuchen mit Phenantren an Aktivkohle, Tixogel VZ und zwei Materialgemischen zur Optimierung der Sorptionsschicht. Unveröff. Bericht, 9 p, Karlsruhe.
- Waite T. D., Davis J. A., Fenton B. R., Payne T. E. (2000): Approaches to modelling uranium(VI) adsorption on natural mineral assemblages. *Radiochimica Acta* 88(09-11): 687-693.
- Waite T. D., Davis J. A., Payne T. E., Waychunas G. A., Xu N. (1994): Uranium(VI) adsorption to ferrihydrite: Application of a surface complexation model. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58(24): 5465-5478.
- Walter M., Arnold T., Reich T., Bernhard G. (2003): Sorption of Uranium(VI) onto Ferric Oxides in Sulfate-Rich Acid Waters. *Environmental Science & Technology* 37(13): 2898-2904.
- Wan J., Tokunaga T. K., Brodie E., Wang Z., Zheng Z., Herman D., Hazen T. C., Firestone M. K., Sutton S. R. (2005): Reoxidation of Bioreduced Uranium under Reducing Conditions. *Environmental Science & Technology* 39(16): 6162-6169.
- Wan, C., Chen, Y. H., and Wei, R. (1999): Dechlorination of chloromethanes on iron and palladium-iron bimetallic surface in aqueous systems. *Environ. Tox. Chem.*, 18(6), 1091-1096.
- Wang Y., Salvage K. (2005): Immobilization of uranium in the presence of FeO(s): Model development and simulation of contrasting experimental conditions. *Applied Geochemistry* 20: 1268-1283.
- Wang, C.-B., and Zhang, W.-X. (1997): Synthesizing Nanoscale Iron Particles for Rapid and Complete Dechlorination of TCE and PCBs. *Environ. Sci. Technol.*, 31(7), 2154-2156.
- Wang, P. C., Mori, T., Komori, K., Sasatsu, M., Toda, K., and Ohtake, H. (1989): Isolation and Characterization of an Enterobacter cloacae Strain That Reduces Hexavalent Chromium under Anaerobic Conditions. *Appl. Environ. Microbiol.*, 55(7), 1665-1669.
- Warner S. D., Longino B. L., Zhang M., Bennett P., Szerdy F. S., Hamilton L. A. (2005): The first commercial permeable reactive barrier composed of granular iron: hydraulic and chemical performance at 10 years of operation, in: Boshoff G. A., Bone B. D. (ed.), *Permeable Reactive Barriers*, IAHS Series of Proceedings and Reports, IAHS Press, Wallingford, Oxfordshire, UK, 32-42.
- Warner, S. D., and Sorel, D. (2003): Ten Years of Permeable Reactive Barriers: Lessons Learned and Future Expectations. *Chlorinated Solvent and DNAPL Remediation, Innovative Strategies for Subsurface Cleanup (ACS Symposium Series 837)*: S. M. Henry, and S. D. Warner, eds., American Chemical Society, Washington, D.C., 36-49.
- Warner, S. D., Longino, B. L., and Hamilton, L. A. (2002): Long-Term Monitoring at the Sunnyvale Permeable Reactive Barrier: Lessons Learned/Future Expectations. <<http://www.rtdf.org/public/permbarr/minutes/110702/summary.html>>

- Warner, S. D., Longino, B. L., Zhang, M., Bennett, P., Szerdy, F. S., and Hamilton, L. A. (2004): The First Commercial Permeable Reactive Barrier Composed of Granular Iron – Hydraulic and Chemical Performance at 10 Years of Operations. First International Symposium on Permeable Reactive Barrier: Belfast, Northern Ireland.
- Warner, S.D., Yamane, C.J., Gallinati, J.D., Szerdy, F.S., Hawkins, D.A. (1995): Assessing the Feasibility of Permeable Reactive Barriers for Treatment VOC-Affected Groundwater In-situ: Experience from the First Fullscale Commercial Application in California. Proceedings of the International Containment Technology Workshop, Baltimore, Maryland, August 29-31.
- Warren, K. D., Arnold, R. G., Bishop, T. L., Lindholm, L. C., and Betterton, E. A. (1995): Kinetics and mechanism of reductive dehalogenation of carbon tetrachloride using zero-valence metals. *J. Hazard. Mater.*, 41, 217-227.
