

Omfang og effekt af herbicidafdrift til læhegn

Marianne Bruus, Helle Vibeke Andersen, Per Løfstrøm,
Christian Kjær, Marianne Glasius, Bjarne Jensen,
Morten Strandberg, Jesper Bak, Kaj Mantzius Hansen
& Rossana Bossi

Danmarks Miljøundersøgelser
Århus Universitet

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	7
SUMMARY	9
1 BAGGRUND	11
2 VINDAFDRIFT AF METSULFURON FRA SPRØJTESPOR TIL TJØRNEHEGN	13
2.1 INTRODUKTION	13
2.2 METODER	13
2.2.1 <i>Meteorologiske målinger</i>	13
2.2.2 <i>Sprøjtning</i>	13
2.2.3 <i>Afsætning af sprøjtemiddel</i>	14
2.3 RESULTATER	18
2.3.1 <i>Meteorologiske data</i>	18
2.3.2 <i>Afsætning af sprøjtemiddel</i>	19
3 MODEL FOR AFDRIFT	25
3.1 INTRODUKTION	25
3.2 DRÅBEMODEL	25
3.3 MODEL FOR SPREDNING OG DEPOSITION	27
3.3.1 <i>Valg af spredningsmodel</i>	27
3.3.2 <i>OML-DEP beskrivelse</i>	28
3.3.3 <i>Deposition</i>	29
3.3.4 <i>Yderligere tilpasninger</i>	30
3.4 KOBLING AF DRÅBE- OG SPREDNINGSMODEL	31
3.4.1 <i>Sammenhæng mellem sprøjtning i spor og stationære modelkoncentrationer</i>	33
3.5 KALIBRERING OG PARAMETERVÆRDIER	33
3.6 SAMMENLIGNING MED MÅLINGER	35
3.7 BEREKNINGSEKSEMPLER PÅ AFDRIFT TIL HEGN	38
3.7.1 <i>Valg af parametre for dyser og meteorologi til modelberegninger</i>	38
3.7.2 <i>Modelresultater for forskellige dysetyper, sprøjtetidspunkter, doseringer og bredder af sprøjtefrie bufferzoner</i>	40
4 UDBREDELSE AF HEGN DER SÆTTER BÆR	47
4.1 INTRODUKTION	47
4.2 METODER	47
4.3 RESULTATER	49
5 KONSEKVENSER AF AFDRIFT AF UKRUDTSMIDLER I HEGN	51
5.1 METODER	51
5.1.1 <i>Effekter af metsulfuron på tjørn – validering af eksisterende data</i>	51
5.1.2 <i>Seljerøns følsomhed over for metsulfuron</i>	51
5.1.3 <i>Hylds følsomhed over for metsulfuron</i>	52

5.1.4	Højdemæssig variation i bærproduktionen	52
5.1.5	Dataanalyser	52
5.2	RESULTATER	53
5.2.1	Effekter på tjørn	53
5.2.2	Seljerøns og hylts følsomhed over for metsulfuron	53
5.2.3	Bærproduktion som funktion af højden	57
6	SCENARIEBEREGNINGER: EFFEKTER AF AFDRIFTSREDUCERENDE TILTAG	59
6.1	METODE	59
6.2	SCENARIEBETINGELSER	59
6.3	METEOROLOGI: TIMING AF SPRØJTNING	59
6.4	SPRØJTEFRIE RANDZONER: BETYDNING AF BREDDE	60
6.5	BETYDNING AF ANTAL SPRØJTESPOR	61
6.6	DYSER: TYPER OG SPRØJTETRYK	62
6.7	EFFEKTEN AF REDUCERET DOSIS	62
6.8	BETYDNING FOR TILGÆNGELIG FUGLEFØDE	63
6.8.1	Bedømmelse af produktionen af bær i læhegn i Danmark	63
6.8.2	Hvilke fugle spiser bærrene i hegnene?	63
6.8.3	Antallet af fugle der spiser bær i hegn	64
6.8.4	Drosselfugles energibehov om vinteren	65
6.8.5	Sammenligning af beregnet fødebehov og fødeproduktion	66
7	DISKUSSION	71
8	KONKLUSIONER	77
9	PERSPEKTIVER	79
9.1	FORSKNINGSMÆSSIGE PERSPEKTIVER	79
9.2	ADMINISTRATIVE PERSPEKTIVER	80
	REFERENCER	83

Forord

Denne rapport beskriver resultaterne af det arbejde, der er udført i forbindelse med projektet ”Vurdering af omfang og effekt af afdrift af ukrudtsmidler til danske læhegn eksemplificeret ved metsulfuron”. Projektet er udført af Danmarks Miljøundersøgelser (DMU) med støtte fra Miljøstyrelsens program for Bekæmpelsesmiddelforskning i perioden 2005-2007.

Ud over forfatterne til denne rapport har følgende DMU-medarbejdere bidraget til projektet: Lise Lauridsen, Anna Marie Plejdrup, Trine Guldager Sørensen, Elin Jørgensen, Zdenek Gavor, Mette Thomson, Bodil Thestrup, Axel Egeløv, Christel Christoffersen og Tinna Christensen. Mogens Erlandsen, Biostatistik, Aarhus Universitet har bistået med de statistiske analyser. Marksprøjtningerne er udført af Sjørslev Maskinstation, og Arne Jørgensen, Gert og Conni Rasmussen, Lene og Jørn Pagh, Peder Tøndborg, Henrik Sehested, Jens Ole Futtrup, Silkeborg Kommune samt Vejdirektoratet. har lagt jord og hegn til undersøgelserne, mens Inger Boesen og Bent Boi Pedersen forsynede os med strøm mm. Forfatterne ønsker hermed at udtrykke deres tak for de nævntes indsats og velvilje.

Projektet har været fulgt af en følgegruppe bestående af Claus Jerram Christensen, Dansk Juletræsdyrkerforening, Victor Beck Pedersen, Skov- og Naturstyrelsen, Helene Simoni Thorup, Dansk Landbrugsrådgivning, Landscentret, Jens Erik Jensen, Dansk Landbrugsrådgivning, Landscentret, Carsten Suhr Jacobsen, GEUS, Hans M. Hedegaard, Dansk Skovforening, Nis Schmidt, Dow AgroSciences Danmark A/S, Jørn Kirkegaard, Miljøstyrelsen, Claus Hansen, Miljøstyrelsen, Michael Stoltze, Danmarks Naturfredningsforening og Per Kremmer, Hardi International A/S.

Sammenfatning

Tidligere undersøgelser har vist, at visse hegnstræer (fx tjørn og fuglekirsebær) er følsomme over for meget små herbiciddoser. Formålet med dette projekt var at kvantificere driften af herbicider til hegnene under realistiske sprøjtebetingelser, sammenligne afdriften med følsomheden af hegnstræer over for et udvalgt herbicid og estimere effekten af forskellige afdriftreducerende tiltag på frugtsætningen i hegn.

Sprøjtemiddelafdrift til hegn blev målt 5 gange under forskellige meteorologiske forhold. Alle sprøjtninger blev udført med en marksprøjte efterspændt en traktor, og forsøgsmarken blev hver gang sprøjtet med et farvestof (natriumfluorescein) i 5 afstande fra hegnet. Ved en lejlighed blev der desuden sprøjtet med ukrudtsmidlet Ally (metsulfuron-methyl). Sprøjtemiddelafdriften blev målt i forskellige højder dels på master placeret i marken, dels i selve læhegnet. Ud fra de indsamlede data blev der udviklet en afdriftsmodel, som bl.a. kan beregne afdriften af sprøjtemiddel til læhegn under forskellige sprøjtebetingelser, såsom sprøjtetidspunkt, dysetype, dysetryk og sprøjtefrie bufferzoner af forskellig bredde.

Ved at sprøjte hylde- og seljerønhegn med lave doser af Ally og derefter måle effekten på frugtsætningen blev vores viden om hegnstræers følsomhed over for ukrudtsmidler øget.

Sprøjtemiddelafdrift og metoder til reduktion

Trods store variationer viste målingerne af sprøjtemiddel i hegnet tydeligt, at der ved sprøjtning tæt på hegnet blev afsat mest sprøjtemiddel i den nederste del af hegnet, mens sprøjtemidlet ved sprøjtning længere fra hegnet blev fordelt mere ensartet over hegnets højde. Ved hjælp af den udviklede model kunne vi beregne, at usprøjtede bufferzoner hovedsageligt vil reducere afdriften til den nedre del af læhegnene. Brug af afdriftreducerende dyser eller lavere dysetryk vil derimod reducere afdriften af sprøjtemiddel til alle højder af læhegnet, hvilket også gælder sprøjtning på tidspunkter, hvor vindhastigheden er lav og luftfugtigheden høj, dvs. tidligt om morgenen. Anvendelse af reducerede doser af ukrudtsmiddel i marken vil resultere i en tilsvarende reduktion i afdriften af sprøjtemiddel til læhegnene, dvs. en halvering af dosis giver en halvering af afdriften.

Det skal bemærkes, at sprøjtemiddelafdriften til læhegn målt i dette projekt er betydeligt højere end de afdriftsværdier, der normalt anvendes i forbindelse med fx den administrative vurdering af risikoen for uønskede effekter af sprøjtemidler på den omgivende natur.

Effekter af sprøjtemiddelafdrift på frugtsætningen i hegn

Hyld var næsten lige så følsom over for Ally som tjørn, mens seljerøn var noget mindre følsom. På grund af disse forskelle i følsomhed samt i den vertikale fordeling af bærrerne i de tre træarter, vil hyld og tjørn have større gavn af afdriftreducerende sprøjteudstyr, sprøjtning tidligt om morgenen og anvendelsen af reducerede herbiciddoser i marken end seljerøn, og kun hyld vil få flere bær, hvis der indlægges en sprøjtefri bufferzone langs hegnet.

Beregninger, der involverer de ovennævnte resultater samt forekomsten af de forskellige hegnstræer, antal overvintrende fugle og trækfugle, der æder bærene på hegnstræerne, og disse fugles fødebehov i efterårs- og vinterperioden antyder, at afdriftreducerende tiltag måske kan have en betydning ikke bare for antallet af bær i hegnene, men også længere oppe i fødekæden.

Desuden er det meget sandsynligt, at hegnets fodpose (de blomstrende planter og græsser under hegnstræerne) vil have gavn af alle de modellerede metoder til reduktion af sprøjtemiddelafdriften, eftersom alle disse reducerer afdriften af sprøjtemiddel til den nederste del af hegnet.

Summary

In heavily populated countries like Denmark hedgerows serve not only as protection against wind erosion, but also as ecological refuges with a recreational value. Previous studies have shown that some hedgerow trees (e.g. hawthorn and bird cherry) are sensitive to very low dosages of herbicides. The aim of the present study was to quantify herbicide drift into hedgerows under realistic spraying conditions, compare spray drift values with the sensitivity of hedgerow species to the selected herbicide and estimate the effect of various mitigation methods on the fruit yield of hedgerow trees.

Spray drift into hedgerows was measured on five occasions under varying meteorological conditions. Spraying was performed with a conventional tractor-mounted sprayer, and on every occasion the dye marker sodium fluorescein was applied to the experimental field in five tracks parallel to the hedgerow. On one occasion the herbicide metsulfuron methyl was also applied. Spray deposition was measured at different heights both on masts in the field and in the hedgerow. On basis of the collected data a spray drift model was established to calculate the vertical distribution of spray drift in hedgerows under varying spraying conditions such as time of spraying, choice of nozzles and nozzle pressure and introduction of unsprayed buffer zones. Our knowledge of the sensitivity of common hedgerow trees to herbicides was extended by exposing Swedish whitebeam and elder to a series of low metsulfuron methyl dosages and subsequently measuring the effect on fruit yield.

Herbicide drift and mitigation methods

The drift measurements showed large variations, but nevertheless a very clear pattern. Spraying close to the hedgerow resulted in spray drift mainly into the lower parts of the hedgerow, whereas herbicide applied far from the hedgerow was more evenly distributed in the hedgerow. Correspondingly, the developed model calculated that unsprayed buffer zones will mainly reduce deposition in the lower part of the hedgerow. In contrast, choosing drift reducing nozzles or nozzle pressure will reduce spray deposition at all heights of the hedgerow, as will spraying at times when wind speed is low and air humidity high, i.e. early in the morning. Application of reduced herbicide dosages will result in linearly reduced spray deposition, i.e. reducing the dosage by 50 % will reduce spray drift by 50 %.

It is worth noting that the spray drift measured in the present study significantly exceeds the spray drift values commonly used administratively to assess the risk of pesticide effects on nature.

Effects of herbicide drift on fruit yield of hedgerow trees

Elder was almost as sensitive as hawthorn to metsulfuron methyl, whereas Swedish whitebeam was somewhat less sensitive. Due to the differences between species in sensitivity and in the vertical distribution of fruits, elder and hawthorn benefit more from a careful choice of spraying equipment and time and from reduced herbicide dosages than does Swedish whitebeam, and only elder benefits significantly from unsprayed bufferzones.

