

Pesticidutlakning i relation till nederbördsmönster och markfuktighet – riskanalys och anpassning av bekämpningstidpunkter.

FOU – H0648344

BAKGRUND

Syftet med projektet är att analysera betydelsen av markfuktighet och nederbördsmönster för pesticidutlakning i lerjordar i södra Sverige. Som underlag för studien används långa väderdataserier (25-30 år) och nederbördsdata med dygns- respektive timupplösning, samt data från ett välundersökt avrinningsområde i Skåne.

Ursprungsansökan omfattade ett 3-årigt projekt inklusive utveckling av ett web-baserat riskbedömningsverktyg. Eftersom SLF endast beviljade ett 2-årigt projekt och budgeten skars ner, har fokus (enligt rekommendation) lagts på projektets mer grundläggande delar och mål:

(a) att beräkna pesticidutlakningen med hög tidsupplösning baserat på långa väderdataserier (25-30 år) och särskilt analysera betydelsen av nederbördsmönster (varaktighet, mängd och intensitet) och markfuktighet på lerjordar för utlakning av typiska herbicider.

(b) att fastställa ett antal kriterier för optimering av bekämpningstidpunkt med avseende på minimering av pesticidutlakning, baserat på kunskap om betydelsen av nederbördsmönster och markfuktighet enligt (a).

Beräkningarna i (a) gjordes med en process-baserad simuleringsmodell (MACRO; Larsbo et al., 2005) för ett stort antal appliceringsdatum (inom ramen för ”normala appliceringsdatum”). Resultaten analyserades med avseende på totalt utlakad mängd via dräneringsvatten och perkolation till grundvatten samt max-koncentrationer. Resultaten kopplas till statistisk analys av markvattenhalt vid appliceringstillfället och efterföljande nederbördsmönster (mängd och intensitet). Med hjälp av en statistisk metod (multipel linjär regression) identifierades kriterier för optimering av bekämpningstidpunkt med avseende på minimering av pesticidutlakningsrisken.

Projektet har löpt enligt planerna. Den ursprungliga tidplanen har justerats, i samråd med SLF, pga huvudsökande var barnledig år 2006 och därefter arbetat deltid pga partiell föräldraledighet.

MATERIAL och METODER

Metod

MACRO-modellen parameteriserades för moränlera baserat på data från Näsbygård (Vemmenhög, Skåne). Ett stort antal simuleringar genomfördes i vilka appliceringstidpunkten för en typisk herbicid varierades inom ett rimligt ”tidsfönster”. Appliceringstidpunkterna baserades på en svensk databas för applicering av olika pesticider (CKB, SLU). Varje simulering omfattar 4 år och applicering av pestiden sker ”år 2”. Simuleringarna omfattar såväl vår-applicering som höst-applicering av en typisk herbicid. För att beakta naturliga mellanårsvariationer i klimatet genomfördes simuleringarna med 20 olika 4-årsserier av klimatdata. För varje 4-årsserie flyttas appliceringsdatum inom ramen för

ett tidsfönster på 50 dagar. På så vis erhålls ett statistiskt sett stort material med många olika kombinationer av appliceringstidpunkt, markfuktighet vid applicering och efterföljande olika nederbördsserier. Eftersom nederbördsintensiteten kan ha betydelse för transport av pesticider i strukturerade jordar (makroporflöde) gjordes dessutom alla simuleringar med dels dygnsupplösning och dels timupplösning i nederbördsdata. Totalt genomfördes 2000 simuleringar för vardera vår- respektive höst-applicerings-scenario.

