

Udvaskning af glyphosat vurderet ud fra tre markforsøg

Leaching of glyphosate from three agricultural sites

Jeanne Kjær, Marlene Ullum & Bo Lindhardt
Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse
Geokemisk Afdeling
Thoravej 8
DK-2400 København NV

Preben Olsen
Danmarks JordbrugsForskning
Afdeling for Jordbrugssystemer
Forskningscenter Foulum
DK-8830 Tjele

Jørgen Ole Jørgensen
Danmarks Miljøundersøgelser
Vejlsøvej
DK-8600 Silkeborg

Summary

The leaching of glyphosate was evaluated under field conditions at three agricultural sites covering one sandy and two loamy soils. All applications were carried out in accordance with current regulation. Application of pesticides was moreover supported by a tracer application of bromide. Bromide and pesticides were subsequently measured in both drainage water, ground water and soil water sampled from the unsaturated zone. At one of the loamy sites, glyphosate and its metabolite AMPA leached from the root zone in an average concentration considerably exceeding 0.1 µg/l. The average concentration of glyphosate and AMPA in the drainage water during the leaching period of 2000/2001 was 0.54 µg/l and 0.17 respectively. The leaching appeared to be governed by a combination of pronounced macropore flow occurring shortly after application and a limiting sorption and degradation capacity allowing both compounds to be leached continuously throughout the six months' leaching period. At the two other sites, the leaching of both glyphosate and AMPA was found to be negligible.

Introduktion

I 1998 blev der iværksat et monitoringsprogram til overvågning af en eventuel udvaskning af pesticider fra dansk landbrug. Programmet har til formål at undersøge, hvorvidt godkendte pesticider - ved regelret brug - udvaskes til grundvandet. Monitoringsprogrammet omfatter i alt 6 marker og gennemføres som et samarbejde mellem Danmark og Grønlands Geologiske

Undersøgelse (GEUS), Danmarks JordbrugsForskning (DJF) og Danmarks Miljøundersøgelser (DMU). I det følgende præsenteres resultaterne vedrørende brugen af glyphosat på tre af forsøgsmarkerne. Monitoringen foregår fortsat på områderne, hvorfor der kun er tale om en foreløbig afrapportering.

Lokalitetsbeskrivelser

De tre lokaliteter omfatter dels en grovsandet mark ved Jyndeved dels to lerede marker ved henholdsvis Estrup og Fårdrup (tabel 1 og figur 1). Grundvandsspejlet ved Jyndeved ligger ca. 1-2 m.u.t. De lerede lokaliteter er begge systematisk dræned i ca. 1 m dybde, og grundvandsstanden falder om sommeren til ca. 3 m.u.t. Marken ved Jyndeved består af smeltevandssand med få lokale indslag af tynde ler- og siltlinser, pløjelaget er beskrevet som en JB1 jord. Marken ved Fårdrup består af moræneler dannet under sidste istid. Der er lokale kanaler/bassiner af smeltevandsler og smeltevandssand, og pløjelaget er beskrevet som en JB5/6. Marken ved Estrup er beliggende på en bakkeø fra den næstsidste istid, jordbundsudviklingen har således foregået over væsentligt længere tid end på de to andre marker. Arealet er langt mere heterogent end marken ved Fårdrup. Hovedparten af arealet er moræneler, men der forekommer betydelige indslag af smeltevandssand, pløjelaget er beskrevet som JB5/6. Den komplekse jordbund og geologi på Estrup vurderes imidlertid ikke at være anderledes end andre marker på danske bakkeøer samt for visse dele af Østjylland.

Tabel 1. Beskrivelse af de tre forsøgsmarker. Characteristics of the three tests sites.

	Jyndeved Tinglev	Estrup Vejen	Fårdrup Slagelse
Areal (ha)	2,4	1,3	2,3
Dræn	Nej	Ja	Ja
Dybde til grundvand (m.u.t.)	1-2	1-3	1-3
Jordart	Grovsand	Moræneler	Moræneler
DGU-symbol	TS	ML	ML
JB-klassifikation	JB1	JB5/6	JB5/6
Ler i A-horisont (%)	5	10-20	14-15
TOC i A-horisont (%)	2,0	1,7-7,3	1,4
Normal nedbør, (mm/år) ^{*)}	858	862	558

^{*)} *Baseret på 30-årige tidsserier fra 1961-1990*; Based on time series from 1961-1990.

Dyrkning

Dyrkningen på de tre lokaliteter blev gennemført som på andre konventionelle brug i regionen, og pesticider blev anvendt i henhold til Vejledning i Planteværn (Jensen, J.E. *et al.*, 2001). Ved Jyndeved og Estrup blev der sprøjet med glyphosat en gang og ved Fårdrup to gange. Ved Estrup blev anvendt 4 l/ha af produktet Roundup Bio svarende til 1,44 kg glyphosat/ha. Ved Jyndeved og Fårdrup anvendtes Roundup 2000 med en dosering på 2,0 l/ha svarende til 0,8 kg glyphosat pr. ha (tabel 2).



Figure 1. Placering af de tre forsøgsmarker Jyndeved, Estrup og Fårdrup. Location of the three test sites Jyndeved, Estrup and Fårdrup.

