

Bekämpningsmedel i dräneringsvatten från växtföljder i Mälarenregionen och vid olika strategier för jordbearbetning

Barbro Ulén och Mats Larsbo, SLU Mark & Miljö

SLU, institutionen Mark och Miljö, Box 7014, SE-750 07 Uppsala, Sweden.

barbro.ulen@slu.se, Tel 018-671251,

Sammanfattning

Den rumsliga variationen i läckage av bekämpningsmedel utvärderades och samtidigt studerades effekter av reducerad jordbearbetning och strukturkalkning. Platsen var Borsjö experimentfält, med dränerade rutor och med tung lerjord (60 %) av marint ursprung, S om Stockholm. Under sommaren 2009, läckte 0,14, 0,22 resp. 1,62 %, av normalt applicerad MCPA, fluroxipyr och klopuralid med häftigt regn 5 dygn efter sprutningen. Under sommaren 2011, läckte i medeltal 0,70 % av den sprutade mängden bentazon under korta skyfall efter 12 dygn. Halter i dräneringsvattnet högre än önskvärda nivåer för akvatiska ekosystem återfanns från 50 % resp. 33 % av behandlad yta för MCPA och bentazon. Ung. 0,08 % av höst-applikerad glyfosat läckte i löst form under en vinter. Baserat på mätningar av glyfosat i partikelform var den totala förlusten dubbelt så hög (0,16 %) en andra vinter. Variationen mellan de 24 försöksrutorna var stor för alla substanser (72-115 %), trots liten variation (25 %) i avrinning.

BAKGRUND

Betydande kvantiteter bekämpningsmedel kan läcka och förorena ytvatten efter transport via dräneringssystemen. Sådana läckage representerar vanligen mindre än 1 % av de applicerade mängderna, men kan vara avsevärt större från tunga lerjordar och erosionsutsatta mjälajordar. Hur stora mängder som läcker beror framför allt på substansernas egenskaper där ett svagt sorberade ämne som bryts ner långsamt medför den största risken för läckage.

Det allmänna prototokollet för risken att bekämpningsmedlet ska nå grundvattnet (GUS) är en enkel riskindikator för läckage av pesticider. Med denna beräknar man fördelningen av adsorptionskoefficienter till organiskt kol (K_{oc}) kombinerat med halveringstiden för nedbrytning (DT_{50}). Framför allt beror läckaget på markegenskaper och markhydrologi där preferensflöden ("makroporflöden") kanske representerar det allra sämsta tänkbara utfallet. Eftersom markegenskaperna varierar inom ett avrinningsområde varierar också pesticidförlusterna. Skiftande hydrologiska egenskaper (t ex. infiltrationskapacitet och tendens till vattenmättnad i matjorden) är om möjligt ännu viktigare och kan förklara den stora variationen i läckage av bekämpningsmedel som observerats i avrinningsområden. Läcketaget av bekämpningsmedel kan också vara olika beroende på varierande förhållanden i alven.

Intentionen med studien var att kvantifiera läcketaget av normalt använda bekämpningsmedel från en dränerad sprickig lerjord i Mälarenregionen som ett resultat av naturligt regn och snöackumulation. Ett annat mål var att utvärdera hur variationen påverkas av reducerad jordbearbetning då man bara bearbetar jorden grunt och utan att vända den som man gör när man plöjer.

Tabell 1. Bekämpningsmedlens egenskaper och potentiella läckage baserat på uppgifter från ”Pesticide Properties Database” (PPDB, 2010)

Substans	DT _{50lab} ^a	DT _{50fält} ^b	K _{oc} ^c	GUS ^d	pK _a ^e
Bentazon	13	14	55,3	2,30	3,28
MCPA	24	25	74 ^f	2,94	3,73
Fluroxypyr	1	51	195 ^f	0	2,94
Klopyralid	34	11	5,0	5,06	2,01
Glyfosat	12	12	1435	-0,49	2,34
Tifensulfuronmetyl	4	4	28,3	1,53	4,4
Tribenuronmetyl	14	14	35	2,88	4,7

^a Halveringskoefficient under syrerika förhållanden uppmätta i laboratoriet

^b Halveringskoefficient under syrerika förhållanden uppmätta i fält

^c Koefficient för adsorption till organiskt material

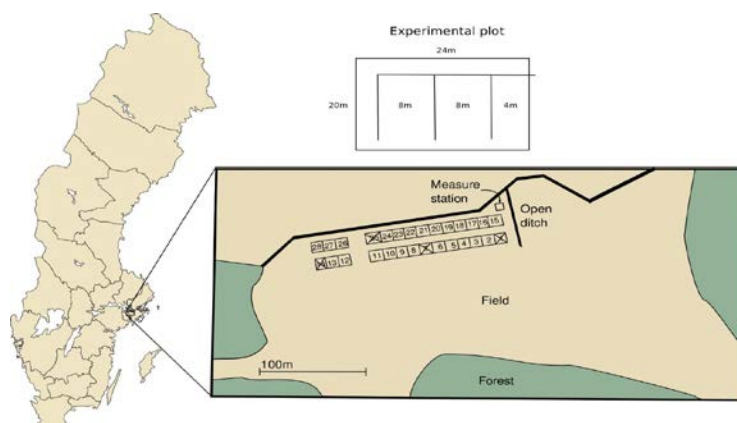
^d Allmänt protokoll (beräkning) för risken att bekämpningsmedlet ska nå grundvatten

