



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Pesticider i grundvand, litteraturstudium vedr. mulige afværgeteknikker

Kirsten Rügge, Cowi
Katerina Tsitonaki, Orbicon
Nina Tuxen, Orbicon

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling.

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Indhold

FORORD	5
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	7
SUMMARY AND CONCLUSIONS	9
1 INDLEDNING	11
1.1 BAGGRUND	11
1.2 FORMÅL	12
2 KILDER TIL PESTICIDER I GRUNDEVAND	13
3 RESUMÉ AF TIDLIGERE UDFØRT LITTERATURREVIEW	15
4 GENNEMGANG AF FOKUSSTOFFER	17
4.1 BESKRIVELSE AF FOKUSSTOFFERNE	17
4.1.1 Nedbrydelighed	21
4.1.2 Fordampning	21
4.1.3 Ionisering	21
4.1.4 Vandopløselighed	22
4.1.5 Sorption	22
5 LITTERATURSØGNING	23
5.1 DATABASER	23
5.2 SØGEKRITERIER	23
6 RESULTATER	27
6.1 GENNEMGANG AF RESULTATER FOR FELTSTUDIER	27
6.1.1 Erfaringer, feltstudier	27
6.1.2 Resultater inddelt på stofgrupper, feltstudier	28
6.2 GENNEMGANG AF RESULTATER FOR LABORATORIEFORSØG	30
6.2.1 Erfaringer, laboratorieforsøg	30
6.2.2 Resultater inddelt på stofgrupper, laboratorieforsøg	31
7 PRÆSENTATION AF RESULTATER I FORHOLD TIL DE FORSKELLIGE AFVÆRGEMETODER	37
8 DISKUSSION	41
8.1 VIDENSNIVEAU	41
8.2 STATE OF THE ART FOR OPRENSNING AF PESTICIDPUNKTKILDER	42
8.2.1 Aktuel forskning og udvikling	43
8.3 RISIKOFORHOLD VED OPRENSNING AF PESTICIDPUNKTKILDER	43
8.4 ANBEFALINGER	44
9 REFERENCER	45

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgæede litteratur

Forord

Dette litteraturreview er udført som et teknologiudviklingsprojekt under Miljøstyrelsens Teknologiuudviklingsprogram 2010.

Tilskudsmodtager og bygherre er Region Hovedstaden og projektet er udført af COWI og Orbicon i samarbejde, med deltagelse af følgende medarbejdere:

- Kirsten Rügge, projektleder og faglig medarbejder, COWI
- Katerina Tsitonaki, faglig medarbejder, Orbicon
- Nina Tuxen, kvalitetssikring, Orbicon

Det overordnede formål med reviewet er at skabe overblik over, hvilke metoder der i dag findes til oprensning af pesticidpunktkilder der truer grundvandet. Reviewet er således en opdatering af det review /41/, der blev udarbejdet i 2002 i forbindelse med et ph.d. projekt på DTU.

I forbindelse med projektet er der oprettet en følgegruppe, bestående af følgende medlemmer:

- Katrine Smith, Miljøstyrelsen
- Henriette Kern-Jespersen, Region Hovedstaden
- Katerina Hantzi, Region Hovedstaden
- Ida H. Olesen, Region Syddanmark
- Lone Dissing, Region Syddanmark

Sammenfatning og konklusioner

Med det formål at belyse, hvilke metoder der i dag findes til oprensning af pesticidpunktkilder, der truer grundvandet, er der gennemført et litteraturreview, hvor mere end 80 artikler publiceret mellem 2002 og 2011 er gennemgået. I litteraturstudiet er der fokuseret på pesticider, som har været anvendt i Danmark, og som også har været påvist i det danske grundvand. Listen inkluderer phenoxysyrer (specielt MCPP, MCPA, 2,4-D og dichlorprop), triaziner (specielt atrazin, simazin, cyanazin og terbutylazin) nitroforbindelser (specielt DNOC og dinoseb) og desuden stoffer som isoproturon, diuron, bentazon og glyphosat. Dichlobenil/BAM indgår ikke i litteraturreviewet. Problemstillinger vedrørende dichlobenil og BAM er belyst i tidligere teknologipuljeprojekter.

Litteraturreviewet har således været en opdatering af det i 2002 udførte review /41/.

Den videnskabelige litteratur er søgt via DTV's artikeldatabase FINDit samt i databasen LIX som administreres fra Videncenter for Jordforurening. Der er desuden indhentet supplerende viden fra øvrige artikler og rapporter m.v. ("grå litteratur"). Dette inkluderer konference-proceedings fra f.eks. Battelle konferencer, andre europæiske og nordamerikanske konferencer og danske møder, samt en række rapporter udgivet af Miljøstyrelsen i Danmark og USA. Endvidere er der foretaget en søgning i Adventus Library, som indeholder artikler skrevet af Adventus om anvendelse af deres produkter til *in situ* oprensninger.

Generelt er vidensniveauet meget begrænset i forhold til felterfaringer, mens der findes langt flere forsøg, som er gennemført på laboratorieskala. Idet erfaringsgrundlaget for oprensning af pesticider er meget spinkelt, er det ikke muligt at give deciderede anbefalinger i forhold til afværgeteknikker for de enkelte pesticider. Det skal her bemærkes, at der i det gennemførte litteraturreview ikke har været fokus på afværegumpning som afværgeteknik, men at denne metode kan anvendes i forhold til de her undersøgte pesticider. Ud fra det gennemførte litteraturreview kan det anbefales, at undersøge anvendelsespotentialet for følgende metoder på konkrete lokaliteter, f.eks. ved pilotskalforsøg:

- For forureninger med phenoxysyrer (MCPA, MCPP, dichlorprop og 2,4-D) anbefales det at undersøge potentialet for anvendelse af biologiske metoder, enten ved monitoreret naturlig nedbrydning eller ved stimuleret nedbrydning, f.eks. ved tilsætning af ekstra ilt og næringsstoffer og/eller specifikke stofnedbrydere. Herudover anbefales det at se nærmere på forskellige teknikker til kemisk oxidation.
- For stofgruppen af triaziner (atrazin, simazin, cyanazin, terbutylazin) anbefales det at en oprensningsteknik, hvor en kombination af organisk materiale og ZVI anvendes, idet der allerede foreligger enkelte feltapplikationer med lovende resultater. Denne teknik kræver dog særlig opmærksomhed i forhold til dannelse af nedbrydningsprodukter.

- For nitroforbindelserne DNOC og dinoseb anbefales det at se nærmere på teknikker som stimuleret naturlig nedbrydning, bioaugmentering og ZVI.
- For phenylurea herbiciderne isoproturon og diuron anbefales det at se nærmere på afprøvning af kemisk oxidation med f.eks. Fentons reagens enten *in situ* eller *ex situ* i kombination med pumpning.
- For glyphosat anbefales ligeledes at se nærmere på en form for kemisk oxidation med f.eks. Fentons reagens, ozon eller H₂O₂.
- For bentazon er der ikke umiddelbart nogle af de undersøgte teknikker, som kan anbefales.

I tilfælde, hvor punktkildeforureninger bestående af flere forskellige stofgrupper ønskes oprenset anbefales det, at bredspektrede teknikker som kemisk oxidation eller anvendelse af ZVI overvejes. Derudover kan en kombination af teknikker, målrettet de enkelte stoffer anvendes. Såfremt monitoreret naturlig nedbrydning ønskes anvendt skal det kunne godtgøres ved en risikovurdering, at de stoffer, som ikke umiddelbart forventes at blive nedbrudt, ikke udgør en risiko for grundvandsressourcen.

Det skal dog til enhver tid anbefales, at der inden valg af metode udføres en omfattende risikovurdering, hvor det fastlægges, hvilke stoffer, der ønskes oprenset og til hvilket koncentrationsniveau. Herudover anbefales det, at originallitteraturen for de overvejede metoder konsulteres med henblik på at få et mere omfattende kendskab til detaljer og specifikke forhold ved de udførte forsøg.

Summary and conclusions

The present literature review aims to present the state of the art on remediation technologies that can be used for cleaning up point sources of pesticide contamination that pose a potential threat to the groundwater. More than 80 papers, published between 2002 and 2011 were reviewed. This review focuses on pesticides that have been used in Denmark, and which have been found in the Danish groundwater wells. These are; chlorophenoxy acids (especially MCPP, MCPA, 2,4-D and dichlorprop), triazines (especially atrazine, simazine, cyanazine and terbutylazine), nitro compounds (especially DNOC and dinoseb), isoproturon, diuron, bentazon and glyphosate. Dichlobenil and BAM are not included in this literature review as they have been in focus in previous studies.

This work is an update of an earlier literature review from 2002 / 41 /.

The scientific literature was searched using the FINDit database (provided by the Technical University of Denmark) and the LIX database, which is administrated by the Danish Regions Information Centre on Soil and Groundwater. White papers and conference proceedings from various European and North American conferences (e.g. Battelle) and Danish meetings have also been included, as well as previously published reports from the Danish EPA and USEPA. In addition, the collection of papers in Adventus library, which includes information on remediation applications of Adventus products, has been consulted.

In general, there is very little information and few studies on field scale projects, while there are several studies at laboratory scale.

Due to the lack of an adequate information basis, it is not possible to give generalized recommendations on which remediation technology should be applied for the removal of individual pesticides. It should be noted although traditional pump and treat technologies have not been adressed in this literature update, this method is applicable for the removal of pesticides from groundwater. Based on the collected information, it is recommended that pilot scale studies are imitated in order to further explore the potential of the following remediation technologies:

- For phenoxy acids (MCPA, MCPP, dichlorprop and 2,4-D) performing pilot tests with biological remediation technologies, such as monitored natural attenuation or stimulated biodegradation (for example by adding oxygen or nutrients) is recommended. In addition, the potential of using in situ chemical oxidation should be explored further.
- For triazines (atrazine, simazine, cyanazine, terbutylazine), it is recommended to further explore the combination of organic materials and ZVI, since there are already some field scale applications with

promising results. Attention should be paid to the generation of degradation products.

- Biological remediation technologies (including bioaugmentation) and treatment with ZVI are promising technologies for nitro compounds such as DNOC and dinoseb.
- For phenyl urea herbicides such as isoproturon and diuron it is recommended to further explore the application of chemical oxidation, e.g. with Fenton's reagent, either in situ or ex situ in combination with pumping.
- The use of chemical oxidation with Fenton's reagent or ozone seems promising for the treatment of glyphosate
- No recommendable technologies have been found for the removal of bentazone

For point sources where the contamination consists of a mixture of several compounds, the application of wide spectrum technologies, such as chemical oxidation or ZVI should be considered. A treatment train of technologies that target the individual compounds may also be a viable solution. If monitored natural attenuation is applied, a risk assessment for the non degradable fraction of the contaminant mixture should be performed.

Performing a thorough risk assessment including determination of clean up criteria for individual contaminant is strongly recommended before deciding on a remediation technology for a given pesticide source. Moreover, it is strongly advised that the original literature is consulted before proceeding with the design of a field application in order to get information on the site/experiment specific conditions.

1 Indledning

1.1 Baggrund

Der kan være flere forskellige årsager til at pesticider påvises i grundvandet. En af disse årsager er spredning fra punktkilder forurenet med pesticider. Problemstillingen omkring punktkilder er beskrevet i et forprojekt: Miljøprojekt nr. 1152 fra 2007 /84/. I dette projekt blev foreslået følgende 5 sammenhængende delprojekter:

1. Pesticiddatabase
2. EDB-værktøj til risikovurdering fra skrivebordet
3. Fysiske undersøgelser af pesticidpunktkilder
4. Teknikker til oprensning af forurening fra pesticidpunktkilder
5. Miljøøkonomi

Delprojekt 1 og 2 er gennemført og afrapporteret i /84/. Region Hovedstaden har i samarbejde med Region Syddanmark, Københavns Energi og Miljøstyrelsen i 2007-2010 gennemført delprojekt 3 vedr. fysiske undersøgelser af pesticidpunktkilder /35/. Projektet har primært fokuseret på, hvordan det meget store antal af potentielle pesticidpunktkilder kan minimeres til nogle få, som undersøges nærmere. Herudover er der fokuseret på deciderede undersøgelsesmetoder for punktkilder.

Et af de næste spørgsmål er så, hvad gør vi, hvis/når vi støder på en pesticidpunktkilde, som udgør en risiko for grundvandsmagasinet?

For at forbedre grundlaget for at svare på dette spørgsmål, er delprojekt 4: "Teknikker til oprensning af forurening fra pesticidpunktkilder" gennemført. Delprojektet er gennemført som et litteraturreview, hvor den tilgængelige litteratur vedr. oprensningsmetoder af pesticidpunktkilder, der truer grundvand er gennemgået. Litteraturstudiet afrapporteres her i form af en opsamling på den indsamlede litteratur og afsluttes med anbefalinger vedrørende de mest lovende teknikker, som anses for mulige at gennemføre i Danmark.

Der er ikke taget beslutning om, hvorvidt litteraturstudiet bør efterfølges af en afprøvning i pilotskala af en eller flere lovende teknikker.

Nedbrydning af pesticider har været undersøgt gennem mange år i Danmark, bl.a. under de Strategiske Miljøforskningsprogrammer f.eks. /36-40/. I en PhD-afhandling fra 2002 blev de forskellige oprensningsmetoders egnethed overfor udvalgte pesticider vurderet, baseret på litteraturindsamling fra diverse laboratorie- og feltforsøg /41/. Det her udførte litteraturreview er således en opdatering af det tidligere udførte review.

1.2 Formål

At belyse hvilke metoder der i dag findes til oprensning af pesticidpunktkilder, der truer grundvandet.

2 Kilder til pesticider i grundvand

Pesticider i grundvand stammer primært fra tre typer af kilder; fladekilder, linjekilder og punktkilder.

Fladekilder: Fladekilderne er en betegnelse for den forurening der sker ved den generelle anvendelse i landbruget, f.eks. ved udsprøjtning på marker.

Linjekilder: Linjekilder kan f.eks. være sprøjtning langs jernbaner og veje.

Fladekilder og linjekilder kan medføre påvirkning af grundvandet med pesticider og evt. deres nedbrydningsprodukter over større arealer, men i relativt lave koncentrationer.

Punktkilder: Ved punktkilder forstås en forureningskilde, som er knyttet til et mindre og afgrænset område. Punktkilderne er karakteriseret ved, at forureningsniveauerne i jord og/eller grundvand er meget højere end koncentrationsniveauerne udenfor dette areal.

I tabel 2.1 er forskellige mulige pesticid-punktkilder opsummeret /42,43/.

Tabel 2.1 Mulige pesticid-punktkilder /42,43/.

Område	Forureningskilder
Erhvervsområde	Nuværende og nedlagte industrier
Landbrugsområde	Påfyldnings- og vaskepladser Aje-, ensilage- og gylletanke Nedgravet affald Uheld Gårdspladser
Andre områder	Lossepladser Mergelgrave (evt. deponeret pesticidaffald)

3 Resumé af tidligere udført litteraturreview

I en PhD-afhandling fra 2002 blev de forskellige oprensningsteknologiers egnethed overfor udvalgte pesticider (primært phenoxy-syrer, isoproturon, DNOC, bentazon og BAM og atrazin) vurderet. Vurderingen blev baseret på et litteraturreview over diverse laboratorie- og feltforsøg /41/. I reviewet blev det klart, at langt det meste viden findes i form af laboratorieforsøg og faktiske feltkala forsøg eller fuldskala oprensninger er stort set ikke-eksisterende. Konklusionerne skal således ses i dette lys: selvom en teknik ser meget overbevisende ud i laboratoriet, kan der være praktiske forhold, der gør det vanskeligt at implementere på en konkret sag. Reviewet fra 2002 viser, at især de biologiske afværgeteknologier, reaktive barrierer og kemisk oxidation vil kunne anvendes på pesticidpunktkilder. Hertil kommer, at naturlig nedbrydning også i visse tilfælde vil kunne medføre en tilstrækkelig reduktion i forureningsfluxen – dette gælder naturligvis primært de lettest nedbrydelige pesticider. Reviewets resultater er opsummeret i tabel 3.1 og uddybet nedenfor. Da pesticider ikke er flygtige er teknikker som f.eks. vakuumventilering og termiske teknikker ikke medtaget i oversigten, da de ikke vurderes at være relevante.

Tabel 3.1 Afværgemuligheder for pesticidpunktkilder (modificeret efter /41/)

Teknologi	Er teknologien anvendelig?	Vandtype	Er teknologien implementeret?
Faseoverførsel			
Afværgepumpning	Ja	Grundvand	Ja
Aktivt kul i væg	Ja	Grundvand	Ja
Kemiske teknikker			
Oxidation	Ja (giver dog stabile nedbrydningsprodukter)	Spildevand, kunstigt drikkevand	Nej
Reduktion	Ja (giver dog stabile nedbrydningsprodukter)	Spildevand, kunstigt drikkevand	Nej
Biologiske teknikker			
Stimuleret biologisk nedbrydning	Ja/nej	Grundvand	Nej
Phytoremediering	Ja	Grundvand	Ja

Afværgepumpning

Afværgepumpning kan teoretisk lade sig gøre i homogene grundvandsmagasiner, da de aktuelle pesticider har høj vandopløselighed og lave retardationsfaktorer. Det oppumpede grundvand kræver efterfølgende behandling. Metoden er kendt i forhold til andre forureningskomponenter, men har kun været gennemført på nogle få feltlokaliteter med pesticider, hvor det er lykkedes at opnå kvalitetskriterierne nedstrøms forureningskilden, men uden at det har ført til en fuldført oprensning eller lukning af anlægget.

Immobilisering ved sorption (Permeable Reactive Barriers)

På grund af den meget høj sorptionskapacitet af aktivt kul, kan barrierer i form af "funnel and gate" installationer blive en succes. Teknologien har

været anvendt *in situ*. En af de kritiske parametre er levetiden for anlægget, men der findes desværre ikke mange oplysninger fra fuldskala projekter angående dette.

Kemisk oxidation

Laboratorieforsøg tyder på et stort potentiale for at anvende kemisk oxidation, men dannelsen af sværtnedbrydelige og toksiske nedbrydningsprodukter kræver evt. yderligere behandling. Forskellige oxidationsmidler kan være mere eller mindre velegnet for specifikke pesticider. Indtil 2002 var der fundet ca. 24 studier, hvor kemisk oxidation blev anvendt overfor herbicider i laboratorieskala. Ozon og Fentons reagens har været de hyppigste anvendte oxidationsmidler. I en enkelt feltskala oprensning blev Fentons reagens anvendt overfor 2,4-D med gode resultater. Generelt kan kemisk oxidation anvendes mod pesticider i zoner, hvor der er høje koncentrationer. In situ kemisk oxidation involverer en række tekniske udfordringer uafhængigt af forureningssammensætningen, men knyttet til fordeling og håndtering af oxidationsmidler.