Calculations involving the above-mentioned results as well as data on the frequency of the studied hedgerow species, the number of birds feeding on hedgerow berries during the winter season and the feeding requirements of those birds indicate that not only hedgerow trees, but also higher levels of the food web may benefit from mitigation of spray drift into hedgerows.

Furthermore, the hedgerow bottom flora is very likely to benefit from all the modelled mitigation methods, including unsprayed buffer zones, since they all reduce spray drift into the lower part of the hedgerow.

1 Baggrund

Der har i de senere år været fokus på direkte og indirekte effekter af sprøjtemiddelafdrift på organismer uden for det dyrkede areal (Bicheludvalget, 1999). Det er dog meget tidligere blevet påpeget i en arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen, at der mangler undersøgelser af effekten af afsætning på levende hegn (Anonym, 1992). Direkte effekter er fx ukrudtsmidlers effekter på urtevegetationen i fodposen (Marrs & Frost, 1997; Bruus Pedersen et al., 2004) eller effekter af insektmidler på sommerfugle (Cilgi & Jepson, 1995; Davis, 1991). Effekten af sprøjtemidlet på de træer og buske, der udgør læhegnet, er ikke undersøgt til trods for de mange dyrearter, de er fødegrundlag for. Eksempelvis har Kennedy & Southwood (1984) opgjort, at 209 insektarter er tilknyttet til tjørn og Atkinson & Atkinson (2002) fandt, at hyldbær indgår i føden for op til 30 fuglearter. Tjørn, slåen, hylde og røn er vigtige fordi de sikrer fugle som fx drosler føde om efteråret og om vinteren (Sparks & Robinson, 1999). Derfor kan direkte effekter på hegnet føre til indirekte effekter på de tilknyttede organismer.

Nogle få undersøgelser dokumenterer, at hegnsarter med bær er følsomme overfor herbicider. Disse undersøgelser er alle eksperimenter, der simulerer afdrift af sprøjtemidler, dvs. ikke praksisnære undersøgelser. Al-Khatib et al. (1992), Bhatti et al. (1995) og Fletcher et al. (1993) fandt således at simuleret afdrift af sulfonylureamidler reducerede vækst og frugtsætning i kirsebær ved doser ned til 1 % af den maksimale godkendte dosis. En dansk undersøgelse af følsomheden af tjørn overfor herbicidet metsulfuron estimerede en stor reduktion i bærmængden i eksponeringsåret, og der var også biologisk og statistisk signifikante effekter året efter (Kjær et al., 2004). Kjær et al. (2004) viste endvidere, at det har stor betydning, hvor i hegnet sprøjtemidlet afsættes, idet bærmængden bliver større højere oppe i hegnet. Derfor er det af betydning at få klarlagt, hvordan sprøjtemidlet fordeler sig i hegn ved afdrift fra marksprøjtning fra flere sprøjtespor, så resultaterne af de tidligere undersøgelser kan relateres til den faktiske afdrift af sprøjtemidler til læhegn. I forbindelse med vindafdrift af herbicider til læhegn er sulfonylureamidlerne vigtige fordi de anvendes på store arealer på tidspunkter der er af betydning for bærmængden. Ifølge Miljøstyrelsen anvendes sulfonylureamidler årligt på ca. 550.000 ha (Anonymous, 2007).

De målinger af sprøjtemiddelafdrift, der er gennemført, har primært målt afsætningen på jorden i varierende afstand fra det sprøjtede areal. I langt de fleste tilfælde er disse undersøgelser kun gennemført for et enkelt sprøjtespor. Undersøgelserne viste, at hovedparten af sprøjtemidlet blev afsat indenfor de første 5 m. De få undersøgelser, der sammenligner afdriften fra 1 henholdsvis 10 sprøjtespor, viser, at afsætningen i omgivelserne stiger med en faktor 3-10 (Gilbert & Bell, 1988; Yates et al., 1978; Maybank et al., 1978; Nordby & Skuterud, 1975). Der er lavet få undersøgelser af afdriften til læhegn, som grænser op til et behandlet areal, og disse undersøgelser viser, at afsætningen er mellem 2 og 15 % af det udsprøjtede fra et enkelt sprøjtespor (Weisser et al., 2002; Longley et al., 1997). Desuden viser undersøgelser, at læhegn kan nedsætte sprøjtemiddelafdriften med helt op til 90 % i forhold til arealer uden læhegn (Richardson et al., 2002; Ucar & Hall, 2001). Man må antage, at en del af disse 90 % afsættes i hegnet. Ovenstående viser, at det er vigtigt at bestemme hvorledes sprøjtemidler afsættes i hegn.

Det er generelt kendt, at potentialet for sprøjtemiddelafrift afhænger af en række meteorologiske faktorer så som vindhastighed, turbulens, luftfugtighed og temperatur (Elliott & Wilson, 1983). Dråbestørrelsesfordelingen er også vigtig, fordi store dråber vil have en tendens til at falde til jorden på grund af tyngdekraften, hvorimod mindre dråber i højere grad transporteres med turbulente vindstrømninger (Elliott & Wilson, 1983). Sprøjte tekniske forhold er derfor vigtige, idet de bestemmer den initiale dråbestørrelsesfordeling. Med så mange påvirkningsfaktorer vil selv store forsøg med mange sprøjte gentagelser kun beskrive et lille udsnit af de betingelser som sprøjtningen foregår under. Der har derfor været en række forsøg på at modellere afdriftspotentialet ved hjælp af matematiske modeller. Disse modeller falder i to grupper; empiriske modeller der ud fra regressionsanalyser beskriver betydningen af enkeltfaktorer, der varierer under forsøgene (fx Goering & Butler, 1975) og dernæst prediktive modeller, der beskriver de processer, der regnes for de mest betydende for afdriften (Holterman et al., 1997). Modellen udviklet af Holterman et al. (1997) er en deskriptiv model for afdriftens størrelse afhængigt af bomhøjde, vindhastighed og dysestørrelse, men denne model beregner afsætningen på en vandret flade og kan derfor ikke beregne afsætningen i hegn eller andre lodrette strukturer.

Formålet med nærværende projekt er således at kvantificere effekten af herbicidafrift fra marksprøjtning til hegnsarter, der er vigtige som føde for trækende og overvintrende fugle. Dette muliggør beregning af om beskyttelsesforanstaltninger (afstandskrav, reduceret dosering m.m.) vil føre til øget fødemængde. Dette vil vi opnå gennem følgende aktiviteter:

- Afsætningen af sprøjtemiddel i læhegn måles under praksisnære sprøjtebetingelser (flere sprøjtespor). Afsætningen af herbicid bestemmes også som funktion af højden, idet forskellige træer og buske har bærrerne fordelt forskelligt vertikalt.
- Projektet her vil udvikle en afdriftmodel, der beregner spredningen af sprøjtemiddel fra sprøjtekilden som funktion af de abiotiske vilkår. Under spredningen med de turbulente luftmassers bevægelse sker en ændring i dråbestørrelsesfordelingen i sprøjteskyen, dels pga. deposition af store dråber, dels fordi der sker en fordampning af væske som gør de mindre dråber endnu mindre. Disse forhold indgår i modellens spredningsberegninger. Resultaterne fra forsøgene med de målte afsætninger anvendes til at validere modellen.
- Eftersom feltmålinger kun er en stikprøve af de situationer, der vil forekomme på den enkelte mark, vil vi i dette projekt modellere, hvorledes sprøjtemidlet bevæger sig fra den enkelte sprøjtefane og ind til hegn. Herved bliver det muligt at generalisere sprøjtemiddelafriften i forhold til en eventuel indførelse af bufferzone eller ændrede sprøjtebetingelser (vindhastighed, temperatur, dråbestørrelsesfordeling (dyse, dysetryk, væskemængde).
- Undersøge seljers og hylde følsomhed overfor metsulfuron for at få et bredere grundlag for at vurdere bærproducerende hegnsarters følsomhed overfor metsulfuron.
- Anslå udbredelsen af bærbærende træer og buske i læhegn i Danmark.
- Bestemme effekten af normaldosering og beregne konsekvensen ved indførelse af tiltag til formindskelse af eksponeringen (eks. afstandskrav, reducerede sprøjtedoseringer eller benyttelse af forskellige typer sprøjteudstyr). Beregningen udføres vha. af model for sprøjtemiddelafrift, dosis-responsammenhænge for hegnsarterne, forskellige sprøjtedysers dråbestørrelsesfordeling og hegnsarternes relative forekomst.

2 Vindafdrift af metsulfuron fra sprøjtespor til tjørnehegn

2.1 Introduktion

Denne forsøgsrække beskriver sprøjtemidlets vej mod hegn og danner dermed grundlaget for at vurdere den konkrete afdrift ind i hegn samt at beregne afsætningen i hegn ved indførelse af bufferzoner, anvendelse af andre dysetyper og særlig hensyntagen til de meteorologiske forhold.

2.2 Metoder

Afdriften af sprøjtemiddel fra fem sprøjtespor til hegn og mark blev undersøgt fem gange under varierende vejrmæssige betingelser. Ved et af sprøjteforsøgene blev der anvendt både ukrudtsmidlet metsulfuron og farvestoffet natriumfluorescein for at etablere en sammenhæng mellem markøren fluorescein og sprøjtemidlet. Ved de øvrige fire sprøjtninger blev der udelukkende sprøjtet med fluorescein, da dette både er hurtigere og billigere at måle end metsulfuron. Meteorologiske forhold blev registreret ved hjælp af en meteorologimast opstillet midt på forsøgsmarken. Afsætning af sprøjtemiddel og fordelingen af dråbestørrelser i marken og i forskellige højder i hegnet blev analyseret. De enkelte metoder er beskrevet mere detaljeret nedenfor.

2.2.1 Meteorologiske målinger

Meteorologiudstyret, der blev anvendt i forsøgene, var placeret i en 6 meter høj gittermast midt på forsøgsmarken på positionen 56° 21' 42,03" N, 9° 26' 35,60" E (se billeder i Appendiks 1). Udstyret målte relativ luftfugtighed, temperatur, vindretning og -hastighed, turbulens, varmefluks samt global stråling som beskrevet i Appendiks 2.

2.2.2 Sprøjtning

Sprøjtning med natriumfluorescein og metsulfuron blev foretaget som sprøjtninger med traktor i en vårbygmark med læhegn mod vest, nord og øst (se evt. billeder i Appendiks 1). Hegnene mod øst og vest bestod udelukkende af hvidtjørn, mens nordhegnet i den vestlige ende bestod af tjørn og i den østlige af seljærn. Læhegnene var ikke lige tætte og varierede også horisontalt i tæthed. Generelt er det østvendte hegn mest gennemtrængeligt for luften, mens det vestlige er tættest. Gennemtrængeligheden af hegnet har en betydning for en eventuel afbøjning af vinden, når den rammer hegnet. Et tæt hegn vil således kunne løfte noget af luftstrømmen og dermed dråberne/partiklerne opad. Den anvendte sprøjte var af typen Hardi 4110-16 (sammenlignelig med Hardi ISO 025 eller 03 hvad angår dyseoutput). Sprøjtebommen var 12 m lang med 50 cm mellem dyserne, og bommen var placeret ca. 50 cm over jordoverfladen under sprøjtningerne. Der blev sprøjtet med 300 l/ha de to første forsøg, mens der blev sprøjtet med 200 l/ha de næste tre. Traktorhastigheden var under alle forsøg 7 km/t. Sprøjtning af marken med anbefalet dosis metsulfuron blev foretaget den 19. maj 2005. Doseringen skulle have været 4 g aktivt stof

pr. hektar, som på daværende tidspunkt var den maksimale godkendte dosering, men pga. en fejl i indstillingen af dysetrykket blev dyseoutputtet større end forventet (se Tabel 2.1), og doseringen blev derfor 6 g/ha. Sprøjtningen blev foretaget i den vestlige del af nordhegnet. Ved denne og de øvrige sprøjtninger (26. april, 9. juni, 30. august og 6. september 2005) blev natriumfluorescein anvendt som markør i en tankkoncentration på ca. 2 g/l, idet dette stof dels ikke er giftigt, dels er billigere at anvende end metsulfuron. Sprøjteinformationer er sammenfattet i Tabel 2.1. Alle sprøjtninger fandt sted, mens afgrøden var lav (Tabel 2.3) og således kunne simulere forholdene forår/tidlig sommer. Afgrødens udviklingstrin blev ikke vurderet.