^e Dissociationskonstant för syran

^f Freundlich adsorptionskoefficient till organiskt kol

MATERIAL OCH METODER

Vid Bornsjö experimentfält (1,3 ha) med tung lerjord (60 %) av marint ursprung strax söder om Stockholm utnyttjades 24 av de 28 försöksrutorna, dvs. alla utom de med grönträda. Rutorna (24m x 20m) systemtäckdikades år 2006 till ett djup av 0,9 m och med 88 m mellan ledningarna. De ligger i två rader och med varierande avstånd från det öppna dike som tjänstgör som recipient för dräneringsvattnet (Figur 1). Fältet som ligger i ett flackt område har en sluttning som är mindre än 0,05 % i genomsnitt. Jorden är aggregerad, speciellt i den nedre alven (43-100 cm), som har rikligt med 10-20 cm stora prismatiska aggregat. Stora vertikala porer (upp till 5 mm vida) är tydliga mellan aggregaten, speciellt i alven, och det finns rikligt med fina porer i de gamla rotkanalerna. Det är vanligt med utfällningar av järnoxider både i rotkanalerna, på väggarna av aggregaten och som ung. 3 mm stora fläckar som är ojämnt fördelade inom jorden. Under blöta förhållanden förstörs aggregaten om man bearbetar jorden. Ett år efter dräneringsarbetet (år 2007) innan experimentet började, hade matjorden ett organiskt kolinnehåll (OC) som var 2,5 %, med en variationskoefficient som var mindre än 17 % mellan rutorna. Kvoten OC/ler var högst 0,05. I den djupare alven var specifika vikten låg och det organiska materialet fattigt på kväve. Detta är karakteristiskt för den här typen av jordar och indikerar förekomst av sprickor som stabiliseras av gammalt organiskt material.



Figur 1. Experimentfältet med dränerade rutor och diket dit vattnet leds.

Tabell 2. År, gröda, dag och handelsnamn för de växtskyddsmedel (herbicer) som användes 2008-2011 i växtföljd I och II (antal konventionellt plöjda rutor/totala antalet behandlade rutor)

År	Växtföljd I Gröda	Dag	Herbucid (16/20 rutor)	Växtföljd II Gröda	Dag	Herbucid (4/4 rutor)
2008	Vårkorn	24/4	Glypro Bio ^{a,b}	Höstvete	26/6	Harmony 50T Plus ^c
	"	26/6	Harmony 50T Plus ^c	Efter höstvete	16/8	Glypro Bio ^b
2009	Vårkorn	9/6	Ariane S ^d	Höstvete	6/5	Harmony 50T Plus ^c
2010	Havre	23/6	Ariane S ^d	Havre	23/6	Ariane S ^d
	"	22/9	Glypro Bio ^b	Efter havre	22/9	Glypro Bio ^b
2011	Ärt	11/6	Basagran ^e	Ärt	11/6	Basagran ^e

^a bara i 8 grunt kultiverade rutor

^b Aktiv ingrediens glyfosat (49%)

^c Aktiv ingrediens tifensulfuronmetyl (37%) och tribenuronmetyl (17%)

^d Aktiv ingrediens MCPA (20%), fluroxipyr (4%) och klopyralid (2%)

^e Aktiv ingrediens bentazon (87%)

Läckaget efter sju olika bekämpningsmedel med konstrasterande egenskaper (Tabell 1) studerades i två olika växtföljder (Tabell 2), båda med havre och ärt de två sista åren (2010-2011). I växtföljd I (20 rutor), jämfördes konventionell plöjning med grund bearbetning (kultivator under hösten) och höstplöjningen jämfördes också med tidigare strukturkalkning hösten 2007. Glyfosat sprutades före vårsådden 2008 för att bekämpa tistel i de 8 grunt bearbetade rutorna i växtföljd I (Tabell 3). Under försommaren samma år sprutades lågdosmedlen tifensulfuronmetyl and tribenuronmetyl i båda växtföljderna. Under hösten 2008 användes glyfosat efter skörden (4 rutor) i växtföljd II för att kontrollera tistel och spillsäd som grott. De tre substanserna klopyralid, fluroxipyr och MCPA (som ingår i samma preparat) sprutades för ogräskontroll den 9 juni 2009 i växtföljd I (20 rutor) och 23 juni 2010 i båda växtföljderna (24 rutor). Glyfosat applicerades efter skörd september 2010 och bentazon sprutades 11 juni 2011 i båda växtföljderna (24 rutor). Vanligen gjordes bekämpningen på kvällen, då det inte blåste och alltid med rekommenderad dos. Använda mängder av bekämp-