Nul-valent jern (ZVI)

Laboratorieforsøg tyder på et stort potentiale for denne teknik, men dannelsen af svært nedbrydelige og toksiske nedbrydningsprodukter kræver evt. yderligere behandling. Der blev fundet over 20 laboratoriestudier med ZVI mod forskellige pesticider. Chlorphenoxy-syrer er ved denne metode ofte omdannet til mindre halogenerede forbindelser, der dog ofte er mere toksiske. Indtil 2002 blev der kun fundet en enkelt feltskala applikation af ZVI for at behandle en jordforurening med metalochlor.

Naturlig nedbrydning (MNA)

Metoden er implementeret med succes for phenoxy-syrer i aerobe grundvandsmagasiner, men er ikke velegnet for phenoxy-syrer i anaerobe grundvandsmagasiner. Metoden vurderes desuden at kunne være anvendelig overfor isoproturon i aerobe magasiner og DNOC i anaerobe magasiner i visse tilfælde.

Biostimulering og Bioaugmentering

Laboratorieforsøg tyder på, at biostimulering kan anvendes overfor phenoxy-syrer og atrazin. Metoden kan teoretisk også være en mulighed for DNOC og isoproturon i nogle tilfælde. Bioaugmentering vurderes på baggrund af laboratorieforsøg at kunne være effektiv overfor atrazin. Derudover kan metoden teoretisk set være anvendelig for de øvrige herbicider, hvor specifikke nedbrydere er blevet isoleret. Der findes dog ingen felterfaringer med hverken biostimulering eller bioaugmentering indtil 2002.

Phytoremediering

Phytoremediering kan potentielt anvendes så længe koncentrationerne ligger under det toksiske niveau for udvalgte planter. Metodens primære anvendelsespotentiale omhandler terrænnære grundvandsmagasiner.

4 Gennemgang af fokusstoffer

I litteraturstudiet er der fokuseret på pesticider, som har været anvendt i Danmark, og som også har været påvist i det danske grundvand. Listen omfatter phenoxysyrer (specielt MCPP, MCPA, 2,4-D og dichlorprop), triaziner (specielt atrazin, simazin, cyanazin og terbutylazin) nitroforbindelser (specielt DNOC og dinoseb), phenylurea pesticider (isoproturon, diuron), og desuden stoffer som bentazon og glyphosat. Dichlobenil/BAM indgår ikke i litteraturstudiet. Problemstillinger vedrørende dichlobenil og BAM er belyst i tidligere teknologipuljeprojekter.

4.1 Beskrivelse af fokusstofferne

Alle de undersøgte fokusstoffer er herbicider, hvilket betyder, at de er ukrudtsmidler. Stofferne anvendesområder i Danmark er kort beskrevet i det følgende:

Phenoxysyrerne anvendes til ukrudtsbekæmpelse i korn og græs. Stofferne er dog delvist udfasede og anvendes kun i begrænset omfang i dag. Triazinerne er i dag udfasede, men har tidligere generelt haft et bredt anvendelsesområde. For atrazin gælder det, at det specielt har været anvendt på majsmarker. Flere af de andre triaziner har herudover været brugt til ukrudtsbekæmpelse i hække, frugtbuske, frugttræer, asparges og ærter samt generelt været anvendt på planteskoler og i skovbrug. Nitroforbindelsen DNOC har været anvendt i korn, mens nitroforbindelsen dinoseb har været anvendt i både korn, frøafgrøder og ærter. Isoproturon har været anvendt i vintersæd og vårbyg mens bentazon hovedsagelig anvendes i ærter, bønner, græsmarker og til frøafgrøder. Stoffet diuron har været anvendt til ukrudtsbekæmpelse omkring frugtbuske og frugttræer. Endelig har stoffet glyphosat en meget bred anvendelse og anvendes bl.a. under frugttræer, i ærter og græs, generelt på planteskoler, til skovkulturer og på udyrkede arealer som vejarealer og parkeringspladser. Herudover anvendes glyphosat også i private haver /43, 44, 45/. Anvendelsen er kort opsummeret i tabel 4.1.

Tabel 4.1 Primær anvendelse af fokusstoffer /43, 44, 45/.

Stofgruppe	Stoffer	Primær anvendelse	Anvendelsesperiode
Phenoxysyrer	MCPP (synonymer: mecoprop, mechlorprop)	korn og frøgræs	1959-
	MCPA	korn og græs	1956-
	2,4-D	korn	1956-
	dichlorprop	korn og græs	1963-
Triaziner	atrazin,	Majs, udyrkede arealer	1960-1994
	simazin	Majs, frugtbuske, frugttræer, asparges og ærter samt generelt på planteskoler og i skovbrug og på udyrkede arealer.	1957-1994
	cyanazin	Majs, frugtbuske, frugttræer, asparges, raps og ærter samt generelt på planteskoler og i skovbrug.	1972-1994
	terbutylazin	Majs, frugtbuske, frugttræer, asparges og ærter samt generelt på planteskoler og i skovbrug.	1973-1984
Nitroforbindelser	DNOC	Korn	1956-1987
	dinoseb	Frøafgrøder, korn og ærter	1956-1990
Phenylurea	isoproturon	Vintersæd og vårbyg	1976-1999
	diuron	Frugtbuske og frugttræer	1959-2008
Benzothiadiazin	bentazon	Korn og ærter	1974-
Organo-phosphorus	glyphosat	Frugttræer, ærter, græs, planteskoler, skovkulturer, udyrkede arealer, private haver.	1975-

På trods af, at alle fokusstofferne er herbicider har de alligevel meget forskellige fysisk-kemiske egenskaber, og det er således ikke muligt at generalisere vedrørende opløselighed, sorption og lignende. Fysisk-kemiske forhold for fokusstofferne er gengivet i tabel 4.2.

Tabel 4.2 Fysisk kemiske forhold for fokusstofferne. Data fra pesticiddata.dk /210/

Stofgruppe	Navn	Molvægt g/mol	Damptryk Pa (25 °C)	Vandopløselighed mg/l (20 °C)	Henry's konstant Pa x m ³ x mol ⁻¹	logK _{ow} (at pH)	pKa T=20
Phenoxysyrer	MCPA	200,6	2,30E-05	274	5,50E-05	-0,72 (7)	3,73
	MCPP	214,6	1,60E-03	250000 ^a	2,18E-04	0,10 (7)	3,11
	Dichlorprop	235,1	1,00E-05	350	1,23E-03	1,77	3
	2,4-D	221	1,90E-05	23180 ^b	1,30E-05	-0,82 (7)	2,73
Triaziner	Atrazin	215,7	3,90E-05	30	1,50E-04	2,50	1,7
	Simazin	201,7	2,94E-06	6	5,60E-05	2,10	1,62
	Cyanazin	240,7	2,00E-07 ^c	171 ^d	2,78E-05	2,10	0,87
	Terbutylazin	229,7	1,50E-04	8	4,05E-05	3,20 (6,6-7,8)	2
Nitroforbindelser	DNOC	198	1,60E-02	198	2,41E-07	1,78 ^e (4)	4,4
	Dinoseb	240,2	1,10E-04 ^f	52	5,11E+01	3,56	4,62
Phenylurea	Isoproturon	206,3	3,15E-06 ⁱ	70	1,46E-05	2,50	-
	Diuron	233,1	1,15E-06	37	7,04E-06	2,87	-
Benzothiadiazin	Bentazon	240,3	4,60E-04 ^g	570	7,20E-05	-0,46 ^h (7)	3,28
Organofosforus	Glyphosat	169,1	1,31E-05	10500 ^j	2,10E-07	-3,20 (5-9)	-

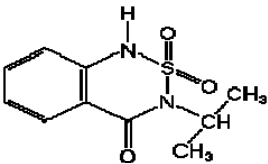
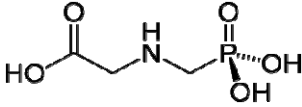
a pH=7, målt for mecoprop-p ved 25 °C, pH 7, med buffer
 b ved 25 °C, pH 7, med buffer
 c ved 20 °C
 d ved 25 °C
 e 1.2 ved pH=7
 f 0.00013 ved 18 °C
 g 0.00017 ved 20 °C
 h 22 °C
 i 20 °C
 j pH=2

Stoffernes CAS-nummer, kemiske struktur m.m. er vist i tabel 4.3.

Tabel 4.3. Kemisk struktur m.m.

	Navn	Bruttoformel	CAS nr.	CAS navn	IUPAC navn	Strukturformel
Phenoxysyrer	MCPA	C ₉ H ₉ ClO ₃	94-74-6	2-(4-chloro-2-methylphenoxy)acetic acid	4-chloro- <i>o</i> -tolylloxyacetic acid	
	MCPP	C ₁₀ H ₁₁ ClO ₃	7085-19-0	2-(4-chloro-2-methylphenoxy)propanoic acid	(<i>RS</i>)-2-(4-chloro- <i>o</i> -tolylloxy)propionic acid	
	Dichlorprop	C ₉ H ₈ Cl ₂ O ₃	120-36-5	2-(2,4-dichlorophenoxy)propanoic acid	(<i>2RS</i>)-2-(2,4-dichlorophenoxy)propionic acid	
	2,4-D	C ₈ H ₆ Cl ₂ O ₃	94-75-7	2-(2,4-dichlorophenoxy)acetic acid	(2,4-dichlorophenoxy)acetic acid	

	Navn	Bruttoformel	CAS nr.	CAS navn	IUPAC navn	Strukturformel
Triaziner	Atrazin	C ₈ H ₁₄ ClN ₅	1912-24-9	6-chloro- <i>N</i> -ethyl- <i>N'</i> -(1-methylethyl)-1,3,5-triazine-2,4-diamine	6-chloro- <i>N</i> ² -ethyl- <i>N</i> ⁴ -isopropyl-1,3,5-triazine-2,4-diamine	
	Simazin	C ₇ H ₁₂ ClN ₅	122-34-9	6-chloro- <i>N,N'</i> -diethyl-1,3,5-triazine-2,4-diamine	6-chloro- <i>N</i> ² , <i>N</i> ⁴ -diethyl-1,3,5-triazine-2,4-diamine	
	Cyanazin	C ₉ H ₁₃ ClN ₆	21725-46-2	2-[[4-chloro-6-(ethylamino)-1,3,5-triazin-2-yl]amino]-2-methylpropanenitrile	2-(4-chloro-6-ethylamino-1,3,5-triazin-2-ylamino)-2-methylpropionitrile	
	Terbutylazin	C ₉ H ₁₆ ClN ₅	5915-41-3	6-chloro- <i>N</i> -(1,1-dimethylethyl)- <i>N'</i> -ethyl-1,3,5-triazine-2,4-diamine	<i>N</i> ² - <i>tert</i> -butyl-6-chloro- <i>N</i> ⁴ -ethyl-1,3,5-triazine-2,4-diamine	
Nitroforbindelser	DNOC	C ₇ H ₆ N ₂ O ₅	534-52-1	2-methyl-4,6-dinitrophenol	4,6-dinitro- <i>o</i> -cresol	
	Dinoseb	C ₁₀ H ₁₂ N ₂ O ₅	88-85-7	2-(1-methylpropyl)-4,6-dinitrophenol	(<i>RS</i>)-2- <i>sec</i> -butyl-4,6-dinitrophenol	
Phenylurea	Isoproturon	C ₁₂ H ₁₈ N ₂ O	34123-59-6	<i>N,N</i> -dimethyl- <i>N'</i> -[4-(1-methylethyl)phenyl]urea	3-(4-isopropylphenyl)-1,1-dimethylurea	
	Diuron	C ₉ H ₁₀ Cl ₂ N ₂ O	330-54-1	<i>N'</i> -(3,4-dichlorophenyl)- <i>N,N</i> -dimethylurea	3-(3,4-dichlorophenyl)-1,1-dimethylurea	

	Navn	Bruttoformel	CAS nr.	CAS navn	IUPAC navn	Strukturformel
Benzothiadiazin	Bentazon	C ₁₀ H ₁₂ N ₂ O ₃ S	25057-89-0	3-(1-methylethyl)-1 <i>H</i> -2,1,3-benzothiadiazin-4(3 <i>H</i>)-one 2,2-dioxide	3-isopropyl-1 <i>H</i> -2,1,3-benzothiadiazin-4(3 <i>H</i>)-one 2,2-dioxide	
Organo-phosphorus	Glyphosat	C ₃ H ₈ NO ₅ P	1071-83-6	2-[(phosphonomethyl) amino] acetic acid	N-(phosphonomethyl) glycine	

Nedenfor er der kort redegjort for, hvorledes de fysisk-kemiske forhold m.m. influerer på nedbrydelighed, fordampning, ionisering og sorption.

4.1.1 Nedbrydelighed

Blandt de mest udbredte af fokusstofferne hører grupperne af phenoxysyrer og triaziner. Phenoxysyrerne anses normalt for at være nedbrydelige under aerobe forhold (f.eks. i pløjelaget) og formodes til en vis grad at kunne nedbrydes under anaerobe forhold. Imidlertid når stofferne ikke altid at blive nedbrudt helt i pløjelaget, og stofferne samt deres nedbrydningsprodukter, chlorphenoler, er da også fundet i grundvand i adskillige tilfælde. For triazinerne forholder det sig som for phenoxysyrerne: Nedbrydelighed er vist både under aerobe og anaerobe forhold, men koncentrationer af atrazin på op til 200 gange grænseværdien på 0,1 µg/l er påvist i grundvand /212/. Nitroforbindelserne er generelt mest nedbrydelige under anaerobe forhold /14,51/, mens der ikke er fundet mange studier vedrørende nedbrydning af de resterende fokusstoffer i jord og grundvand.

4.1.2 Fordampning

Alle ovennævnte herbicider er karakteriseret ved meget lavt damptryk, og lav Henrys lovs konstant. Stoffer med lav Henrys lovs konstant (<10 Pa m³/mol) anses for ikke-flygtige. Henry's konstant for alle stoffer i tabel 4.2 på nær dinoseb er angivet til værdier mindre end 1 x 10⁻² Pa m³/mol. Det betyder at stofferne ikke er flygtige, hvorfor der kan ses bort fra fordampning når transport og skæbne af disse stoffer i miljøet vurderes.

4.1.3 Ionisering

Syrekonstanten pK_a angiver den pH-værdi, hvor halvdelen af et stof er på ioniseret form og den anden halvdel er på neutral form /212/. Phenoxysyrer, DNOC, dinoseb og glyphosat er organiske syrer med pK_a værdier i intervallet 0,8-4,5. Stofferne vil derfor i stor grad (over 50 %) optræde i ioniseret form i grundvandet, hvor pH-værdierne typisk ligger mellem 5,5 og 7,5. Dette har stor betydning for stoffernes sorption. Den neutrale fraktions sorption er oftest styret af det faste organiske kulstofindhold (og kan estimeres vha. bl.a. K_{oc}-neutral værdien, se afsnit 4.1.4), mens den ioniserede fraktions sorption er styret af kompleksdannelsen. Sorption af ioniserbare stoffer er svær at estimere og afhænger bl.a. af pH og ionsammensætning i jorden. Denne type

sorption kan ikke estimeres på baggrund af en stofparameter med mindre man udfører forsøg med det pågældende stof og jordmatricen. Triazinerne er svage organiske baser med lave pK_a -værdier og forventes derfor hovedsageligt at optræde i neutral form i grundvandet.

4.1.4 Vandopløselighed

De udvalgte stoffernes vandopløselighed varierer meget. Vandopløselighed afhænger bl.a. af temperatur og pH. Generelt er phenoxysyrer og glyphosat mere vandopløselige end de øvrige pesticider.

4.1.5 Sorption

Herbiciderne i tabel 4.2, med undtagelsen af glyphosat, er karakteriseret ved lav sorption og dermed høj mobilitet i grundvandet.

For chlorphenoxysyrerne, som oftest optræder hovedsageligt i dissocieret form ved typiske pH værdier i grundvandet, er der fundet K_d -værdier på 0 - 0,26 l/kg /41/, som tyder på meget høj opløselighed i vand og høj mobilitet. Pga. dissociation kan disse K_d -værdier ikke korreleres til K_{oc} - eller K_{ow} -værdier.

Sorption af triaziner stiger ved lave pH værdier. Triaziner har $\log K_{ow}$ -værdier under 3, hvorfor stofferne anses for mobile. Der er i forsøg med forskellige jordtyper fundet en stor spredning i K_d -værdier i intervallet 0,01-7,3 /213/. Sorption af triaziner kan afhænge af både det organiske kulstofindhold i jorden og van der Waals kræfter /41/.

Organiske nitroforbindelser som DNOC og dinoseb er svage organiske syrer og karakteriseres ved relativt lav mobilitet ift. andre herbicider /41/. For DNOC vurderes hovedparten af sorption at skyldes elektriske kræfter mere end sorption til organisk kulstof. K_d -værdier for DNOC er fundet i intervallet 0,1-0,98 l/kg, som betyder at stoffet har en høj mobilitet /41/.

Phenylurea herbicider dissocierer ikke. Deres sorption er primært styret af det organiske kulstofindhold i jorden. Stofferne er mobile ($\log K_{ow} < 3$) men i mindre grad end phenoxysyrerne og triazinerne.

Bentazon er en stærk organisk syre og optræder, som phenoxysyrerne primært på dissocieret form i grundvand ved almindelige pH-værdier. Dette betyder, at bentazon er meget mobil. K_d -værdier for bentazon er tidligere fundet i intervallet 0 til 0,05 l/kg /41/.

Glyphosat er en stærk organisk syre med en meget lav syrekonstant på 0,8. Glyphosat optræder næsten udelukkende på dissocieret form i miljøet og sorberer kraftigt til jorden pga. ioniske bindinger med jordens positivt ladede mineraler /81/.

5 Litteratursøgning

5.1 Databaser

Den videnskabelige litteratur er søgt via DTV's artikeldatabase FINDit, som giver fri adgang til abstracts fra ISI tidsskrifter samt en række konferenceartikler. Databasen indeholder hovedsageligt litteratur publiceret i internationale videnskabelige tidsskrifter, dvs. artikler der inden publikation er kritisk gennemlæst (peer reviewed) af eksterne forskere.