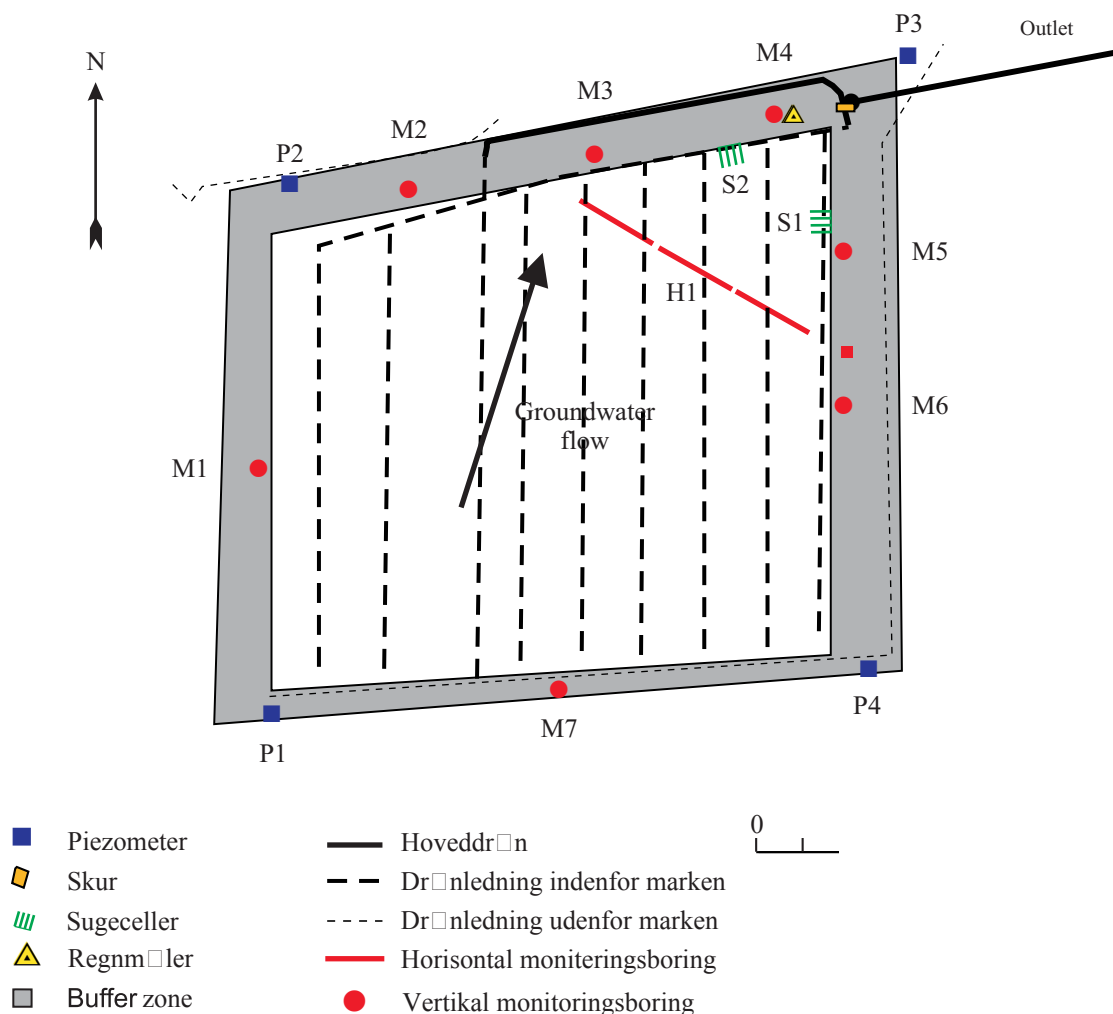
Tabel 2. Den landbrugsmæssige drift af de tre marker. Management practice at the three test sites.

	Dato Date	Dyrkning Management practice
Jyndeved 1999/2000	09.08.1999	Høst af vårbyg
	22.09.1999	Herbicidesprøjtning – 2,0 l/ha Roundup 2000 (0.8 kg/ha glyphosat)
	05.10.1999	Rotor harvning – 5 cm dybde
	11.10.1999	Pløjning 20 cm dybde og betontromlet
	13.10.1999	Såning af vinterrug – sort Dominator,
	12.11.1999	Tracer udbragt – 30.0 kg/ha kaliumbromid
	05.05.2000	Vanding – 29 mm/ha
Fårdrup 1999/2000	11.08.1999	Herbicidesprøjtning – 2,0 l Roundup 2000 (0,8 kg/ha glyphosat /ha)
	10.09.1999	Stubharvet – 10 cm dybde
	19.09.1999	Pløjning – 20 cm dybde
	20.09.1999	Såning af vinterhvede – sort Stakado
	05.10.1999	Tracer udbragt – 30.0 kg/ha kaliumbromid
Fårdrup 2000/2001	28.08.2000	Høst af vinterhvede
	14.10.2000	Herbicidesprøjtning – 2 l/ha Roundup 2000 (0,8 kg glyphosat/ha)
	16.10.2000	Pløjning - dybde 20 cm
	02.05.2001	Såning af sukkerroer – sort Havanna
Estrup 2000/2001	15.05.2000	Tracer udbragt – 30.0 kg/ha kaliumbromid
	28.08.2000	Høst af vårbyg
	13.10.2000	Herbicidesprøjtning – 4 l/ha Roundup Bio (1,44 kg glyphosat/ha)
	23.10.2000	Pløjning - dybde 20 cm
	02.05.2001	Såning af ærter– sort Julia

Monitering

Koncentrationerne af bromid og pesticid blev målt i dræn- og grundvand samt i jordvand.