Tabell 3. År och dag då sprutningen skedde, substanser som analyserades i dräneringsvattnet, gröda och applicerad dos av detekterade substanser tillsammans med den allmänna dosen (g ha⁻¹) som använts i de svenska typområdena 2008-2011

År	Dag	Substans	Gröda	Dos (g ha ⁻¹)	Allmän dos (g ha ⁻¹)
2008	24/4	Glyfosat	Före korn	707	748
2008	26/4	Tifensulfuronmetyl	Vårkorn	4	6
		Tribenuronmetyl	Vårkorn	2	3
2008	16/8	Glyfosat	Efter höstvete	1060	1116
2009	26/5	Tifensulfuronmetyl	Höstvete	6	6
		Tribenuronmetyl	"	3	3
2009	9/6	Klopyralid	Vårkorn	52	48
		Fluroxipyr	"	104	81
		MCPA	"	520	590
2010	23/6	Fluroxipyr	Havre	104	75
		MCPA	"	520	510
		Glyfosat	Efter havre	1 060	1110
2011	11/6	Bentazon	Ärt	475	500

ningsmedel (Tabell 3) var snarlika de som rapporterats från typområdena inom den svenska miljöövervakningen av bekämpningsmedel. Nederbörden mättes med ouppvärmad utrusning och resultatet samlades i en datalogger. Eftersom mängden snö lätt underskattas vid nederbördsräkningar utnyttjades manuella mätningar av snödjupet (5 dagar i veckan) på ett öppet fält vid Norsborgs vattenverk som är beläget 6 km NÖ om försöksfältet. Snöackumulation mellan snösmältperioder beräknades härifrån.

Avrinningen mättes med vippkärl i en provtagningskällare. Vattnet provtogs flödesproportionellt och varje delprov representerade 0,003 mm avrinning under sommaren och 0,04 mm resten av året. Samlingsproverna hämtades varje vecka (mera frekvent vid första flödetillfället efter besprutningen). Därför jämnade veckoproverna ut toppkoncentrationerna, medan de medelhalter som mättes under kortare period indikerade den maximala halten lite bättre. Omdelbart efter uppsamlingen frystes proven och sändes till Laboratoriet för Organiska Miljökemi, Institutionen för Vatten och Miljö, SLU där de analyserades om man förväntade sig detekterbara koncentrationer av bekämpningsmedel.

Koncentrationerna tifensulfuronmetyl och tribenuronmetyl (år 2008) bestämdes med fastfasextraktion följt av vätskekromatografi och masspektrometri (LC-MS) och koncentrationerna klopyralid, fluroxipyr och MCPA (år 2009) med samma fast-fasextraktion och genom derivatisering och gaskromatografi/masspektrometri (GC/MS). Fluroxipyr och MCPA (år 2010) och bentazon (år 2011) analyserades med masspektrometrisk bestämning (LC-MS/MS). Löst glyfosat och dess huvudsakliga metabolit AMPA analyserades vintern 2008/2009 och 2010/2011, med hjälp av jonutbyte och derivatisering följt av slutlig identifiering och kvantifiering med GC-MS. Under vintern 2010/2011, analyserades totalt glyfosat, inklusive partikulär glyfosat (Glyfosat Part.), med filtrering genom ett cellulosaacetatfilter med porstorleken 0,45 µm (Ulén et al., 2012a). Medianvärdet för detektionsgränsen (LOD; µg L⁻¹) var; 0,003 för bentazon; 0,005 för klopyralid; 0,01 för fluroxipyr; 0,003 för MCPA; 0,006 för tifensulfuronmetyl och tribenuronmetyl; 0,03 för löst glyfosat; 0,1

Tabell 4. Månadsnederbörd (Ned) och snöackumulation (Snö ack) under vinterperioder (oktober-december aktuellt år och januari-april följande år), avrinning (Avr) (mm månad⁻¹) och kvoten Avr/Ned (flödesutbytet) under experimentår och som långtidsmedelvärde (1987-2007)

År		Maj	juni	juli	aug.	sept.	okt.-april	Snöack
2008	Ned	30	5	44	42	8	385	14
	Avr	10	1	0	4	5	395	
	Avr/Ned	0,33	0,20	0	0,03	0,63	0,99	
2009	Ned	45	95 ^a	94	54	35	384	50
	Avr	3	43	3	1	0	370	
	Avr/Ned	0,07	0,45	0,03	0,02	0	0,85	
2010	Ned	53	39	155 ^b	95	51	290	75
	Avr	16	3	8	87	42	310	
	Avr/Ned	0,30	0,08	0,05	0,92	0,82	0,85	
2011	Ned	40	70	26	138	72	358	3
	Avr	3	14	0	0	4	350	
	Avr/Ned	0,08	0,20	0	0	0,06	0,96	
1988-2011	Ned	40	67	82	69	63	338	32
	Avr	7	12	2	18	10	360	
	Avr/Ned	0,15	0,18	0,02	0,21	0,16	0,97	