Der findes kun få videnskabelige artikler, der beskriver erfaringer om feltforsøg, økonomi og risikovurderinger. Der er derfor indhentet supplerende viden fra øvrige artikler og rapporter m.v. (grå litteratur). Dette inkluderer konference-proceedings fra f.eks. Battelle-konferencer, andre europæiske og nordamerikanske konferencer og danske møder, samt en række rapporter udgivet af Miljøstyrelsen i Danmark og USA. Da der er store kvalitetsforskelle i denne litteratur, er der efter en faglig bedømmelse sket en udvælgelse af de mest relevante artikler og rapporter. Endvidere er der foretaget en søgning i Adventus Library som indeholder artikler skrevet af Adventus om anvendelse af deres produkter til *in situ* oprensninger. Idet Adventus er et kommercielt firma skal artiklerne vurderes kritisk.

Udover FINDit er der søgt i databasen LIX som administreres fra Videncenter for Jordforurening og indeholder flere tusinde artikler, foredragsmaterialer, rapporter m.m. om jord- og grundvandsforurening.

De væsentligste oplysninger om de enkelte artikler (både videnskabelige artikler, og andre artikler) er samlet i appendiks A.

5.2 Søgekriterier

Der er opstillet en række optimale søgekriterier, som er anvendt i søgningen på FINDit databasen. I databasen LIX, er der blot søgt på stofnavne og ordene "pesticider" og "herbicider".

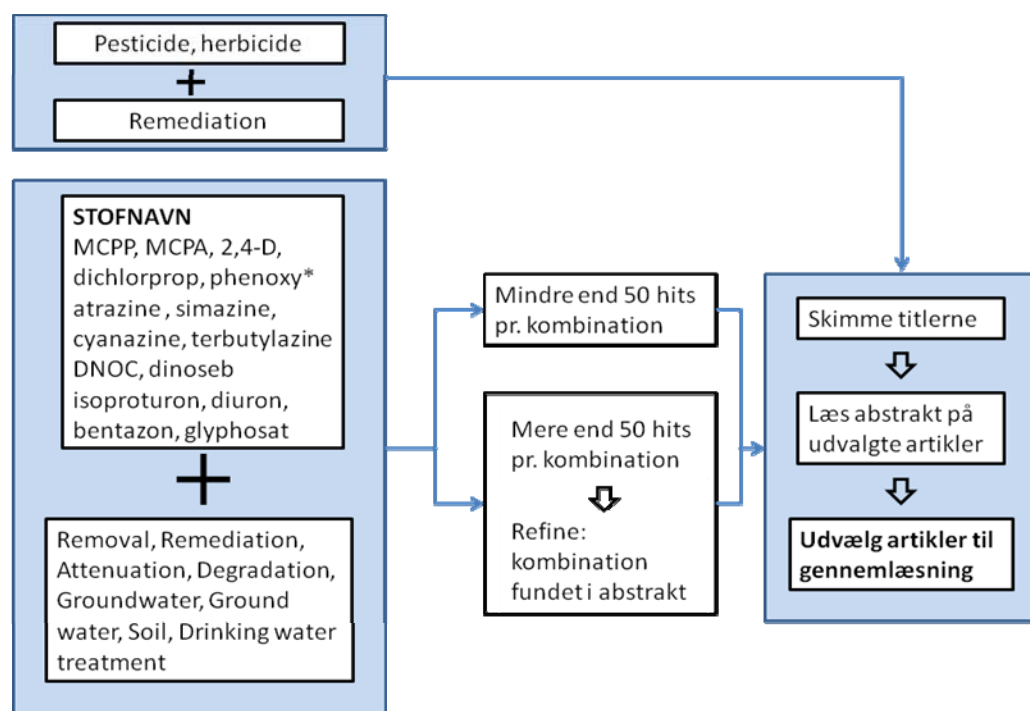
Der er foretaget en "iterativ" søgning.

Søgekriterier i FINDit bestod af stofnavne for de forskellige fokuspesticider, kombineret med:

- remediation, attenuation, degradation, groundwater (ground water), drinking water treatment, removal,
- soil (specielt for glyphosat),
- pesticides, herbicides kombineret med det ovennævnte

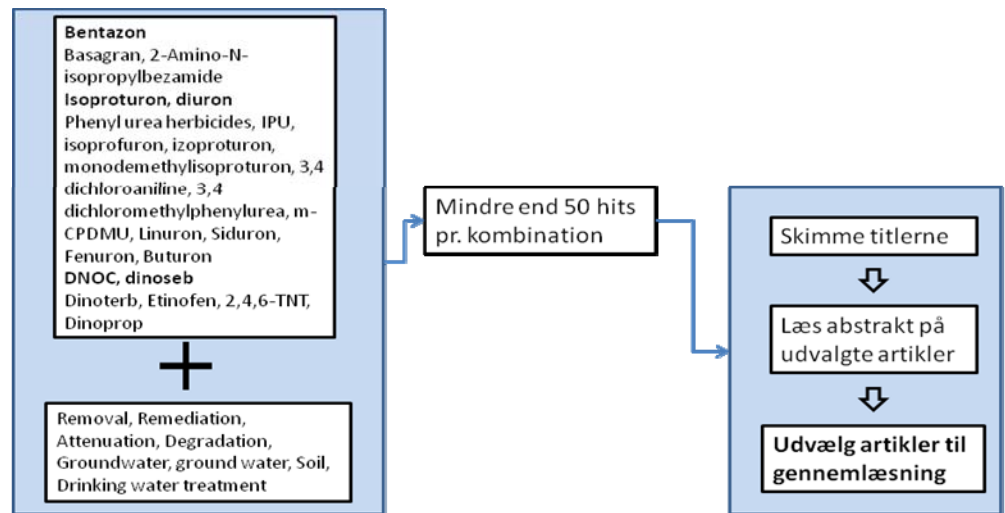
Afhængigt af antallet af artikler fundet, blev søgningerne raffineret ved at kombinere flere af de ovennævnte ord. Fremgangsmåden fremgår af figur 5.1. I de tilfælde hvor en søgningskombination gav flere end 50 hits blev søgningen begrænset til artikler, hvor ordene kunne findes i artiklens abstract.

Artiklerne blev gennemgået, og efterfølgende blev der udført en supplerende søgning for at skaffe oplysninger for de stoffer, hvor der i første omgang ikke blev fundet tilstrækkeligt antal artikler.



Figur 5.1 Fremgangsmåde for den 1. søgning
*phenoxy**: der er søgt for alle ord der begynder med eller indeholder "phenoxy"

For stofferne phenoxy-syrer og triaziner foreligger der en del litteratur vedrørende nedbrydning af disse stoffer, som kan anvendes i oprensningssøjemed. For stofferne bentazon, isoproturon, diuron, DNOC og dinoseb har der kun været ganske få artikler. For disse stoffer er litteratuddelen derfor udvidet til at omfatte stoftyper, som har lighedspunkter med de nævnte pesticider, idet det vurderes, at meget af den viden man har opnået om afværgeteknikker på andre stofgrupper kan overføres til pesticidpunktkildeproblematikken under hensyntagen til de forskellige stoffers fysiske-kemiske egenskaber. Der blev udført en supplerende søgning, hvor der blev søgt med bredere søgningskriterier, dvs. stofgrupper. Fremgangsmåde for denne søgning kan ses i figur 5.2.



Figur 5.2 Fremgangsmåde for den supplerende søgning.

Der blev i alt fundet 680 relevante artikler, hvis abstracts blev læst. På baggrund af de relevante abstracts blev der udvalgt ca. 85 artikler og rapporter, der blev anskaffet i fuld tekst og gennemlæst i detaljer.

6 Resultater

Generelt er vidensniveauet meget begrænset i forhold til felterfaringer, mens der findes langt flere forsøg, som er gennemført på laboratorieskala. Forsøgene er udført under meget forskellige forhold, herunder koncentrationsniveau og matrix. I nogle tilfælde, er koncentrationsniveauet af pesticiderne i forsøgene meget højere end hvad, der typisk træffes i en punktkilde, hvilket kan give et urealistisk billede af nedbrydeligheden (både positivt og negativt). Der opfordres derfor til at konsultere den refererede litteratur, såfremt man ønsker at gå videre med en metode for at sikre at forholdene er sammenlignelige. I det følgende gennemgås litteratursøgningen først i forhold til den viden, der haves fra feltforsøg, og efterfølgende i forhold til den viden, der haves fra laboratorieforsøg. For fuldstændighedens skyld er resultaterne fra det tidligere udførte litteraturreview /41/ ligeledes inddraget i de respektive resultatafsnit, dog haves for disse referencer ikke samme detaljeringsniveau, som haves for referencerne fra det her udførte review. Det skal her bemærkes, at der i litteraturreviewet ikke er fokuseret på afværgepumpning som afværgeteknik.

I resultatgennemgangen er der foruden fokusstofferne medtaget stoffer, som fysisk har lighed med nogle af fokusstofferne. For triazinerne er medtaget resultater for RDX (1,3,5-Trinitroperhydro-1,3,5-triazine), for nitroforbindelserne er medtaget TNT (trinitrotoluen) og DNT (dinitrotoluen) og for phenylurea er der medtaget linuron. Herudover er der medtaget resultater for nogle få andre stoffer, hvor studierne er fundet relevante. Gruppen af "andre" omfatter: Metalachlor, alachlor, parathion, methylparathion, malathion og sulfotep.

Resultaterne er opsummeret i tabel 6.1 og 6.2. I kapitel 7 er de forskellige oprensningmetoder diskutere i forhold til anvendelighed overfor pesticider. Herudover henvises til bilag A, hvor de enkelte referencer kan genfindes, og hvor yderligere informationer er noteret.

6.1 Gennemgang af resultater for feltstudier

6.1.1 Erfaringer, feltstudier

Generelt er der kun få felterfaringer med oprensning af pesticider på feltskala. De få forsøg, der findes, er desuden ofte udført med forskellige blandinger af pesticider. Erfaringer fra det ene feltforsøg kan derfor ikke nødvendigvis overføres direkte til det andet feltforsøg. Omvendt er der så relativt få erfaringer, at det anbefales at indhente inspiration fra andre projekter velvidende, at forskellige stoffblandinger kan have en betydning for effekten af de respektive afværgetekniker.

Nedenfor er resultaterne inddelt efter stofgruppe. Soges oplysninger på et eller flere stoffer, vil nedenstående gennemgang kort opsummere den eksisterende viden. Der opfordres dog til at konsultere den refererede litteratur, såfremt man ønsker at gå videre med en metode.

6.1.2 Resultater inddelt på stofgrupper, feltstudier

En opsummering af resultaterne ses i tabel 6.1. I bilag a findes supplerende oplysninger.

Tabel 6.1 Opsummering af resultater for feltstudier.

Stofgruppe	Stof	Teknologi	Antal studier (positive*)	Antal studier (negative**)	Reference
Phenoxysyrer	MCPP/2,4-D/dichlorprop	Naturlig nedbrydning	5	2	36, 41, 79,80, 83
	2.4-D	Kemisk oxidation (Fentons)	1		41
Triaziner	atrazin	Naturlig nedbrydning		2	79,80
	atrazin	Bioaugmentering	1		34
	atrazin	Stimuleret biologisk nedbrydning (anaerob)	1		2
	atrazin, simazin og BAM	Kemisk oxidation (ozon)	1		67
	atrazin/cyanazin	ZVI kemisk/biologisk nedbr.	1		60
	atrazin/phenidimethalin	ZVI + CH ₃ COOH + AL ₂ (SO ₄) ₃	1		48
	atrazin, simazin og BAM	Phytoremediering	1		20
	RDX	Stimuleret biologisk nedbrydning (anaerob)	2		6, 17
Nitroforbindelser	dinoseb	Stimuleret biologisk nedbrydning (anaerob)	3		2,29,63
	DNOC	Naturlig nedbrydning	1		4
	TNT, DNT	Bioaugmentering	1		16
	TNT, DNT	Kompost	3		16
	TNT, DNT	Stimuleret biologisk nedbrydning (anaerob)	2		6, 16, 17
	TNT, RDX	ZVI reaktiv væg	1		74
Phenylurea	Isoproturon	Naturlig nedbrydning		1	36
Bezothiazin	bentazon	Naturlig nedbrydning		1	36
	bentazon	Phytoremediering	?		76
Andre	metalachlor/alachlor	ZVI + CH ₃ COOH	1		48
	parathion, methylparathion, malathion, sulfotep	Basisk hydrolyse/biologisk nedbr.	1		68

*: med positiv menes at der er set nedbrydning/fjernelse af stoffet

** med negativ menes, at der ikke er set nedbrydning/fjernelse af stoffet

Phenoxysyrer (MCPP, MCPA, 2,4-D, dichlorprop)

For phenoxysyrerne er der fundet fire nyere studier som beskriver feltforsøg med naturlig nedbrydning af et eller flere af stofferne under aerobe forhold i hhv. Vejen, Danmark/36/, Sjølund Losseplads, Danmark /83/og Canada /79/ samt under anaerobe forhold i lossepladsperkolat i Grindsted, Danmark /80/. Heraf er de tre første positive i forhold til nedbrydning og det sidste negativt i forhold til nedbrydning. Herudover er der i det tidligere udførte review /41/

refereret to andre positive og et andet negativt forsøg med naturlig nedbrydning af phenoxysyrer i feltforsøg.

Der foreligger ifølge det tidligere review et feltforsøg, hvor phenoxysyren 2,4-D er set nedbrudt ved brug af kemisk oxidation (Fentons) /41/.

Triaziner (atrazin, simazin, cyanazin, terbutylazin)

For atrazin foreligger der to studier /79,80/, som beskriver feltforsøg med naturlig nedbrydning udført under aerobe forhold dels i Canada og dels i Vejen, DK. Begge studier har dog været negative, hvilket betyder, at der ikke blev observeret nedbrydning af stoffet.

Herudover foreligger der studier med atrazinformuret jord, hvor der i feltforsøg er set nedbrydning ved stimuleret biologisk nedbrydning (anaerob) /2/ og bioaugmentering /34/. Det explosive stof RDX, som strukturmæssigt ligner atrazin, er ligeledes set fjernet i feltforsøg med stimuleret biologisk nedbrydning (anaerob) /6,17/.

For div. kombinationer af triaziner foreligger der feltstudier, hvor kemisk oprensning er afprøvet ved hhv. kemisk reduktion/biologisk nedbrydning vha. ZVI + EOS (soyabønneolie) /60/, ZVI i kombination med eddikesyre og salte /48/ samt kemisk oxidation med ozon /67/. Alle tre studier viste at stofferne kunne nedbrydes, dog blev der i nogle tilfælde rapporteret om dannelse af nedbrydningsprodukterne DEA (desethylatrazin), DIA (desisopropylatrazin) og HA (hydroxyatrazin).

Endelig er der rapporteret om et vellykket feltforsøg, hvor atrazin og simazin oprensnes ved phytoremediering ved at plante træer, der rodfæster i det terrænnære grundvand /20/.

Der er ikke fundet referencer vedr. terbutylazin.

Nitroforbindelser (DNOC og dinoseb)

For DNOC foreligger der et feltstudie, hvor der er observeret naturlig nedbrydning af stoffet under anaerobe forhold i grundvandet /4/.

For dinoseb foreligger der tre forskellige studier af stimuleret biologisk nedbrydning (anaerob), hvor forskellige kulstofkilder: HRC /29/, Daramend® /2/ og kartoffelstivelse /63/ er anvendt. I alle forsøg kunne der konstateres nedbrydning af dinoseb.

For det lignende stof TNT findes mange studier, hvor stoffet med succes er set nedbrudt ved stimuleret biologisk nedbrydning (anaerob) /6,16,17/, bioaugmentering /16/ eller tilsætning af kompost som kulstofkilde /16/. Alle forsøg viste nedbrydning af stoffet. Endelig er der rapporteret om et enkelt studie, hvor TNT og RDX nedbrydes i felten vha. ZVI i reaktiv væg /74/.

Phenylurea (isoproturon, diuron)

Der foreligger data fra et feltforsøg gennemført i Vejen i Danmark /36/, hvor den naturlige nedbrydning af isoproturon er undersøgt i aerobt grundvand. Ved forsøget sås dog ingen nedbrydning.

For diuron er der ikke fundet referencer vedr. feltforsøg med stofferne.

Benzothiadiazin (bentazon)

For bentazon er der fundet et feltforsøg udført i Vejen, DK, hvor den naturlige nedbrydning af bentazon er undersøgt. Ved forsøget sås dog ingen nedbrydning /36/.

Herudover er der fundet et studie, som beskriver metoder til bestemmelse af planteoptag af bentazon /76/. Studiet belyser dog ikke oprensningseffekten i forhold til en jord-/grundvandsforurening, og hvorvidt phytoremediering er effektiv overfor bentazon kan derfor ikke vurderes.

Organo-phosphorus (glyphosat)

For glyphosat er der ikke fundet referencer vedr. feltforsøg med stoffet.

Andre pesticider

For stofferne parathion, methylparathion, malathion og sulfotep er det i feltforsøg set, at basisk hydrolyse kan spalte stofferne til mere mobile og mindre giftige nedbrydningsprodukter /68/. Forsøgene blev udført ved Høfde 42 i Jylland, hvor grundvandet var anaerobt. Det vides dog ikke, om metoden er anvendelig overfor fokusstofferne i dette litteraturreview.

Herudover er det i felten set, at ZVI + tilsætning af eddikesyre kan nedbryde stofferne alachlor og metolachlor /48/.

6.2 Gennemgang af resultater for laboratorieforsøg

6.2.1 Erfaringer, laboratorieforsøg

Der foreligger en del forsøg med oprensning af pesticider på laboratorieskala. De forsøg, der findes, er ofte udført med forskellige blandinger af pesticider. Pesticidforureninger vil også ofte forekomme som et mix af flere stoffer. Om et givent stof vil kunne oprenses ved de omtalte metoder ved en evt. *in situ* applikation kan dog afhænge af, hvorvidt forureningssammensætningen på lokaliteten er tilsvarende med blandingen i de heri omtalte forsøg.

Nedenfor er resultaterne inddelt efter stofgruppe. Søges oplysninger på et eller flere stoffer vil nedenstående gennemgang kort opsummere den eksisterende viden. For fuldstændighedens skyld er resultaterne fra det tidligere udførte review medtaget.

Det skal pointeres, at den udførte litteraturgennemgang har vist, at resultaterne ikke er entydige, og det er ikke muligt at give et klart svar på, om et givent stof kan oprenses ved en given metode eller ej. Der opfordres derfor til at konsultere den refererede litteratur, såfremt man ønsker at gå videre med en metode. Der opfordres ligeledes til at konsultere den refererede litteratur m.h.t. dannelse af evt. toksiske nedbrydningsprodukter, som følge af anvendelsen af de beskrevne metoder.