Resultaten analyserades statistiskt med avseende på följande ”mål-variabler”:

- Totalt utlakad mängd via perkolation till grundvattnet, L_{tot}
- Totalt utlakad mängd till dräneringssystemet, D_{tot}
- Maximal dygnsförlust till dräneringsssystemet, D_{max}
- Maximal dygns-koncentration i dräneringsvattnet, C_{max}

Variationen i ”mål-variablerna” (utlakningsvariabler) testades med avseende på ett antal möjliga ”förklarings-variabler”:

- Markvattendeficit vid applicering (markfuktighet) i marken ner till 2 m djup, SWD_{tot}
- Akkumulerad nederbörd 0-5, 5-30, 30-90, 90-180 samt 180-360 dagar efter pesticid applicering: P_{0-5} , P_{5-30} , P_{30-90} , P_{90-180} , $P_{180-360}$

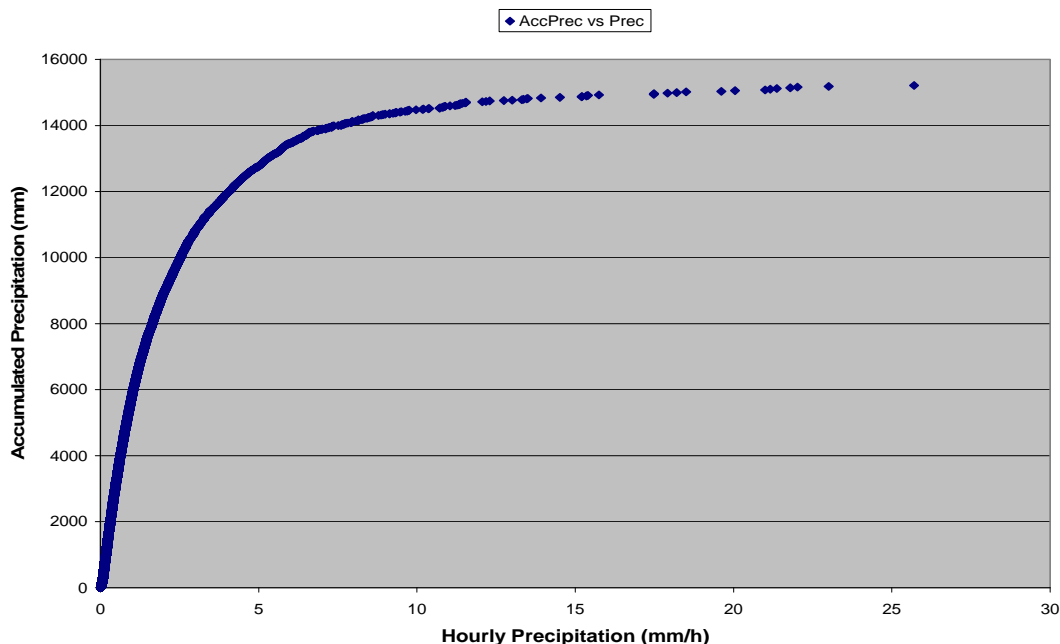
Sambandet med ytterligare två målvariabler testades också: (iii) markvattendeficit i matjorden vid applicering, samt (iv) maximal nederbördsintensitet efter applicering (ovan angivna perioder). Dessa tester visade emellertid att den förra var starkt korrelerade med (i), samt den senare starkt korrelerad med (ii) ackumulerad nederbörd 0-5 dagar efter applicering – varför dessa senare två förklaringsvariabler uteslöts från den fortsatta analysen.

Genom tillämpning av två olika statistiska metoder (classification-trees och step-wise multiple regression) undersöktes i vilken grad de olika potentiella ”förklaringsvariablerna” kan förklara variationen i utlakningsmängder och koncentrationer. Endast metoden med stegvis multipel regresssion gav bra systematiska samband – varför endast resultat från denna redovisas.

RESULTAT och DISKUSSION

Klimat, Hydrologi och Vattenbalans

Årlig medeltemperatur var 7.5 C och dygnsmedeltemperaturen varierade mellan -20 och +25 C. Årsnederbörden varierade mellan 475 och 850 mm och var i genomsnitt 691 mm. Simuleringar gjordes med både dygns – och timupplösning i nederbördsdata. Timdata genererades från dygnsdata med en stokastisk disaggregeringsmetod vars parametrar tagits fram genom jämförelse mellan dygns- och timnederbördsdata från södra Sverige (Olsson, 1998). Statistisk fördelning av den genererade tim-nederbörden presenteras i Fig. 1. Trots att 94% av nederbördstillfällena hade en intensitet < 2 mm/h, föll 50% av den totala nederbördsmängden med en intensitet >1.5 mm/h och nästan 15 % av totalnederbörden med en instensitet > 5 mm/h. Nederbördstillfällena med intensitet > 10 mm/h inträffade ca 50 gånger under perioden som helhet. Maximal intensitet under perioden var 25.7 mm/h. Åtminstone 30% av nederbördstillfällena hade en intensitet som översteg den mättade hydrauliska konduktiviteten av ”mikroporererna” i matjorden (>0.41 mm/h). Den sammanlagda nederbörden från dessa tillfällen utgjorde 83% av den totala nederbördsmängden, vilket indikerar att makroporflöde inträffade regelbundet i simuleringarna.