- Watson D. B., Phillips D. H., Gu B. (2002): Performance evaluation of in-situ iron reactive barriers at the Oak Ridge Y-12 Site, FY2000-Milestone Report. Oak Ridge National Laboratory, Environmental Sciences Division, Technical Report / Environmental Sciences Division Publication, ORNL/TM-2001/193 TTP: OR1-8-SS-41, Oak Ridge, Tennessee.
- Waybrant, K. R., Blowes, D. W., and Ptacek, C. J. (1998): Selection of reactive mixtures for use in permeable reactive walls for treatment of mine drainage. *Environ. Sci Technol.*, 32(13), 1972-1979.
- Wazne M., Korfiatis G. P., Meng X. (2003): Carbonate Effects on Hexavalent Uranium Adsorption by Iron Oxyhydroxide. *Environmental Science & Technology* 37(16): 3619-3624.
- WCI Umwelttechnik GmbH, Dreieich: Patent Nr. P 44 25 061.4-41 "Permeables Behandlungsbett zur Reinigung kontaminierter Grundwasserströme in-situ".
- Weathers, L. J., Parkin, G. F., and Alvarez, P. J. (1997): Utilization of cathodic hydrogen as electron donor for chloroform cometabolism by a mixed, methanogenic culture. *Environ. Sci. Technol.*, 31(3), 880-885.
- Weathers, L.J., Parkin, G.F., Novak, P.J., Alvarez, P.J.J. (1995): Methanogene Couple Anaerobic Fe(0) Oxidation and CHCl₃ Reduction. 209th American Chemical Society National Meeting. Anaheim, C.A. Division of Environmental Chemistry Preprints of Papers, Vol. 35, No. 1, p 829-833.
- Weber, E. J. (1996): Iron-Mediated Reductive Transformations: Investigation of Reaction Mechanism. *Environ. Sci. Technol.*, 30(2), 716-719.
- Weber, H.H., Fresenius, W., Matthes, G., Müller-Kirchbauer, H., Storp, K. and Weßling, E. (1990): Altlasten: Erkennen, Bewerten, Sanieren, Springer-Verlag, Berlin.
- Wegner, M. (2000): Erfahrungen im Einsatz einer Reaktiven Wand in Rheine/Westfalen. Handbuch der Altlastensanierung, 5954 – 5954
- Wegner, M. (2001): Neues Sanierungsverfahren bei der Per-Verunreinigungen im Grundwasser. *Reiniger & Wäscher*, Heft I/2001, 26-27.
- Wegner, M. (2004): Reaktive Wand Rheine. Statusbericht: RUBIN Statusseminar.
- Wegner, M. (2005): Auswertung zum Langzeitverhalten einer Fe⁰-Reaktiven Wand am Beispiel des Standortes Rheine / Westfalen, Schlußbericht, BMBF.
- Weiske, A., Martin, T., Stiehl, M., Schad, H., Hornischer, W. (2002): Planung, Finanzierung und Umsetzung einer innovativen Abstromsicherung im Grundwasser. - *TerraTech* 3/2002: 45-47.
- Weiß, H. (1997): Untersuchungen zur in situ-Sanierung komplex belasteter Grundwässer am Modellstandort Bitterfeld. Sanierung von Altlasten mittels durchströmter Reinigungswände, Vorträge und Diskussionsbeiträge des Fachgesprächs am 27.10.1997 im Umweltbundesamt in Berlin, Umweltbundesamt, Berlin, 91-103.
- Weiß, H., Dahmke, A. (2001): Verfahren zur Konditionierung von mit Halogenkohlenwasserstoffen belasteten Wässern. Patent No. DE 10017618 A1, Mar. 31, 2000.
- Weiß, H., Daus, B., Teutsch, G. (1997): Sanierungsforschung in regional kontaminierten Aquiferen (SAFIRA): UFZ-Bericht Nr. 27. ISSN 0948-9452, Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Leipzig.
- Weiß, H., Daus, B., Teutsch, G. (1999): SAFIRA 2. Statusbericht, Modellstandort, Mobile Testeinheit, Pilotanlage. UFZ-Bericht Nr. 17. ISSN 0948-9452, Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Leipzig.
- Werner, P. (1985): A new way for the decontamination of polluted aquifers by biodegradation. *Wat. Suppl.*, 3, 41-47.