6.2.2 Resultater inddelt på stofgrupper, laboratorieforsøg

Alle resultater fra laboratorieforsøg er opsummeret i tabel 6.2. I bilag A findes supplerende oplysninger.

Tabel 6.2 Opsummering af resultater for laboratoriestudier.

Stofgruppe	Stof	Teknologi	Antal studier (positive*)	Antal studier (negative**)	Reference
Phenoxy syrer	MCPA/MCPP/2,4-D/ dichlorprop	Naturlig nedbrydning	1	2	3, 23, 27, 47
	MCPP	Stimuleret biologisk nedbrydning. (aerob)	1	1	41
	MCPP/MCPA	Kemisk oxidation (ozon)	2		41
	MCPP	Kemisk oxidation (H ₂ O ₂ + metalporpyriner)	1		49
	2,4-D	Stimuleret biologisk nedbrydning (anaerob)	1		2
	2,4-D	Kemisk oxidation (elektrokemisk oxidation)	1		50
	2,4-D	Kemisk oxidation (fentons)	1		28
	2,4-D	Phytoremediering	1		20
Triaziner	atrazin	Flushing (+ surfactant)	2		10, 30
	atrazin	Flushing + Kemisk oxidation (Fentons)	1		54
	atrazin	Kemisk oxidation (fentons)	2		10, 25
	atrazin	Kemisk oxidation (H ₂ O ₂ + metalporpyriner)	1		49
	atrazin	Metoder til denitrifikation			55
	atrazin/simazin	Naturlig nedbrydning	2	2	3, 26
	atrazin	Stimuleret biologisk nedbrydning (aerob)	1		18
	atrazin	Stimuleret biologisk nedbrydning (anaerob)	1		2
	atrazin	ZVI	1		33
	atrazin	ZVI/nZVI	3		56, 52, 75
	atrazin, propazin, simazin	ZVI	1		77
	atrazin/simazin	Bioaugmentering	3		26, 41
	atrazin	Phytoremediering	2		41
	atrazin	Stimuleret biologisk nedbrydning	1		41
	atrazin/cyanazin/simazin	Kemisk oxidation, Ozon	4		41
	atrazin/cyanazin/simazin	Kemisk oxidation, Fentons	2		7, 41
	atrazin/RDX	ZVI	5		41
	cyanazin	Kemisk oxidation (ozon, UV-radiation, H ₂ O ₂)	1		53
	S-triaziner, atrazin, cyanazin, alachlor, metolachlor	Kemisk oxidation (fenton + specifikke bakterier)	1		66
	RDX	Stimuleret biologisk nedbrydning (anaerob)	2		6, 17

*: med positiv menes at der er set nedbrydning/fjernelse af stoffet

** med negativ menes, at der ikke er set nedbrydning/fjernelse af stoffet

Tabel 6.2 Opsummering af resultater for laboratoriestudier (fortsat).

Stofgruppe	Stof	Teknologi	Antal studier (positive*)	Antal studier (negative**)	Reference
Nitroforbindelser	dinoseb	Bioaugmentering (anaerob)	1		69
	dinoseb	Stimuleret biologisk nedbrydning (aerob?)	1		15
	dinoseb	ZVI	2		19, 31
	<i>dinoseb</i>	<i>Bioaugmentering</i>	<i>1</i>		<i>41</i>
	DNOC	<i>Naturlig nedbrydning</i>	<i>1</i>		<i>41</i>
	DNOC	Stimuleret biologisk nedbrydning (aerob?)	1		15
	TNT, DNT	Bioaugmentering	1		16
	TNT, DNT	Kompost	3		16
	TNT, DNT	nZVI	1		19
	TNT, DNT	Phytoremediering	1		16
	<i>TNT, DNT</i>	<i>Kemisk oxidation (Fentons)</i>	<i>4</i>		<i>41</i>
	<i>TNT,</i>	<i>ZVI</i>	<i>3</i>	<i>2</i>	<i>41</i>
Phenylurea	diuron	Kemisk oxidation (fentons)	1		12
	diuron, linuron	Kemisk oxidation (photofentons)	1		14
	diuron m.fl.	isolering af bakterier	1		73, 78
	diuron/linuron	Kemisk oxidation (Fenton 3 x modifikationer)	1		51
	fenuron	Kemisk oxidation (UV, ozon, Fentons, kombinationer)	1		1
	<i>diuron</i>	<i>Kemisk oxidation (Fentons)</i>	<i>1</i>		<i>41</i>
	Isoproturon	Naturlig nedbrydning	1		3
	Linuron	Flushing	1		30
	Linuron	Kemisk oxidation	1		14
	phenyl-urea, diuron,	Isolering af bakterier	1		76
	phenyl-urea, diuron, monuron, fenuron, chloroxuron	Basisk og neutral hydrolyse	1		72
	phenyl-urea, isoproturon, chlortoluron, chloroxuron	Kemisk oxidation (elektrofenton og sollys)	2		70,71
Bezothiadizin	Bentazon	Immobilisering	1		8
	Bentazon	Naturlig nedbrydning		2	22, 41
Organo-phosphorus	glyphosat	Bioaugmentering	1		13
	glyphosat	Kemisk oxidation (manganoxid)	1		65
	glyphosat	Kemisk oxidation (ozon)	1		5
	glyphosat	Kemisk oxidation (UV+H2O2)	1		24
	glyphosat	Naturlig nedbrydning.	2		47,64
	<i>glyphosat</i>	<i>Kemisk oxidation (ozon)</i>	<i>1</i>		<i>41</i>
	<i>glyphosat</i>	<i>Kemisk oxidation (permanganat)</i>		<i>1</i>	<i>41</i>
	glyphosat	Stimuleret biologisk nedbrydning (aerob)	1		32
Andre	alachlor	nZVI og reductiv dechlorering	1		52
	parathion/malathion	ZVI	1		86

*: med positiv menes at der er set nedbrydning/fjernelse af stoffet

** med negativ menes, at der ikke er set nedbrydning/fjernelse af stoffet

Phenoxysyrer (MCP, MCPA, 2,4-D, dichlorprop)

For phenoxysyrerne foreligger der 4 referencer, hvor den naturlige nedbrydning er undersøgt, alle positive i forhold nedbrydning /3, 23,27,47/, dog viser /3/, at nedbrydningen kun finder sted under aerobe forhold, i hhv. umættet zone og i aerobt grundvand, mens der ikke sker nedbrydning i anaerobt grundvand. Desuden skal det nævnes, at forsøgene i /23/ er gennemført med en speciel isoleret bakteriestamme, som anvender phenoxysyrerne som eneste kulstofkilde.

I det tidligere udførte review rapporteres om et positivt forsøg med stimuleret biologisk nedbrydning af MCP (aerob) /41/, mens der i /2/ rapporteres om et positivt forsøg med anaerob stimuleret biologisk nedbrydning af 2,4-D. I sidstnævnte tilfælde er 2,4-D nedbrudt ved reduktiv dechlorering ved anvendelse af Daramend®.

I det tidligere udførte review rapporteres om to studier, det ene med MCP og det andet med MCPA, hvor kemisk oxidation af stofferne er lykkedes ved brug af ozon /41/. Herudover er der fundet en reference, hvor MCP er nedbrudt ved kemisk oxidation ved brug af H₂O₂ og metalporpyriner /49/ samt to forsøg, hvor 2,4-D er nedbrudt ved hhv. elektrokemisk oxidation /50/ og Fentons /28/.

Endelig er der fundet en reference, som beskriver positiv oprensning af 2,4-D i jord ved brug af phytoremediering i rhizosferen ved anvendelse af græs /20/.

Triaziner (atrazin, simazin, cyanazin, terbutylazin)

For atrazin foreligger der et forsøg, hvor atrazin er set nedbrudt i umættet zone, mens forsøg i grundvand, både aerobt og anaerobt, ikke har vist nedbrydning /3/.

For atrazin foreligger der to studier, hvor den biologiske nedbrydning er øget ved tilsætning af ilt /18, 41/, mens der i /2/ er rapporteret om vellykket øget biologisk nedbrydning ved metoden reduktiv dechlorering og anvendelse af Daramend®. For det lignende stof RDX er der i to studier rapporteret om stimuleret biologisk anaerob nedbrydning /6, 17/.

For atrazin er der endvidere fundet et review, der omhandler isolering af atrazinnedbrydende bakterier under denitrificerende forhold /55/. Artiklen kan ikke direkte anvendes i forhold til forslag om metoder til oprensning af stoffet, men indikerer at det er muligt at isolere bakterier under de givne redoxforhold.

Bioaugmentering med en *Pseudomonas* bakteriestamme har ifølge det tidligere udførte review vist positiv indflydelse på nedbrydningen af atrazin i tre studier /41/.

For simazin er der rapporteret om naturlig nedbrydning i /26/, mens samme studie viste, at bioaugmentering med en *Pseudomonas* bakteriestamme ikke øgede nedbrydningen af simazin, men blot øgede hastigheden.

For forskellige triaziner foreligger der en del nyere studier, hvor stofferne er nedbrudt kemisk ved tilsætning af jern i form af enten ZVI eller nZVI /33, 56, 52, 75, 77/. I det tidligere udførte review rapporteres ligeledes om 5 andre studier, hvor triaziner er set nedbrudt vha. ZVI /41/. Dog er det ofte ved disse forsøg observeret, at der kan dannes forskellige nedbrydningsprodukter. Det er især dehalogenerede triaziner der dannes ved brug af ZVI og nZVI. Disse stoffer er mindre toksiske end f.eks. atrazin, men deres potentielle sundheds- og miljøeffekter er ikke velundersøgte.

Kemisk nedbrydning af triaziner er også rapporteret ved brug af H_2O_2 + metalporpyriner /49/, Fentons /7, 10, 25, 41/ samt Fentons + brug af specifikke bakterier /66/. I to referencer er atrazin set fjernet fra jord ved flushing hhv. med vand og vand tilsat surfactants /10, 30/ og atrazin er oprenset ved flushing i /54/ med efterfølgende kemisk oxidation af vandfasen ved brug af Fentons. Endelig er der i det tidligere review rapporteret om fire studier, hvor triaziner er nedbrudt kemisk ved brug af ozon /41/ og i et nyere studie er cyanazin nedbrudt ved brug af ozon, UV-radiation samt H_2O_2 /53/. Ved kemisk oxidation af triaziner er der i nogle tilfælde observeret dannelse af nedbrydningsprodukter /10, 25/.

Endelig er der i det tidligere review rapporteret om to studier med positiv nedbrydning af atrazin ved phytoremediering /41/.

Nitroforbindelser (DNOC og dinoseb)

Ved den seneste litteratursøgning er der ikke fundet referencer, som omhandler naturlig nedbrydning af nitroforbindelserne. I det tidligere review /41/, er der set naturlig nedbrydning af DNOC under aerobe forhold. Der er dog fundet en reference, hvor DNOC er set nedbrudt under aerobe forhold ved anvendelse af specifikke bakteriekulturer mens der i samme studie ikke blev observeret nedbrydning af dinoseb/15/. I en anden reference ses dinoseb nedbrudt ved bioaugmentering under anaerobe forhold /69/. I /41/ refereres ligeledes et studie med positiv nedbrydning af dinoseb ved bioaugmentering.

For dinoseb samt det pesticidlignende stof TNT er der set kemisk nedbrydning af stofferne ved anvendelse af jern som hhv. ZVI og nZVI /31, 19,/. Ved disse forsøg blev der midlertidigt dannet nedbrydningsprodukter, som dog ikke var persistente. Herudover er der i det tidligere review /41/ rapporteret om tre positive studier og to negative ved anvendelse af ZVI overfor TNT samt 4 positive studier med anvendelse af Fentons til nedbrydning af TNT.

Endelig er der fundet et studie, der beskriver oprensning af TNT ved phytoremediering /16/.

Phenylurea (isoproturon, diuron)

Der er fundet et studie, hvor naturlig nedbrydning af isoproturon er set i hhv. sediment fra umættet zone og i aerobt grundvand /3/. I samme studie blev isoproturon ikke nedbrudt i anaerobt grundvand /3/.

Forskellige phenylurea stoffer samt diuron er set nedbrudt ved bioaugmentering, hvor specifikke bakterier er isoleret og anvendt /73, 78/.

For forskellige phenylurea pesticider er der set kemisk nedbrydning ved anvendelse af Fentons /12, 51, 41/, foto-Fentons /14/ samt ved forskellige

kombinationer af UV, ozon og Fentons /1/ og ved anvendelse af elektro-Fentons + sollys /70, 71/. Ozonering alene har ført til dannelse af toksiske produkter /1/ mens Fenton's reagens har opnået komplet mineralisering /12/. Herudover foreligger et studie for forskellige phenylurea pesticider, hvor stofferne er set nedbrudt ved basisk og neutral hydrolyse /72/.

Endelig er der fundet et studie, hvor linuron er fjernet fra jord/grundvand ved flushing med surfactants /30/.

Benzothiadiazin (bentazon)

For bentazon er der kun fundet to studier, hvor naturlig nedbrydning af stoffet er undersøgt. Der sås dog ingen nedbrydning /22, 41/.

Herudover er der fundet et studie, hvor koncentrationen af bentazon i vand/spildevand er reduceret ved anvendelse af overflader med aktivt kul /8/.

Organo-phosphorus (glyphosat)

For glyphosat er der fundet to referencer, hvor glyphosat er set delvist nedbrudt ved naturlig nedbrydning i jord /47, 64/. Ved begge forsøg sås sorptionen af glyphosat at reducere nedbrydningen. Ved et forsøg er nedbrydningen i jord øget ved tilsætning af ilt /32/ og i to forsøg har bioaugmentering ved anvendelse af specielle bakteriestammer vist at øge nedbrydningen i jord /13, 64/.

Kemisk oxidation ved anvendelse af manganoxid /65/ ozon /5, 41/ og UV + H_2O_2 /24/ har ligeledes vist nedbrydning af glyphosat, i nogle tilfælde dog med dannelse af nedbrydningsprodukter som AMPA /5, 65/. Anvendelse af permanganat gav ikke nedbrydning /41/.

Andre pesticider

Der er under litteratursøgningen fundet en reference, hvor stoffet alachlor også er set nedbrudt ved anvendelse af en kombination af nZVI og reduktiv dechlorering /52/. Der er i laboratorie forsøg set nedbrydning af parathion og malathion ved brug af ZVI /86/.

7 Præsentation af resultater i forhold til de forskellige afværgemetoder

Idet følgende gennemgås resultater fra det udførte litteraturreview i forhold til afværgemetoder.

Tabel 7.1 sammenfatter resultaterne fra den seneste gennemgang af litteraturen.

Tabel 7.1. Afværgemuligheder for pesticidpunktkilder, opsummering af resultater efter metode. Antal af studier fra tidligere litteraturreview /41/ angives i parentes * indikerer negative resultater, dvs. hvor ingen nedbrydning eller fjernelse er set.

Teknologi	Stofgruppe	Medie	Antal studier	Afprøvet i felten	Stoffer i felterfaringer
FASEOVERFØRSEL					
Flushing	triaziner, phenylurea herbicider	jord (grundvand)	3	nej	
Afværgepumpning	Nitroforbindelser, Chlorophenoxyr	Grundvand	1 (+1)	ja	Dinoseb, MCP, dichlorprop
Aktiv kul i reaktiv væg	Triaziner, organophosphorus, andre	Grundvand	(1)	ja	Atrazin, DDT, Chlordane, lindane, methylparathion, endosulfan
KEMISKE METODER					
ZVI	triaziner, nitroforbindelser, alachlor, parathion, malathion	grundvand, spildevand	10 (+10)	ja	metolachlor, alachlor triaziner (atrazin, RDX), nitroforbindelser (TNT)
Basisk hydrolyse	organophosphorus, phenylurea	grundvand	2	ja	parathion mv.
Avanceret kemisk oxidation (photo/UV+ oxidanter) eller elektrokemisk	triaziner, phenylurea, organophosphorus, chlorophenoxyr	spildevand, drikkevand,	8	nej	
Kemisk oxidation, Fentons	triaziner, phenylurea, organophosphorus, chlorophenoxyr, nitroforbindelser	spildevand, drikkevand, jord/grundvand	8 (+9)	ja	2,4-D
Kemisk oxidation, Ozon	triaziner, phenylurea, organophosphorus, chlorophenoxyr	spildevand, drikkevand, jord	5 (+7)	Ja (umættet zone)	Atrazin, simazin, BAM
BIOLOGISKE METODER					
Naturlig nedbrydning	triaziner, phenylurea herbicider, organophosphorus, nitroforbindelser, chlorophenoxyr, bentazon	grundvand	13 (+3)	ja	DNOC, MCP, 2,4-D *atrazin, *bentazon, *dichlorprop
Stimuleret biologisk nedbrydning (aerob)	triaziner, chlorophenoxyr, organophosphorus, nitroforbindelser	grundvand	3(+2)	nej	

Teknologi	Stofgruppe	Medie	Antal studier	Afprøvet i felten	Stoffer i felterfaringer
Stimuleret biologisk nedbrydning (anaerob)	triaziner, nitroforbindelser, chlorophenoxyssyrer	jord, grundvand, drikkevand og spildevand	6	ja	atrazin, dinoseb
Bioaugmentering	triaziner, nitroforbindelser, organophosphorus	jord, grundvand, drikkevand og spildevand	5(+4)	ja	atrazin, nitroforbindelser (TNT, DNT)
Phytoremediering	triaziner, nitroforbindelser, chlorophenoxyssyrer, bentazon	jord og grundvand	3 (+2)	ja	atrazin, simazin, BAM, bentazon

Naturlig nedbrydning

Naturlig nedbrydning af pesticider afhænger af tilstedeværelse af de rigtige redoxforhold og mikroorganismer, som kan nedbryde den givne forurening. Naturlig nedbrydning er generelt mest effektiv i den umættede zone /3, 26/, og i to forskellige laboratorieforsøg er der påvist nedbrydningspotentiale for glyphosat i topjord / 47, 64 /. Naturlig nedbrydning af phenoxyssyrer er desuden påvist i aerobt grundvand i flere studier /36, 79, 83/. Phenoxyssyrer og DNOC kan nedbrydes både aerobt og anoxisk /23, 47, 4, 41/. Generelt er der store variationer i nedbrydningspotentialet for phenoxyssyrer med dybden. Nedbrydning er generel højere omkring redoxgrænsen /27/. Andre pesticider som bentazon, og atrazin kan kun i mindre grad nedbrydes naturligt, primært i topjord /22, 79,80/.