Figur 1. Fördelning av nederbördshändelser med avseende på nederbördsintensitet (Ackumulerad nederbörd, 1977 – 1998).

Tabell 1. Årlig vattenbalans (Medel-, Min- och Max-värden, 1977-1998)

Vattenbalans - komponenter	Medelvärde		Min - Max
	(mm)	%	(mm)
Nederbörd	691	100	475 - 850
Evapotranspiration	478	69	392 - 532
Dränering	137	20	16 - 289
Perkolation	69	10	42 - 94
Ytavrinning	4	<1	0 – 18 (26*)
Nettoförändring i förråd	3	<0.5	

* model runs with hourly rainfall

Avdunstning utgjorde i genomsnitt 69% av den årliga vattenbalansen och dränering samt perkolation till grundvattnet utgjorde 20% respektive 10%, Tabell 1. De genomsnittliga vattenbalanserna var identiska för simuleringar med tim- respektive dygnsupplösning i nederbörd och skillnaderna beträffande min- och max-värden var försumbara.

Tabell 2 a. Variation i utlakningsvariabler med dygns- respektive timdata på nederbörd. Resultat från simuleringar baserat på totalt 1000 olika appliceringstillfällen (50 datum under 20 olika år). Vårspridning

Variabel	Dygnsdata			Timdata		
	Min	Max	Median	Min	Max	Median
Totalförlust - g. w.*	9.77 e-6	0.246	0.001	2.89 e-5	0.394	1.36 e-3
Totalförlust - dränering *	2.49 e-4	8.76	0.025	5.22 e-4	14.2	0.028
Total förlust *	2.59 e-4	9.00	0.026	5.51 e-4	14.6	0.029
Max dygnsförlust - dränering *	5.78 e-7	0.084	6.5 e-5	9.39 e-7	0.157	8.16 e-5
Max concentration i dräneringsvatten **	5.76 e-3	426	0.368	11.1 e-3	797	0.618

*mg/m²; **mg/m³ = µg/l**Tabell 2 b.** Variation i utlakningsvariabler med dygns- respektive timdata på nederbörd. Resultat från simuleringar baserat på 1000 olika appliceringstillfällen (50 datum under 20 olika år). Höstspridning

Variabel	Dygnsdata			Timdata		
	Min	Max	Median	Min	Max	Median
Totalförlust - g. w.*	2.57 e-4	2.03	0.052	2.37 e-4	1.48	0.038
Totalförlust - dränering *	5.92 e-3	14.0	1.01	6.19 e-3	21.5	0.822
Totalförlust *	6.18 e-3	14.4	1.06	6.47 e-3	22.1	0.859
Max dygnsförlust - dränering *	1.42 e-5	0.11	3.5 e-3	1.68 e-5	0.207	3.27 e-3
Max concentration i dräneringsvatten **	0.127	471	19.9	0.114	937	27.1

* = mg/m²; ** =mg/m³ = µg/l

Betydelsen av tidsupplösning i nederbördsdata

Resultaten från simuleringar med tim- respektive dygnsupplösning i nederbördsdata skiljde sig främst vad beträffar simulerade max-värden, vilka blev systematiskt högre för alla utlakningsvariabler när timdata användes som indata (Tabell 2a och 2b). Median-värdena visade emellertid små skillnader med undantag för max-koncentrationen i dräneringsvattnet. Dessa resultat indikerar att tidsupplösningen i nederbördsdata blir mer betydelsefull i samband med ”extrema händelser”. Dygnsupplösning i nederbördsdata kan därför medföra underskattning av pesticidutlakningen i samband med extrema klimat- och väderbetingelser. Max-värdena var emellertid av samma ”storleksordning”, oavsett om tim- eller dygnsupplösning användes i simuleringarna, vilket innebär att dygnsupplösning kan vara tillräckligt för att uppskatta pesticidutlakningsrisken i termer av ”hög”, ”medel” eller ”låg” risk.