- Werner, P. (1996): Möglichkeiten der Einbindung mikrobieller Prozesse in passive Systeme zur Grundwassersanierung. In: Passive Systeme zur In-situ-Sanierung von Boden und Grundwasser. p 47-49. Workshop - Extended Abstracts, Dresden, Mai 2-3.
- Wersin, P., Hochella M. F., Jr., Person, P., Redden, G., Leckie, J. O., and Harris, D. W. (1994): Interaction between aqueous uranium and sulfide minerals: Spectroscopic evidence for sorption and reduction. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58(13), 2829-2843.
- Westall, J. (1987): Adsorption mechanisms in aquatic chemistry. *Aquatic Surface Chemistry*, W. Stumm, ed., John Wiley and Sons, NY, 3-32.
- Westall, J. C. (1986): Reactions at the oxide-solution interface: chemical and electrostatic models. *Geochemical Processes at Mineral Surfaces (ACS Symp. Ser. 323)*: J. A. Davis and K. F. Hayes, eds., American Chemical Society, Washington, D.C., 54-78.
- Westerhoff P. (2003): Reduction of nitrate, bromate, and chlorate by zero valent iron (Fe⁰). *J. Environ. Eng.*, 10-16.
- WHG (2002): Siebtes Gesetz zur Änderung des Wasserhaushaltsgesetzes. *Bundesgesetzblatt Teil I Jahrgang 2002(Nr. 37, 24.06.2002)*: 1914-1922.
- White, D. M., Irvine, R. L., and Woodlard, C. W. (1998): The use of solid peroxides to stimulate growth of aerobic microbes in tundra. *J. Haz Mat.*, 57, 71-78.
- WHO (2005): Uranium in drinking-water, Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. World Health Organization, WHO/SDE/WSH/03.04/118, Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.
- Wiedemeier T. H., Rifai H. S., Newell C. J., and Wilson J. T. (1999): Natural attenuation of fuels and chlorinated solvents in the subsurface. pp. 617. John Wiley & Sons, New York.
- Wielinga B., Bostick B., Hansel C. M., Rosenzweig F., R., Fendorf S. (2000): Inhibition of Bacterially Promoted Uranium Reduction: Ferric (Hydr)oxides as Competitive Electron Acceptors. *Environmental Science & Technology* 34(11): 2190-2195.
- Wienberg, R. (1990a): Zum Einfluß organischer Schadstoffe auf Deponietone. - Teil 1: Unspezifische Interaktionen - *AbfallwirtschaftsJournal* 4, p 222-230.
- Wienberg, R. (1990b): Zum Einfluß organischer Schadstoffe auf Deponietone. - Teil 2: Spezifische Interaktionen - *AbfallwirtschaftsJournal* 6, p 306-314.
- Wienberg, R. (1997): Nichtstun und beobachten - eine alternative Grundwasser-Sanierungstechnik? *Altlasten Spektrum* 2/97. p 55-56.
- Wienberg, R. (1997): Vollständige, stoffspezifische Bilanzen des Schadstoffumsatzes beim Einsatz reaktiver Wände. Sanierung von Altlasten mittels durchströmter Reinigungswände, Vorträge und Diskussionsbeiträge des Fachgesprächs am 27.10.1997 im Umweltbundesamt in Berlin., Umweltbundesamt, Berlin, 112-119.
- Wienberg. (2003): Teilprojekt: Vollständige, stoffspezifische Bilanzen des Schadstoffumsatzes beim Einsatz reaktiver Wände mit Hilfe 14C-markierter Substanzen. RUBIN Statusseminar. Nov. 2003, Hannover.
- Wijn, G. J., Schraa, G., De Kreuk, J. F., Rijnaarts, H. H. M. (1998): In-situ method for cleaning a soil fraction contaminated with halogenated products, particularly chlorinated products. Patent No. EP 0924000 A1, Dec. 3, 1998.
- Wildman M. J., Alvarez P. J. J. (2001): RDX degradation using an integrated Fe(0)-microbial treatment approach. *Water Sci. Technol.* 43, 25-33.
- Wilkens J., Shoemaker S. H., Bazela W. B., Egler A. P., Sinha R., Bain J. G. (2003): Arsenic Removal from Groundwater using a PRB of BOF Slag at the DuPont East Chicago (IN) Site, RTDF PRB Action Team Meeting, Niagara Falls, New York, Remediation Technologies Development Forum und Permeable Reactive Barriers Team (ed.), http://www.rtdf.org/public/permbarr/minutes/101603/pdf/q_wilkens.pdf.