Generelt må det forventes, at naturlig nedbrydning går forholdsvist langsomt, og at nedbrydningen med fordel kan stimuleres ved forskellige metoder, se nedenfor.

Stimuleret biologisk nedbrydning

Stimulering af biologisk nedbrydning af pesticider (phenoxyssyrer, glyphosat, DNOC og dinoseb) kan opnås ved at skabe aerobe forhold/øge iltindholdet /3, 32, 15, 41/. Mange af de nævnte forsøg er dog gennemført med enten topjord eller fixed bed reaktor, og afspejler således ikke forholdene i grundvandet. I et studie /41/ er der udført laboratorieforsøg med grundvand og sediment fra forskellige lokaliteter og det er set konsekvent nedbrydning af phenoxyssyrer unde aerobe forhold, mens aerob nedbrydning af DNOC foregik kun i halvdelen af mikrokosmerne.

Stimuleret biologisk nedbrydning er anvendt i laboratorieforsøg overfor triaziner med gode resultater /18/. I undersøgelserne blev grundvand tilsat hhv. ilt og nitrat, og nedbrydningen forløb bedst under de iltrige forhold.

Der foreligger flere feltapplikationer, hvor anaerob nedbrydning af forskellige pesticider (atrazin, dinoseb og 2,4 D) i forurenede jord er stimuleret med produktet Daramend®, som består af bl.a. organisk materiale og ZVI /2/. Dinoseb er også behandlet ex situ ved at tilsætte stivelse i jorden med forholdsvis gode resultater /63/.

Et andet produkt der fremmer reductive biologiske processer er HRC®. Produktet er anvendt med succes i grundvandsmagasiner (fuldskala) overfor

dinoseb /29/ og pesticidlignende produkter (nitroforbindelser og triaziner) /6, 17/.

Bioaugmentering

Tilsætning af bakterier eller svampe, der kan fremme nedbrydning af pesticider i jord og grundvand er undersøgt i flere studier /13, 16, 34, 26, 69/. Isolering af bakterier der kan nedbryde fokuspesticiderne er ofte den vigtigste begrænsning for anvendelse af denne metode. Metoden er afprøvet i felten overfor atrazin /34/ og pesticidlignende stoffer som TNT og DNT /16/ og i laboratoriet for simazin /26/. Jf. laboratorieforsøg, findes der mikrobielle kulturer eller specifikke mikroorganismer, der evner at nedbryde phenylurea herbicider /73, 78/ dinoseb /69/ og glyphosat /13/. Teoretisk set kunne disse anvendes i feltoprensninger.

Flushing

Princippet bag flushing er at øge udvaskning af jordbundne pesticider ved brug af et udvaskningsmiddel. På den måde bliver stofferne mere tilgængelige for biologiske eller kemiske processer. Der er ikke fundet oplysninger om evt. afprøvning af metoden i felten. I laboratorieforsøg blev op til 95 % af jordbunde triaziner udvasket fra jord med ethanol /30, 54/, mens phenylurea pesticider kunne udvaskes i mindre grad (op til 70 %) /30/. Stofferne skal derefter fjernes fra vandfasen i evt. rensningsanlæg, kulfilteranlæg eller ved tilsætning af kemikalier.

Kemisk oxidation

Metoden involverer tilsætning af oxidationsmidler i jorden/grundvandet, der kan reagere med forureningsstofferne og omdanne dem til ikke toksiske nedbrydningsprodukter. Kemisk oxidation anvendes ofte til spildevand /drikkevandsrensning i behandlingsanlæg. Der findes flere oxidationsmidler og kombinationer.

Der er fundet flere studier, hvor kemisk oxidation i form af en foto-Fenton ($H_2O_2 + Fe(II) + \text{lys}$) eller en elektro-Fenton er anvendt i vandige opløsninger overfor phenylurea herbicider /14, 70, 71/ chlorophenoxy-syrer /50/ og glyphosat /24/. Metoden er effektiv, men den kan kun anvendes til grundvandsoprensning såfremt der er tale om on site oprensning af det oppumpede grundvand.

Forsøg med Fentons reagens og atrazin /10, 25/ viste at oxidation af atrazin førte til dannelse af nedbrydningsproduktet CAAT, som er mere toksisk. Ligeledes har forsøg med simazin /7/ vist kun 32 % mineralisering, selvom 100 % af simazin var nedbrudt. Til gengæld, har forsøg med diuron /12/ og 2,4-D /28/ vist at Fentons reagens kan føre til komplet mineralisering af disse stoffer.

Udover Fentons er ozon bredt anvendt til rensning af drikkevand fra pesticider / 41, 66/. Ozonering ved høj pH har opnået over 80 % mineralisering af glyphosat i vandige opløsninger /5/. Forsøg med phenylurea herbicidet fenuron har dog vist, at der kan dannes meget toksiske nedbrydningsprodukter ved ozonering /1/.

ZVI og nZVI

Oprensning ved brug af ZVI (nul valent jern) og nanoZVI (nul valent jern bestående af nano partikler) en kemisk afværgemetode hvor forureningsstoffer nedbrydes af ZVI via kemisk reduktionsreaktioner. Metoden har været anvendt overfor chlorerede opløsningsmidler. ZVI/nZVI kan anvendes i reaktive væg til faneoprensning, eller til kildeoprensning f.eks. ved at blande jern i jorden (soil mixing) /86/.

I flere laboratorieforsøg er det påvist, at ZVI kan bruges til fjernelse af triaziner /33, 52, 75, 77/, dinoseb, metolachlor og alachlor /48, 31/ fra jord og grundvand, dog sker der ikke fuldstændig mineralisering, hvilket vil sige, at der kan dannes toksiske nedbrydningsprodukter.

Metoden er i laboratorieforsøg vist effektiv overfor malathion og parathion /86/.

Der foreligger en enkelt feltapplikation, hvor ZVI er anvendt i en reaktiv væg til behandling af en forureningsfane med nitroforbindelserne TNT og DNT. Metoden viste sig at være meget effektiv på denne lokalitet; koncentrationerne nedstrøms væggen faldt til under detektionsgrænsen /74/.

I de seneste år er nanopartikler af ZVI (nZVI) anvendt til oprensning af TNT forurennet jord. Processen danner dog giftige nedbrydningsprodukter /19/. Metoden kan også anvendes til ex situ oprensning af oppumpet vand. Dette er forsøgt med gode resultater i flere laboratorieforsøg med triaziner /52,56/.

Basisk hydrolyse

Basisk hydrolyse kan anvendes til oprensning af organophosphorus pesticider. Metoden går ud på at tilsætte en stærk basisk opløsning til jorden, det medfører en pH stigning til over 11, hvilke resulterer i omdannelsen af organophosphorus pesticider til mindre toksiske og mere vandopløselige produkter /68/.

Metoden er brugt i forsøg ved Høfde 42 til oprensning af organophosphor-pesticider som parathion, malathion m.fl. /68/. I nærværende litteraturreview er der kun fundet 2 studier om metoden. I det ene er hydrolyse ved neutral/basisk pH og en temperatur over 65 grader anvendt til fjernelse af phenylurea pesticider fra vand. Reaktionen var langsom, og halveringstiden for diuron blev påvist til 41 år /72/. Tilsætning af base har i et andet forsøg vist sig at ødelægge den naturlige bakterieflora /68/.

Phytoremediering

Forskellige planter kan optage/nedbryde forskellige pesticider, men metoden er endnu ikke afprøvet i stort omfang og anses mest som et efterpoleringstiltag. Metoden kan bruges til forurennet jord eller til oprensning af terrænnære grundvandsmagasiner. I et feltforsøg er træer plantet på tværs af forureningsfanen for at kontrollere spredning af triaziner /20/. Der er fundet planter, der kan nedbryde pesticid-lignende stoffer som TNT /16/, samt planter der kan optage bentazon /76/. Udover planternes funktion kan phytoremediering øge naturlig mikrobiel nedbrydning omkring rhizosphæren.

8 Diskussion

8.1 Vidensniveau

Fokus ved dette review har været at opdatere vidensniveauet angående teknologier til oprensning af pesticidpunktkilder for udvalgte pesticider. En række studier hvor pesticiderne er forsøgt oprenset i felt- eller laboratoriestudier er gennemgået med henblik på at skabe et overblik over de eksisterende erfaringer med oprensning af pesticider. Desværre er vidensniveauet i forhold til oprensningsmetoder overfor pesticider stadig yderst begrænset, og der findes kun få felterfaringer, mens der findes langt flere forsøg, som er gennemført på laboratorieskala.

Forsøgene er udført under meget forskellige forhold, herunder koncentrationsniveau og matrix. I nogle tilfælde, er koncentrationsniveauet af pesticiderne i forsøgene meget højere end hvad der typisk træffes i en punktkilde. Der opfordres til at konsultere den refererede litteratur, såfremt man ønsker at gå videre med en metode for at sikre at forholdene er sammenlignelige.

I forhold til at vælge en specifik metode til oprensning af en pesticidpunktkilde på en given lokalitet, må der stilles følgende krav:

- Metoden er anvendelig over for de dominerende pesticider i den aktuelle punktkildeforurening og inhiberes ikke af de øvrige tilstedeværende stoffer
- Metoden er dokumenteret anvendelig under forhold svarende til de aktuelle feltforhold
- Metoden er anvendelig i jord/grundvand
- Der dannes ikke uønskede og persistente nedbrydningsprodukter ved metoden
- Der skal ikke anvendes kemikalier, som i sig selv kan udgøre et problem på den givne lokalitet

Grundet det begrænsede vidensniveau på de forskellige metoder vil det ikke være muligt at få opfyldt alle de stillede krav, og oprensning af pesticidpunktkilder må derfor i dag stadig opfattes som værende af forsøgsmæssig karakter (på nær afværgepumpning, som er velafprøvet). I forhold til de opstillede krav kan følgende forhold nævnes:

- Såfremt der ikke foreligger undersøgelser, der dækker de aktuelle dominerende stoffer, kan der skeles til stofmæssigt lignende stoffer
- Såfremt der ikke foreligger undersøgelser gennemført på feltskala, må der skeles til undersøgelser foretaget på laboratoriebasis
- Såfremt der ikke foreligger undersøgelser for stofferne i jord/grundvand, kan der skeles til undersøgelser udført i kunstigt vand og/eller i spildevand

8.2 State of the art for oprensning af pesticidpunktkilder

Den viden, der er opnået i forhold til oprensningsmetoder i dette litteraturreview er beskrevet i Bilag B. Den væsentligste udvikling er sket indenfor de biologiske og kemiske oprensningsmetoder, som opsummeret nedenfor:

- **Biologiske metoder, herunder naturlig nedbrydning**
Siden 2002 er der udført flere studier, hvor naturlig nedbrydning er monitoreret og forskellige mikroorganismer, der kan nedbryde pesticider, er isoleret. Der er i de sidste år sket en udvikling indenfor anvendelse af stimuleret reduktiv bionedbrydning af pesticider med flere feltapplikationer. Det er især udvikling af kommercielle produkter som Daramend® og HRC®, der skaber reducerede forhold, som er anvendt til oprensning af hhv. forurenede jord og grundvand. Det er især triaziner, nitroforbindelser som kan oprenses ved disse metoder. Chlorophenoxysyrer kan også nedbrydes biologisk under aerobe forhold.
- **Kemiske metoder, herunder ZVI og kemisk oxidation**
Der sker en løbende optimering af teknologier til *ex situ* rensning af drikkevand/spildevand og grundvand, hvor især avancerede kemiske oxidationsteknikker (f.eks. foto-Fenton med sol- eller UVlys eller elektro-Fentons) er i fokus. Disse teknikker er dog ikke direkte anvendelige for *in situ* oprensninger. Denne type avancerede kemisk oxidation kan kun anvendes til grundvandsoprensning såfremt der er tale om *on site* oprensning af det oppumpede grundvand. Traditionelle kemiske oxidationsmetoder kan også anvendes i kombination med afværgepumpning. Der er meget få felterfaringer men *in situ* kemisk oxidation med ozon og Fentons er afprøvet med positive resultater i den umættede zone. Idet der findes flere oxidationsmidler og kombinationer, kan en evt. *in situ* anvendelse af kemisk oxidation være en egnet oprensningmetode for pesticider i grundvandet, men det vil i alle tilfælde være nødvendigt at udføre treatability tests for at sikre, at stoffernes nedbrydes uden dannelse af mere toksiske nedbrydningsprodukter. Derudover skal muligheden for at opnå kontakt mellem oxidationsmidlerne og forureningen vurderes på den enkelte lokalitet.

I de seneste år har kemiske processer baseret på reduktion med ZVI været videreudviklet, delvis pga. opfindelsen af nZVI. Metoden ser lovende ud på baggrund af laboratorie- og feltforsøg, men der er stadig problemer med dannelse af nedbrydningsprodukter. Det er især dehalogenerede triaziner, der dannes ved reaktion med f.eks. atrazin og ZVI/nZVI. Disse dehalogenerede forbindelse er mindre toksiske end f.eks. atrazin, men deres potentielle sundheds- og miljøeffekter er ikke velundersøgte.

Basisk hydrolyse er brugt overfor stoffer som parathion og malathion ved Høfde 42.

- **Faseoverførsel**
Da fokusstofferne generelt ikke er flygtige, er der som ventet ikke fundet nye felterfaringer ang. faseoverførselsteknikker, herunder termisk oprensning og ventilering. Da der er søgt information primært

i den videnskabelig litteratur har de anvendte oprensningmetoder været forholdsvis avanceret, og traditionelle metoder som afværgepumpning er ikke nævnt i den gennemgæede litteratur. Dog skal det her nævnes at pga. af de udvalgte stoffers høje mobilitet, er metoden anvendelig overfor grundvand, især med henblik på at forhindre yderligere spredning af stofferne i grundvandmagasiner/32, 41/.

8.2.1 Aktuel forskning og udvikling

Bioaugmentering har et stort potentiale som afværgeteknologi, enten i kombination med afværgepumpning eller *in situ*. På nuværende tidspunkt er metoden mest udviklet til oprensning af forurenede jord. Metoden er i fokus i et stort forskningsprojekt "Miresowa", hvorfor der forventes en betydelig udvikling i de kommende år /85/. Projektet er finansieret af det strategiske forskningsråd, og har deltagelse af GEUS, DTU Miljø, Københavns Universitet, forskellige vandforsyningsselskaber, Miljøstyrelsen og andre. Projektet har til formål at udvikle nye mikrobiologiske teknikker til oprensning af pesticidforurenede jord og drikkevand. Projektet startede i 2009 og vil forløbe over 5 år. Projektets fokus er på nuværende tidspunkt at udvikle bioaugmenteringsteknikker til rensning af drikkevand på vandværker eller forurenede jord. Projektets aktiviteter foregår pt. på laboratorieskala, og er derfor endnu ikke anvendelige til oprensning af grundvandsforurening med pesticider. Det er planlagt, at de udviklede teknologier vil blive afprøvet i felten til oprensning af forurenede jord og drikkevand.

8.3 Risikoforhold ved oprensning af pesticidpunktkilder

En pesticidpunktkilde, f.eks. fra en vaskeplads eller fra et kemikalieoplag, vil som oftest bestå af en blanding af flere forskellige pesticider med enkelte pesticider som dominerende. En forudgående risikovurdering må afgøre, hvilke oprensningskrav der skal stilles og herunder, hvilke stoffer og koncentrationsniveauer, der kan accepteres efter endt oprensning.

Når en metode til oprensning af en pesticidpunktkilde skal udvælges vil det være relevant dels at kigge på undersøgelser for de enkelte dominerende stoffer og dels på undersøgelser, som omhandler blandinger af stoffer. Det skal her påpeges, at tilstedeværelsen af nogle stoffer kan virke inhiberende på nedbrydningen af andre stoffer.

Ofte vil der ikke foreligge oplysninger vedrørende dannelse af eventuelle uønskede/persistente nedbrydningsprodukter. Dette er især et problem for kemiske metoder, men kan også forekomme ved biologisk nedbrydning. Det anbefales her at gennemføre laboratorieforsøg under de relevante betingelser til belysning af dette emne eller som minimum, at der udarbejdes et monitoringsprogram samt mulighed for alternativ afværge, såfremt metoden ikke virker efter hensigten.

Afhængig af lokalitetens placering i forhold til terrænnært overfladevand, kan det være risikabelt f.eks. at anvende kemikalier, som kan skade nærliggende overfladevand, såfremt disse kemikalier ikke når at blive fuldstændig nedbrudt inden de forlader lokaliteten. I sådanne tilfælde må anden metode overvejes.

8.4 anbefalinger

Idet erfaringsgrundlaget for oprensning af pesticider er meget spinkelt, er det ikke muligt at give deciderede anbefalinger i forhold til afværgeteknikker for de enkelte pesticider. Det skal her bemærkes, at der i det gennemførte litteraturreview ikke har været fokus på afværegpumpning som afværgeteknik, men at denne metode kan anvendes i forhold til de her undersøgte pesticider. Ud fra det gennemførte litteraturreview kan det anbefales, at undersøge anvendelsespotentialet for følgende metoder på konkrete lokaliteter, f.eks. ved pilotskalforsøg:

- For forureninger med phenoxyrter (MCPA, MCPP, dichlorprop og 2,4-D) anbefales det at undersøge potentialet for anvendelse af biologiske metoder, enten ved monitoreret naturlig nedbrydning eller ved stimuleret nedbrydning, f.eks. ved tilsætning af ekstra ilt og næringsstoffer og/eller specifikke stofnedbrydere. Herudover anbefales at se nærmere på forskellige teknikker til kemisk oxidation.
- For stofgruppen af triaziner (atrazin, simazin, cyanazin, terbutylazin) anbefales det at en oprensningsteknik, hvor en kombination af organisk materiale og ZVI anvendes, idet der allerede foreligger enkelte feltapplikationer med lovende resultater. Denne teknik kræver dog særlig opmærksomhed i forhold til dannelse af nedbrydningsprodukter.
- For nitroforbindelserne DNOC og dinoseb samt de lignende stoffer (specielt TNT) anbefales det at se nærmere på teknikker som stimuleret naturlig nedbrydning, bioaugmentering og ZVI.
- For phenylurea herbiciderne isoproturon og diuron anbefales det at se nærmere på afprøvning af kemisk oxidation med f.eks. Fentons reagens enten *in situ* eller *ex situ* i kombination med pumpning.
- For glyphosat anbefales ligeledes at se nærmere på en form for kemisk oxidation med f.eks. Fentons reagens, ozon eller H_2O_2 .
- For bentazon er der ikke umiddelbart nogle undersøgte teknikker, som kan anbefales.