^a Maximal intensitet 46 mm d⁻¹ under mitten av månaden

^b Maximal intensitet 79 mm d⁻¹ vid slutet av månaden

för partikulär glyfosat och 0,2 för AMPA. På grund av bakgrundsinterferens överskreds LOD värdet för löst glyfosat, partikulär glyfosat och AMPA i resp. 20, 22 och 45 % av proven. Löst reaktiv fosfor (DRP) och partikulär fosfor (PP) bestämdes för alla prov som analyserades för något bekämpningsmedel.

RESULTAT OCH DISKUSSION

Nederbörd och avrinning Dräneringen var effektiv och praktiskt taget all vinternederbörd dränerade genom täckdikena. Kvoten mellan avrinning och nederbörd var högre än i genomsnitt juni 2011 och mycket högre juni 2009 (Tabell 4). Under augusti och september 2010, var denna kvot mer än fyra gånger högre än i genomsnittet. Östra Sverige har ofta försommartorka, men under juni 2011 föll det upprepade sommarregn under mitten av juni 2009 (12 mm, 4 mm resp. 46 mm den 12:e, 13:e och 14:e juni) och med en maximal intensitet av 9 mm timmer⁻¹ den 14:e juni. Detta följdes av en utpräglad flödestopp på 40 mm som varade under två dygn (15-16 juni) och som hämtades som ett första samlingsprov. En snabb minskning i vattenflödet följde och nästa samlingsprov, 6 dagar senare, representerade 5 mm avrinning. I motsats till detta karakteriserades växtsäsongen 2010 av en torr junimånad, följt av tre på varandra följande åskregn med eskalerade intensitet under senare delen av juli (29 mm, 43 mm, resp. 79 mm under 24:e, 25:e och 27:e juli) och med ytterligare 21 mm den 2 augusti. Regn av sådan omfattning inträffar bara vart 10:e år i denna trakt. Åskregnen resulterade i en total översvämning av mätstationen 29-31 juli 2010. Ett vattenprov som representerade 6 mm avrinning provtogs den 3 augusti efter att toppflödet (>25 mm) hade passerat. Den 23 juni 2011, föll det 17 mm regn inom två timmar och då marken redan var fuktig efter 5 mm:s regn två dagar tidigare. Detta resulterade i 8 mm resp. 4 mm avrinning de två följande dagarna. Dräneringsproven analyserades på bentazon, som hade sprutats 12 dagar tidigare. De två vintrar som följde efter att glyfosat hade använts på hösten (2008/2009, 2010/2011) var olika. Hösten 2008 var varm och den mesta av vinterhalvårets avrinning inträffade under oktober-december, medan vintern 2010/2011 var kall med mycket snö och den mesta avrinningen skedde under våren 2011. Avrinningen mellan olika rutor hade en variationskoefficient på i genomsnitt 22 % under sommaren och 25 % under vintern.

Koncentrationer i dräneringsvatten Inga spår detekterades av sulfonyleureorna (tifensulfuron-metyl och tribenuron-metyl) under 2008. På grund av den snabba avklingningen som kännetecknar dessa substanser analyserades de inte följande år. I motsats till dessa lågdosmedel återfanns detekterbara nivåer av alla andra herbicider varje år under de första två månaderna efter försommarsbesprutning. Detekterbara koncentrationer av fluroxipyr och MCPA observerades 31 dagar efter applicering (Tabell 5) i det första vattenprov som kunde tas efter översvämning av mätstationen. Att man återfinner pesticider i det första avrinningstillfället efter besprutning stämmer väl överens med konceptet för preferensflöde. En annan indikation var att klopäralid och fluroxipyr dök upp samtidigt den 14-16 juni 2009, trots stora skillnader i K_{oc} värden (Tabell 1). Eftersom bara 5 dagar hade passerat mellan tillförsel och nederbörd kan substanserna inte ha varit i jämvikt med jorden. Löst glyfosat detekterades i alla på varandra följande avrinningstoppar hösten 2008. Både partikelbunden och löst glyfosat detekterades i dräneringsvattnet från alla tillfällen med snabba flöden under hösten 2010. För både MCPA och bentazon återfanns högre koncentrationer än de som potentiellt är skadliga för ytvattens ekosystem enligt Kemikalieinspektionens beräkningar (Svenska Kvalitetskriterier, WQO). Sådana höga värden observerades för MCPA i 50 % av försöksrutorna och för bentazon i 33 % av rutorna (Tabell 6).