- Wilkin R. T., Puls R. W. (2003): Capstone report on the application, monitoring, and performance of permeable reactive barriers for ground-water remediation: Volume 1 – Performance evaluation at two sites, pp. 140. U.S. EPA, Cincinnati, OH 45268.
- Wilkin, R. T., Puls, R. W., Sewell, G. W. (2003): Long-Term Performance of Permeable reactive Barriers Using Zero-Valent Iron: Geochemical and Microbiological Effects. *Ground Water*, 41, 493-503.

- Wilkowske C. D., Rowland R. C., Naftz D. L. (2002): Selected hydrologic data for the field demonstration of the three permeable reactive barriers near Fry Canyon, Utah, 1996-2000. U.S. Environmental Protection Agency und U.S. Geological Survey, Open file Report, 01-361, Washington, D.C.
- Williams A. G. B., Scherer M. M. (2001): Kinetics of Cr(VI) reduction by carbonate green rust. *Environ. Sci. Technol.* 35, 3488-3494.
- Williamson, D., Hoenke, K., Wyatt, J., Davis, A., Anderson, J. (2000): Construction of a Funnel-and-Gate Treatment System for Pesticide-contaminated Groundwater. Proc. of the 2nd Int. Conf. on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey, CA, A. R. Gavaskar and A. S. C. Chen, eds., Battelle Press, Columbus, Ohio, 257-264.
- Wilson, R.D., Mackay, D.M. (1997): Arrays of Unpumped Wells: An Alternative to Permeable Walls for In Situ Treatment. Proceedings of International Containment Technology Conference, St. Petersburg, Florida, USA., 888-894.
- Wilson, R.D., Mackay, D.M. (1995): A method of passive release of solutes from an unpumped well. *Ground Water*. Vol. 33, No. 6. p 936 - 945.
- WISMUT GmbH (2000): Abschlußbericht zum BMBF-Förderprojekt „Entwicklung von verfahrenstechnischen Lösungen zur Sanierung von Grundwasserschäden im Abstrom von Absetzbecken der Uranerzaufbereitung mittels permeabler reaktiver Wände. Förderkennzeichen 02WB9891/8 des BMBF. Bearbeitungszeitraum 01.11.1998-30.06.2000. Projektleiter Dr. G. Kießig, WISMUT GmbH.
- Wright J., Conca J. (2002): Remediation of groundwater contaminated with Zn, Pb and Cd using a permeable reactive barrier with apatite II, Remediation Technologies Development Forum, PRB Action Team Meeting.
- Wu L., Forsling W., Schindler P. W. (1991): Surface Complexation of calcium minerals in aqueous solution, 1. Surface protonation at fluorapatite-water interfaces. *Journal of Colloid and Interface Science* 147(1): 178-185.
- Wüst W. (2000): Geochemische Untersuchungen zur Sanierung CKW-kontaminierter Aquifere mit Fe(0)-Reaktionswänden. Dissertation, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 147 p
- Wüst W. F., Köber R., Schlicker O., Dahmke A. (1999): Combined zero- and first-order kinetic model of the degradation of TCE and cis-DCE with commercial iron. *Environ. Sci. Technol.* 33, 4304-4309.
- Wüst, W., Schlicker, O., Dahmke, A. (1998): Degradation of TCE at Zero-Valent Iron: Chemical Processes Effecting the Design and Performance of Permeable, Reactive Fe(0) Walls. In: U.S. EPA: NATO/CCMS Pilot Study Evaluation of Demonstrated and Emerging Technologies for the Treatment of Contaminated Land and Groundwater (Phase III): – United States Environmental Protection Agency, Washington DC, Report EPA/542/R-98/003, May 1998.
- Xu Y., Schwartz F. W. (1994a): Lead immobilization by hydroxyapatite in aqueous solutions. *Journal of Contaminant Hydrology* 15(3): 187-206.
- Xu Y., Schwartz F. W., Traina S. J. (1994b): Sorption of Zn²⁺ and Cd²⁺ on Hydroxyapatite Surfaces. *Environmental Science & Technology* 28(8): 1472-1480.