I tilfælde, hvor punktkildeforureninger bestående af flere forskellige stofgrupper ønskes oprenset anbefales det, at bredspektrede teknikker som kemisk oxidation eller anvendelse af ZVI overvejes. Derudover kan en kombination af teknikker, målrettet de enkelte stoffer anvendes. Såfremt monitoreret naturlig nedbrydning ønskes anvendt skal det kunne godtgøres ved en risikovurdering, at de stoffer, som ikke umiddelbart forventes at blive nedbrudt, ikke udgør en risiko for grundvandsressourcen.

Det skal dog til enhver tid anbefales, at der inden valg af metode udføres en omfattende risikovurdering, hvor det fastlægges, hvilke stoffer, der ønskes oprenset og til hvilket koncentrationsniveau. Herudover anbefales det, at originallitteraturen for de overvejede metoder konsulteres med henblik på at få et mere omfattende kendskab til detaljer og specifikke forhold ved de udførte forsøg.

9 Referencer

- /1/ Acero, L.J., Benitez, F.J., Gonzalez, M. and Benitez, R. (2002): 'Kinetics of Fenuron Decomposition by Single-Chemical Oxidants and Combined Systems' *Ind. Eng. Chem. Res.*, **41**, 4225-4232
- /2/ ADVENTUS Project Summaries Treatment of Soil Impacted by Chlorinated Pesticides Ontario, Canada
http://www.adventusgroup.com/projects/proj_daramend.shtml
- /3/ Albrechtsen, H-J., Clausen, L., Pedersen, G.P. (2005): 'Nedbrydning og sorption af herbicider (atrazin, isoproturon, MCPP og acetochlor i umættet zone'. ATV møde om Jord og grundvandsforurening Vingstedcentret, 8. – 9. marts 2005
- /4/ Arildskov, P.N., og Pedersen, G.P. (2005): 'Felt vs. Laboratoriemetoder til at undersøge nedbrydning og sorption af pesticider i grundvandsmagasiner' ATV møde om Jord og grundvandsforurening Vingstedcentret, 8. – 9. marts 2005
- /5/ Assalin, R.M. , De Moraes, G.S. , Queiroz, C.N.S., Ferracini, L.V., and Duran, N. (2010): 'Studies on degradation of glyphosate by several oxidative chemical processes: Ozonation, photolysis and heterogeneous photocatalysis', *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 45: 1, 89 — 94
- /6/ Barnes P.W., Heaston M.S., Compton J.S. (2001): 'Treatment of explosives contaminated groundwater by in situ cometabolic reduction.' Proceedings of the Battelle sponsored Sixth International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, San Diego, California, June 4-7, 2001. Published by Battelle Press, ISBN 1-57477-110-8, 2001.
- /7/ Catalkaya, E.C. and Kargi, F. (2009): 'Advanced oxidation and mineralization of simazine using Fenton's reagent' *Journal of Hazardous Materials* **168**: 688–694
- /8/ Ania, C.O., Béguin, F., Mechanism of adsorption and electrosorption of bentazone on activated carbon cloth in aqueous solutions, *Water Res.* (2007), doi:10.1016/j.watres.2007.03.031C.
- /9/ Di Palma L., (2003): 'Experimental assessment of a process for the remediation og organosphorus pesticides in contaminated soils through in situ soil flushing and hydrolysis' *Water, Air, and Soil Pollution* **143**: 301–314.
- /10/ L. Di Palma L., Ferrantelli, P., and Petrucci, E. (2003) : 'Experimental study of the remediation of atrazine contaminated soils through soil extraction and subsequent peroxidation' *Journal of Hazardous Materials B* **99**, 265–276.

- /11/ Dombek, T., Davis, J.D., and Klarup D.S. (2004): 'Degradation of terbutylazine (2-chloro-4-ethylamino-6-terbutylamino-1,3,5-triazine), deisopropyl atrazine (2-amino-4-chloro-6-ethylamino-1,3,5-triazine), and chlorinated dimethoxy triazine (2-chloro-4,6-dimethoxy-1,3,5-triazine) by zero valent iron and electrochemical reduction' *Environmental Pollution* **129**, 267–275
- /12/ Edelahe, M.C., Oturan, N., Oturan, M.A., Padellec, Y.A., Bermond, A., and Kacemi, E.K. (2004): 'Degradation of diuron by the electro-Fenton process' *Environ Chem Lett*:233–236
- /13/ Ermakova, T.I., Kiseleva, I.N., Shushkova, T., Zharikov, M., Zharikov, A.G., Leontievsky, A.A. (2010): 'Bioremediation of glyphosate-contaminated soils' *Appl Microbiol Biotechnol* **88**:585–594
- /14/ Farré M.J., Maldonado, I.M., Gernjak, G., Oller, I., (2008): 'Coupled solar photo-Fenton and biological treatment for the degradation of diuron and linuron herbicides at pilot scale' *Chemosphere* **72**, 622–629
- /15/ Gisi, D., Stucki, G., Hanselmann, W.K., (1997): Biodegradation of the pesticide 4,6-dinitro- ortho-cresol by microorganisms in batch cultures and in fixed-bed column reactors, *Appl Microbiol Biotechnol* (1997) **48**: 441±448
- /16/ Haselhorst, L. (1999): 'Bioremediation of 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT) at munitions sites' *Restoration and reclamation review* Student on line Journal Vol. 4 No 7 Spring 1999, Department of Horticultural Science, University of Minnesota
- /17/ Heaston S.M, Barnes W.P., Alvestad, R.K. (2001): 'Reductive biotransformation of nitrate and explosives in groundwater' *Proceedings of the Battelle sponsored Sixth International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, San Diego, California, June 4-7, 2001. Published by Battelle Press, ISBN 1-57477-110-8, 2001.*
- /18/ Hunter, J.W., Shane L.D. (2010): *Biological Remediation of Groundwater Containing Both Nitrate and Atrazine* *Curr Microbiol* **60**:42–46
- /19/ Jiamjitpanich, W., Polprasert, C., Parkpian, P, Delaune, R. D. and Jugsujinda, A. (2010): 'Environmental factors influencing remediation of TNT-contaminated water and soil with nanoscale zerovalent iron particles', *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, **45**: 3, 263 — 274
- /20/ Karthikeyan, R. , Davis, C.L., Erickson, E.L., Kassim A.K., Kulakow, A.P., Barnes, L.P., Hutchinson, L.S., and Nurzhanova, A.A. (2004): 'Potential for Plant-Based Remediation of Pesticide-Contaminated Soil and Water using Nontarget Plants such as Trees, Shrubs, and Grasses', *Critical Reviews in Plant Sciences*, **23**: 1, 91-101
- /21/ Sung-Chul Kim S-C., Yang, E.J., Ok S.Y., Skousen, J., Kim, D-G., Joo, J-H., (2010): *Accelerated Metolachlor Degradation in Soil by*

Zerovalent Iron and Compost Amendments Bull Environ Contam Toxicol (2010) **84**:459–464

- /22/ Knauber., D.W., Krotzky, A.J., and Schink, B., (2000): 'Microbial Metabolism and Further Fate of Bentazon in Soil' Environ. Sci. Technol.2000, **34**,598-603
- /23/ Mai, P., Jacobsen, S.O., Aamand, J., (2001): 'Mineralisation and co-metabolic degradation of phenoxyalkanoic acid herbicides by a pure bacterial culture isolated from an aquifer' Applied Microbiol Biotechnology (2001) 486-490
- /24/ Manassero, A., Passalia C., Negro C.A., Cassano, E.A., Zalazar S.C. (2010): 'Glyphosate degradation in water employing the H₂O₂/UVC process (2010)' Water Research 44, 3875-3882
- /25/ Mecozzi, R., Di Palma, L., Merli, C., (2006): 'Experimental in situ chemical peroxidation of atrazine in contaminated soil' Chemosphere **62** 1481–1489
- /26/ Morán, C.A., Müller, A., Manzano, M., and González, B. (2006): 'Simazine treatment history determines a significant herbicide degradation potential in soils that is not improved by bioaugmentation with Pseudomonas sp. ADP' Journal of Applied Microbiology 1364-5072
- /27/ Nygaard, B. (2005): 'Vertikal variation i nedbrydningen af phenoxysyrer i en lossepladsforurenede akvifer' ATV møde om Jord og grundvandsforurening Vingstedcentret, 8. – 9. marts 2005
- /28/ Oturan A.M., (2000): An ecologically effective water treatment technique using electrochemically generated hydroxyl radicals for in situ destruction of organic pollutants: Application to herbicide 2,4-D Journal of Applied Electrochemistry **30**: 475±482, 2000
- /29/ Regenesi (2004):Case History H-24 A Pilot Test for Dinoseb Reduction at an Agricultural Facility Hydrogen Release Compound (HRC®) www.regenesi.com
- /30/ Rodriguez-Cruz MS, Sanchez-Martin MJ, Sanchez-Camazano M. (2006): 'Surfactant-enhanced desorption of atrazine and linuron residues as affected by aging of herbicides in soil.' Arch Environ Contam Toxicol. 2006 Jan;**50**(1):128-37.
- /31/ Satapanajarua, T., Onanong S., Comfort S.D., Snow, D.D., Cassada, A.D., and Harris, C. 'Remediating dinoseb-contaminated soil with zerovalent iron' (2009): Journal of Hazardous Materials **168** (2009) 930–937
- /32/ Schultz, A., Jacobsen, S.O., Aamand., J. (2002): 'Mineralisering og sorption af glyphosat i et leret og sandet jordprofil' ATV møde om Jord og grundvandsforurening Vingstedcentret, 8. – 9. marts 2005
- /33/ Singh, J.,Shea J.P., Hundal, S.L., Comfort, S.D., Zhang, T.C., Hage, S.D., (1998): Iron-Enhanced Remediation of Water and Soil

Containing Atrazine' Weed Science, Vol. 46, No. 3 (May - Jun., 1998), pp. 381-388

- /34/ Strong, C.L., McTavish H., Sadowsky, J.M., and Wackett L.P., (2000): 'Field-scale remediation of atrazine-contaminated soil using recombinant Escherichia coli expressing atrazine chlorohydrolase' Environmental Microbiology **2**(1), 91±98
- /35/ Miljøstyrelsen 2011. Strategier mod pesticidtruslen mod grundvandet fra punktkilder. Miljøprojekt 1332.
- /36/ Broholm, M. M., Rügge, K., Tuxen, N., Højberg, A. L., Mosbæk, H. & Bjerg, P.L. (2001). Fate of herbicides in a shallow aerobic aquifer: A continuous field injection experiment (Vejen, Denmark). *Water Resources Research*, **37**, (12), 3163-3176.
- /37/ Broholm, M. M., Tuxen, N., Rügge, K., & Bjerg, P.L. (2001). Sorption and degradation of the herbicide 2-methyl-4,6-dinitrophenol (DNOC) under aerobic conditions in a sandy aquifer in Vejen Denmark. *Environmental Science and Technology*, **35**, 4789-4797.
- /38/ Tuxen, N., Tüchsen, P.L., Rügge, K., Albrechtsen, H.-J. & Bjerg, P.L. (2000): Fate of seven pesticides in an aerobic aquifer studied in column experiments. Chemosphere **41**, 1485-1494.
- /39/ Rügge, K., Bjerg, P.L., Mosbæk, H. & Christensen, T.H. (1999): Fate of MCPP and atrazine in an anaerobic landfill leachate plume (Grindsted, Denmark). Water Research **33**, 10, 2455-2458.
- /40/ Rügge, K., Bay, H., Christs, T., Bruch, W. & Rosenberg, P. (2005). Pesticider I dansk grundvand: GRUMO- og boringskontrolldata. Miljøstyrelsen, Miljøprojekt nr. 1033, 2005.
- /41/ Tuxen, Nina, 2002. In situ bioremediation of groundwater contaminated by herbicides from point sources. PhD afhandling, Miljø & Ressourcer, Danmarks Tekniske Universitet.
- /42/ Miljøstyrelsen 1997. Boringskontrol på vandværker, Vejledning nr. 2, 1997.
- /43/ Miljøstyrelsen 2007. Risikovurdering af pesticidpunktkilder. Miljøprojekt nr. 1158, 2007.
- /44/ www.pestdata.dk
- /45/ Miljøstyrelsen 1994. Oversigt over godkendte bekæmpelsesmidler. Orientering nr. 2, 1994.
- /46/ Miljøstyrelsen 1999. kemiske stoffers opførsel i grundvand: bind 2. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen, nr. 20, 1996.
- /47/ Sørensen, S. R., Schultz, A., Jacobsen, O. S., Aamand, J. (2006). Sorption, desorption and mineralisation of the herbicides glyphosate and MCPA in samples from two Danish soil and subsurface profiles. Environmental Pollution, **141**, 184-294.

- /48/ Shea, P.J., Machacek, T.A., Comfort, S.D. (2004). Accelerated Remediation of Pesticide Contaminated Soil with Zerovalent Iron. *Environmental Pollution*, **132**, 183-188.
- /49/ Rebelo, S.L.H., Pereira, M.M., Monsanto, P.V., Burrows, H.D. (2009) Catalytic Oxidative Degradation of s-triazine and Phenoxyalkanoic Acid Based Herbicides with Metalloporphyrins and Hydrogen Peroxide: Identification of Two Distinct Reaction Schemes. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, **297**, 35-43.
- /50/ Zourab, S., Ghalwa, A., Nasser, Zaggout, F. R., Al-Asqalany, M. Y., Khdear, N. (2009). Electrochemical Degradation of Herbicidal and Pure 2,4-Dichlorophenoxy Acetic Acid on Pb/PbO₂ Modified Electrodes. *Journal of Dispersion Science and Technology*, **30**:5, 712-719.
- /51/ Farré, M. J., García-Montaña, J., Ruiz, N., Muñoz, I., Doménech, X., Peral, J. (2007). Life Cycle Assessment of the Removal of Diuron and Linuron Herbicides From Water Using Three Environmentally Friendly Technologies. *Environmental Technology*, **28**:7, 819-830.
- /52/ Bezbaruah, A.N., Thompson, J.M., Christholm, B.J. (2009). Remediation of Alachlor and Atrazine Contaminated Water with Zero-valent Iron Nanoparticles. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, **44**:6, 518-524.
- /53/ Benitez, F.J, Beltrán-Heredia, J., Gonzalez, T., Acero, J.L. (1995). Advanced Oxidation Process In The Degradation Of Cyanazine. *Ozone: Science and Engineering*, **17**:3, 237-258.
- /54/ Palma, L. Di, Merli, C., Petrucci, E. (2004). Effect of Ethanol on the Oxidation of Atrazine in the Remediation of Contaminated Soil. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, **9**:4, 987-997.
- /55/ Ralebitso, T.K., Senior, E., W. van V., H. (2002). Microbial Aspects of Atrazine Degradation in Natural Environments. *Biodegradation*, **13**, 11-19.
- /56/ Satapanajaru, T., Anurakpongsatorn, P., Pengthamkeerati, P., Boparai, H. (2008). Remediation of Atrazine-contaminated Soil and Water by Nano Zerovalent Iron, *Water Air Soil Pollut*, **192**, 349-359.
- /57/ Singh, O.V., Jain, R.K. (2003). Phytoremediation of Toxic Aromatic Pollutants from Soil. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **63**, 128-135.
- /58/ Smejkal, C.W., Vallaey, T., Burton, S.K., Lappin-Scott, H.M. (2001). A Rapid Method to Screen Degradation Ability in Chlorophenoxyalkanoic Acid Herbicide-degrading Bacteria. *Letters in Applied Microbiology*, **32**, 273-277.
- /59/ Wackett, L.P., Sadowsky, M.J., Martinez, B., Shapir, N. (2002). Biodegradation of Atrazine and Related s-triazine Compounds: From

Enzymes to Field Studies. Applied Microbiology and Biotechnology, **58**, 39-45.

- /60/ Waria, M., Comfort, S., Onanong, S., Satapanajaru, T., Boparai, H., Harris, C., Snow, D.D., Cassada, D.A. (2009). Field-Scale Cleanup of Atrazine and Cyanazine Contaminated Soil with a Combined Chemical-Biological Approach. *Journal of Environmental Quality*, **38**, 1803-1811.
- /61/ Zhang, W. (2003). Nanoscale Iron Particles for Environmental Remediation: An overview. *Journal of Nanoparticle Research*, **5**, 323-332.
- /62/ Carlisle, S.M., Trevors, J.T. (1987). Glyphosate in the Environment. *Water, Air, and Soil Pollution*, **39**, 409-420.
- /63/ Roberts, D.J., Kaake, R. H., Funk, S.B., Crawford, D.L., Crawford, R.L. (1993). Anaerobic Remediation of Dinoseb from Contaminated Soil, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. **39:40**, 781-789.
- /64/ Shushkova, T.V., Vasilieva, G.K., Ermakova, I.T., Leontievsky, A.A. (2009). Sorption and Microbial Degradation of Glyphosate in Soil Suspensions. *Applied Biochemistry and Microbiology*, vol. **45**, no. **6**, 599-603.
- /65/ Barrett, K.A., McBride, M.B. (2005). Oxidative Degradation of Glyphosate and Animomethylphosphonate by Manganese Oxide. *Environmental Science and Technology*, **39**, 9223-9228.
- /66/ Arnold, S.M., Hickey, W.J., Harris, R.F., Talaat, R.E. (1996). Integrating Chemical and Biological Remediation of Atrazine and s-triazine-containing Pesticide Wastes. *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. **15**, no. **8**, 1255-1262.
- /67/ Pedersen, K. (2000). Nedbrydning af organisk fourening I drikkevand med katalytisk ozonering, ATV møde vedr. renseteknologier for vand og luft.
- /68/ Kirkegaard, C., Elkjær, L., Ramsay, L., Jørgensen, C., Oberender, A. (2008). Demonstrationsprojekt om basisk hydrolyse og biologisk nedbrydning ved Høfde 42. Perspektiver, undersøgelser og foreløbige resultater, ATV jord og grundvand
- /69/ Kaake, R.H., Crawford, D.L., Crawford, R.L. (1995). Biodegradation of the Nitroaromatic Herbicide Dinoseb (2-~~sec~~-butyl-4,6-dinitrophenol) Under Reducing Conditions. *Biodegradation*, **6**, 329-337.
- /70/ Losito, I., Amorisco, A., Palmisano, F. (2008). Electro-Fenton and Photocatalytic Oxidation of Phenyl-urea Herbicides: An Insight by Liquid Chromatography- Electrospray Ionization Tandem Mass Spectrometry. *Applied Catalysis B: Environmental*, **79**, 224-236.
- /71/ Oturan, M.A., Edelahi, M.C., Oturan, N., Kacemi, K.El, Aaron, J. (2010). Kinetics of Oxidative Degradation/Mineralization Pathways of

the Phenylurea Herbicides Diuron, Monuron and Fenuron in Water During Application of the Electro-Fenton Process. Applied Catalysis B: Environmental, **94**, 82-89.