Tabell 5. År, dag för besprutning av substansen (inklusive glyfosatmetaboliten AMPA), antal dagar till första stora nederbördstillfälle (Ant. Dag), svenska nivåer för vattenkvalitet (WQO), maximal halt (Max) och medelhalt (Medel) under det intensivaste avrinningstillfället, kvoten mellan antalet rutor med halter över WQO och totala antalet rutor (Kvot WQO) och totala period (dagar) efter att appliceringen då halterna överskred WQO

Årr	Dag	Substans	Ant. Dag	WQO			Kvot WQO	Period
				Max	Medel	— (µg L ⁻¹) —		
2008	16/8	Glyfosat löst	47	100	1,2	0,48	0/4	-
		AMPA	47	500	0,3	-	-	-
2009	9/6	Klopyralid	5	50	5,5	2,2	0/20	-
		Fluroxipyr	5	100	1,7	0,67	0/20	-
		MCPA	5	1	5,5	2,0	10/20	5-14
2010	23/6	Fluroxipyr ^a	31	100	0,3	0,081	0/24	-
		MCPA ^b	31	1	0,04	0,007	0/24	-
2010	22/9	Glyfosat löst	33	100	3,9	0,58	0/24	-
		Glyfsat total	33	100	9,4	2,2	0/24	-
		AMPA	33	500	0,7	-	-	-
2011	11/6	Bentazon	12	30	63	23,9	8/24	12-16

^a Vanligen bara analyserad i löst form

^b Sen uppsamling av prov eftersom mätstationen översvämmades

Efter att höga halter uppmättes 14-16 juni 2009, minskade de i det nästföljande provet (representerande följande 6 dagar) då vattenflödet fortsatte att minska. Halterna klopyralid, fluroxipyr resp. MCPA var då 63, 55 och 38 % av resp. toppkoncentration. Det relativt snabba avtagandet visar att läckaget var betingat av flödesepisoder. Höga koncentrationer av bentazon (upp till 63 µg L⁻¹) efter ett kort men intensivt regn i juni 2011 befäster att det mera är nederbördens intensitet än av dess varaktighet som avgör hur höga koncentrationerna av bekämpningsmedlen blir.

Variationskoefficienten för koncentrationerna under de viktigaste läckagetillfällena varierade mellan 72-115% i de olika rutorna (inkluderande de med olika behandlingar) och ökade i ordningen bentazon < klopyralid < fluroxipyr < Partikulär Glyfosat < MCPA < Löst Glyfosat. Dessa högst varierande halter av olika substanser var inte signifikant korrelerade till grundläggande markfaktorer som pH-värdet, lerinnehållet och det organiska materialet i matjorden, vilka hade en betydligt mindre variationskoefficient (2, 17 resp. 10 %).

Förluster av bekämpningsmedel Mängderna pesticider som läckte under sommarperioderna från konventionellt plöjda rutor åren 2009-2011 varierade mellan 0,2 och 3,3 g ha⁻¹ (0,1-1,6 % av applicerad dos) (Tabell 6). Förluster av den storlekordningen har rapporterats från andra försöksplatser och från kritiska arealer i undersökta avrinningsområden. Läckageförluster över 1 % hänger ofta ihop med stora nederbördstillfällen kort efter besprutningen. I vårt fall representerade de nederbördsförhållandena under 2009 och 2011 inte ett 'värsta fall' för stora läckage och därför visar de stora förlusterna vikten av de hydrologiska förhållandena och att sannolikheten för preferenstransport är väldigt stor för denna jord.

Förluster över 0,1 % inträffade från 2-24 rutor (92-100 % av försöksytan) för klopyralid och bentazon, medan den relativa förlusten av MCPA som överskred 0,1 % representerade 42 % av ytan. Enligt internationella översikter har man återfunnit högre förluster av bekämpningsmedel (med olika egenskaper) i dräneringsledningarna från 43 % av de undersökta lokalerna i Europa, medan motsvarande siffra var 59 % i USA.

Tabell 6. År, dag, applicerad substans, inklusive de tre komponenterna i Ariane S, medelförlust (Medel) från plöjda rutor med standard avvikelse (SD), medelförlust relativt tillförd mängd, variationen i den relativa förlusten samt andelen av arealen (Yta) med en relativ förlust större än 0,1 g ha⁻¹. Glyfosat analyserades både i löst och partikulär (part.) form under 2010/2011

År	Dag	Substans	Medel (g ha ⁻¹)	SD	Relativ förlust (%)	Variation i relativ förlust (%)	Yta (%)
2008	16/8	Glyfosat löst	0,89	±0,64	0,084	0,02 - 0,17	25
2009	9/6	Klopyralid	0,84	±0,70	1,62 ^c	0,09 - 4,55	92
		Fluroxipyr	0,24	±0,36	0,22	0,002- 0,96	60
		MCPA	0,71	±0,89	0,14	0,003- 0,49	42
		Sum	1,81	±3,03	0,34	0,02 - 1,36	60
2010	23/6	Fluroxipyr ^a	>0,03	±0,02	>0,03	-	-
2010	22/9	Glyfosat löst ^b	0,90	±0,32	0,085	0,05 -0,12	-
		Glyfosat part.	0,82	±0,25	0,064	0,08 -0,10	-
		Glyfosat total	1,72	±1,47	0,15	0,12 -0,23	100
2011	11/6	Bentazon	3,31	±2,92	0,70 ^b	0,42 - 2,16	100