Betydelsen av vår- respektive höstspridning

Resultaten visar på systematiskt högre värden för alla beaktade utlakningsvariabler vid applicering av pesticiden på hösten jämfört med applicering på våren (Tabell 2a och 2b). För vissa variabler låg medianvärdena mer än en tiopotens högre vid höst-applicering jämfört med vår-applicering. Medianvärdet för total förlust till dräneringsrören (i simuleringar med timdata på nederbörd) låg på 0.028 mg/m² vid vår-applicering och 0.822 mg/m² vid höst-applicering. Motsvarande max-värden var 14.2 mg/m² och 21.5 mg/m², vilket motsvarar 14.2% respektive 21.5% av applicerad mängd. Skillnaden mellan vår- och höst-applicering var störst med avseende på median-värdet av max-concentrationer i dräneringsvattnet (0.618 respektive 27.1 mg/m³; timvärden). Resultaten visar som väntat att risken för stora

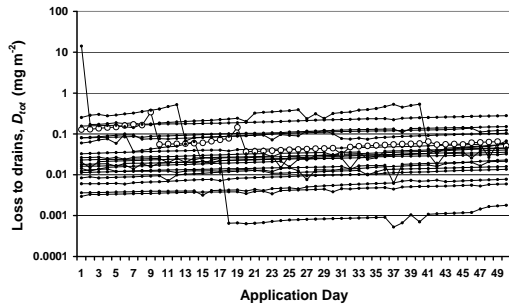
utlakningsförluster liksom höga exotoxikologiska koncentrationer i dräneringsvattnet är väsentligt högre vid höstspredning av herbicider jämfört med vårspredning.

Betydelsen av spridningstidpunkt under enskilda år

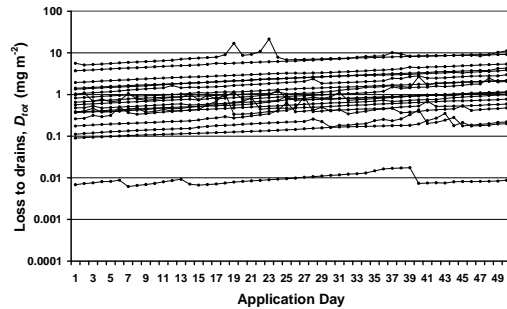
I Fig. 2 visas exempel på betydelsen av spridningstidpunkt under enskilda år. Resultaten demonstrerar att valet av spridningstidpunkt under våren kan reducera den totala pesticidutlakningen med mer än två tiopotenser under vissa år. Den maximala koncentrationen i dräneringsvattnet kan reduceras med upp till tre tiopotenser. De statistiska analyserna visar att de aktuella extremhändelserna är kopplade till vissa väderbetingelser – dvs. kombinationer av markfuktighet vid applicering samt en eller flera större nederbördstillfällen strax efter applicering. Detta genererar makroporflöde och därmed snabb transport av pesticider genom markprofilen. Om appliceringen sker en eller ett par dagar efter de aktuella nederbördshändelserna reduceras pesticidförlusten väsentligt. Denna typ av händelse illustreras för ett specifikt år i Fig. 4.

Betydelsen av appliceringstidpunkt under hösten är starkare kopplad till när vinteravrinningen startar i förhållande till appliceringen. Generellt sett minskar både risken för hög utlakning och risken för höga max-koncentrationer i dräneringsvattnet, vid tidig höst-applicering jämfört med sen höst-applicering (Fig. 3). Eftersom både max-koncentrationer och totalförluster ligger mer än en tiopotens högre vid höstspredning jämfört med vårspredning, är valet av spridningstidpunkt mer betydelsefullt vid höstspredning, i relativ mening. De statistiska analyserna visar på starkt samband mellan pesticidförlustens storlek och markvattenhalt vid applicering och med total nederbördsmängd under det efterföljande vinterhalvåret (Fig. 5).