- /72/ Sabalinas, D., Ellington, J., Lekevičius, R. (1996). Alkaline and Neutral Hydrolysis of Four Phenylurea Herbicides. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, **64:2**, 123-134.
- /73/ Sharma, P., Chopra, A., Cameotra, S.S., Suri, C.R. (2010). Efficient Biotransformation of Herbicide Diuron by Bacterial Strain *Micrococcus* sp. PS-1. Biodegradation, **21**, 979-987.
- /74/ Remediation of TNT and RDX in Groundwater Using Zero-Valent Iron Permeable Reactive Barriers, ESTCP: Cost and Performance Report, 1-54.
- /75/ 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 Science*, vol. **46**, 381-388.
- /76/ Begum, S. 2003. Field Validation of Bentazon phytoremediation. M.Sc. thesis, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College
- /77/ Ghauch, A., Suptil, J. (2000). Remediation of s-triazines Contaminated Water in a Laboratory Scale Apparatus Using Zero-Valent Iron Powder. Chemosphere, **41**, 1835-1843.
- /78/ Turnbull, G., A., Ousley, M., Walker, A., Shaw, E. & Morgan, A.W. Degradation of substituted phenylurea herbicides by *Arthrobacter globiformis* strain D47 and characterization of a plasmid-associated hydrolase gene, *puhA*. *Appl. and Environ Microbiology*, 2270-2275.
- /79/ Agertved, J., Rügge, K. & Barker, J.F. (1992). Transformation of the herbicide MCPP and atrazine under natural aquifer conditions, Ground Water 30, 4, 500-506.
- /80/ Rügge, K., Bjerg, P.L., Mosbæk, H. & Christensen, T.H. (1999). Fate of MCPP and atrazine in an anaerobic landfill leachate plume (Grindsted, Denmark). Wat. Res. **33**, 10, 2455-2458.
- /81/ HSDB Hazardous substances Data Bank, Glyphosate CASRN: 1071-83-6
- /82/ Screening af datamateriale for Rødovrevej 239-241 og 254, 2610 Rødovre, Region Hovedstaden, oktober 2009
- /83/ Tuxen, N., Ejlskov, P., Albrechtsen, H.-J., Reitzel, L.A., Pedersen, J.K. & Bjerg, P.L. Application of natural attenuation to ground water contaminated by phenoxy acid herbicides at an old landfill in Sjølund, Denmark. Ground water monitoring and remediation, **23**, no. 4, 48-58.

/84/ Miljøstyrelsen 2007. Pesticidtruslen mod grundvandet fra pesticidpunktkilder på oplandsskala. Miljøprojekt 1152.

/85/ www.miresowa.dk

/86/ Miljøstyrelsen (2007), Miljøprojekt **Nr. 1198** Oprensning af forureningen på depotet ved Høfde 42 ved hjælp af nul-valent jern.

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix ¹	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
Fenuron	lab	single	Fentons, Ozon UV kombinationer	vand	ozon: >99 % UV: 86% Fentons: 70% UV+H ₂ O ₂ : 99% Photofentons: 100% Ozon + UV: 100%	k=0,225 min ⁻¹ k=0,039 min ⁻¹ k=7,4 x 10 ⁹ M ⁻¹ s ⁻¹ k=0,213 min ⁻¹ k=0,951 min ⁻¹ k=0,36 min ⁻¹	ozon: Dannelse af toksiske nedbrydningsprodukter UV: langsom process		Startkoncentration= 10 ⁻⁴ M. Oxidationsprocesser var hurtigere og mere effektive.	1
DDT, DDD, DDE, 2,4-D og 2,4,5-T	felt	mix	Reduktive deklorering med Daramend®	jord	Koncentrationsniveau for 2,4-D, 2,4,5-T, og DDT, nedsat med hhv. 96%, 84%, and 91%. Dvs. fra hhv. 97,7 mg/kg, til 8,1 mg/kg, og 54 mg/kg, til 3,6 mg/kg, 1,3mg/kg, og 4,7mg/kg.	Projektet gennemført indenfor 3-4 måneder	Omkostninger: 112 USD pr. ton jord		Daramend® kan bruges til at behandle de øverste 2 meter jord, som on site treatment eller in situ i kombination med deep soil mixing.	2
Metolachlor, atrazin, dinoseb	felt	mix	Reduktive deklorering med Daramend®	Jord	Koncentrationsfald fra 170 mg/kg til 11 mg/kg		Omkostninger: 112 USD pr. ton jord. Behandlingstid: 10 måneder		Startkoncentration= 170 mg metolachlor /kg.	2

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
atrazin, isoproturon, MCP, acetochlor og DEA	lab	single	Naturlig nedbrydning	Jord, aqvifer sediment og grundvand		Isoproturon: $t_{1/2}$ =28-1300 dage, MCP $t_{1/2}$ =10-408 dage	Isoproturon nedbrudt i alle aerobe sedimenter, MCP i 7/ 8. Ingen nedbrydning under anaerobe forhold. Ingen nedbrydning af atrazin eller acetochlor i grundvandsprøve. Alle pesticider blev nedbrudt i prøver fra den umættede zone	DEA	Startkoncentration=10 µg/kg i umættet, 50 µg/l i mættet. Testet prøver fra 8 europæiske lokaliteter (8 grundvandsprøver, kalk og umættet zone.	3
Dichlobenil	lab/felt	single	Sorption						Sorption af dichlobenil overvurderes i laboratorieforsøg. Sorptionskinetik skal medtages ved modellering af retardation.	4
DNOC	lab/felt	single	Naturlig nedbrydning		100 % nedbrydning i feltforsøg	Feltforsøg: $t_{1/2}$ =1 dag Labforsøg: $t_{1/2}$ =7,45-9,94 dage	Nedbrydning under anaerobe forhold		Det vurderes at den aktuelle nedbrydningsmekanisme i feltet er abiotisk reduktion ved oxidation af jern. Laboratorieforsøg underestimerer nedbrydning, pga. de lave sediment/vand forhold.	4
Glyphosat	lab	single	Ozonering ved pH 10 Ozonering ved pH 6,5	Vand	100 % 80 %	1,8 minutter -	AMPA 100% nedbrudt AMPA akkumuleret	97,5 % TOC reduktion 20 % TOC reduktion	Ozonering ved pH=10 førte til mere komplet og hurtigere mineralisering af glyphosat i vand. Start koncentration var 42 mg/l.	5

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix ¹	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
2,4-DNT, TNB, RDX	felt (pilot)	mix	Bionedbrydning med HRC®: In situ cometabolisk reduktion	grundvand	RDX: >45-99 % efter 105 dage 2,4 DNT: 72-98 % TNB: 86-100 %			Midlertidig akkumulering af NDMA og hydrazin. Ingen nedbrydningsprodukter fundet efter 105 dage. Undersøgt for MNX, DNX, TNX, NDMA og hydrazin).	Startkoncentrationer: RDX: 9,3 µg/l, 2,4 DNT: 3,7 µg/l, TNB: 231 µg/l. Nitrat koncentration reduceret fra 6,1 til 0,2 mg/l. Injiceret 30 kg pr meter ved direct push injektioner. COD, ORP og redox parametre blev brugt som indikatorer for fordelingen. Fede syrer bekræfter tilstedeværelse af HRC®.	6
Simazin	lab	single	Fentons	vand	100 % fjernelse af simazin, men kun 32 % mineralisering efter 15 minutter	$k=0,009 \text{ min}^{-1}$	Øvre grænse for Fe(II) til mest effektiv fjernelse af simazin		Undersøgt effekten af H ₂ O ₂ og Fe(II) koncentration på nedbrydning og mineralisering af simazin, startkoncentration= 3 mg/l.	7
Bentazon	lab	single	Elektrosorption på carbon "cloth"	Vand/spildevand	Op til 90 % ved optimale forhold: ikke oxideret carbon ved pH=2				Startkoncentration: 20 ppm. Sammenlignet sorption på en oxideret carbon overflade og en ikke oxideret carbon overflade. Højere sorption på den ikke oxideret overflade. Højere sorption ved lav pH.	8

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
Phosalon (CAS nr. 2310-17-0)	lab	single	In situ flushing og basisk hydrolyse ved pH 10, 11 og 12	jord	99 % udvasket efter 7 porevolumener, komplet fjernelse ved pH 12 efter 12 timer	$t_{1/2}=0,57-2,96$ timer	Aktiveringsenergi stiger med faldende pH. Kortere halveringstid ved højere temperatur og pH.		Startkoncentration var 25 µg / g jord. Flushing foregik med 5 og 10% ethanol, 2 og 4 x porevolumen med en flow på 0,15 l/time. Basisk hydrolyse udført med 30% NaOH ved pH 10, 11 og 12. Tests udført ved 20, 30 og 40 °C.	9
Atrazin	lab	single eller i mix med ethanol	Soil flushing og ISCO (Fentons)	soil slurry (flushing), vand (ISCO)	Flushing: 95 % udvasket efter 15 porevolumener, ISCO: 100% fjernelse for atrazin alene, men kun 28 % når ethanol var til stedet.	ISCO, reaktionstid var 2 timer: $k=0,1-0,14 \text{ min}^{-1}$	Højere Fe(II) resulterer i højere omdannelse til CAAT. Ethanol reagerer hurtigt med Fentons radikaler og hindrer dermed oxidation af atrazin	CAAT var slutproduktet af oxidationsreaktionen.	Startkoncentrationer: 10 µg/g i slurry og 3,2 mg/L i det ekstraherede vand.	10
Triaziner (CDMT, TBA, DIA)	lab	single	ZVI	vand	CDMT: 20 % i 4,5 timer, DIA: 60 % i 2 timer, TBA: 90 % i 2 timer	CDMT: $k=1,4 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$, DIA: $k=7,8 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$, TBA: $k=2 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ Atrazin: $k=3 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$	Hurtigere ved lav pH	Dehalogerede triaziner	Kinetiske konstanter normaliseret efter overfladeareal.	11
Diuron	lab	single	Fentons	vand	93 % mineralisering	$K=4,8 \times 10^{-9} \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$, komplet mineralisering indenfor 10 minutter		Alle nedbrydningsprodukter blev nedbrudt	Startkoncentration=0,17 mM diuron.	12

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix ¹	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
Glyphosat	lab og pilot test i felt (overfladejord)	single	Bioaugmentering	fugtig jord	Op til 65,85 fjernelse i laboratoriemikrosmer og ca. 61,4 % i pilotforsøg inden for 2 uger.		Glyphosatmineralisering er højere i jord med lav sorptionskapacitet, ergo højere biotilgængelighed		Isoleret to ikke patogene bakteriestammer fra opformeringskulturer (<i>Achromobacter sp. Kg 16</i> og <i>O. anthropi GPK 3</i>). Startkoncentration = 100 l/ha.	13
Diuron, Linuron	lab/pilot	mix	Photofenton og bionedbrydning	vand	100 % fjernelse af diuron og linuron indenfor 100 minutter i photofenton reaktor. Effluenten er 87 % bionedbrydeligt		Nedbrydningsprodukter af photofenton reaktionen var bionedbrydelige		Startkoncentrationer: Linuron: 42 mg/l Diuron: 75 mg/l Photofenton effluent er efterbehandlet i en biologisk reaktor.	14
DNOC, dinoseb	lab	single	Bioaugmentering	vandmikrosmer og fixed bed reaktor	61,4% efter 28 dage, k=30 mmol/day i fixed bed reaktor.		Kultur kunne også nedbryde 4-nitrophenol, 2,4-dinitrophenol, men IKKE 2,3- dinitrophenol, 2,6-dinitrophenol, 2,4-dinitrotoluene, 2,4-dinitrobenzoic syre og dinoseb		Blandet kultur der kan bruges som inoculum til biologiske bioreaktorer. Startkoncentration = 5 mg/l i batcherne. Inletkoncentration i reaktoren= 50 µM. Hæmning på C> 300µM.	15
TNT	Litteratur-review	single	Aerob nedbrydning. Anaerob nedbrydning ved <i>white rot fungus</i> eller <i>P. fluorescens</i>	jord				DNT og andre mere toksiske produkter ingen toksiske nedbrydningsprodukter		16

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
TNT	Storskala pilottest	single	Bioslurry / evt. bioaugmentering med TNT nedbrydere	jord	>99%		Anaerobe/aerobe periode, tilsætning af sukker eller en kvælstof kilde			16
TNT	Felt	single	Kompostering (aerob)	jord	2 studier 99,70 % 96-97 %			DNT også nedbrudt	Jord blandet med en "bulking agent" og iltet.	16
TNT	Felt	single	Kompostering (aerob/anaerob)		aerob 92 %, aerob/ anaerob 100 % fjernelse og ingen nedbrydningsprodukter				Kompostering indebærer en risiko for at TNT binder sig til partiklerne og frigives senere, ulempen er at jordvolumen øges med næsten 5-30 gange.	16
TNT	Review		Phyto-remediation	jord	high		Planter kan nedbryde eller immobilisere TNT direkte eller ved mikrobiel nedbrydning i rhizosferen. Metoden er mest effektiv for lave koncentrationer af TNT.	Nedbrudt til ikke toksiske metabolitter	Mange planter kan nedbryde TNT: <i>Acena sativa</i> (oat) er den mest lovende. Phytoremediering anbefales som efterpolering af en oprensning.	16

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix ¹	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
TNT, DNTs, AmDNT, RDX	lab	mix	Anaerob bioremediering med HRC®	grundvand	95 %		Biologisk omdannelse ved kometabolisk reduktion. Høj fjernelse i kontrol reaktorer, muligvis pga. abiotiske mekanismer.	MVX, DNX, TNX, NDMA under detektionsgrænse	Startkoncentration=2000 µg/l, og 20 µg/l.	17
atrazin /nitrat	lab (reaktor)	single	Biologisk nedbrydning, sekventiel forbundet reaktorer	grundvand	>98 % fjernelse af nitrat, 30 % fjernelse af atrazin i denitrificeringsreaktor, 100% fjernelse af atrazin i den aerobe reaktor				Sekventiel behandling i to reaktorer: 1 denitrificerende biobarrier der fjerner nitrat efterfulgt af et lufttilførselssystem eller anden iltning proces for at fjerne residual atrazin og nitrat fra grundvandet. Startkoncentration: nitrat = 5 mg / l, atrazin = 3 mg / l, atrazin nedbrydning hæmmes af høje nitratniveauer.	18
TNT	lab	single	nZVI	Jord slurry og grundvand	Vand: 99,99% fjernelse af TNT indenfor 20 minutter, nZVI /TNT forhold =200/1 Slurry: 99,88% indenfor 20 minutter, nZVI /TNT forhold=250/1	k=0,137 min ⁻¹	Behov for højere nZVI dosis i slurry pga. jordens naturlige forbrug	2-ADNT og 4-ADNT, begge er mere bionedbrydelige og mindre toksiske end TNT	Startkoncentrationer 2000 mg/l 5000 mg/kg nZVI er effektiv behandling men der dannes nedbrydningsprodukter. Kan kræve yderligere behandling.	19

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix ¹	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
2,4,5-T, simazin, atrazin, 2,4 D, amitrol, aldrin	felt		Phyto-remediering med store træer	grundvand					Træer plantet på tværs af fanen som fungerer som biologiske "pumper" til at opnå hydraulisk kontrol over forureningsfanen.	20
Alle	review/felt		Phyto-remediering	jord og grundvand						20
atrazin, 2,4-D, 2,4,5-T	lab	single	Phyto-remediering med grass	rhizosphere			Øget nedbrydning		Grass 0,5-2 m	20
metolachlor	lab	single	ZVI og kompost	jord	60% fjernelse indenfor få dage ved compost, 91 % i 40 dage ved ZVI . Kombination af ZVI og kompost: 90 % i 3 dage, 98% i 40 dage	1 dag ved ZVI (30 ton/ha) og kompost			Startkoncentration = 200 mg/kg.	21

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
bentazon	lab	Single og nedbrydningsprodukter	Naturlig nedbrydning	jord	15% mineraliseret, 5% omdannet til methylbentazon og 65-85 % omdannet til hydroxybentazon og jordbundet. Kun 9,3 % af de jordbundne nedbrydningsprodukter blev mineraliseret indenfor 141 dage		Højt organisk indhold hæmmede mineralisering af bentazon under aerobe forhold	8-hydroxybentazon, 8 methoxybentazon, n-methyl bentazon	Startkoncentration= 3 mg/kg jord.	22
MCPP, MCPA, MCPB, 2,4 -D, mv.	lab	Single, Mix: MCPP med 2,4,5-T	Naturlig nedbrydning, isolering af specifikke nedbrydere	vand	50-75 % mineralisering	1 uge	Kometabolisk nedbrydning af 2,4,5-T resulterede i toksiske nedbrydningsprodukter		Isolering af en <i>stamme</i> der kan mineralisere MCPA, MCPB, 2,4-D, 2,4-DP, 2,4-DB ved at bruge dem som den eneste kulstof- og energikilde. Startkoncentration= 120 mg/l.	23
Glyphosat	lab	single	UV and H ₂ O ₂	vand	70 % i 5 timer	t _{1/2} = 0,19 timer, reaktionstid: 5 timer	UV alene og peroxid alene viste ingen nedbrydnings indenfor 3 timer	I dette forsøg: glycin, formaldehyd, formic acid, nitrat, ammonium og fosfat. I andre forsøg: AMPA, sarcosin, glycolsyre	Startkoncentration: 0,16-0,54 mM. Kombinationen af UV og peroxid resulterede i komplet nedbrydning af glyphosat til ikke toksiske nedbrydningsprodukter.	24