^a Från ett sent vattenprov efter att mätstationen översvämmats

^b Perioden 22 sept.-15 april och beräknad från samma 4 rutor som besprutades 2008

^c Relativ förlust av klopyralid var signifikant större (p<0.01) än förlusten av fluroxipyr

Eftersom vi inte undersökte vare sig desorption eller nedbrytning av substanserna i jorden vid Bornsjön utvärderade vi läckaget i relation till egenskaperna från en databas (Pesticide Properties Database). Vi är samtidigt väl medvetna om att både sorption och nedbrytning är starkt beroende av markegenskaperna. De relativa läckageförlusterna av de aktuella substanserna visas i Tabell 6. Läckaget av klopyralid (1,62 %), den substans som hade högst GUS index, var mycket större än för fluroxipyr (0,22 %) och MCPA (0,14 %), som applicerades samtidigt. Baserat på GUS index för fluroxipyr och MCPA (Tabell 1), läckte fluroxipyr ovanligt mycket. Eftersom GUS index beräknades från DT₅₀ värden uppmätta i laboratoriet kan detta förklara den betydligt långsammare nedbrytningen under fältförhållanden som vi indikerat här. Förlusterna av bentazon representerade 0,70 % av besprutad mängd (juni 2011) och förlusten av total glyfosat 0,16 % av applicerad mängd (vintern 2010/2011). Dessa tydliga förluster står i stark kontrast med de låga värden för GUS index som dessa substanser har (Tabell 1) och indikerar därför preferenstransport. Baserat på GUS-index för MCPA, kan man förvänta att denna substans skulle läcka mer än bentazon. Den höga relativa förlusten av bentazon i den här studien (0,70 %) överskrider läckagen av MCPA (0,14 %) två år tidigare, och demonstrerar vikten av de hydrologiska förhållandena för läckaget av dessa pesticider.

Förvånande nog resulterade båda höstbesprutningarna 2008 och 2010 i lika stora förluster (löst) glyfosat den följande vintern (0,9 g ha⁻¹), dvs. 0,08 % av applicerade mängder (Tabell 6). Detta inträffade oberoende av om den huvudsakliga avrinningen skedde efter höstregn följt av en mild vinter (2008/2009) eller i samband med snösmältning efter en kall vinter med långliggande snötäcke (2010/2011). I laboratorieexperiment har det rapporterats statistiskt säkert långsammare nedbrytning av glyfosat under konstant låg temperatur nära noll jämfört med när man haft en fluktuerande temperatur med upprepade frysnings-tinings-cykler. På grund av en förmodad långsam nedbrytning under vintern 2010/2011 under ett långvarigt snötäcke var glyfosat tillgängligt för läckage under det viktigaste snösmältningstillfället våren 2011, vilket var intensivt och antagligen resulterade i preferenstransport.

Tabell 7. År, använt substans, medel och standard avvikelse (SD) för transport av applicerad substans (g ha^{-1}) inklusive höstbesprutad total glyfosat (i löst och i partikulär form), från plöjda, strukturkalkade (+ plöjda) och konventionellt (Konv.) plöjda rutor. Transporten anges också justerad till en beräknad transport baserad på avståndet till diket inom parentes. Längs ner visas medelvärdet för pH i jorden och koncentration (%) av organiskt kol (OC) i alven i rutor med olika behandling

År	Substans	Reducerad plöjning		Strukturkalkad		Konv. plöjd			
		Medel	SD	Medel	SD	Medel	SD		
<i>Transport av bekämpningsmedel</i>									
2009	Klopyralid	1,16	(1,14)	$\pm 0,77$	1,07	(1,13)	$\pm 0,95$	0,73 (0,71)	$\pm 0,59$
2009	Fluroxipyr	0,36	(0,35)	$\pm 0,29$	0,25	(0,26)	$\pm 0,28$	0,22 (0,21)	$\pm 0,25$
2009	MCPA	1,11	(1,09)	$\pm 1,03$	0,86	(0,88)	$\pm 1,25$	0,63 (0,61)	$\pm 0,82$
2011	Bentazon	4,78	(4,73)	$\pm 2,84$	3,52	(3,75)	$\pm 3,81$	3,40 (3,32)	$\pm 2,53$
2010	Glyfosat ^a	3,81	(3,77)	$\pm 2,58$	0,85	(0,90)	$\pm 1,13$	1,59 (1,56)	$\pm 1,56$
<i>Förhållanden i mat och alv</i>									
	pH (0-2) ^b	6,1		$\pm 0,15$	6,5		$\pm 0,45$	6,2	$\pm 0,09$
	OC (0-2) ^b	2,72		$\pm 0,23$	2,70		$\pm 0,34$	2,64	$\pm 0,27$
	OC (0-23) ^c	2,43		$\pm 0,54$	2,47		$\pm 0,46$	2,50	$\pm 0,49$
	OC (23-60) ^c	1,42		$\pm 0,25$	1,47		$\pm 0,35$	1,52	$\pm 0,32$
	OC (60-90) ^c	0,63		$\pm 0,12$	0,64		$\pm 0,08$	0,65	$\pm 0,10$