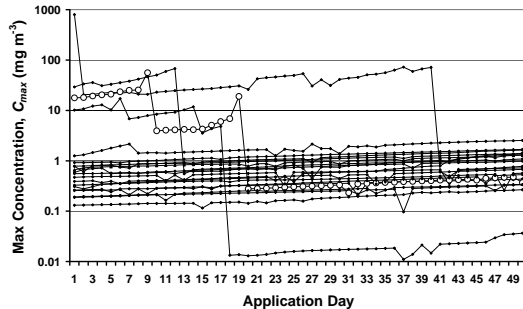
(a) **Vårspredning** (1 april – 20 maj)



(a) **Höstspredning** (22 sept – 10 Nov)



(b)



(b)

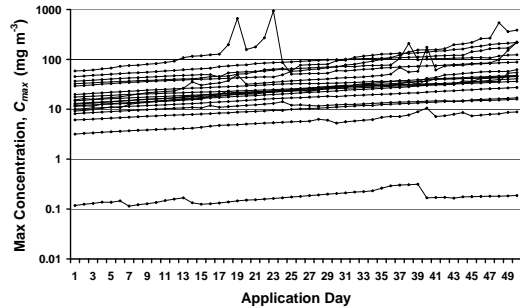
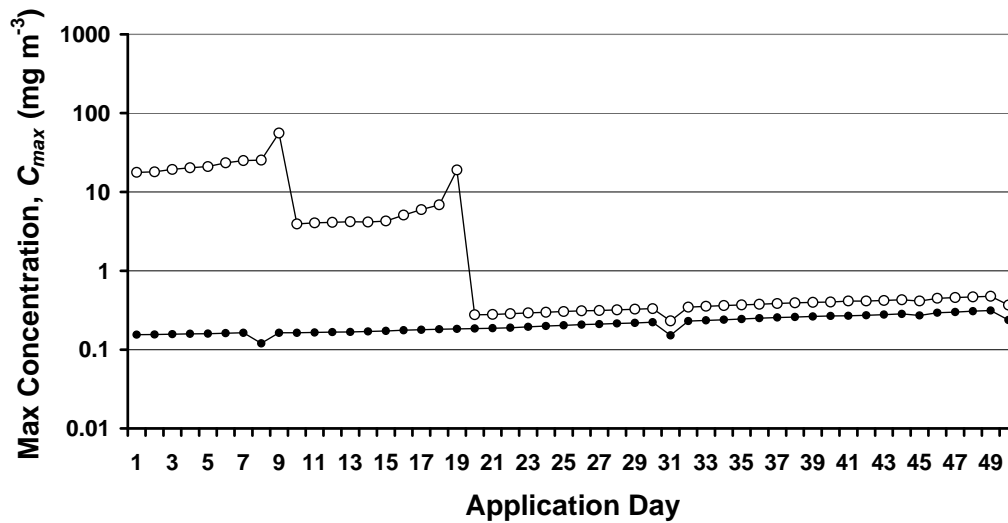
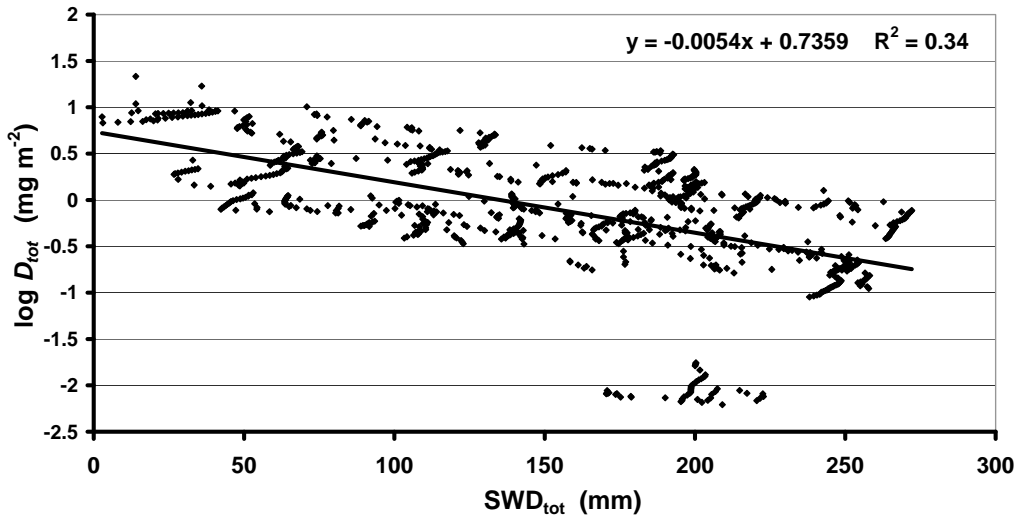