Jordvandsprøver blev udtaget en gang om måneden henholdsvis 1 og 2 m.u.t. i de to profiler S1 og S2. Prøvetagningen skete via 16 sugeceller som, i grupper af 4, var placeret henholdsvis 1 og 2 m.u.t. ved S1 og S2 (se figur 2). Hver af sugecellerne var via en slange af PTFE forbundet med en prøveflaske placeret i et køleskab i et skur. Jordvand blev suget ud af jorden ved at pålægge et konstant vakuum på ca. 0,8 bar over en uge. Vandanalyserne blev udført på prøver puljet fra de 4 sugeceller i hver gruppe.



Figur 2. Oversigt over forsøgsmarken Estrup. Det inderste hvide areal er den dyrkede mark, mens det omkringliggende grå område er den omkringliggende bufferzone. Positionerne af diverse installationer er ligeledes vist på figuren. Overview of the Estrup test site. The innermost white area indicates the cultivated area while the grey area indicates the surrounding buffer zone. The positions of the various installations are indicated.

Grundvandsprøver blev udtaget en gang om måneden fra syv vertikale monitoringsboringer placeret i bufferzonen, der omgiver marken. Hver monitoringsboring består af 4 stk. 1 m

lange filtre, der tilsammen dækker de ca. 4 øverste meter af den mættede zone. Foruden de 7 vertikale boringer blev der på de lerede lokaliteter placeret horisontale boringer ca. 3,5 m.u.t., (2 stk. på Fårdrup og 1 stk. på Estrup). Hver af de horisontale boringer består af 3-5 filtersektioner af 18 m længde. Hver sektion giver således integrerede vandprøver til karakterisering af grundvandskvaliteten umiddelbart under marken, figur 2

Drænvandsprøver blev udtaget på de lerede lokaliteter ved hjælp af såvel tids- som flowproportionale prøvetagere:

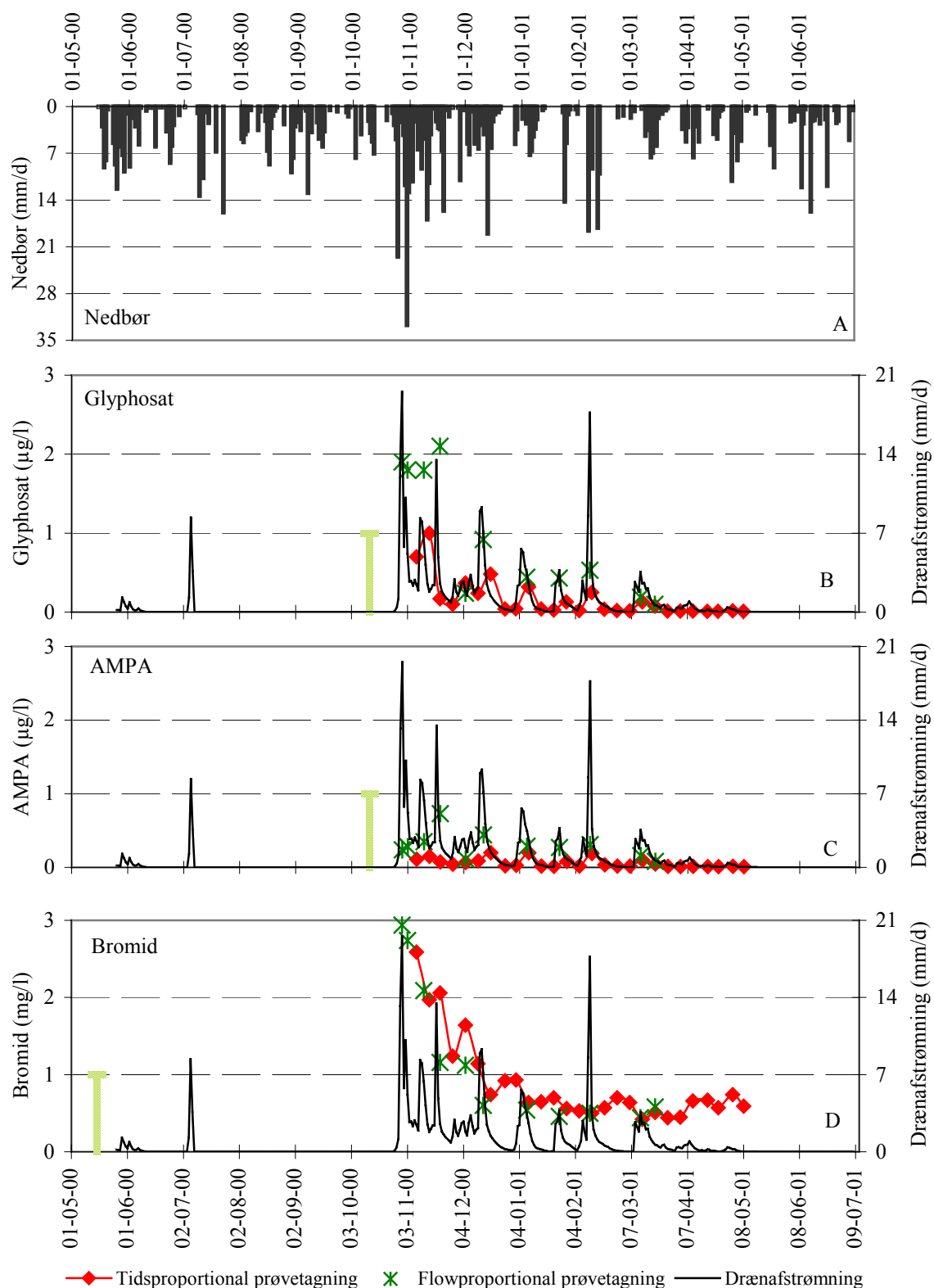
- Igennem hele afstrømningsperioden udtages drænvandsprøverne proportionalt med tiden og uafhængigt af flowet – *tidsproportional prøvetagning*. Prøvetageren er udstyret med 7 kølede flasker, og prøvetagningen udføres over en periode på 7 dage, hvor der for hver time udtages en delprøve på 70 ml. Den ugentlige drænvandsanalyse udføres på en fællesprøve, der dannes ved at udtage 250 ml fra hver af de 7 dages prøver.
- Ved kraftige afstrømningshændelser udtages drænvandsprøverne også proportionalt med flowet - *flowproportionale prøvetagning*. Den flowproportionale prøvetager bliver kun aktiveret ved kraftige afstrømningshændelser og prøvetagningen forløber over en periode på 1-2 dage alt afhængig af afstrømningsintensitet. Hvor tit der skal udtages en delprøve beror på afstrømningsintensitet, dog kan der maksimalt udtages 72 delprøver (af 200 ml), som er fordelt på 7 flasker. For hver afstrømningshændelse samles alt vand fra de 7 flasker i en stor prøve, som analyseres for indhold af pesticider og uorganiske ioner inklusiv bromid. Koncentrationen af stoffer i drænvandet forventes at ændre sig proportionalt med flowet. I perioder med kraftige afstrømningshændelser beregnes udvaskningen derfor på baggrund af koncentrationerne i de flowproportionale prøver, idet disse grundet prøvetagningsmåden er vægtet i forhold til afstrømningen.