Tabel 2.1 Sprøjteinformationer

	26. april	19. maj	9. juni	30. august	6. september
Hegn	vest	nord	øst	øst	vest
Sprøjtemiddel	nf	nf + mm	nf	nf	nf
Dysetryk	5,5 atm	5,5 atm	3 atm	3 atm	3 atm
Dyseoutput	1,6 l/min	1,6 l/min	1,1 l/min	1,1 l/min	1,1 l/min
Tankconc. nf	1,49 g/l	2,23 g/l	1,63 g/l	1,99 g/l	1,83 g/l

mm: metsulfuron

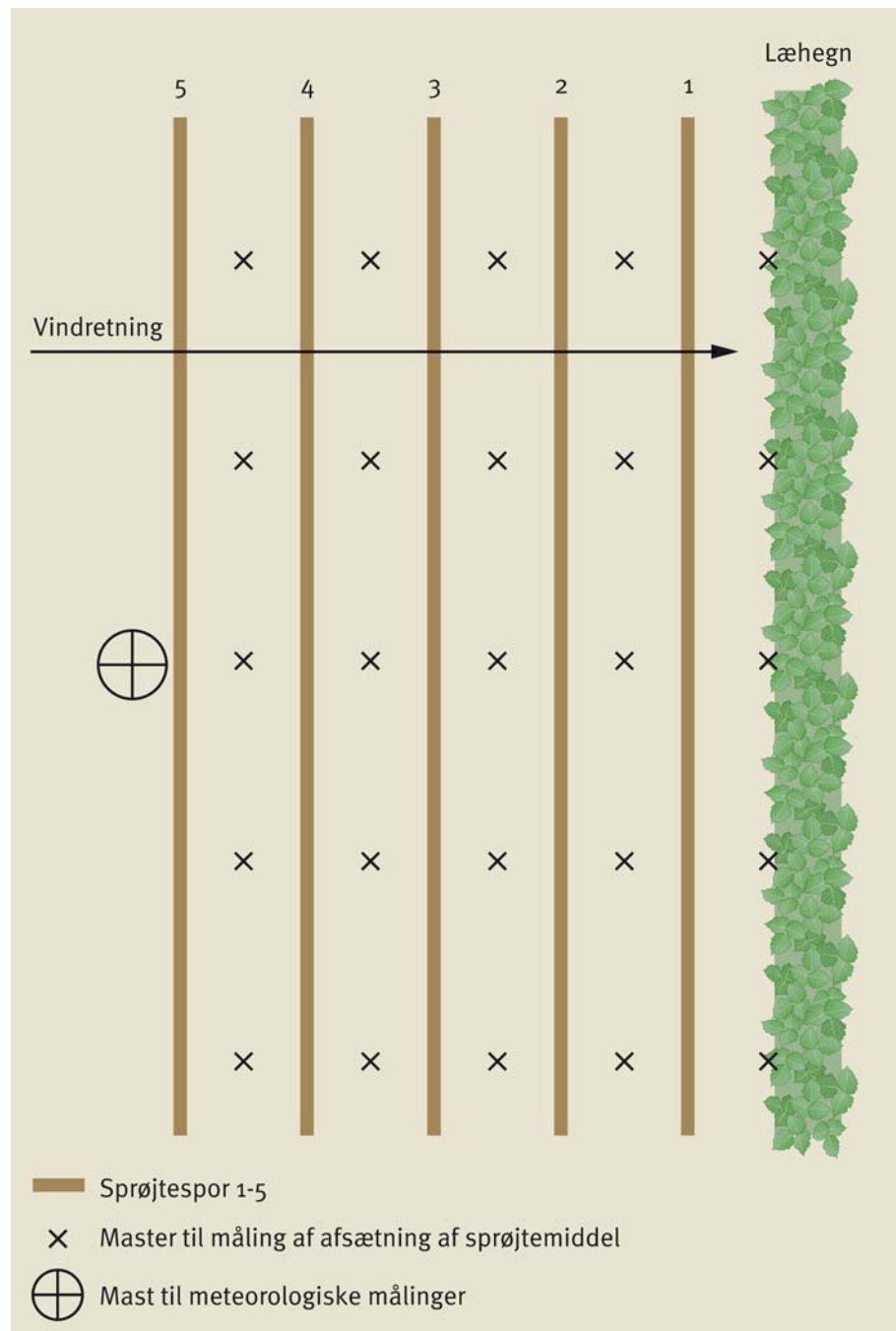
nf: natriumfluorescein

2.2.3 Afsætning af sprøjtemiddel

Det udsprøjtede ukrudtsmiddel og farvestof blev opsamlet både på blade, curlere og vandfølsomt papir i hegnet, samt curlere og vandfølsomt papir på 5 master placeret langs hvert af de 5 sprøjtespor (se Figur 2.1 samt billeder i Appendiks 1).

De forskellige mål for afsætning er valgt dels for at få standardiserede mål (curlere) til sammenligning med det egentlige afsætningsmedium (blade), dels for at få beskrevet dråbestørrelsesfordelingen for såvel dråber mindre end 20µm (sugefiltre og partikelmåler med sug,) som dråber større end ca. 20µm (vandfølsomt papir, curler).

Umiddelbart efter kørslen i hvert af de fem sprøjtespor blev der taget prøver i fire højder (½, 1, 2, og 4 m) i masterne og i 4 højder (0, ½, 1 og 2 m) i hegnet, idet der for første sprøjtespor blev taget prøver i master og træer i hegnet, for andet spor i hegnet samt 12 m inde i marken, for tredje sprøjtespor i hegnet samt 12 og 24 m inde i marken, og så fremdeles (se tabel i Appendiks 3). Ved sprøjtning af østhegnet var afstanden fra hegnet til masterne i marken 4 m længere end ved de øvrige hegn pga. en markvej mellem hegn og mark.



Figur 2.1. Skematisk oversigt over forsøgsopstillingen i marken.

I hegnet blev målingerne med afsætning af stof suppleret med målinger, hvor der aktivt blev opsamlet stof vha. sug under hver sprøjtning. Der blev opsamlet på fire parallelle ”sugefiltre”, hvor totalmængden af stof blev analyseret. Derudover blev der opsamlet med en såkaldt ”Chemvol-partikelopsamler”, som fraktionerer det opsamlede materiale efter størrelse og således kan mængden af stof i forskellige størrelsesfraktioner bestemmes. Sugefiltre og Chemvolopsamler opsamler materiale fra luften, der er mindre end ca. 20 µm. Chemol-partikelopsamleren repræsenterer en punktmåling og var placeret i læhegnet før/efter de andre opsamlere.

2.2.3.1 Blade

For hvert sprøjtespor blev der (med undtagelse af den 26. april, hvor hegnet ikke var sprunget ud endnu) indsamlet 5-10 blade så tæt på masterne i hegnet som muligt. Disse blade var kun eksponeret for sprøjtemidlet fra dette ene

sprøjtespor, idet de indtil sprøjtningen i dette sprøjtespor var dækket med en plastpose. Umiddelbart efter indsamlingen blev bladene overført til et plastrør med ekstraktionsmiddel og placeret i en lystæt kasse.

2.2.3.2 Curlere

På hver af masterne blev der forud for kørslen af det aktuelle sprøjtespor placeret to curlere (almindelige hårcurlere af mærket "M-cosmetics", diameter 2 cm, længde 6 cm, farve lyserød) i hver af de fire højder til opsamling af fluorescein. Den 19. maj, da der blev sprøjtet med metsulfuron, var der en curler i hver højde på masterne i hegnet for sprøjtespor 1, 3 og 5 til opsamling af herbicidet. Efter prøvetagningen blev curlerne overført til plastrør med ekstraktionsmiddel og placeret i en lystæt kasse.

2.2.3.3 Sugefiltre

Under den første sprøjtning (26. april) blev sugefiltrene eksponeret i højderne 0,5 m, 1 m, 2 m og 4 m i læhegnet. Resultaterne viste den forventede vertikale gradient, men det blev dog klart under forsøget, at variationen i spredningen af sprøjtetågen (langs med læhegnet) var meget stor og repræsentativiteten af den vertikale profil meget vanskelig at vurdere. I de efterfølgende fire forsøg blev der derfor målt på langs af læhegnet, således at variationen langs læhegnet kunne vurderes. Fire filtre blev eksponeret parallelt i 2 m's højde med 8-10 m's afstand imellem opsamlerne. For at vurdere den vertikale profil, blev der i de sidste tre feltforsøg udført et ekstra forsøg. Her blev den vertikale profil målt med større tidsmæssig midling, idet der blev sprøjtet fra 3. spor mens traktoren kørte frem og tilbage ti gange.

Der er anvendt filtre af typen Millipore (White RAWP, 1,2 μ m, 50 mm i diameter). Filtrene var monteret i filterholdere med et indløb, der er 40 mm i diameter og 80 mm langt. Der er analyseret blindprøver på ueksponerede filtre samt filtre, der har været monteret i filterholdere og sat på målemasterne i lighed med de eksponerede prøver. Fluoresceinindholdet i begge typer blindprøver viste sig ubetydelige i forhold til de eksponerede prøver (typisk mindre 2 % og ikke over 4 %), og der er ikke foretaget nogen korrektion af måleresultaterne. Efter eksponering er filterholderen taget ned, lukket og lagt mørkt i plastpose i en trækasse. Efter endt forsøg med sprøjtning af alle spor er filtrene overført fra filterholdere til ekstraktionsflasker, der er lagt mørkt i plastposer i trækasse. Derefter er filtrene transporteret til laboratoriet, hvor der er tilsat ekstraktionsvæske og prøverne er analyseret for natriumfluorescein som beskrevet nedenfor i afsnit 2.2.3.7.

Der blev suget med et flow, der opsamler partikler op til en størrelse omkring 15-20 μ m. Før alle kørsler i sprøjtespor er flowet på de enkelte opsamlere målt. Alle flow blev tillige elektronisk registreret. Under første sprøjtning er der suget med et gennemsnitsflow omkring 35 l/min, mens der under de øvrige sprøjtninger er suget med et flow på omkring 39 l/min. Alle forsøg havde en flowvariation under 8 % på de parallelt eksponerede filtre. Variationen i gennemsnitsflowet mellem de forskellige prøvetagninger var meget lille (under 2 %).

Selve sprøjteepisoden, hvor sprøjtetågen passerer opsamlere, er meget vanskelig at tidssætte. Dermed kan det luftvolumen, der hidrørte selve sprøjteepisoden ikke fastsættes, og en absolut luftkoncentration af natriumfluorescein kan ikke gives. Værdierne er således opgivet i en mængde som μ g natriumfluorescein pr. filter. For at skabe sammenlignelighed forsøgene imellem er værdierne for sugefiltrene normeret til gennemsnitsflowet af de parallelle op-

samlere. Da flowafvigelseerne mellem de enkelte sprøjtespor og forsøgsdagene i mellem er meget lille, er der ikke korrigeret for dette. Tankkoncentrationen af natriumfluorescein varierer med 16 % de fem forsøg imellem og filterkoncentrationerne er også normeret til den gennemsnitlige tankkoncentration. Derudover er der korrigeret til en sprøjtemængde på 1,1 l/min i forsøget d. 19. maj således, at det er direkte sammenligneligt med forsøgene juni, august og september. Da sugefiltrene eksponeres med et konstant flow, vil der opsamles en forholdsmæssig mindre fraktion fra en sprøjtetåge, der passerer hurtigt forbi opsamlere sammenholdt med en sprøjtetåge, der bevæger sig langsommere. Resultaterne er derfor yderligere korrigeret i forhold til vindhastigheden. For de enkelte sprøjtespor er middelvinden estimeret ud fra de meteorologiske målinger midt på marken. De vertikale målinger i ekstraforsøgene er korrigeret med en vindprofil, der er beregnet ud fra de målte meteorologiske data under forsøget. Der er ikke taget hensyn til hegnetts eventuelle indvirkning på vindhastigheden.

2.2.3.4 Vandfølsomt papir

Der er udviklet en simpel, automatisk metode til bestemmelse af dråbestørrelsesfordelingen på fugtfølsomt papir. Metoden er forholdsvis hurtig, reproducerbar og kræver ingen manuel parametrisering eller kalibrering. Nøjagtigheden er bedst på papirer med veldefinerede og velseparerede dråber, og metoden forventes her at være rimeligt nøjagtig. På papirer med meget snavs, meget utydelige dråber, eller hvor fugtpåvirkningen har været så stor, at dråberne i væsentlig grad er flydt sammen, forventes nøjagtigheden at være væsentligt dårligere. Der er ikke foretaget kontrolmålinger eller sammenligninger med alternative metoder.

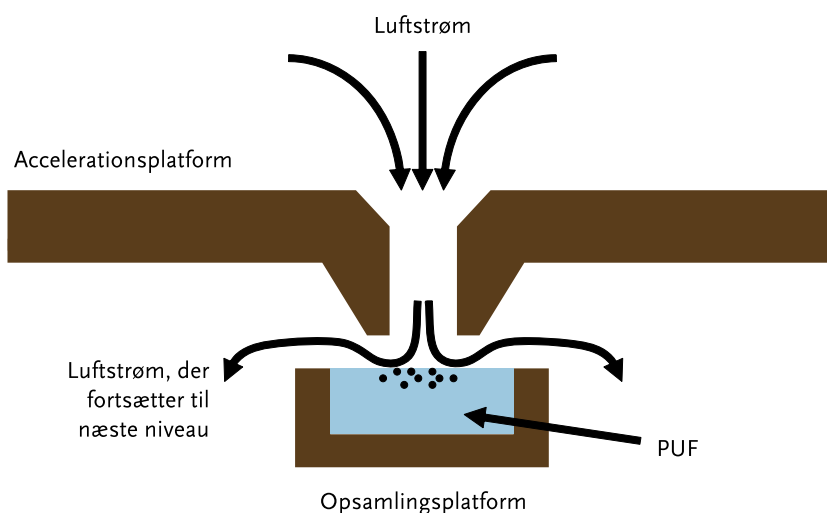
Metoden er beskrevet i Appendiks 4.