^a Totalglyfosat både i partikulär och löst form under perioden 22 sept. 2010-15 april 2011

^b Efter fem år (2012) med upprepad grund kultivering under hösten

^c Vid försökets start (2007)

Halter av bekämpningsmedel korrelerade fosfor och till försöksrutornas läge Trots den obetydliga variationen i avrinningen mellan rutorna beräknades det vara stor olikheter i förlorad kvantitet för alla substanser vilket resulterade i högst varierande koncentrationer i dräneringsvattnet. Dessutom var koncentrationerna av klopyralid, bentazon, MCPA och fluroxipyr, var och en, statistiskt säkert korrelerade till den partikelbundna fosfor (PP) från samma ruta. Samma relationer gällde också mellan total glyfosat och PP (Ulén et al., 2012a). På grund av en stark förmåga att binda till partikelytor (sorption), anser man att glyfosat och PP i huvudsak läcker genom preferensflöde i makroporer. Våra resultat indikerar att preferenstransport också dominerar transporten av ämnen med svag sorptionsförmåga på denna plats. Dessutom, eftersom pesticiderna applicerades på markytan och läckte med ett liknande mönster som PP, antyder detta att det var matjorden som var det huvudsakliga ursprunget för den partikelbundna fosfor som läckte via dräneringsrören.

Vi kunde inte se något ytvatten rinna i riktning mot diket under försöksperioden. Det är också mindre sannolikt att vatten flödar horisontellt under markytan (t ex på en plogsula) eftersom det inte finns någon distinkt plogsula på platsen. Det fanns ingen korrelation mellan ytjordens (0-23 cm) pH och rutornas läge. Däremot ökade det organiska materialet i matjorden tydligt med ökat avstånd mellan försöksrutornas mittpunkt och diket ($R^2 = 0,70$ %, $p < 0,001$) medan pH i den nedre alven (60-90) minskade ($R^2 = 78$ %, $p < 0,001$). Koncentrationerna av varje substans tenderade att öka när avståndet mellan rutan och diket minskade. Detta samband var signifikant för bentazon, och också signifikant när man gjorde en total rankning av alla detekterbara bekämpningsmedel. Orsaken till denna gradient är inte helt klar.

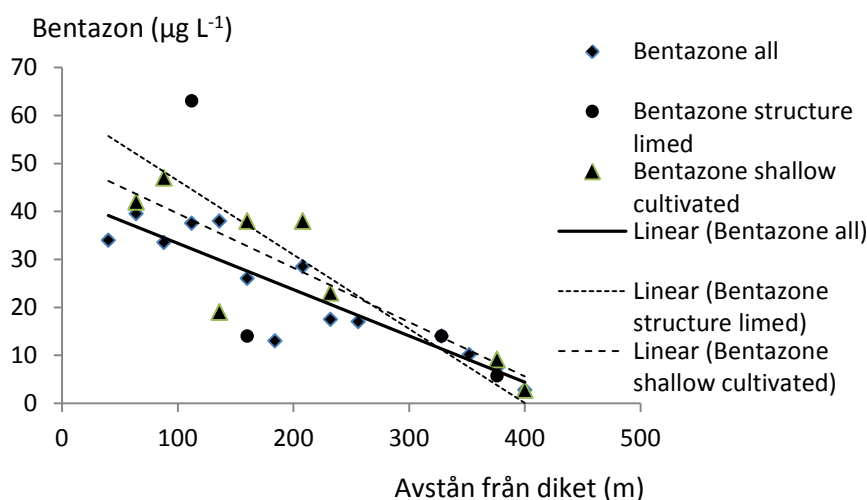
Lutningen för regressionslinjerna mellan koncentrationen bekämpningsmedel relaterat till (den slumpmässiga) positionen av resp. försöksruta skiljde sig något åt för de tre åtgärderna (reducerad bearbetning, strukturkalkning och vanlig plöjning). Detta är exemplifierat för

bentazon i Figur 2. Följaktligen kan halterna ha varit något överskattad från de grunt kultiverade rutorna, och något underskattas från de strukturkalkade rutorna. Det har därför gjorts en korrektion (upp till 3 %) för denna effekt för varje substans (Tabell 7), som dock inte förändrar resultaten i någon högre grad.