- Xu, Y. & Schwartz, F.W. (1992): Immobilization of Lead In Groundwater with a Reactive Barrier System. Subsurface Restoration Conference. p 204-206. Third International Conference on Groundwater Quality Research, Dallas, TX, June 21-24.
- Yabusaki S., Cantrell K., Sass B., Steefel C. (2001): Multicomponent Reactive Transport in an In Situ Zero-Valent Iron Cell. *Environmental Science & Technology* 35(7): 1493-1503.
- Yang J., Volesky B. (1999): Biosorption and elution of uranium with seaweed biomass, in: Ballester A., Amils R. (ed.), *Biohydrometallurgy and the Environment Toward the Mining of the 21st Century: International Biohydrometallurgy Symposium Proceedings*. (20th - 23rd June, 1999, San Lorenzo De El Escorial, Madrid, Spain), Bd. B, Elsevier Sciences, Amsterdam, 483-492.
- Yang Y., McCarty P. L. (1998): Competition for hydrogen within a chlorinated solvent dehalogenating anaerobic mixed culture. *Environ. Sci. Technol.* 32, 3591-3597.
- Yarmoff J. A., Amrhein C. (2000): Fundamental studies of the removal of contaminants from ground and waste waters via reduction by zero-valent metals. U.S. Department of Energy, Final Report, 55061.
- Yeskie, M. A., Harwell, J. H. (1988): On the structure of aggregates of adsorbed surfactants: the surface charge density at the hemimicelle/admicelle transition. *J. Phys. Chem.*, 92, 2346-2352.
- Zachara, J. M., Girvin, D. C., Schmidt, R. L., Resch, C. T. (1987): Chromate adsorption on amorphous iron oxyhydroxide in the presence of major groundwater ions. *Environ. Sci. Technol.*, 21(6), 589-594.

- ZAG – Zentrum für Angewandte Geowissenschaften (2003): Technisch-umweltökonomische Bewertung Reaktiver Wände. – Abschlußbericht Projekt 02WT0019, 195 p
- ZAG – Zentrum für Angewandte Geowissenschaften (2005): Vergleichende technisch-ökonomische Bewertung von In-Situ-Reinigungswänden an kontaminierten Standorten. – Abschlußbericht Projekt 02WR0195, 283 p
- Zänker H., Richter W., Hüttig G. (2003): Scavenging and immobilization of trace contaminants by colloids in the waters of abandoned ore mines. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 217(1-3): 21-31.
- Zawaideh, L. L., Zhang, T. C. (1998): The effects of pH and addition of an organic buffer (HEPES) on nitrate transformation in Fe(0)-water systems. *Wat. Sci. Technol.*, 38(7), 107-115.
- Zehnder, A. J. B., Stumm, W. (1988): Geochemistry and biogeochemistry of anaerobic habitats. *Biology of Anaerobic Microorganisms*, A. J. B. Zehnder, ed., John Wiley and Sons, NY.
- Zenker, M. J., Borden, R. C., Barlaz, M. A., Lieberman, M. T., Lee, M. D. (2000): Insoluble substrates for reductive dehalogenation in permeable reactive barriers. *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds*, Monterey, CA, C2-4, G. B. Wickramanayake, A. R. Gavaskar and A. S. C. Chen, eds., Battelle Press, Columbus, Ohio, 47-53.
- Zepp R. G., Wolfe N. L. (1987): Abiotic transformation of organic chemicals at the particle-water interface. In *Aquatic Surface Chemistry: Chemical Processes at the Particle-Water Interface* (ed. W. Stumm), pp. 423-455. Wiley.
- Zhang P., Ryan J. A. (1998): Formation of Pyromorphite in Anglesite-Hydroxyapatite Suspensions under Varying pH Conditions. *Environmental Science & Technology* 32(21): 3318-3324.
- Zhang W.-X. (2003): Nanoscale iron particles for environmental remediation: an overview. *Journal of Nanoparticle Research* 5, 323-332.
- Zhang Z., Clifford D. A. (1994): Exhausting and regenerating resin for uranium removal. *Journal of the American Water Works Association* 86: 228-241.
- Zhou P., Gu B. (2005): Extraction of Oxidized and Reduced Forms of Uranium from Contaminated Soils: Effects of Carbonate Concentration and pH. *Environmental Science & Technology* 39(12): 4435-4440.
- Zimmermann, H.-J., Gutsche, L. (1991): *Multi-Criteria Analyse*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 307.