2.2.3.5 PUF-filtre (ChemVol sampler)

Ved hjælp af ChemVol-partikelopsamlere (ChemVol® High Volume Cascade Impactor, model 2400) er det muligt at opsamle partikler i forskellige størrelsesfraktioner fra luft. Opsamlingen i hvert enkelt niveau sker ved afsætning på en polyuretanskumplade (PUF), hvorefter denne udtages til analyse ved opsamlingsperiodens ophør. Hvert enkelt niveau består af en "accelerationsplatform" med 3 spalter og en "opsamlingsplatform" (se Figur 2.2), der er indbygget i et rundt "hus" og tilsammen udgør disse niveauer den samlede opsamlingsenhed.

Ud over opsamlingsenheden består ChemVol-partikelopsamlere af en kraftig pumpe således at det krævede luftflow på ca. 750 l/min kan opnås. I forbindelse med forsøgene blev der opsamlet dråber og aerosoler på PUF i følgende størrelsesfraktioner: >10 µm, 1-10 µm og 0,1-1 µm. Desuden blev dråber <0,1 µm opsamlet på et ultrafint filter af polypropylen. Dette filter var placeret nederst/bagerst i opsamlingsenheden og indgik i lighed med PUF-erne i analysen. Det første trin, der opsamler dråber større end 10 µm, har en øvre afskæring omkring 20 µm, dvs. dråber større end 20 µm opsamles. Hele opsamlingsenheden var under forsøgene placeret i ca. 2,3 meters højde direkte over pumpen. Efter prøvetagningen blev filtrene overført til en lystæt kasse.

Analysen af natriumfluorescein blev foretaget som beskrevet i afsnit 2.2.3.7., men det viste sig nødvendigt først at udryste fluoresceinet fra de vandskyende PUF-filtre med ethanol og derefter inddampe dem, inden prøven kunne opløses i Na₂HPO₄-bufferen og analyseres.



Figur 2.2. Accelerations- og opsamlingsdelen i ChemVol-partikelopsamleren. Tegning efter salgsmateriale fra Thermo Electron.

2.2.3.6 Analysemetode til natriumfluoresceinbestemmelse

Umiddelbart efter kørsel af hvert sprøjtespor blev blade, curlerne, sugefiltre, Chemvol-filtre og filterpapir overført til lystætte beholdere for at undgå henfald af markøren. Ved hver sprøjtning blev der desuden taget en prøve fra sprøjtetanken. En kontrol af henfaldet af natriumfluorescein viste, at stoffet var stabilt i hvert fald i to døgn ved opbevaring i mørke ved stuetemperatur, dvs. der var ikke noget henfald mellem prøvetagning og afslutningen af analyserne.

Natriumfluorescein-afsætningen blev målt ved fluorescensspektrofotometri (Sharp 1974; Davis et al., 1994). Fluoresceinet blev ekstraheret fra prøverne vha. en 0,1 M Na_2HPO_4 -buffer justeret til pH 6,8 med NaH_2PO_4 . Fluoresceinindholdet blev målt på en fluorescens HPLC-monitor (Shimadzu RF-551, detektionsgrænse 0,01 $\mu\text{g/l}$), idet stoffet exciteres ved 492 nm og derefter kan detekteres ved 513 nm.

2.2.3.7 Analysemetoder til metsulfuronbestemmelse

Metsulfuron-afsætningen blev målt ved væskrokromatografi efterfulgt af tandem massespektrometri (LC-MS-MS), efter at stoffet var vasket af blade, filterpapir og curler, jf. Appendiks 5. Indsamlingsmetoden er designet, således at en afsætning på 1 % af den på produktet angivne maksimale dosis (4 g aktiv stof/hektar) fører til en stofmængde på mere end 10 ng per prøve (metodens forventede detektionsgrænse). Beregningen er baseret på rapporterede opsamlings effektiviteter (Bui et al., 1998; Davis et al., 1993).

2.3 Resultater

2.3.1 Meteorologiske data

Målingerne af de meteorologiske forhold på forsøgsgdagene dækker også timerne/dagen op til afdriftsforsøgene samt nogle timer efter. De enkelte forsøg for hvert sprøjtespor varede ca. et halvt minut, men afviklingen af alle spor samt supplerende ekstrarforsøg (se afsnit 3.3.1.2.) strakte sig over nogle timer fra formiddag til tidlig eftermiddag. De samlede forsøgsperioder fremgår af Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Perioder med afvikling af afdriftsforsøg. Tiderne er i dansk normalt tid (sommertid – 1 time).

Dato	Start	Slut
26. april	10:10	12:14
19. maj	10:30	12:20
9. juni	09:39	12:35
30. august	09:38	12:32
6. september	09:45	12:46

Meteorologien i forsøgsperioderne er vist i oversigtsform i Tabel 2.3. De fleste dage var med få eller ingen skyer; kun en dag var det overskyet. Markens overflade/vegetation ændredes naturligvis i mellem forsøgsdagene. Vindhastighederne har været svage til jævne og fugtigheden for det meste omkring 50 %. Temperaturen har været jævnt stigende gennem målesæsonen.

Tabel 2.3. Meteorologiske data for perioderne med afdriftsforsøg. Data under de enkelte sprøjtninger fremgår af Tabel 3 i Appendiks 2. L (Monin-Obukhov længden) er en stabilitetsparameter. Parametren u_* er friktions-hastigheden, $Gl.str.$ er globalstrålingen.

Dato	Skydække (1/8-dele)	Overflade	Vindhast. m/s	Retning grader	u_* m/s	L m	Varmeffluks W/m ²	Temp. °C	Gl.str. W/m ²	Fugtighed %
26. april	0	Ringe veg. 2 cm	5,5-6,2	114-126	0,51-0,61	-57 – -88	206-255	10-11	640-700	42-50
19. maj	8 (*1)	Ringe veg. 5 cm	2,0-3,6	197-220	0,19-0,28	-5 – -21	51-130	11-12	470-440	53-59
9. juni	1-2	Tæt veg. 20 cm	2,9-3,8	271-303	0,39-0,45	-58 – -88	74-120	17-18	600-750	65-79
30. aug.	0-1	Stubbe 10 cm	3,7-4,5	260-274	0,34-0,53	-21 – -87	93-205	17-18	410-490	47-60
6. sept.	0	Stubbe 10 cm	2,4-3,3	136-157	0,29-0,58	-24 – -107	91-164	22-24	420-480	45-65

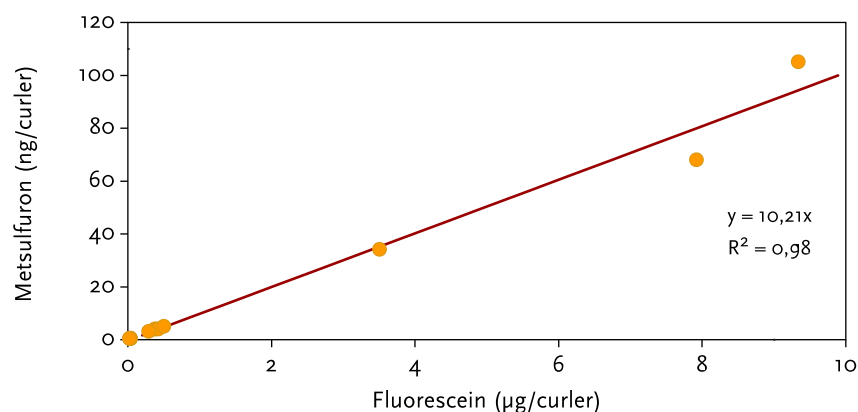
*1: relativt tyndt skydække.

Figurer med tidsserier af udvalgte meteorologiske parametre er vist i Appendiks 2.

2.3.2 Afsætning af sprøjtemiddel

2.3.2.1 Sammenhængen mellem afsætningen af de to sprøjtemidler

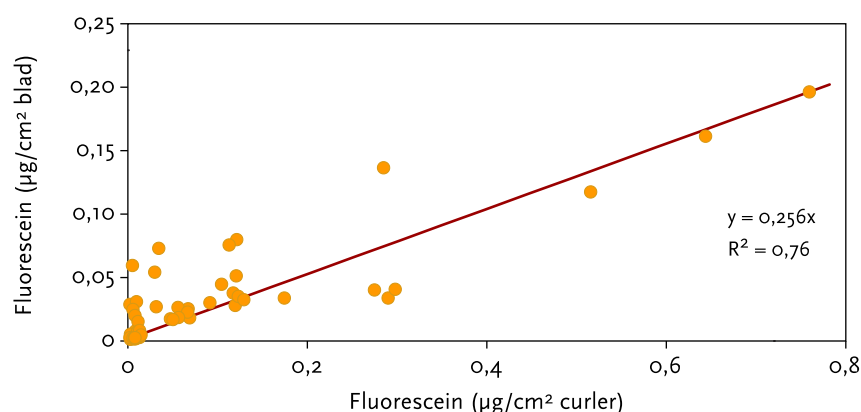
Af Figur 2.3 ses, at der er god overensstemmelse mellem afsætningen af farvestoffet natriumfluorescein og herbicidet metsulfuron på curlerne. Koncentrationen af de to stoffer i sprøjtetanken er forskellig, således er der 100 gange så meget natriumfluorescein som der er metsulfuron. Den gode overensstemmelse mellem afsætningen af farvestof og herbicid tages som udtryk for, at natriumfluoresceinmålingerne er repræsentative for afsætningen af herbicidet.



Figur 2.3. Sammenhængen mellem afsætning af fluorescein og metsulfuron på curlere ved sprøjtningen den 19. maj.

2.3.2.2 Sammenhængen mellem afsætning på blade og curlere

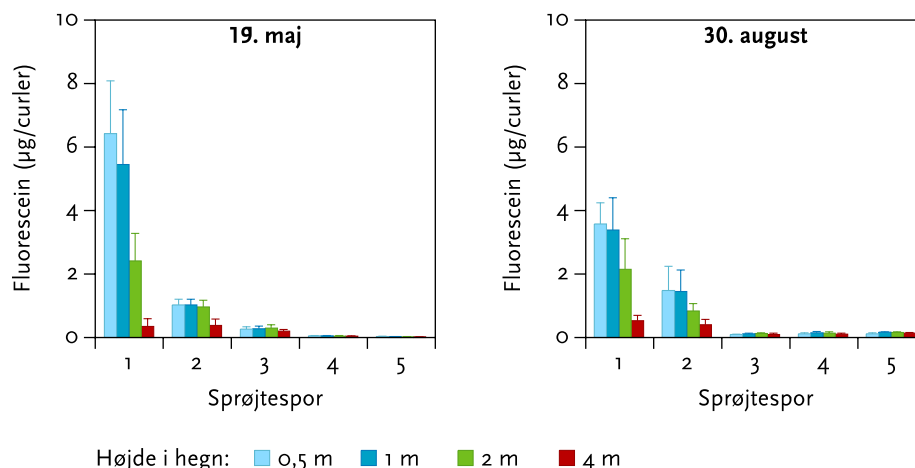
Figur 2.4 viser, at der er en god sammenhæng mellem afsætningen af fluorescein på curlere og blade. Det vil således være muligt at omregne de målte værdier på curlere til afsætning af fluorescein og metsulfuron på tjørneblade.



Figur 2.4. Relationen mellem afsætning af fluorescein på blade og curlere. Alle målinger er foretaget i hegnet, og hvert punkt repræsenterer gennemsnittet for 5 prøver i hver af højderne ½, 1 og 2 m over jorden for hvert sprøjtespor.