Udvaskning af glyphosat ved Estrup

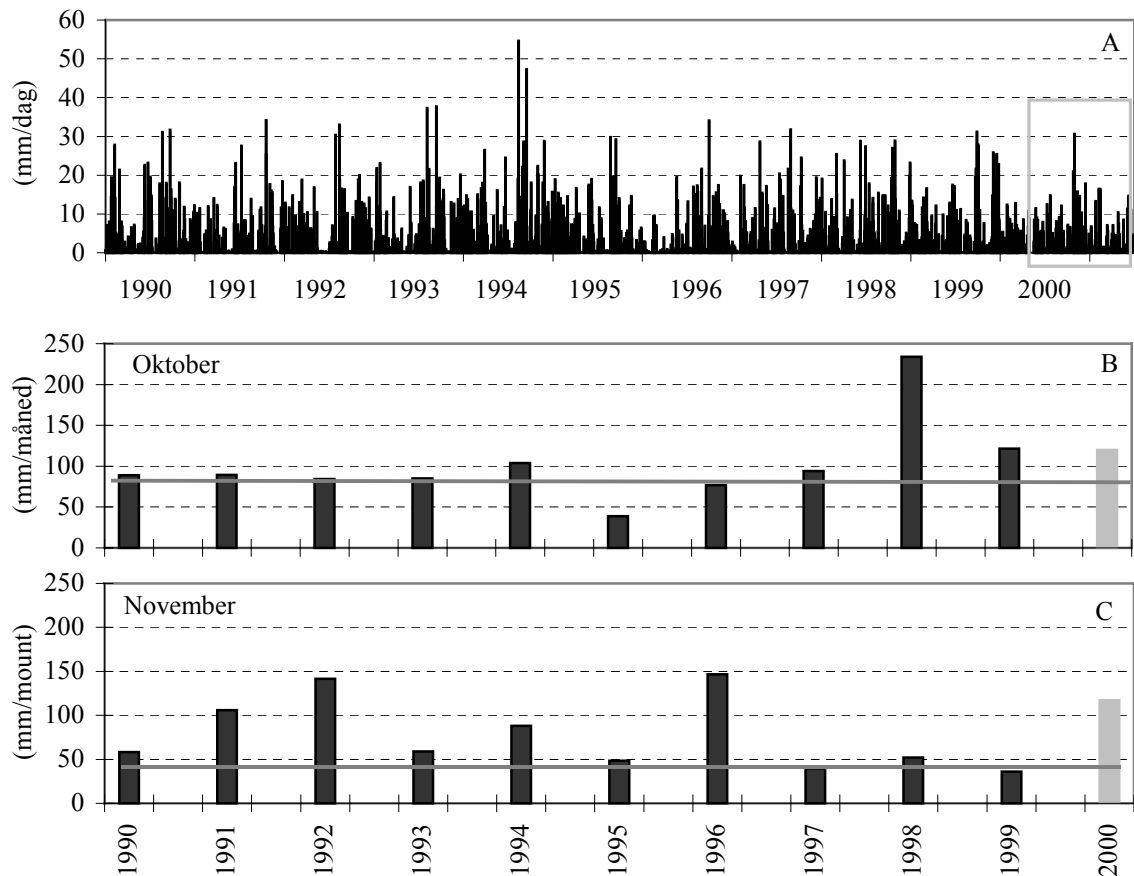
Ved Estrup blev glyphosat og metabolitten AMPA udvasket fra rodzonen i gennemsnitskoncentrationer, der langt overskred 0,1 µg/l. Udvaskningen af glyphosat var langt den største, idet gennemsnitskoncentrationen for udvaskningsperioden 2000/2001 var 0,54 µg/l, medens den gennemsnitlige koncentration af AMPA var 0,17 µg/l.