Figure 2. (a) total pesticidutlakningsförlust; och (b) maximal koncentration i dräneringsvattnet, efter vårspredning vid 50 olika tidpunkter, under 20 år olika år.

Figure 3. (a) total pesticidutlakningsförlust; och (b) maximal koncentration i dräneringsvattnet, efter höstspredning vid 50 olika tidpunkter, under 20 olika år.



Figur 4. Simulerad max-koncentration av herbicid i dräneringsvattnet efter spridning av herbicid vid olika tidpunkter under våren (1 april - 20 maj). *Med* (ofyllda symboler) och *utan* (fyllda symboler) beaktande av snabb transport via makroporflöde,



Figur 5. Samband mellan total pesticidförlust till dräneringsrör (D_{tot}) och markvattendeficit vid spridningstidpunkt (SWD_{tot}), för alla “höstapplikationer”, 50 dagar per höst, 20 olika spridnings-år.

Pesticidförluster efter vårspridning styrdes inte i lika hög grad av markvattendeficit vid spridningstidpunkt, som efter höstspridning. Detta beror på att markvattenhalterna är högre och visar mindre variation under våren jämfört med vad som är fallet under hösten. Under de år då stora nederbördstillfällen förekom i anslutning till spridningsperioden styrdes förlusterna av nederbördsmängderna närmast appliceringstillfället (P_{0-5} och P_{5-30}). Under år – med färre sådana tillfällen och alltså lägre förekomst av direkt transport via makroporflöde direkt till dräneringsrören under våren – styrdes totalförlusterna främst av totalnederbörden under påföljande höst och vinter (P_{90-180} samt $P_{180-360}$).

Optimering av spridningstidpunkt för att reducera pesticidutlakning - Spridningskriterier

Resultaten från denna studie visar att, under rådande klimatförhållanden i södra Sverige, styrs pesticidförluster från jordbruksmark i hög grad av den totala nederbördsmängden under höst och vinter. Eftersom denna variabel är svår att förutsäga – kan detta samband inte användas praktiskt för att anpassa/optimera spridningstidpunkten i syfte att uppnå reducerad utlakning av pesticider. De andra faktorer som visats betydelsefulla för pesticidutlakning i denna studie går emellertid att utnyttja för ett sådant syfte – dvs markvattendeficit vid appliceringstidpunkt, samt information om sannolik nederbördsmängd de närmaste dygnet. Aktuella markvattenhalter kan bestämmas genom enkla direkta mätningar i fält eller med tillgång till ”enkla on-line beräkningar” av markvattenbalans för olika typjordar i olika regioner. Nederbördsprognoser för de närmaste 5-10 dygnet blir alltmer tillförlitliga och kan användas som beslutsstöd för att bedöma lämpliga spridningstidpunkter – ur ett miljöperspektiv.