2.3.2.3 Afsætning af sprøjtemiddel som funktion af højde og afstand

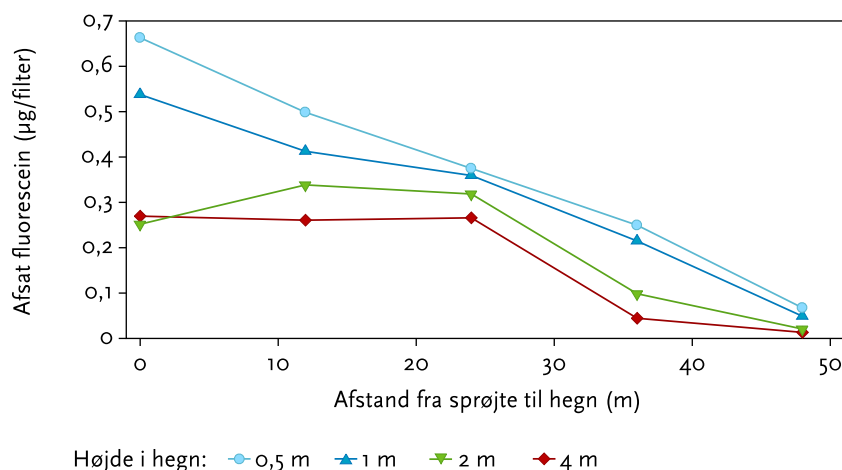
En sammenstilling af data for fluoresceinafsætningen på curlere fra sprøjtningen i de fem sprøjtespor for sprøjtningerne 19. maj og 30. august er vist på Figur 2.5. Standardfejlene på middeltallene viser, at der er stor variation i afsætningen inden for samme sprøjtning, især når der sprøjtes nær hegnet. Figuren viser, at der generelt opsamles mest fluorescein på curlere nederst i hegnet, men at denne effekt aftager, når der sprøjtes længere væk fra hegnet. Det hænger sammen med sprøjtebommens højde på 0,5 m, hvor stoffet sprøjtes ud. Tæt på sprøjtebommen (første spor) er stoffet således kun i ringe grad begyndt at blande op i luften, mens opblandingen tiltager med tiden og dermed de sprøjtespor, der ligger længere væk. Forskellen i afsætningen af den absolutte mængde stof de to forsøgsdage skyldes bl.a., at der den 19. maj blev sprøjtet i hegnet mod nord, mens der den 30. august blev sprøjtet i hegnet mod øst. Afstanden mellem sprøjte og hegn er 4 m bredere i østhegnet pga. en markvej. Den øgede afstand vil alt andet lige nedsætte den afsatte mængde, særligt fra sprøjtningen i det første spor.



Figur 2.5. Afsætning af fluorescein på curlere placeret på master i hegnet ved sprøjtningerne den 19. maj og den 30. august. Figuren viser gennemsnit og SEM for fem målinger for hvert af de fem sprøjtespor i forskellige højder over jorden. Hvert sprøjtespor var 12 m bredt. Værdierne er normeret til ens dyseoutput, svarende til udsprøjtning af 4 g metsulfuron/ha.

2.3.2.4 Sugefiltre

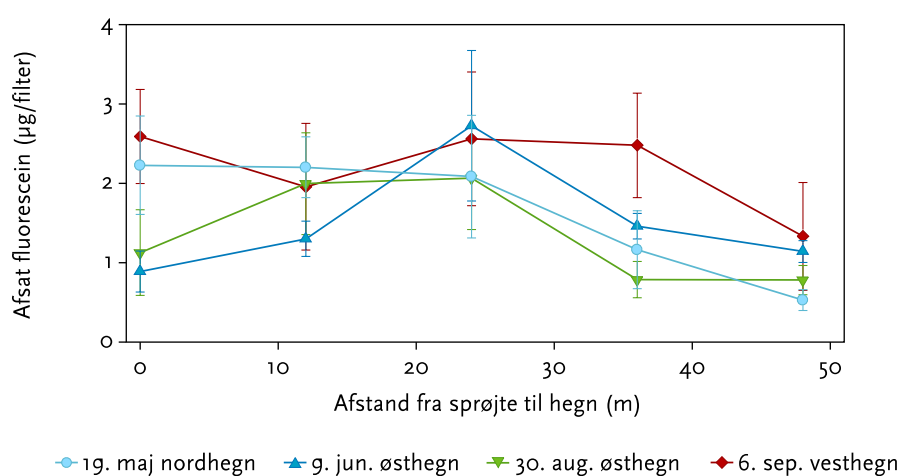
Under forsøget 26. april blev mængden af små partikler målt med aktivt sug i læhegnet i fire højder. Det var det vestvendte læhegn, og det var ikke sprunget ud, dvs. at gennemtrængeligheden for luften var stor. Figur 2.6 viser de målte mængder af natriumfluorescein pr. filter for hver af de fem sprøjtespor. Mængderne er normeret til samme luftflow. Målingerne er et udtryk for et øjebliksbillede og de har dermed en stor variation pga. korttidssvingninger af turbulensen i luften. Målingerne af de små dråber viser, i lighed med afsætningen af de større dråber på curlerne Figur 2.5., at der opsamles mest fluorescein nederst i hegnet tæt på sprøjtesporet, men at effekten og mængden aftager, når der sprøjtes i større afstand fra hegnet. Som for de større dråber (jf. afsnit 2.3.1.4) hænger det sammen med sprøjtebommens højde på 0,5 m, hvor stoffet sprøjtes ud og tiden det tager, før opblandingen sker.



Figur 2.6. Mængde natriumfluorescein pr. filter i forskellige højder i hegnet ved sprøjtning i varierende afstand. Mængderne er normeret til samme luftflow.

I de fire efterfølgende forsøg blev der målt en horisontal profil, således at variationen langs læhegnet kan vurderes. Under de fire forsøg blev fire filtre eksponeret parallelt i 2 m's højde med 8-10 m's afstand imellem opsamlerne. For

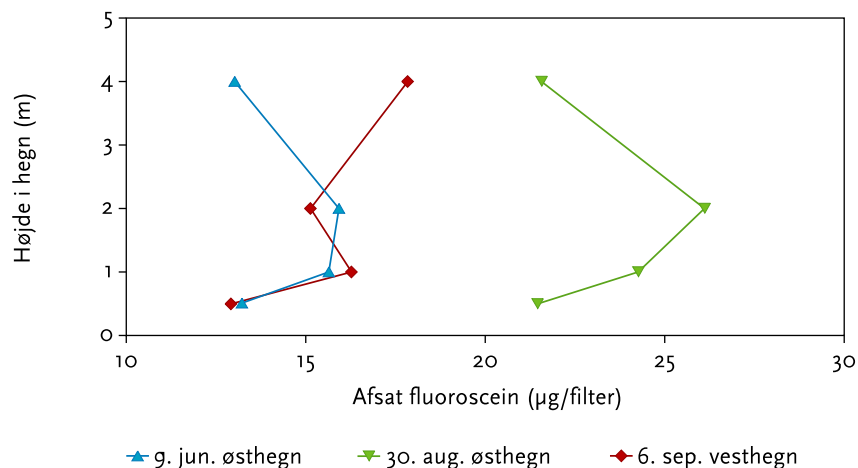
at skabe sammenlignelighed dagene imellem er resultaterne normeret i forhold til luftflow og tankkoncentration og er ydermere normeret m.h.t. vindhastigheden (jf. afsnit 2.2.3.4). På Figur 2.7 ses, at mængden af små dråber/partikler i hegnet i 2 meters højde på forsøgsdagene i juni og august stiger fra 1. til 3. spor, hvorefter mængden falder igen. Dette forløb stemmer overens med en forventning om, at det tager lidt tid for sprøjtetågen at blande op i luften og dermed ses maksimum i 2 meter først ved sprøjtning i en vis afstand fra hegnet. Maj og september viser mængder på samme niveau og nogenlunde konstant de første tre spor. I 4. sprøjtespor ligger september højere end de øvrige forsøgsdage, mens der ses et fald i 5. spor. De meteorologiske forhold giver ikke umiddelbart nogen forklaring på, hvorfor opblandingen tilsyneladende allerede er opnået fra 1. spor i maj og september. I juni og august er målingerne foretaget i det østvendte hegn, hvor afstanden til sprøjten er øget med 4 m pga. en markvej. Det kan være medvirkende til de lavere absolutte mængder fra de første sprøjtespor i forhold til maj og september.



Figur 2.7. Mængden af natriumfluorescein pr. filter i læhegnet i 2m's højde med ca. 8-10 m's afstand mellem opsamlerne. Punkterne viser middelværdier og SEM for de fire sprøjtninger. Mængderne er normeret med hensyn til luftflow, tankkoncentration og vindhastighed.

Med henblik på validering af modelberegninger blev der i de sidste tre feltforsøg udført et ekstra forsøg med målinger af den vertikale koncentrationsprofil af de små dråber/partikler i hegnet. For at opnå en mere repræsentativ værdi, bl.a. i forhold til profilen opnået d. 26. april, blev der målt med større tidsmæssig midling, idet der blev sprøjtet fra 3. spor, mens traktoren kørte frem og tilbage ti gange. Figur 2.8 viser de opnåede målinger med koncentrationer normeret i forhold til flow, tankkoncentrationer og vindhastighed, således at dagene indbyrdes nemmere kan sammenlignes.

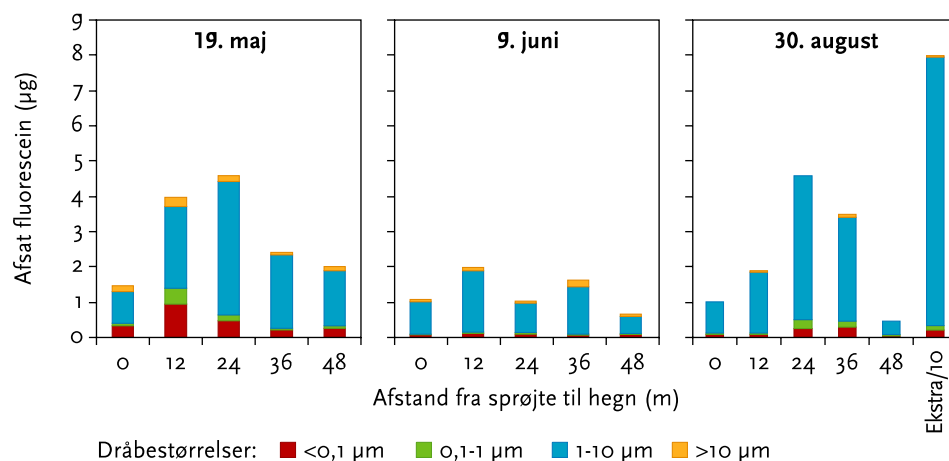
De vindvægtede profiler viser stort set det forventede forløb. Profilet fra juni og august er meget ens, bortset fra de numeriske værdier, mens værdien i 4 m højde i september synes at afvige fra det generelle mønster. Der er ikke umiddelbart fundet nogen forklaring på de højere stofmængder i august. Vindprofilen kan være fejlbehæftet, da hegnets indflydelse er ignoreret, men dette gælder alle tre forsøg. Vindens retning var ikke direkte på hegnet i august, og måske har noget af sprøjtetågen bevæget sig langs hegnet. Lignende forhold gjorde sig dog også gældende i juni.



Figur 2.8. Mængde natriumfluorescein pr. filter i forskellige højder relateret til 10 gentagne sprøjtninger i 3. spor (24 m fra hegnet), fordelt på tre forsøgss dage. Mængderne er normeret med hensyn til luftflow, tankkoncentration og vindhastighed.

2.3.2.5 ChemVol

Der blev opsamlet spraydråber og partikler med ChemVol-partikelopsamleren ved alle sprøjtninger undtagen den første. Der var problemer med inddampningen i forbindelse med fluoresceinanalyserne af filtrene fra den sidste sprøjtning, og det blev besluttet at udelade disse resultater i dataanalysen. Resultaterne er vist i Figur 2.9. ChemVol-opsamleren opsamler de dråber/partikler, der er mindre end ca. 20 µm. Målingen er en punktmåling og må derfor forventes at have en stor variation pga. sprøjtetågens turbulensafhængighed. På Figur 2.9 ses, at størrelsesfraktionen 1-10 µm indeholdt den største mængde fluorescein for alle spor og forsøg. I ekstrasforsøget (med sprøjtning 10 gange i 3. spor) var denne tendens også tydelig, hvilket underbygger de øvrige forsøg.



Figur 2.9. Resultater fra analyse af fluorescein i dråber opsamlet med ChemVol i forskellige størrelsesfraktioner angivet i mikrometer for forsøgss dagene 19. maj, 9. juni og 30. august 2005. Ved sprøjtningen 30. august blev der gennemført et ekstra forsøg hvor der blev sprøjtet 10 gange i 3. spor (24 m fra hegnet) under kontinuert opsamling. For sammenligning er resultaterne divideret med 10 i figuren.

3 Model for afdrift

3.1 Introduktion

Når en dråbe forlader en dyse på en sprøjtebom, begynder den straks at fordampe og blive mindre under transporten mod overfladen. Store dråber vil umiddelbart falde til jorden (afsættes) uden nævneværdig ændring af størrelse; men jo mindre dråben er, jo større er sandsynligheden for, at dråben 'fanges' af (middel-)vinden og turbulente hvirvler, hvilket betyder at opholdstiden i luften forøges betydeligt, og at dråben begynder at mindske og dermed også mindske faldhastighed. Til bestemmelse af denne afdrift er der i projektet udviklet en afdriftsmodel.

Det generelle princip i den udviklede afdriftsmodel bygger på sammenbygningen af en dråbemodel og en spredningsmodel. Dråbemodellen beskriver, som det centrale, en dråbes størrelse og faldhastighed, som er afgørende for afsætningshastigheden til (jord-)overfladen. Spredningsmodellen beskriver spredning, fortynding og deposition (den vandrette afsætning) af en udsendt 'sky' af dråber.