Effekter av jordbearbetning, struktur, pH och organiskt material Det fanns en allmän tendens för stora förluster av alla substanser från de grunt bearbetade rutorna än från de plöjda rutorna, med eller utan föregående strukturkalkning (Tabell 7). De tydliga skillnaderna, som inte var signifikanta för någon substans, ökade i ordningen klopyralid < MCPA < bentazon < fluroxipyr < total glyfosat. Beräknad för alla fem substanserna tillsammans (parad t-test), var skillnaderna mellan ytligt bearbetade och plöjda strukturkalkade rutor signifikanta ($p < 0,05$), både före och efter justering av rutans läge i förhållande till diket.

Att plöja anses generellt minska pesticidutlakningen från jordar med utpräglade preferensflöden genom att man då bryter kontinuerliga makroporer. Dessutom kan den ytliga och ojämna ackumuleringen av växtrester i de grunt bearbetade rutorna orsaka en ojämn infiltration och följas av en snabb mera horisontella transporter av bekämpningsmedel. En sådan ändrad markstruktur i den översta matjorden skulle kunna förklara de signifikant högre förlusterna av partikelbunden fosfor efter grund kultivering i jämförelse med konventionell plöjning. Graden av preferensflöde är starkt beroende av markstrukturen. Den här studerade platsen har visat att strukturkalkning (bränd snabbkalk) signifikant förbättrar markstrukturen, vilket antagligen är en anledning till mindre läckage av pesticider från de kalkade rutorna.

För lösliga substanser påverkas också läckaget av pH, eftersom många substanser är starkt sorberade vid höga pH. Baserat på pK_a värden för de här studerade substanserna fanns det små skillnader i pH mellan behandlingarna (Tabell 7), och eventuell pH-effekt var antagligen minimal. Innehållet av organiskt kol i matjorden är ofta högre då man bara bearbetat grunt under en lång tid jämfört med då man plöjt, vilket har konsekvenser för sorption och nedbrytning av bekämpningsmedel. I vårt fall var emellertid innehållet av organiskt kol inte signifikant olika mellan de olika behandlingarna och det fanns inga signifikanta skillnader i alven mellan de olika regimerna. Matjordens organiska innehåll har ofta stora konsekvenser för både sorption och nedbrytning. I vårt fall var emellertid inte koncentrationen organiskt kol signifikant olika mellan behandlingarna och det var heller ingen statistisk skillnad i alvens innehåll av kol mellan de olika regimerna (Tabell 7).



Figur 2. Koncentrationer av bentazon i förhållande till avståndet mellan diket och centrum av varje försöksruta med regressionslinjer baserat på koncentrationer från strukturkalkade och grunt bearbetade rutor markerade för sig.

De högst varierande läckagen mellan olika rutor är kanske ett resultat av en ojämn fördelning av sprickor med olika form i den lägre alven. I dessa nivåer träffar man på både ”gyttja” (dvs. gammalt material av organiskt ursprung som sedimenterat till havets botten) och rost. Detta kan stärka porer och sprickväggar och göra dem till permanenta transportleder för vatten. Det gäller speciellt i de djupare jordlagren med lågt pH nära diket. Motsvarande kanaler, speciellt de i direkt kontakt med dräneringen, kan utgöra effektiva transportvägar för pesticider och för partikulärt bunden fosfor. Variationskoefficienten för förlust i förhållande till applicerad mängd varierade mellan 40 och 92 % för de olika substanserna. Motsvarande variationskoefficienten för alla rutor var högre och varierade än mer (92-156 %). Detta visar också att skillnaderna i transportvägarna genom jorden mellan rutorna hade större effekt på halterna bekämpningsmedel i vattnet än skillnaderna betingade av de olika bekämpningsmedlens egenskaper.

PUBLIKATIONER OCH ANNAN RESULTATFÖRMEDLING

Vetenskapliga artiklar

Ulén B, Alex G, Kreuger J, Svanbäck A, and Etana A, 2012a. Particulate-facilitated leaching of glyphosate and phosphorus from a marine clay soil via tile drains. Submitted to *Acta Agriculturae Scandinavica B Soil and Plant* (available on-line).

Ulén, B., Kreuger, J. Larsbo, M and Svanbäck, A 2012b. Spatial variability of herbicide leaching from a marine heavy clay soil via subsurface drains. Submitted to *Pesticide Management Science*.

Övrig internationell resultatförmedling

NJF-seminarium “Erosion i Norden” Oslo 15/11 2011.” Particulate-facilitated leaching of glyphosate and phosphorus from a drained clay soil in Sweden.”

Konferensbidrag EUROSIL 2012 Bari Italien 5/6 2012. ”Leaching of phosphorus and pesticides from drained clay soils in Sweden.”

Övrig resultatförmedling till näringen har bla skett genom:

Föredrag på Brunnbydagen januari, 2011. ”Resultat från Bornsjöförsöket”

Föredrag på KSLA 13 september 2011 ”Långa mätserier och beräkningar av läckage”

Greppa näringens hemsida Ulén B 2012. ”Läckage av glyfosat minskar med strukturkalkning” Nyhet 2012-06-01 www.Greppa.nu