Vi testade enkla beslutskriterier baserat på resultaten från denna studie - kopplat till markvattendeficit på hösten, samt korttidsnederbörd på våren:

För höstspridning: antogs att ”acceptabel utlakningförlust” motsvarar 1% av applicerad pesticidmängd. Detta gav ett tröskelvärde på ”acceptabelt minsta markvattendeficit” för den aktuella jorden = 136 mm. Eftersom markvattendeficitet under vissa höstar alltid var < 136 mm, accepterades alltid pesticidespridning under ”spridningsfönstrets” första 10 dagar (22/9 – 1/10. Detta ”kombinations-kriterium” för lämplig spridningstidpunkt tillät spridning vid 68% av alla spridningstidpunkter under hösten – och resulterade i en 30% reduktion av medianvärdena på både totalförlust och maximal dygns-förlust till dräneringsrör samt max-koncentrationer i dräneringsvattnet. Värdena på 95:e och 99:e percentilen av totalförlust samt maximal-förlust halverades och maxvärdena på alla mål-variabler reducerades med en faktor 3 eller mer (Tabell 3). ”Kombinations-kriteriet” jämfördes med ett enklare kriterium där applikationstiden endast begränsades av datum varje höst: Spridning av pesticid tilläts fram till 8 oktober varje år. Det senare kriteriet gav liknande reduktion av de olika målvariablerna men medgav endast spridning vid 34% av alla spridningstidpunkter på hösten – vilket skulle ge jordbrukaren mindre flexibilitet vad gäller val av spridningstillfällen. Ett enkelt modell-redskap som kombinerar aktuellt markvatten-deficit med tillåten tidig spridning skulle alltså ge jordbrukaren större valmöjlighet att välja spridningstidpunkt för att uppnå effektiv reduktion av utlakningsrisken.

Tabell 3. Effekter av olika kriterier för spridningstidpunkt under hösten på total-förlust (D_{tot}), max-förlust (D_{max}), samt max-koncentration (C_{max}) av en typisk herbicid i dräneringsvattnet:

All = spridning alla dagar inom ramen för spridningsfönstret; *Crit_1* = spridning endast då markvattendeficit $SWD_{tot} > 136$ mm eller vid datum fram t o m 1st October;

Crit_2 = spridning alla dagar fram t o m 8th October

Measure	D_{tot} (mg m ⁻²)			D_{max} (mg m ⁻²)			C_{max} (mg m ⁻³)		
	All	Crit_1	Crit_2	All	Crit_1	Crit_2	All	Crit_1	Crit_2
Median	0.82	0.58	0.60	0.0033	0.0022	0.0023	27.1	19.3	17.5
95 th percentile	7.30	2.94	5.26	0.0144	0.0089	0.0117	120.6	119.0	63.6
99 th percentile	9.12	5.42	7.20	0.0240	0.0125	0.0190	219.5	196.6	112.5
Maximum	21.48	6.32	7.95	0.2067	0.0154	0.0211	937.1	220.6	127.5
N	1000	681	340	1000	681	340	1000	681	340

Tabell 4. Effekter av olika kriterier för spridningstidpunkt under våren – på total-förlust (D_{tot}), max-förlust (D_{max}), samt max-koncentration (C_{max}) av en typisk herbicid i dräneringsvattnet. Spridningskriterier baserat på total nederbörd 5 dagar närmast efter spridningstillfället ($P_{0.5}$): $P_{0.5} < 5$ mm, 10 mm, 20 mm or 30 mm.

	All	$P_{0.5} <$			
		30 mm	20 mm	10 mm	5 mm
D_{tot} (mg m ⁻²)					
Median	0.028	0.028	0.027	0.028	0.029
95 th percentile	0.234	0.232	0.212	0.206	0.206
99 th percentile	0.393	0.384	0.319	0.277	0.276
Maximum	14.18	14.18	0.417	0.344	0.324
D_{max} (mg m ⁻²)					
Median	0.000082	0.000080	0.000078	0.000082	0.000085
95 th percentile	0.00107	0.00107	0.00048	0.00029	0.00027
99 th percentile	0.00261	0.00244	0.0019	0.0015	0.0013
Maximum	0.158	0.157	0.0029	0.0023	0.0021
C_{max} (mg m ⁻³)					
Median	0.62	0.61	0.59	0.59	0.57
95 th percentile	22.1	21.7	17.6	2.5	2.5
99 th percentile	53.7	51.2	41.0	31.1	31.4
Maximum	796.5	796.5	55.9	45.4	45.4
<i>N</i>	1000	983	945	791	601

För vårspridning: Kriterier för att minska pesticidförlusten efter vårspridning bör fokusera på att minska max-concentrationer och max-förluster av pesticider till omgivningen. Detta kan ske genom att undvika spridning i nära anslutning till större nederbördshändelser. Som exempel testade vi kriteriet att spridning av pesticider endast bör ske när 5-dygns väderprognosen visar på < 10 mm sammanlagd nederbörd. ($P_{0.5} < 10$ mm). Detta reducerade max-förlusten (D_{max}) och max-koncentrationen (C_{max}) med en faktor 10, samt minskade 95:e och 99:e percentilerna av motsvarande målvariabler med en faktor 2-3. Kriteriet medgav spridning vid 79% av alla vårspridningstidpunkter (Se tabell 4).