Den udviklede afdriftsmodel tager udgangspunkt i en dråbestørrelsesfordeling bestemt af tabelværdier for den anvendte dyse samt den udsprøjtede mængde væske og herbicid pr. arealenhed. Den andel, der ikke umiddelbart afsættes, men føres videre med vinden, betegnes "initiel afdrift" og er omtrent proportional med vindhastigheden. Dråbestørrelsesfordelingen er i modellen repræsenteret ved et endeligt antal diameterintervaller à 10 μm , hvor egenskaberne for en dråbe med den centrale værdi beskriver hele intervallet. Beregningen foregår for et sprøjtespor ad gangen, og bidrag fra et givet antal spor adderes.

For et sprøjtespor beregnes fordampning og deposition på (jord-)overfladen i skridt henover små arealelementer nedstrøms for sporet. Ved hvert skridt beregnes dråbernes nye diameter (efter fordampning) og nye faldhastighed, som bestemmer afsætningshastigheden til (jord-)overfladen. Princippet er skitseret i Figur 3.5 og 3.6.

I det følgende beskrives dråbe- og spredningsmodellen hver for sig, koblingen af modellerne, kalibreringen af den samlede model mod målinger samt resultater af nogle scenarieberegninger.

3.2 Dråbemodel

Dråbemodellen beskriver udviklingen af en dråbes størrelse og faldhastighed, efter den har forladt en dyse. Modellen tager hensyn til udgangshastigheden på dysen, luftens fugtighed og temperatur. Modellen tager også hensyn til, at dråberne indeholder opløste stoffer som fx metsulfuron eller farvestoffet natriumfluorescein; men ikke eventuelle hjælpestoffer.

Dråbemodellen tager ikke hensyn til interaktionen mellem dråber og er i den større modelsammenhæng anvendt til at beskrive den tidslige udvikling af

dråbediameteren efter en empirisk bestemmelse af den initiale afdrift, hvor dråberne kun har minimal interaktion.

Dråbers fald mod jorden styres af påvirkningen fra tyngdekraften, luftmodstanden samt fordampningen af vand. Faldet og fordampningen beskrives gennem løsning af masse-, moment-, og energi-ligningerne for en enkelt dråbe (Appendiks 6), hvor det antages at dråbens opførsel ikke er påvirket af de andre dråber i dråbeskyen. Det antages også at der kan ses bort fra dråbens indflydelse på den omgivende lufts temperatur og fugtighed.

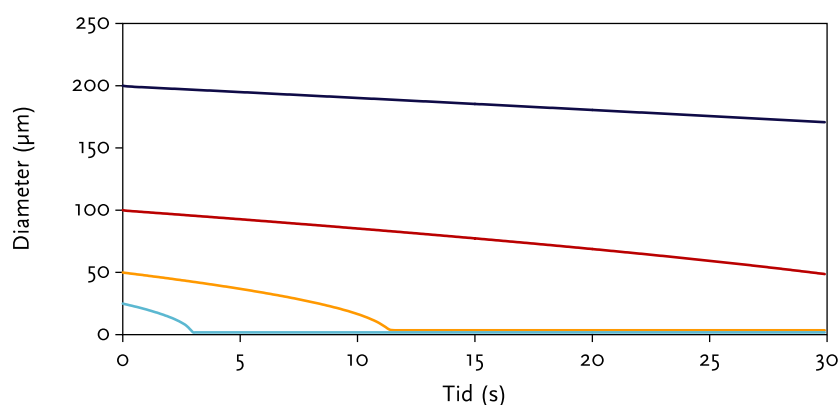
Modellens evne til at beskrive dråbers fordampning og faldhastighed er blevet testet ved sammenligning med eksperimentelle data fra litteraturen og andre modeldata.

Hvis dråberne opholder sig tilstrækkelig lang tid i luften, vil de til sidst fordampe til en mindste størrelse, hvor det opløste stof 'holder' på det sidste vand. Slutdiameteren afhænger af startkoncentrationen af det opløste stof. For natriumfluorescein og metsulfuron er slutdiameterne vist i Tabel 3.1.

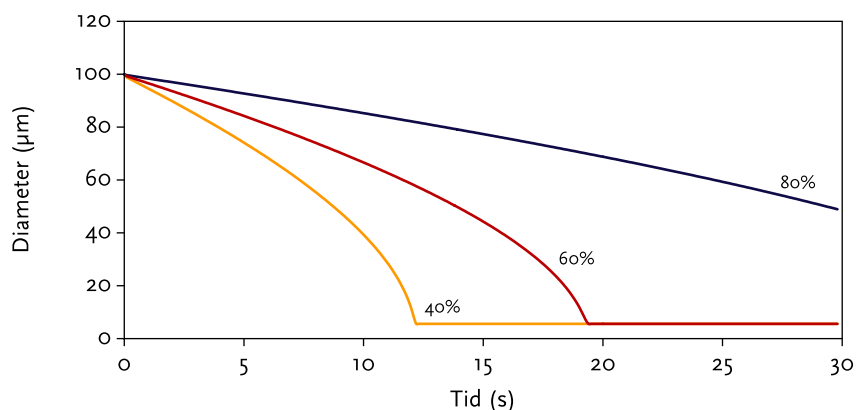
Tabel 3.1. Mindste/slutdråbediameter (μm) for startkoncentration af natriumfluorescein på 1,83 g/L hhv. metsulfuron på 0,0133 g/L.

Startdiameter	Slutdiameter, natriumfluorescein	Slutdiameter, metsulfuron
1	0,06	0,01
50	2,8	0,54
100	5,6	1,1
200	11,2	2,2

Både en dråbes begyndelsesdiameter og luftens fugtighed er af afgørende betydning for, hvor hurtigt diameteren mindskes under faldet. I Figur 3.1 og 3.2 er vist udviklingen af dråbestørrelsen som funktion af begyndelsesdiameteren hhv. fugtigheden. Det ses, at det er de mindste dråber, som fordamper relativt hurtigt, og at lav luftfugtighed medfører en stor fordampningshastighed.

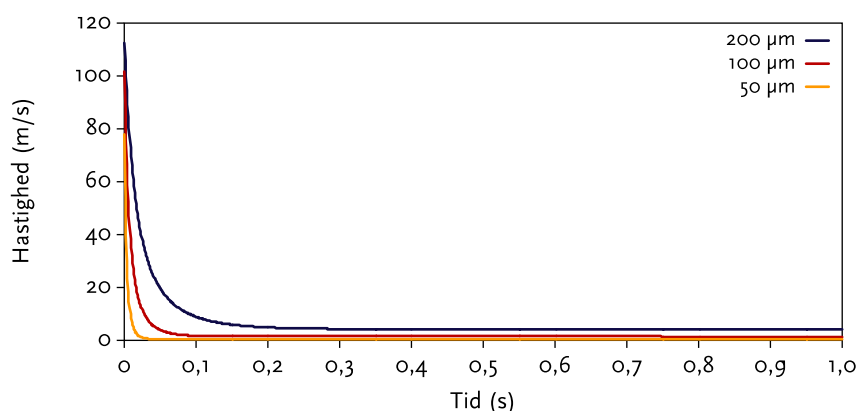


Figur 3.1. Tidslig udvikling af dråbestørrelser for forskellige begyndelsesdråbestørrelser ved en temperatur på 20°C, en relativ luftfugtighed på 80 % og starthastighed på 20 m/s. Dråberne når en mindstediameter, som er bestemt af den initiale stofkoncentration i dråben (Tabel 3.1).



Figur 3.2. Tidslig udvikling af størrelsen af en dråbe på 100 µm for forskellige relative luftfugtigheder ved en temperatur på 20°C og en starthastighed på 20 m/s. Dråben når en mindstediameter, som er bestemt af den initielle stof-koncentration i dråben (Tabel 3.1).

Den tidslige udvikling af den vertikale faldhastighed af dråber efter udsendelse fra en dyse med 20 m/s fremgår af Figur 3.3 og er vist for dråber med forskellig begyndelsesdråbestørrelse. Det ses, at dråber under 100 µm nedbremses til en lav sluthastighed i løbet af mindre end 0,1 sek.. Dette gælder dog kun for en enkelt dråbe. Når en hel sky af dråber udsendes fra en dyse, vil luften omkring dråberne også sættes i bevægelse, og nedbremsningen vil tage lidt længere tid. Sluthastigheden for 50, 100 og 200 µm dråber er 0,071, 0,25 hhv. 0,71 m/s.



Figur 3.3. Den tidslige udvikling af den vertikale hastighed for forskellige begyndelsesdråbestørrelser. Begyndeshastighed fra dysen er 20 m/s, temperaturen er 20°C og den relative luftfugtighed er 80 %. Efter kort tid vil dråbens vertikale hastighed antage en konstant sluthastighed.

3.3 Model for spredning og deposition

3.3.1 Valg af spredningsmodel

CFD-modeller (Computational Fluid Dynamics models) og Gaussiske røgfanemodeller anvendes i almindelighed til spredningsberegninger uden deposition (vandret afsætning) eller omdannelse. I sådanne modeller kræver en tilføjelse af yderligere processer, som fx deposition og dråbefordampning, et ind-

gående kendskab til modelkoden og de simulerede processer. Mange modeller er kommercielle, hvor brugeren ikke har mulighed for at ændre i modelkoden.

CFD-modeller er generelt tilpasset/valideret for neutrale atmosfæriske turbulensforhold (forholdsvis meget vind og beskeden solindstråling/overskyet) og til dels for stabile forhold (nat). Ustabile forhold (dagtimer med sol) er vanskeligere at modellere. CFD-modeller er i stand til at simulere strømninger omkring/gennem delvist gennemtrængelige forhindringer (læhegn). Modellerne kræver ofte tilpasning til den konkrete meteorologiske situation gennem sammenligning med rumligt detaljerede meteorologiske målinger på lokaliteten. Resultaterne er meget følsomme over for de anvendte 'setup'-betingelser i modellen, dvs. brugerens valg af fx tætheden i det rumlige beregningsgitter, hvori strømningsligningerne løses, og den indkommende vindprofil. Dette kan vanskeliggøre ekstrapolation til andre forhold.

Røgfanemodeller er udviklet til at håndtere alle normalt forekommende meteorologiske forhold, men ikke meget lokale turbulensforhold omkring fx læhegn. Et læhegn vil på luv side have tendens til mest at bremse vinden og i ringere grad ændre på turbulensen, men på læsiden vil turbulensen selvfølgelig være forøget betydeligt. Ved meget gennemtrængelige læhegn vurderes denne mangel at være af mindre betydning i forbindelse med anvendelse af røgfanemodeller, idet påvirkningen vil være størst efter læhegnet. I nærværende projekt skal dette også ses i forhold til andre måleusikkerheder i projektet.

DMU/ATMI har udviklet røgfanemodellen OML samt en version til håndtering af deposition, OML-DEP, og har derfor en fuldstændig indsigt i modelkoden og de simulerede processer.

På denne baggrund er derfor valgt at anvende OML-DEP som udgangspunkt for den del af modellen, som beskriver spredning og deposition af sprøjtemiddelafdriften, og heri implementere et dråbemodul, som beskriver fordampning og faldhastigheder af dråber.

3.3.2 OML-DEP beskrivelse

OML-DEP modellen er en såkaldt Gaussisk røgfanemodell, hvori der er indbygget metoder til at beregne depositionen. Den er baseret på den atmosfæriske spredningsmodel OML (Olesen et al., 2007), som beregner spredningen (uden deposition) fra multiple punkt- og flade-/arealkilder. OML er udviklet af DMU. I modsætning til ældre modeller, som beskriver atmosfærens turbulensstilstand ved 7 diskrete klasser af turbulensstilstande, hører OML til gruppen af nye spredningsmodeller, hvor turbulensen er beskrevet ved kontinuerlige, mikrometeorologiske parametre som bl.a. friktionshastighed og varmeffluks fra jordoverfladen. Modellen anvendes af danske myndigheder i forbindelse med miljøgodkendelser af luftforurenende virksomheder og landbrug.

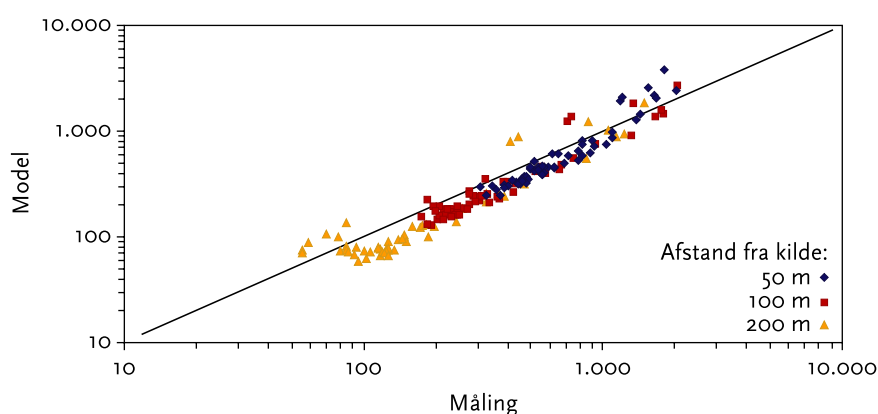
At modellen er Gaussisk, betyder, at for punktkilder følger den vertikale og horisontale spredning/koncentrationsfordeling en Gaussisk (normal)fordeling. For en punktkilde placeret i (0,0,0) beregnes koncentrationen c i et punkt (x,y,z) i princippet efter følgende formel:

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_z \sigma_y} \exp(-0.5(\frac{z-H}{\sigma_z})^2) \exp(-0.5(\frac{y}{\sigma_y})^2) + \text{refleksionsled}$$

hvor Q er kildens emissionsrate (g/s), u er vindhastigheden, H er kildens højde, σ_y og σ_z er den horisontale hhv. vertikale spredningsparameter. Refleksionsled refererer til refleksion fra jordoverfladen af det emitterede stof. For fladekilder bliver den horisontale spredning integreret (analytisk og numerisk) over arealet, hvilket medfører, at for aflange arealer (sprøjtespor) reduceres betydningen af den horisontale spredning væsentligt.