I midten af oktober 2000 blev der udsprøjtet 1,44 kg/ha glyphosat, hvilket er det maksimalt tilladte ved anvendelse af Roundup Bio. I de 10 mellemliggende dage fra sprøjtningen og frem til pløjning den 23. oktober faldt der ingen regn. Ved den første nedbørshændelse efter pløjningen kom der for alvor gang i drænvandsafstrømningen. De kraftige nedbørshændelser i oktober/november 2000 gav således anledning til en hurtig og markant udvaskning af glyphosat og AMPA, som nåede maksimale koncentrationer i drænvandet på henholdsvis 2,1 og 0,73 µg/l.

I efteråret/vinteren var AMPA- og glyphosatkoncentrationerne målt ved de kraftige nedbørshændelser (flowproportionale prøver) markant højere end i den kontinuerlige drænvandsafstrømning (tidsproportional prøver). Udvaskningen af glyphosat med de i alt 11 kraftige nedbørshændelser (flowproportionale prøver) udgjorde således 97% af den totale mængde glyphosat, der var udvasket til drænene (figur 3B).



Figur 3. Nedbør (A) samt koncentrationen af glyphosat (B), AMPA (C) og bromid (D) i drænvandet ved Estrup. Precipitation (A) together with concentration of glyphosate (B), AMPA (C) and bromide (D) in the drainage runoff at Estrup.



Figur 4. Sammenligning mellem nedbørsfordelingen i den aktuelle monitoringsperiode (markeret med gråt) og nedbøren igennem de sidste 10 år (markeret med sort). Den daglige nedbør er sammenlignet i graf A (den grå boks markerer monitoringsperiode), hvorimod den månedlige nedbør for Oktober og November er sammenlignet i henholdsvis graf B og C. Data fra monitoringsperioden er markeret med gråt og den vandrette grå linie indikerer månedsnormalen. Data fra selve monitoringsperioden er målt på marken ved Estrup, mens data for de foregående 10 år stammer fra Askov meteorologiske station 3 km fra forsøgsmarken. Comparison between the precipitation patterns of the current monitoring period (marked in grey) and that of the preceding 10 years (marked in black). The daily precipitation is compared in graph A, whereas the monthly precipitation of October and November is compared in graphs B and C respectively. Data from the monitoring period is marked in grey, and the horizontal grey line indicates the monthly normal. Data from the actual monitoring period derives from the Estrup test site, whereas data from the preceding ten years derives from the DIAS Askov meteorological station situated less than 3 km from the test site.

Den meget hurtige transport af glyphosat og AMPA til drøndybde, samt det at hovedparten af glyphosat og AMPA udvaskes i forbindelse med de kraftige afstrømningshændelser, tyder på, at makroporetransport har en stor betydning for udvaskningen af disse stoffer. Det er dog vigtigt at bemærke, at der forekom en udvaskning over hele udvaskningsperioden, der strakte sig frem til maj 2001.

Udvaskningen af bromid forløb noget anderledes, idet koncentrationerne målt ved de kraftige nedbørshændelser (flowproportionale prøver) ikke var højere end i den kontinuerlige drænvandsafstrømning (tidsproportionale prøver) og kun udgjorde 58% af den samlede mængde bromid udvasket med drænvand (figur 3D). Denne forskel kan skyldes, at bromid blev udsprøjtet i maj, ca. 6 måneder før der forekom en egentlig netto infiltration. En stor del af den udbragte bromid vil således kunne være diffunderet ind i jordmatrisen, hvor den - alt andet lige - vil være langt mindre påvirket af makroporetransport.

De klimatiske forhold i den omtalte monitoringsperiode synes ikke at være unormale for området. Oktober og november måned var begge meget våde med flere kraftige regnhændelser på op til 30 mm/dag og med en månedlig nedbør, der oversteg normalen med 20%. Disse nedbørsfordelinger adskiller sig imidlertid ikke specielt fra, hvad der - igennem de sidste 10 år - er observeret i området (figur 4).

Glyphosat og AMPA er indtil nu ikke registreret i hverken sugeceller, horisontale- eller vertikale monitoringsfiltre. Grundvandsdannelse på Estrup er beregnet til 81 mm i det hydrologiske år 2000/2001. Dette svarer til ca. 19% af den infiltrerende vandmængde, den resterende del transporteres bort med drænen (tabel 3). Transporten under drændybde forventes at foregå væsentligt langsommere end over drændybde (Lindhardt *et al.*, 2001). Der er dog begyndende tegn på gennembrud af bromid i de horisontale filtre (3,5 m.u.t.), hvilket underbygger, at der foregår en grundvandsdannelse på arealet. Der er ikke observeret bromid i de vertikale filtre, hvorfor der ikke forventes at være nogen lateral vandtransport af betydning på arealet. At der endnu ikke er observeret glyphosat eller AMPA i de horisontale filtre kan skyldes, at sorptionen af disse stoffer, har en større betydning i de dybere jordlag end i selve rodzonen.