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix ¹	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
Atrazin	lab	single	ISCO (fentons)	Jord (slurry)	89% indenfor 24 timer		Overskud af jern: Tilstedeværelse af stabilisator nedsætter effektiviteten Lav jern koncentration: Tilstedeværelse af stabilisator øger effektiviteten Højere fjernelse af atrazin ved: pH = 1, større reaktion volumen og gradvis tilsætning af peroxid	Spor af chlorerede metabolitter og didealkylatrazin (CAAT)	Startkoncentration= 100 mg/kg.	25
Simazin	lab		Naturlig nedbrydning og bioaugmentering med <i>Pseudomonas ADP</i>	jord	80 % ved 5 ppm, 40% ved 40 ppm i kontroljord, 90 % ved 40 ppm i simazin behandlet jord	Kontroljord: k=0,23 dag ⁻¹ Simazin jord: k=0,06 dag ⁻¹	Bioaugmentering kunne ikke fremkalde en større fjernelse af simazin men det fremskyndte processen		Jord fra et mark der over 10 år er sprøjtet med simazin, startkoncentrationer= 5 og 40 ppm.	26
MCPP, 2-CPP, 4-CPP, og ¹⁴ C-MCPP	lab	single	Naturlig nedbrydning	Akvifer sediment	op til 31 % af MCP in 154 dage		Stor vertikal variation i nedbrydningspotentiale. Tilstedeværelse af reaktive zoner i akvifer i overgangen mellem aerobe og anaerobe forhold			27

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
2,4-D og nedbrydningsprodukter	lab	single	ISCO (Fentons)	vand	93 % fjernelse af 2,4-D			hydroxylation products, 2,4-DCP, 2,4-DCR, 4,6-DCR, 2-CHQ, 2-CBQ, 1, 2,4-THB, blev dannet og fuldstændig nedbrudt	Startkoncentration 2 mg/l med elektrokemisk produktion af OH-radikaler.	28
dinoseb	felt (pilot)	mix med dicamba	Stimuleret biologisk nedbrydning med HRC®	grundvand	Dinoseb: 86 -99 % fjernelse, fra 20000 µg/l til 3680 µg/l Dicamba: 80-99 % fjernelse fra 160 µg/l til, 32 µg/l		Metaboliter der indikerer reduktion af dinoseb		Landbrugsfacilitet, sandet ler silt. Startkoncentrationer: Dinoseb: 20.000 µg/l, Dicamba: 160 µg/l. HRC injiceret i magasinet i 15 injektionsboringer placeret med en 1,5 m grid. I alt 626 kg HRC® svarende til ca 9 kg/m.	29
atrazin, linuron	lab	single	surfactant flushing	jord /grundvand	op til 87,9% udvaskning af atrazin og op til 69,9% udvaskning af linuron		SDS (Sodium dodecyl sulphate) var mest effektivt Mindre udvaskning af linuron "gammel" jord resulterede i bedre udvaskning		Surfactant flushing med triton X og natriumdodecylsulphat (SDS).	30

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
dinoseb	lab	single	ZVI	vand, jord og slurry	100 % fjernelse indenfor 7 dage		Tilsætning af FeSO ₄ og Al ₂ (SO ₄) ₃ øgede effektiviteten	quinonimine og benzoquinone, ingen af dem var persistente	Startkoncentrationer: Vand: 30 mg/L, Slurry: 250 mg/kg Jord: 16 mg/kg	31
Glyphosat	lab	single	Stimuleret biologisk nedbrydning med tilførsel af ilt	jord eller aqvifer sediment			I sandjord blev det højeste nedbrydningspotentiale observeret i pløjelaget (10 % nedbr). I lerjord blev det kun nedbrudt 3.5 % i overjorden og op til 18 % i 2 m dybde.	AMPA og sarcosin (ikke målt)	Startkoncentration= 1 mg/kg Inkuberet i 3 måneder. Størst mineralisering i ler end i sand, muligvis pga. højere indhold af organisk stof der fremmer kometabolisk nedbrydning. I sandjord: større mineralisering ved lavere sorption.	32
Atrazin	Lab	single	ZVI	grundvand og jord	Lav startkoncentration: 92 % fjernelse af atrazin Høj startkoncentration: 74 % fjernelse 11,2% mineralisering i jord			lav startkoncentration: ingen nedbrydningsprodukter Høj startkoncentration: deethylatrazin	Startkoncentrationer: 20 µg/l 20000 µg/l 1 mg/kg	33

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
Atrazin	lab og felt	single	Bioaugmentering med genmodificeret <i>E.Coli</i> biostimulering med fosfat, kombination	jord	Phosphat tilsætning: ingen nedbrydning Naturlig nedbrydning: 70% nedbrydning Bioaugmentering: 55% nedbrydning Kombinering: 77% nedbrydning	Naturlig nedbrydning $t_{1/2} = 300$ dage			Startkoncentration= 29000 ppm.	34
MCPP, dichlorprop, bentazon, isoproturon, DNOC, BAM	felt	mix	Naturlig nedbrydning	grundvand	nedbrydning af MCP, dichlorprop. Ingen nedbrydning af bentazon, isoproturon DNOC eller BAM.				Feltforsøg udført i aerobt grundvand I Vejen, DK.	36
MCPA	lab	MCPA/glyphosat	Naturlig nedbrydning	jord	44-72 %		nedbrydning. i topjord - nedbrydning dybere -nedbrydning anoxisk	CO ₂	Ingen tilsætninger eller anden form for stimulering.	47

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
glyphosat	lab	MCPA/ glyphosat	Naturlig nedbrydning	jord	9,3-14,7%		nedbr. i topjord - nedbr. dybere - nedbr. anoxisk sorption inhiberer tilgængelighed	CO ₂		47
atrazin/phe ndimethalin	felt, miler	mix	Fe (0) + CH ₃ COOH + AL ₂ (SO ₄) ₃	jord	>90%					48
metalachlor /alachlor	felt, miler	mix	Fe (0) + CH ₃ COOH	jord	>60%				Vand + eddikesyre tilsat til vandindhold på 0,35-0,40 /kg i miler dækket med plastic. Vand tilsat hver 2. uge. Svagt sur til næsten neutral pH kan øge effektiviteten af Fe(0) ved at nedsætte oxidationen og deaktivere Fe(III) dannelse, mens evt. dannelse af hydroxyatrazin-stærkt bundet til Fe(0).	48

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/ mix	Teknologi	Jord/vand/ grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydnings- produkter	Kommentarer (opsummering)	Reference
MCPPP	lab	mix arazin/ MCP	H ₂ O ₂ + metalporpyriner	jord	op til 100%			Ingen stabile, men nedbrydningsveje kortlagt	Kortlægning af nedbrydningsveje, meget laboratorieorienteret.	49
atrazin	lab	mix arazin/ MCP	H ₂ O ₂ + metalporpyriner	jord	83% 15 h			Primært DEA eller DIA	Meget laboratorieorienteret artikel .	49
2,4-D	lab	single	Elektrokemisk oxidation	kunstigt spildevand						50

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/ mix	Teknologi	Jord/vand/ grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydnings- produkter	Kommentarer (opsummering)	Reference
diuron/ linuron	lab	mix	Fenton 3 x modifikationer	spildevand					Livscyklusvurdering af forskellige måder med Fenton.	51
atrazin	lab	mix alachlor /atrazin	nZVI	grundvand	ingen nedbrydning.				On site rensning af "rinse water".	52
alachlor	lab	mix alachlor /atrazin	nZVI og reduktiv dechlorering	grundvand	92-96% 72h				nZVI og reduktiv dechlorering.	52

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
cyanazin	lab		Ozon UV-radiation H ₂ O ₂	grundvand/ spildevand						53
atrazin	lab	single	Ethanol + oxidation m. Fenton	jord					Udvaskning af atrazinforurenet jord med ethanol. Fenton på vandig opløsning ethanol forbedrer udvaskningen fra jord, men skal reduceres betydeligt bagefter for at Fentons oxidation kan foregå.	54
atrazin	lab	single	Metoder til denitrifikation	jord					Artikel vedr. identifikation af organismer der kan nedbryde atrazin.	55

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix ¹	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
atrazin	lab	single	nZVI ZVI	grundvand/ jord		1,39 d ⁻¹ 0,18 d ⁻¹		2-ethyl-amino-4-isopropylamino-1,3,5-triazin og 2-hydroxy-4-ethylamino-6-isopropylamino-1,3,5-triazin	Reduktiv dechlorering. pH fra 9 til 4 øger nedbrydningsraten.	56
ikke specifikt på pesticider			Phyto-remediering							57
chloro-phenoxy yalcanoic acids	screenings metoder for nedbrydning									58

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
atrazin og s-triaziner	lab	mix	Fastlæggelse af DNA og gener for bakterier, ikke artikel vedr oprensning							59
atrazin/cyanazin	felt, miler	mix	ZVI, naturlig nedbrydning	jord						60
ikke pesticid-specifik	lab/felt						Generelt review vedr. nZVI TCE nedbrydning 20 m flow of nZVI			61

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix ¹	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
glyphosat							Generelt review, ikke direkte oprensning. Glyphosat nedbrydes primært biologisk, uger-år			62
dinoseb	on site i containere	single	Anaerob nedbrydning	jord	100% på 15 d			Et ikke identificeret nedbrydningsprodukt, stoffet nedbrydes dog efter 45 d	Trin 1:pH justeres til 7 med syre eller base. Stivelse fra en kartoffelfabrik tilsættes sammen med inoculum af adapterede bakterier. I trin 2 anvendes jorden fra trin 1 som inoculum. Desuden tilsættes buffer og stivelse. Tilsvarende for trin 3. Processen forløb bedst ved temp. >25 °C. Gik i stå i vinterperiode (frost), men gik igang igen efter optøning i foråret.	63
glyphosat	lab	single	Biologisk nedbrydning	jord	op til 25% i grus		Sorption af glyphosat inhiberende for nedbrydning. Kun den opløste del nedbrydes. Der tilsættes inoculum af glyphosatnedbrydende bakterier, hvilket øger nedbrydningen.			64

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
glyphosat	lab	single	Oxidation med manganoxid	vand				AMPA, sarcosin	Hurtigere nedbrydning af glyphosat end af AMPA. Forsøg udført ved 20°C og 50 °C. Højere temp giver hurtigere nedbr. Konc. af glyphosat 10,5 mg/l og 0,5mM MnCl ₂ . Ikke umiddelbar skalerbar til felt.	65
S-triaziner atrazin, cyanazin, alachlor,me tolachlor	lab	mix	Fenton + specifikke bakterier	vand	>99% på 10 d.				Stabile ikke carcinogene nedbrydningsprodukter produceret med Fenton, men efterfølgende behandling med bakteriestammen nedbrød alt. Muligvis overførbart til felt.	66
atrazin, simazin og BAM	felt	mix	Katalytisk ozonering	grundvand	fjernelse til under detektionsgrænsen				Anvendt på Thorsbro Vandværk til rensning af pesticidforurenet drikkevand.	67

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgæede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
parathion, methylparathion, malathion, sulfotep	lab/felt	mix	Basisk hydrolyse/ biologisk nedbrydning	jord/ grundvand			Tilsætning af base til høj pH slår størstedelen af den naturlige bakterieflora ihjel. For at få den biologiske nedbrydning til at forløbe, skal der først neutraliseres og derefter podes med nye bakterier			68
dinoseb	lab	single	Anaerob enrichment kultur	kunstigt medium	-	-	kortlægning af nedbrydningsveje	en lang række nedbrydningsprodukter observeret	Udelukkende laboratorierelateret. Kunstigt medium. Ikke direkte skalerbar til jord/grundvand og feltforhold.	69
phenyl-urea isoproturon, chlortoluron, chloroxuron	lab	single	Electro-fenton og radiation (sollys)	sterilt vand	>95% på 1h	op til $4,2 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$		Nedbrydningsveje kortlagt	Sammenligning af forskellige forhold mellem isoproturon. Udelukkende laboratorierelateret. Sterilt vand, konc stof 5 mg/l. Ikke direkte skalerbar til jord/grundvand og feltforhold. Fe ³⁺ konc, samt sammenligning med sollys og TiO ₂ plade i vandet.	70

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
phenyl-urea diuron, monuron, fenuron	lab	single	Electro-fenton			$4,8 \cdot 10^9$ til $12 \cdot 10^9$ M-1 S-1 >90% på 3h	jo flere chloratomer, des langsommere	Nedbrydningsveje kortlagt	Udelukkende laboratorierelateret. Sterilt vand. Pest konc. 0,17-0,25mM, pH 3,0, stuetemperatur.	71
phenyl-urea diuron, monuron, fenuron, chloroxuron	lab	single	Basisk og neutral hydrolyse	destilleret vand		41 år for diuron 25 °C, pH 7	neutral hydrolyse bedste metode		Meget laboratorierelateret. Destilleret vand, forsøg udført ved 64 og 84 °C. Pest konc. 3-6 µg/l.	72
diuron m.fl.	lab	single	Speciel bakteriestamme	vækstmedium	96% ved konc 250 ppm indenfor 30d			3,4-dichloroanilin	Bakterier isoleret og opformeret fra jord forurenet med diuron. Herefter rent laboratorieeksperiment med vækstmedium og pesticider tilsat efter opløsning i methanol, konc. pest 250 ppm. En lang række phenylurea testet.	73

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
TNT, RDX	felt		ZVI reaktiv væg	jord/ grundvand	fjernelse til under detektionsgrænsen		reduktion af sulfatkonc.		Oprensning af forureningsfane på militærbase. Meget omfattende rapport med geologi, hydraulisk ledningsevne m.m. beskrevet.	74
atrazin	lab	single	ZVI	jord/grundvand	92 % på 48h ved 20 µg/l. 88% på 48h ved 20mg/l		atrazin sorberer til jern	deethylatrazin (mailn prod), også deisopropylatrazin, didealkylatrazin og hydroxyatrazin	Forsøg med både grundvand og med jord/grundvand. Forsøg med høje og lave konc. af atrazin i forskellige konc. af ZVI. Pyrit ikke anvendelig.	75
bentazon	felt	single	Phyto-remediation	jord/grundvand					Ph.D. afh., der beskriver ekstraktionsmetoder m.m. for bestemmelse af planteoptag af bentazon. Grundvandskoncentrationer beskrives ikke umiddelbart. Oprensningseffekt kan derfor ikke vurderes.	76

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
atrazin, propazin, simazin	lab	single	ZVI	vand, bufferopløsning m.m.		7,4-10,6 min.		4,6-diamino-s triazin	Simazin>atrazin>propazin. T½ lavere ved forsøg med mix af pest. Stuetemp, pest konc. 1,25 mg/l. Meget laboratorierelateret.	77
phenyl-urea diuron,	lab	single	Speciel bakteriestamme	vækst-medium					Isolering af gener fra bakterier. Mere rettet på bakterierne end egentlig oprensning.	78
atrazin, MCPP	felt	mix	Naturlig nedbrydning	grundvand,	Ingen nedbr. af atrazin. Nedbrydning af MCPP fra 100 µg/l til 30 µg/l efter lagfaser på ca. 40-60 dage.				Feltforsøg udført i Canada. Injektionsforsøg i aerobt grundvand.	79
atrazin, MCPP, chlorerede opløsningsmidler m.m.	felt	mix	Naturlig nedbrydning	grundvand	ingen nedbrydning				Feltforsøg udført i lossepladsfanen nedstrøms Grindsted Gl. Losseplads. Anaerobt perkolatforurennet grundvand.	80

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Stof	Lab/felt	Single/mix ⁱ	Teknologi	Jord/vand/grundvand	Observeret fjernelse	Kinetik	Andre observationer	Nedbrydningsprodukter	Kommentarer (opsummering)	Reference
MCPP, dichlorprop	Lab og felt	mix	Naturlig nedbrydning	Jord og grundvand					Der er set nedbrydning af MCPP i laboratorieforsøg under både aerobe og anaerobe forhold. Meget kort lag fase i aerobe forsøg, hvorimod lang lag fase i anaerobe forsøg. Der er indikationer af naturlig nedbrydning i felten.	83

ⁱ Single/mix: "Single" refererer til ét enkelt pesticid, mens "mix" refererer til en blanding af pesticider, som omhandles i artiklen.

Bilag A Arbejdsskema for den gennemgåede litteratur

Dette skema er tænkt som et hurtigt opslagsværk, hvis man ønsker en uddybelse af det, der står i teksten i rapporten. Skemaet er dog udelukkende et arbejdsskema og skal ikke opfattes som en systematisk gennemgang af oplysninger fra de refererede artikler. Det anbefales derfor, at relevant litteratur fra de refererede artikler findes frem, hvis der er behov for at læse oplysningerne i en sammenhæng. Bagest i skemaet er en række anvendte forkortelser forklaret.

Forkortelse	Forklaring, stofnavn	Forkortelse	Forklaring
1,2,4-THB	1,2,4-trihydroxybenzen	COD	Chemical Oxidant Demand
2,4,5-T	2,4,5-trichlorphenoxy-eddikesyre	HRC	Hydrogen Release Compound®
2,4-D	2,4-dichlorphenoxy-eddikesyre	ISCO	In Situ Chemical Oxidation
2,4-DB	2,4-dichlorphenoxybutylsyre	nZVI	nano Zero Valent Iron
2,4-DCP	2,4-dichlorophenol	ORP	Oxidation Reduction Potential
2,4-DCR	2,4-dichlororesorcinol	SDS	Sodium dodecyl sulphate
2,4-DNT	2,4-dinitrotoluen	TOC	Total organic Carbon
2,4-DP	2,4-dichlorophenoxypropionsyre	USD	US Dollars
2-ADTN	2-amino-4,6-dinitrotoluen	ZVI	Zero Valent Iron
2-CBQ	2-chloro 1,4-benzoquinon		
2-CHQ	2-chloro 1,4-hydroquinone		
2-CPP	2-chlorophenoxypropionsyre		
4,6-DCR	4,6-dichlororesorcinol		
4-ADTN	4-amino-2,6-dinitrotoluen		
4-CPP	4-chlorophenoxypropionsyre		
AmDNT	amino-4,6-dinitrotoluen		
AMPA	aminomethylphosphorsyre		
BAM	2,6-dichlorbenzamid		
CDMT	2-chloro-4,6-dimethoxy-1,3,5-triazin		
CAAT	chlorodiamino-striazine		
DDD	dichlorodiphenyldichlorethan		
DDE	1,1-dichlor-2,2-bis(4-chlorphenyl)ethen		
DDT	dichlorodiphenyltrichlorethan		
DEA	desethylatrazin		
DIA	desisopropylatrazin		
DNOC	dinitro-ortho-cresol		
DNT	2,4-dinitrotoluen		
MCPA	2-(4-chloro-2-methylphenoxy)acetic acid		
MCPB	4-chloro-2-methylphenoxyeddikesyre		
MCPA	2-(4-chloro-2-methylphenoxy)propanoic acid		
MNX, DNX, TNX	mono, di, og trinitroso derivativer af RDX		
NDMA	n-nitrosodimethylamin		
RDX	hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazin		
TBA	2-chloro-4-ethylamino-6-terbutylamino-1,3,5-triazin		
TNB	trinitrobenzen		
TNT	trinitrotoluen		