OML-modellen er tidligere blevet valideret på mange forskellige spredningsforsøg (Olesen et al., 2007). Et relevant eksempel på en evaluering er vist i Figur 3.4 for et stort spredningsforsøg i USA, hvor der blev udsendt svovldioxid fra en lav (0,5 m) kilde og målt koncentrationer i 1,5 m højde på tværs af fanen i flere afstande. Koncentrationerne er normerede tværvindskoncentrationer, hvilket vil sige, at koncentrationen er integreret på tværs af fanen og normeret med emissionen. Det betyder, at den horisontale spredning ikke indgår i sammenligningen.

Disse måledata er meget benyttet og er anvendt til udvikling og validering af stort set alle anerkendte spredningsmodeller. Det ses, at modellen undervurderer koncentrationen med 15-30 %, mest for store afstande. For disse data konstateres samme fænomen også for andre modeller. Modellen er ikke korrigeret for denne bias, idet modellen ikke har denne bias for andre typer kilder.



Figur 3.4. Sammenligning af målt og modelleret tværvindskoncentration i forskellige afstande. Målinger er fra et spredningsforsøg i USA fra en 0,5 m høj kilde. Tværvindskoncentrationen er normeret med kildestyrken.

Depositionen indgår i OML-DEP ved det såkaldte 'surface depletion'-princip (Horst 1977). Det betyder, at depositionen fra en kilde i en given afstand - længere nedstrøms - indgår som en negativ kilde med samme styrke som depositionsraten. I modellen betyder det i praksis, at beregningsdomænet opdeles i 40×40 arealelementer, hvortil depositionen (den negative emission) sker. En mere simpel metode er 'source depletion', som i stedet for negative fladekilder fratrækker depositionsraten fra kildes emission. Dette giver fejlagtige resultater, og specielt vil den vertikale profil af koncentrationen ved jorden blive forkert, idet 'svinget' i profilet ved jorden, som fx ses i Figur 2.8, ikke kan reproducere.

3.3.3 Deposition

Beregningen af afsætningen til vandrette flader (fx jordoverfladen) – depositionen - udføres med sædvanlige metoder. Depositionsraten, Dep , er proportional med depositions hastigheden, v_d , og koncentrationen, c :

$$Dep = v_d(z) \cdot c(z)$$

hvor z er referencehøjden. Da beregningerne her er udført på meget små horizontale skalaer er z sat til 0,5 m.

Depositionshastigheden er bestemt ved den såkaldte resistansmetode baseret på en analogi til elektrisk modstand. Tørdepositionshastigheden for partikler/dråber er givet ved (Seinfeld & Panis, 1998):

$$v_d = \frac{1}{r_a + r_b + r_a \cdot r_b \cdot v_s} + v_s$$

hvor v_s er faldhastigheden af dråben, som er en funktion af diameteren, r_a er den aerodynamiske modstand, og r_b er den quasi-laminære overflademodstand.

Den aerodynamiske modstand mod turbulent transport i grænselaget:

$$r_a = \frac{1}{\kappa \cdot u_*} \log\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

hvor κ er den dimensionsløse von Karman's konstant ($\approx 0,35$), u_* (m/s) er friktionshastigheden og z_0 (m) er den mekaniske ruhedslængde.

For partikler er den quasi-laminære modstand for det meget tynde luftlag (millimeter) ved overfladen givet ved:

$$r_b = \frac{1}{u_* \left(Sc^{-2/3} + 10^{-3/St} \right)}$$

hvor Sc er det dimensionsløse Schmidttal:

$$Sc = \frac{\nu}{D}$$

hvor D er den molekylære diffusivitet af gas i luft, og ν er den kinematiske viskositet, og hvor St er det dimensionsløse Stoketal:

$$St = \frac{u_*^2 \cdot v_s}{g \cdot \nu}$$

hvor g er tyngdeaccelerationen (m/s^2). Dråbernes faldhastighed indgår her som den del af Stoketallet.

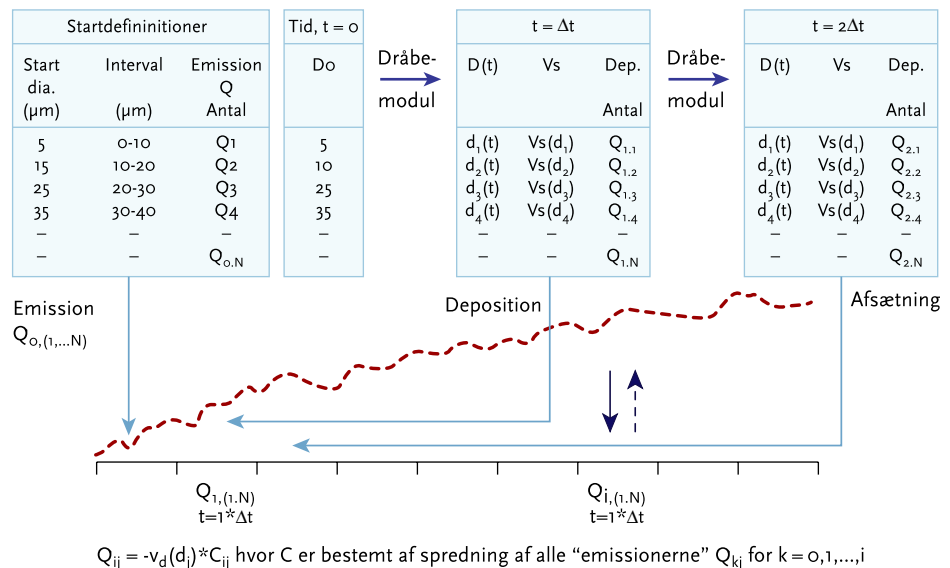
3.3.4 Yderligere tilpasninger

Da de største dråber har en meget stor faldhastighed og dermed en stor depositionshastighed, har det været nødvendigt at justere OML-DEP-modellens beregningen af depositionen, idet der ellers kunne ske en større deposition, end der er stof til rådighed. Derfor er depositionen beregnet implicit, dvs. der tages hensyn til at depositionens størrelse i et arealelement påvirker koncentrationen i arealelementet, som igen påvirker depositionen.

Generelt vil dråber med en større faldhastighed end den hastighed, hvormed sprøjtefanen bevæger sig i vertikal retning, afsættes umiddelbart, og der vil antages at der ikke vil være afdrift for sådanne dråber efter første sprøjtefri arealelement. Modellens afsætningsberegninger er dermed mindre præcis for store ($>200\text{--}250\text{ }\mu\text{m}$) dråber.

3.4 Kobling af dråbe- og spredningsmodel

Spredningsmodellen OML-DEP kan som nævnt umiddelbart håndtere spredning og deposition af en dråbe, som har en konstant faldhastighed. Når en dråbe under transporten med vinden ændrer diameter, vil depositionshastigheden også ændres. Det tager afdriftsmodellen hensyn til ved at koble dråbemodelen på som et modul i spredningsmodellen. Spredningsmodellen beregner spredningen af afdriftsfanen i trin væk fra sprøjtezone, og for hvert trin anvendes dråbemodelen til at beregne en aktuel dråbestørrelse og faldhastighed på basis af transporttiden, inden depositionshastigheden og dermed depositionen beregnes. Dette princip anvendes for en hel række dråber med forskellig startdiameter. Princippet er skitseret i Figur 3.5.

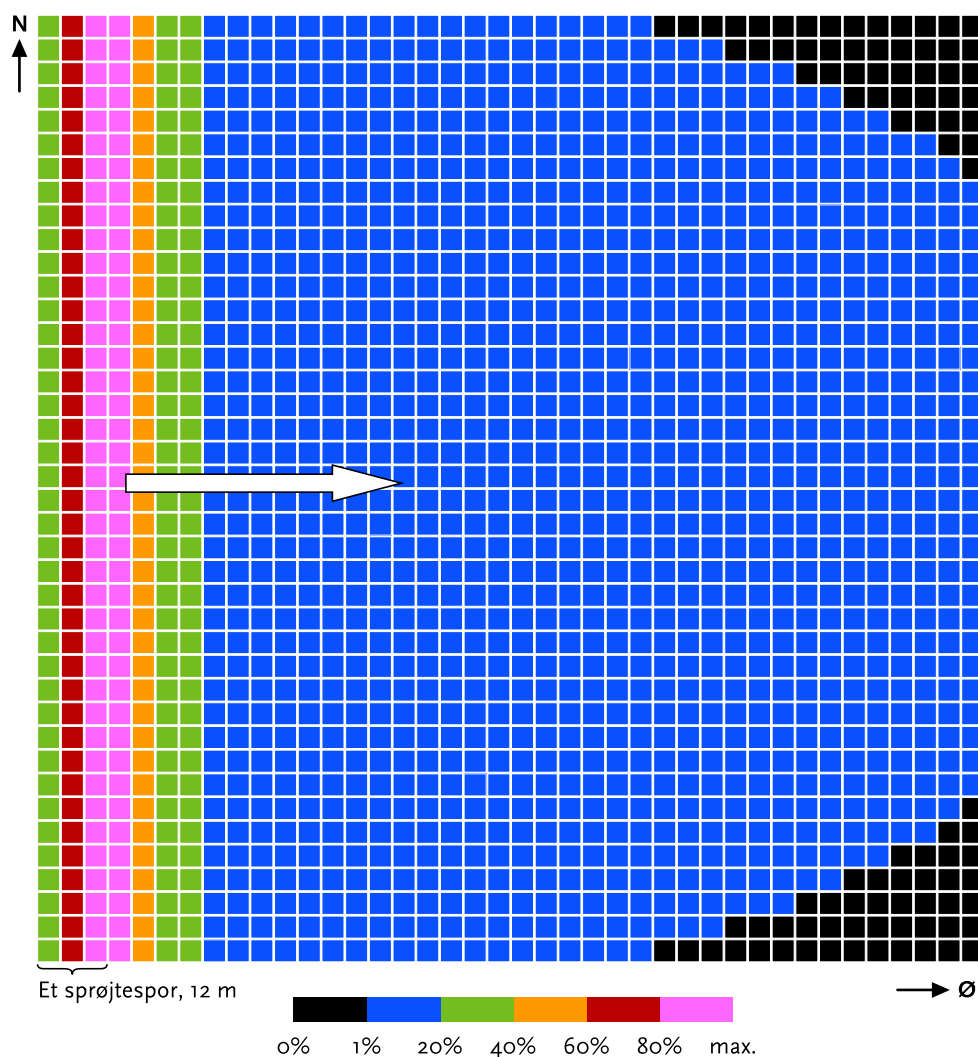


Figur 3.5. Skematisk fremstilling af afdriftmodellen, som sammenkobler dråbemodelen og sprednings- og depositionsmodellen OML-DEP. For en vind fra venstre mod højre bevæger modellen sig i trin (Δt) væk fra sprøjtesporet med en emission $Q_{0,1..N}$, hvor indeks 0 refererer til arealet inkluderet i første trin og 1..N til klasser for initiale dråbestørrelser, D_0 . I næste trin væk fra sprøjtesporet er der forløbet en tid t . Med dråbemodelen beregnes for hver initiale dråbestørrelse en ny diameter $d_i(t)$, som har indflydelse på depositionshastigheden. Spredningsmodellen bestemmer derefter fortyndingen og en deposition (afsætning til vandret flade), $Q_{1,1..N}$, i dette trin. Denne deposition fratrækkes derefter den tilgængelige stofmængde i den videre beregning længere væk fra sprøjtesporet. v_s er faldhastigheden af dråber og v_d er depositionshastigheden, hvor begge er funktion af diameteren d .

Afdriftsmodellen regner i et såkaldt domæne på 40×40 arealelementer (enheder) à $4 \times 4\text{ m}^2$. Domænet dækker således $160 \times 160\text{ m}^2$, hvor der de yderste 40×3 arealelementer repræsenterer et sprøjtespor. Den største afstand fra et sprøjtespor, hvori der kan beregnes deposition, er således 37 arealelementer, dvs. 148 m. I Figur 3.6 er vist et principielt eksempel på beregnede koncentrationer af stof 0,5 m over jorden, hvor vindretningen er fra venstre mod højre (vestlig

vind). Afdriften sker fra de 3 vestligste rækker af arealelementer. I den videre behandling af resultaterne anvendes kun data fra positioner på en øst-vest-linje midt i domænet.