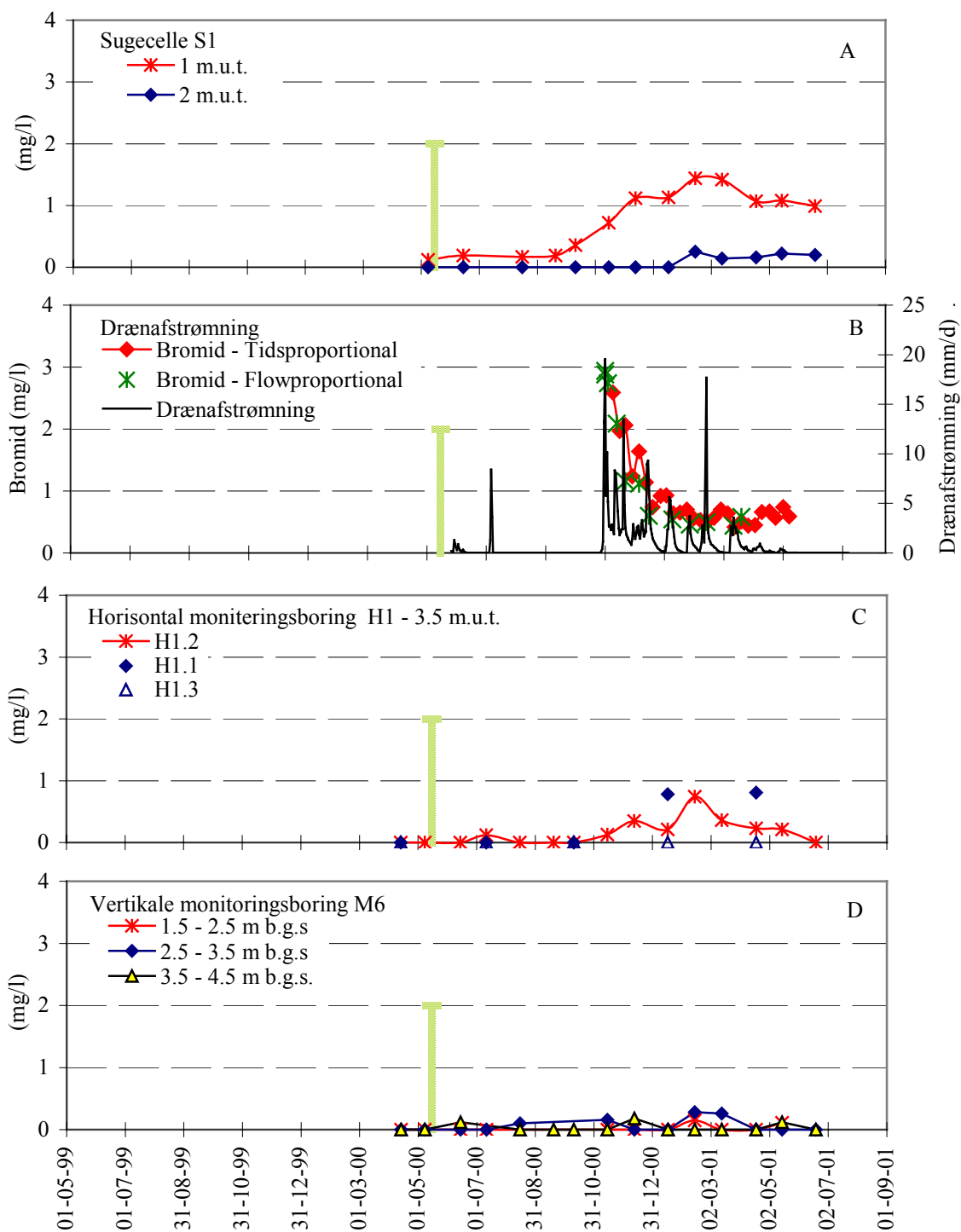
Tabel 3. Årlig vandbalance (mm/år) for de tre områder. Annual water balance (mm/y) at the three test sites.

	Normal nedbør ^{*1)} Yearly normal	Nedbør Precipitation	Vanding Irrigation	Ea ^{*2)}	Drænvandsafstrømning Drainage runoff	Grundvandsdannelse ^{*3)} Groundwater recharge
Jydevad						
1999/2000	858	966	31	565	-	432
2000/2001	858	723	29	463	-	289
Fårdrup						
1999/2000	557	802	-	442	182	178
2000/2001	557	643	-	395	47	201
Estrup						
1999/2000	867	1079	-	437	Ikke målt	
2000/2001	867	819	-	382	356	81

*1) **Normalnedbøren (normal), baseret på tidsserier fra 1961-1990, refererer til den nærmeste meteorologiske station;** Normal values are based on time series from 1961-1990 from the nearest meteorological station.