Resultatens betydelse för bedömning av pesticidutlakning i ett förändrat klimat

Den pågående klimatförändringen kommer sannolikt att leda till ökad areal av höstgrödor i Sverige. Detta i sin tur kan medföra att höstspridning av herbicider kan öka i omfattning. Såtidpunkter och appliceringstidpunkter under hösten kan också komma att förändras till följd av klimatförändringen. Nederbörden under tidig höst förväntas minska, medan nederbörden under vinterhalvåret förväntas öka i södra Sverige, enligt aktuella klimatscenarier från Rossby Center, SMHI. För att uppnå bästa möjliga etablering kan detta medföra en förskjutning mot senare sådd och därmed också senare applicering av herbicider i höstgrödor. En sådan systematisk förskjutning i spridningstidpunkt i kombination med ökad totalnederbörd under vintern kommer, i enlighet med de resultat som här presenterats, medföra risk för generellt sett högre utlakning av pesticider från jordbruksmark, liksom högre koncentrationer i dräneringsvattnet (Fig. 3a och b).

Projektets fortsättning

Resultaten från de statistiska analyserna är lovande och pekar på att det kan vara möjligt att utveckla enkla prediktionsverktyg för utlakningsrisken kopplat till rådande markfuktighetsbetingelser vid applicering – särskilt med avseende på höst-applicering av herbicider. Denna typ av prediktionsverktyg kan även bli användbara för att bedöma utlakningsrisken i ett förändrat klimat.

Resultat från den aktuella studien har även utgjort ett viktigt underlag för en ny forskningsansökan med fokus på riskbedömning av pesticidförluster från svensk jordbruksmark i en förändrad klimatsituation. Den senare ansökan är beviljad och projektet pågår, samt har även möjliggjort att knyta en doktorand till forskningsområdet – vilket särskilt fokuserar frågor kring interaktioner mellan klimatfaktorer och utlakning av pesticider från jordbruksmark.

Informationsspridning

Projektet har presenterats inom ramen för CKB:s kontaktseminarier (Kompetens-Centrum för Kemiska Bekämpningsmedel, SLU) och finns listat under CKB:s hemsida:

<http://www.slu.se/sv/centrumbildningar-och-projekt/kompetenscentrum-for-kemiska-bekampningsmedel/publikationer/>

Projektet och därtill kopplad publicering finns även listat inom området ”Effekter av klimat på hydrologi och vattenkvalitet” på den externa hemsidan för Institutionen Mark & Miljö, Avdelningen Biogeofysik & Vattenvård, SLU:

<http://www.slu.se/sv/fakulteter/nl-fakulteten/om-fakulteten/institutioner/institutionen-mark-och-miljo/forskning/biogeofysik-och-vattenvard/effekter-av-klimatforandring/>

Resultaten har publicerats i en referee-granskad vetenskaplig tidskrift:

Lewan, E., Kreuger, J. and Jarvis, N. **2009.** Implications of precipitation patterns and antecedent soil water content for leaching of pesticides from arable land. *Agricultural Water Management*, Vol. 96: 1633-1640. doi:10.1016/j.agwat.2009.06.006

REFERENSER

Larsbo, M., Roulier, S., Stenemo, F., Kasteel, R. & Jarvis, N.J. 2005. An improved dual-permeability model of water flow and solute transport in the vadose zone. *Vadose Zone Journal*, 4, 398-406.

Olsson, J. 1998. Evaluation of a scaling cascade model for temporal rain-fall disaggregation. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol 2 (1), 19 – 30.