*2) **Aktuel fordampning (Ea) er beregnet ved hjælp af modellen MACRO 4.2. (Ullum *et al.*, upubliceret);** Actual evapotranspiration (Ea) is estimated by means of the model MACRO 4.2 (Ullum *et al.*, unpublished)

*3) **Grundvandsdannelse = Nedbør + vanding-aktuel fordampning-drænvandsafstrømning;** Groundwater recharge = Precipitation+irrigation-evapotranspiration-drainage runoff



Figur 5. Koncentrationer af bromid målt på Estrup i henholdsvis sugecelle S1 (A) drænvand (B), horisontal boring H1 (C) og vertikale boring M6 (D). Den lodrette grå linie indikerer tidspunktet for bromidudbringningen. Bromide concentration at Estrup measured in the suction cups S1 (A), drainage runoff (B), horizontal monitoring well H1 (C) and monitoring well M6 (D). The grey vertical line indicates the date of bromide application.

At der ikke er registreret nogen udvaskning af glyphosat eller AMPA til sugecellerne kan skyldes selve prøvetagningsmetoden. Sugecellerne repræsenterer kun en lille del af arealet og

fanger primært det vand, der infiltrerer gennem jordmatrisen. Drænsystemet integrerer derimod over hele marken, og drænvandsprøverne repræsenterer det vand, der infiltrerer både gennem jordmatrisen og præferentielt gennem makroporer. Den store del af glyphosatudvaskningen, der skyldes præferentiel transport, vil derfor - alt andet lige - snarere blive opsamlet i drænvandsprøverne end i prøverne udtaget med sugecellerne.

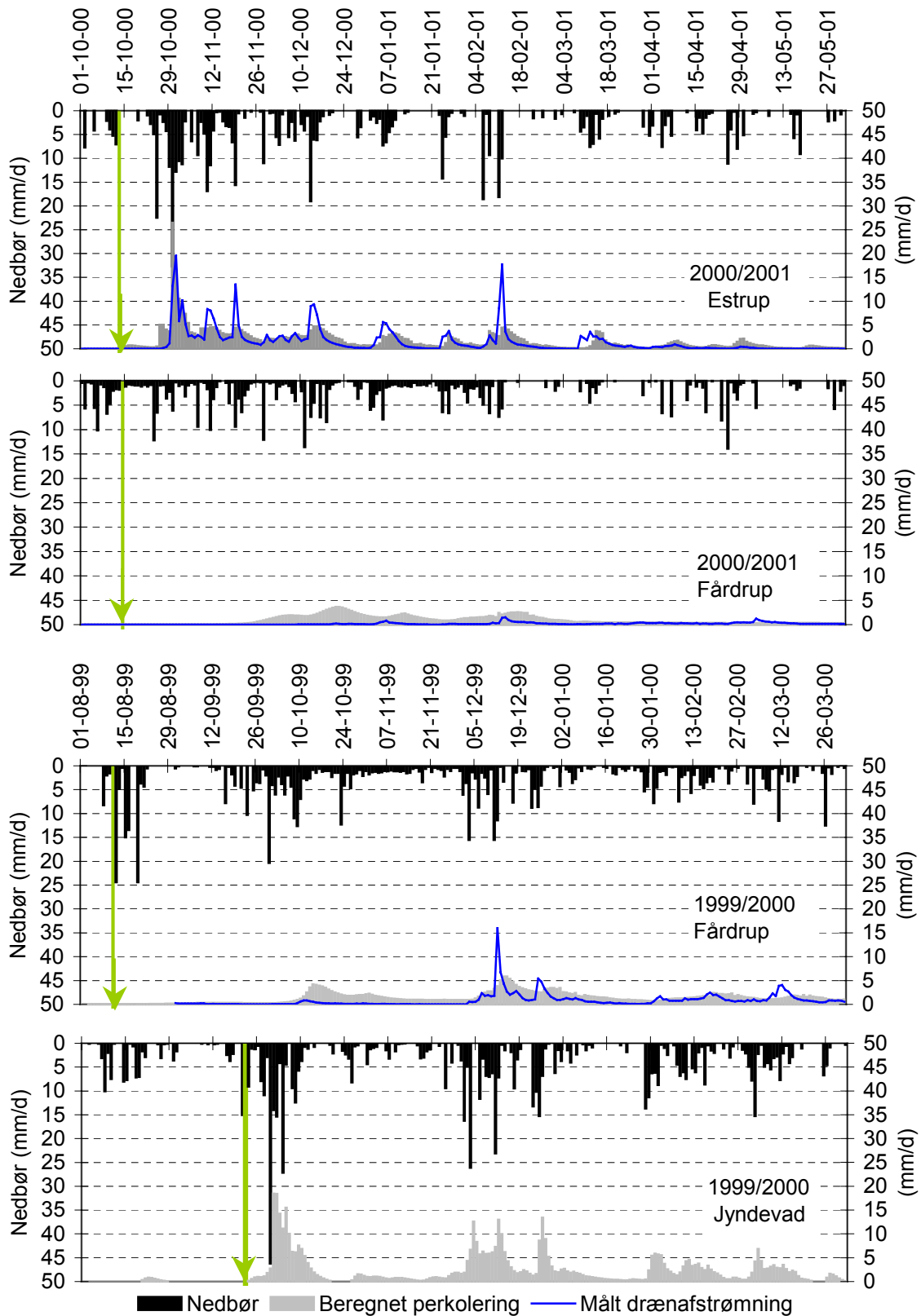
Sammenfattende syntes udvaskningen styret af en kombination af kraftig makroporestrømning kort tid efter udbringning samt en langsom, kontinuer udvaskning over længere tid. Dette peger på en relativ begrænset adsorptions- og nedbrydningskapacitet i rodzonen på Estrup set i forhold til, hvad der skulle forventes ud fra litteraturen.

Udvaskning af glyphosat ved Jyndeved og Fårdrup

Udvaskningen af såvel glyphosat som AMPA var ubetydelig ved Jyndeved og Fårdrup. Ved Jyndeved var nedbørsfordelingen i perioden efter glyphosatudbringningen ikke meget anderledes end efter udbringningen ved Estrup, figur 6. Ved Jyndeved blev der udbragt 0,8 kg/ha glyphosat i stub den 22. september. Den 5. oktober blev arealet rotorharvet, og efterfølgende blev det pløjet den 11. oktober (tabel 2). Indtil nu (efterår 2001) er der kun i tre enkelte prøver fundet AMPA og det i koncentrationer på 0,01 – 0,02 µg/l. Ingen af vandprøverne indeholdt glyphosat.

Blot 8 dage efter sprøjtningen faldt der en stor mængde nedbør, 46 mm. Oktobers nedbør var i alt 160 mm, hvilket er 67% mere end det normale. Perkoleringen, beregnet med modellen MACRO 4.2. (Ullum *et al.*, upubliceret), begyndte i starten af oktober, blot 8 dage efter glyphosatsprøjtningen, og i alt perkoleredes der 432 mm i udvaskningsperioden 1999/2000 (figur 6 og tabel 3). På Jyndeved syntes det således ikke at være tidsrummet imellem sprøjtning, nedbør og infiltrationens start, der var afgørende men snarere jordbundsforholdene. Der er tale om en grovsandet jord, hvorfor infiltreringen primært sker som matrixflow. Makroporetransport forventes ikke at forekomme på Jyndeved. Når vandet infiltrerer som matrixflow, opnås en længere opholdstid i rodzonen, langt bedre kontakt med den omkringliggende jordmatrise, og som følge heraf bliver der bedre vilkår for sorption og nedbrydningsprocesser. Hertil kommer, at stofferne på vej mod grundvandet skal passere et lag af al (Bhs horisonten). Denne al har et meget stort indhold af jern- og aluminiumoxider (Lindhardt *et al.*, 2001), og dermed en potentiel stor bindingskapacitet overfor glyphosat og AMPA, hvorved det så at sige kan virke som et filter.

På Fårdrup blev der sprøjtet med glyphosat både i august 1999 og oktober 2000 (tabel 2). I begge tilfælde var nedbørsmængderne efter sprøjtning moderate, og perkoleringen startede mere end 1,5 måned efter sprøjtning (figur 6). Når man sammenholder risikoen for udvaskning ved Fårdrup og Estrup, skal man holde nedbørsforskellene for øje. Ved Fårdrup var både nedbørsmængder og intensiteter væsentlig mindre, hvilket resulterede i mindre og mere jævn drænaflow uden markante udsving (figur 6 og tabel 3). Dette tyder på, at infiltreringen ved Fårdrup primært er sket via jordmatrisen (matrixflow), og at der - modsat Estrup - ikke er sket markant infiltrering via makroporer.



Figur 6. Nedbør, drænvandsafstrømning og beregnet perkolering (sekundær akse) på Estrup, Fårdrup og Jynde vad. Perkoleringen er beregnet med MACRO 4.2. (Ullum *et al.*, upubliceret), og den grå pil viser tidspunktet for glyphosatsprøjtningen. Precipitation, drainage runoff and estimated percolation following the application of glyphosate at the test field. Percolation was estimated by means of Macro 4.2 (Ullum *et al.*, unpublished), and the grey arrow indicates the date of glyphosate application.

Sammendrag

Risikoen for udvaskning af glyphosat fra dyrket jord blev undersøgt under markforhold på en sandjord og to lerjorde. På to af disse var udvaskningen ubetydelig. Mulige forklaringer kan være stor adsorptionskapacitet og lang opholdstid i rodzonen med deraf følgende mulighed for nedbrydning. Resultater fra det tredje sted tyder på, at glyphosat ved regelret brug kan udvaskes fra rodzonen i koncentrationer, der overskrider 0,1 µg/l. Tabet var størst af glyphosat, som i drænvand nåede en maksimal koncentration på 2,1 µg/l og et gennemsnit på 0,54 µg/l for udvaskningsperioden 2000/2001. Nedbrydningsproduktet AMPA blev ligeledes udvasket fra rodzonen. Den maksimale koncentration var 0,73 µg/l og den gennemsnitlige 0,17 µg/l. Udvasningen syntes styret af en kombination af markant makroporeflow og begrænset adsorptions- og nedbrydningskapacitet, som gjorde det muligt for stofferne at udvaskes løbende gennem den 6 måneders lange udvaskningsperiode.

Litteratur

Jensen JE, Jensen PK, Nielsen GC, Jørgensen LN, Nielsen ST & Paaske K. 2001. Vejledning i Planteværn 2001, Landbrugsforlaget, Århus 2001.

Lindhardt B, Abildtrup C, Vosgerau H, Olsen P, Torp S, Iversen BV, Jørgensen JO, Plauborg F, Rasmussen P & Gravesen P. 2001. The Danish Pesticide Leaching Assessment Programme: Site Characterisation and Monitoring Design, Geological Survey of Denmark and Greenland, September 2001.