Afdriftsmodellen kan herved bestemme en koncentration af en given dråbestørrelse i en vilkårlig afstand til sprøjtesporet og i vilkårlig højde over jorden. Hver dråbe har fra starten den samme koncentration uanset størrelsen, og dermed et givet stofindhold. Selv om dråberne bliver mindre under transporten, vil de stadig indeholde den samme stofmængde som ved start, idet de anvendte stoffer har meget lavt damptryk. Derfor kan modellen i et givet punkt beregne den samlede stofmængde pr. m^3 (eventuelt for et interval af størrelser) ved at summere over dråbestørrelsernes stofmængde og deres antal.



Figur 3.6. Et eksempel på afdriftsmodellens beregningsdomæne (samling af arealelementer $4 \times 4 \text{ m}^2$), hvori beregning af deposition til 'jord'-overfladen og koncentrationer i luften foretages. Domænet dækker $160 \text{ m} \times 160 \text{ m}$. Vindretningen er fra venstre mod højre (vestlig vind). Der er emission fra ét sprøjtespor, som dækker de 3 vestligste rækker af arealelementer. Farverne i arealelementerne angiver luftkoncentrationen af stof beregnet 0,5 m over jorden. Farveskalaen i bunden af figuren viser koncentrationen i relative enheder. Koncentrationen er størst ved lækanten af sprøjtesporet og aftager hurtigt med afstanden fra sporet på grund af fortynding og deposition til overfladen. Der anvendes kun data fra positioner på en øst-vest-linje midt i domænet, hvor effekter fra den nordlige og sydlige rand ikke har indvirkning.

3.4.1 Sammenhæng mellem sprøjtning i spor og stationære modelkoncentrationer

Afdriftsmodellen er en stationær model. Det vil sige, at den forudsætter en konstant emissionsrate fra en stationær kilde, og modellen beregner umiddelbart koncentrationer (g/m^3). Et sprøjtespor genereres af en ikke-stationær kilde med konstant emissionsrate, som giver anledning til en dosis i en vertikal flade (g/m^2). Sammenhængen mellem disse to 'forskellige' situationer er beskrevet herunder.

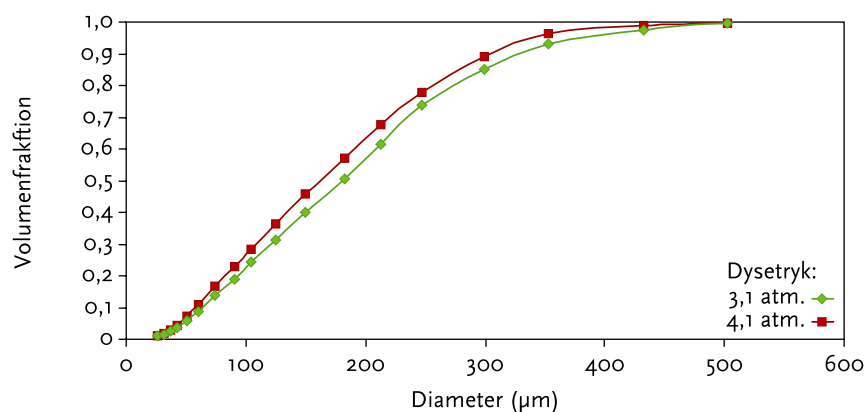
Når et spor er blevet sprøjtet, er der tilført en bestemt stofmængde pr. areal, fx $Q \text{ g/m}^2$. I afdriftsmodellen antages denne mængde at tilføres på én gang over hele sporets længde. Dette udgør ingen approksimation til de faktiske forhold, idet et spredningsforsøg udført på disse to måder heller ikke ville give forskelle i målte stofmængder. Tilførslen antages at ske i løbet af tiden t (s), dvs. emissionsraten bliver $Q/t \text{ g/s/m}^2$. Når der skal beregnes en dosis i et vertikalt areal nedstrøms for sporet, 'udtager' man en tilsvarende fluks over tiden t i den kontinuerte og stationære modelbane fra sporet. Dosis er da lig den samlede fluks, som modtages fra sprøjtning over tiden t .

Dosis bliver $c(z) \cdot u(z) \cdot t \text{ (g/m}^2\text{)}$, hvor c er koncentrationen (g/m^3) og u er vindhastigheden (m/s). Heraf ses, at størrelsen af t ikke har betydning for dosen, idet $c(z)$ er proportional med emissionsraten, Q/t . Dermed har traktorens hastighed heller ikke nogen direkte betydning for beregningen, men indgår selvfølgelig indirekte, idet Q er bestemt som $q_{\text{dys}}/(12 m u_T)$, hvor q_{dys} er den samlede emissionsrate fra alle dyser (g/s), $12 m$ er bommens bredde og u_T er traktorens hastighed (m/s).

3.5 Kalibrering og parameterværdier

I løbet af de 5 forsøgsdage varierede nogle af parametrene for sprøjtningerne (Tabel 2.1). Dråbestørrelserne for de 2 første forsøgsdage er simuleret med fordelingen fra dysen XR11002 ved 4,1 atm og de 3 sidste dage med et tryk på 3,1 atm (Figur 3.7), idet vi ikke havde adgang til tilsvarende data for den anvendte dysetype. Ved de to første sprøjtninger var dysetrykket 5,5 atm. Idet der ikke findes dråbestørrelsesdata for dette tryk, anvendte vi i stedet data for 4,1 atm tryk. Fordelingerne af dråbestørrelser er aflæst fra kurver i Klein & Golus (2004). I afdriftsmodellen opdeles antallet af dråber i diameterintervaller af $10 \mu\text{m}$ for intervallerne centerværdier for diameterne er 35, 45, 55,..., $495 \mu\text{m}$. Der antages således ingen emission af dråber mindre end $30 \mu\text{m}$ fra en dyse, og det antages at eventuelle dråber større end $500 \mu\text{m}$ umiddelbart afsættes på overfladen.

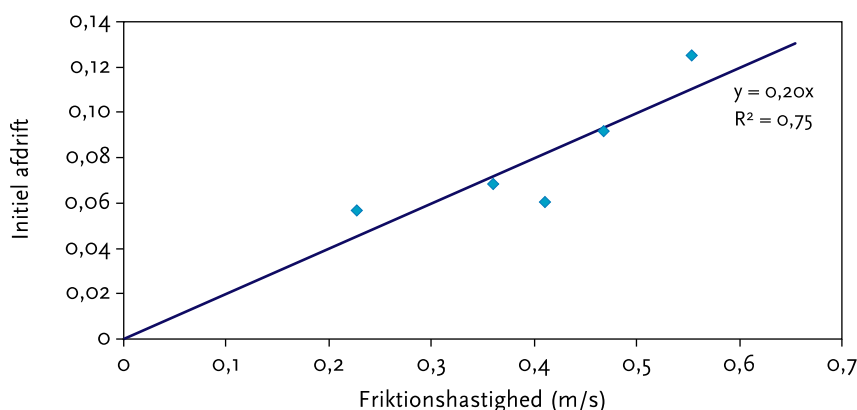
Modellen har kun én 'fri' parameter, som skal kalibreres, nemlig den initiale afdrift af dråber, som her forstås som afdriften fra den enkelte dyse. Da dråber fra den initiale afdrift fra vindsiden af sprøjtebommen delvist afsættes inde i sporet, er den initiale afdrift altså forskellig fra (og større end) den 'sædvanlige' afdrift, der kan måles på læsiden af bommen.



Figur 3.7. De anvendte dråbestørrelsesfordelinger ved modelberegninger for forsøgsgene (Klein & Golus, 2004).

I første omgang er alle sprøjteforsøgene blevet gennemregnet med modellen under forudsætning af, at den initielle afdrift i alle forsøg er ens. Derefter er der for hver af de 5 forsøgsgene lavet grafer af modelberegnete doser mod målte doser på curlere. For hver dag er det bedste lineære fit bestemt. Korrelationen mellem model og måling var rimelig god; men hældningen af bedste-fit-linjerne varierede betydeligt (hældningen er i høj grad styret af de største doser, altså af målingerne nærmest sprøjtesporet). For hver forsøgsged blev den initielle afdrift, der gav en hældning tæt på 1, bestemt ved simpel proportionalitet.

Som det fremgår af Figur 3.8, viste den initielle afdrift sig at være godt korreleret med den meteorologiske parameter u_* (friktionshastigheden), som beskriver mængden af turbulens og er tilnærmelsesvis proportional med vindhastigheden, u_* (m/s) blev beregnet som gennemsnit over dagens 5 forsøgsperioder. Korrelationen mellem den initielle afdrift og vindhastigheden var dårligere end mellem den initielle afdrift og u_* . Den initielle afdrift i modellen blev herefter beskrevet som $0,2 \cdot u_*$. Da u_* groft regnet er ca. 1/10 af vindhastigheden i 10 m højde, så udtrykker relationen, at den initielle afdrift er ca. 2 % af den numeriske værdi af vindhastigheden i m/s – altså ved 1 m/s er den initielle afdrift ca. 2 %.

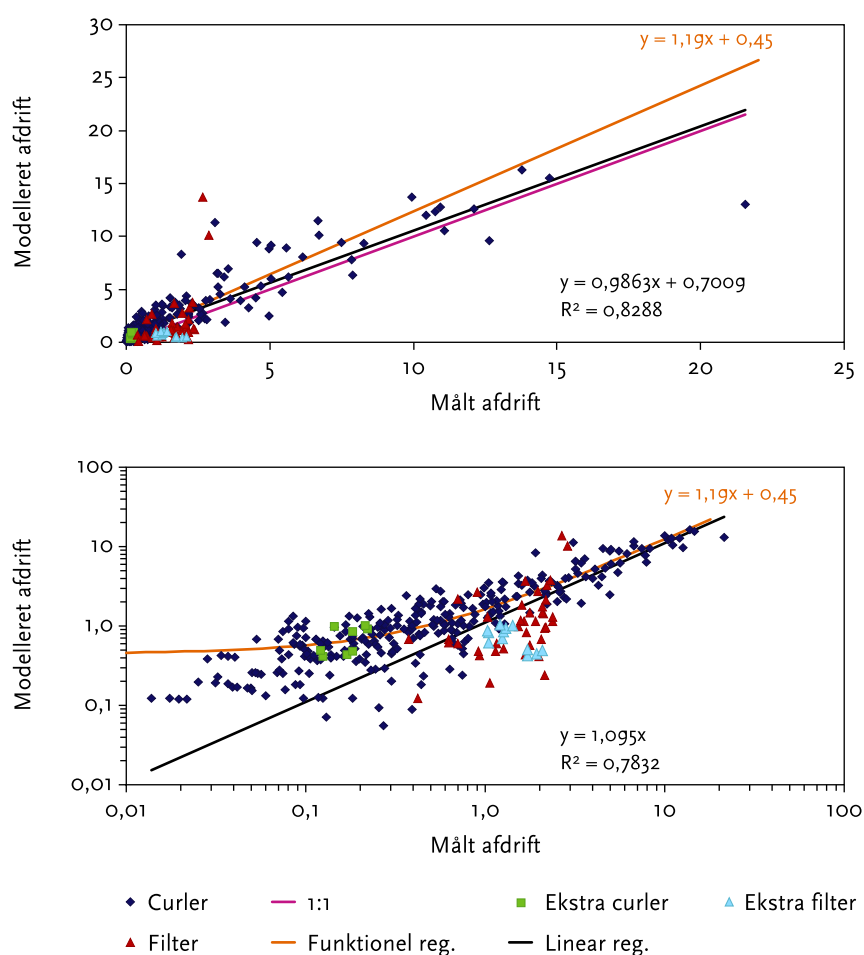


Figur 3.8. Den initielle afdrift for de 5 forsøgsgene som giver bedst korrelation mellem curler-målinger og model (punkter). I modellen er den initielle afdrift antaget beskrevet ved linjen. Initiel afdrift er defineret i teksten.

De komplicerede afdriftsforhold som følge af vindpåvirkningen pga. traktorens kørehastighed samt turbulensforholdene bag traktoren og i mindre grad bag sprøjtebommen er således indeholdt i den empiriske relation for initial afdrift. Det skal bemærkes, at den initiale afdrift i modellen er ens for alle dråbestørrelser, hvilket ikke er fysisk rimeligt. En mere variabel og realistisk initial afdrift vil kunne etableres i en senere modeludvikling.

3.6 Sammenligning med målinger

I Figur 3.9 er modelberegninger sammenlignet med målingerne beskrevet i kapitel 2. Alle dråbestørrelser indgår i modelberegningen. I beregningerne er der taget hensyn til, at vindretningen under de forskellige sprøjtninger har forskellig vinkel på hegnet. I forhold til en vinkelret vindretning kan afvigelsen være op til 42 grader. De anvendte meteorologiske data til beregningerne er vist i Appendiks 2. For at få pålidelige og stabile statistiske værdier af de mikrometeorologiske parametre er de beregnet som middel over 10 minutter for tidspunktet omkring sprøjtningen af de enkelte spor.

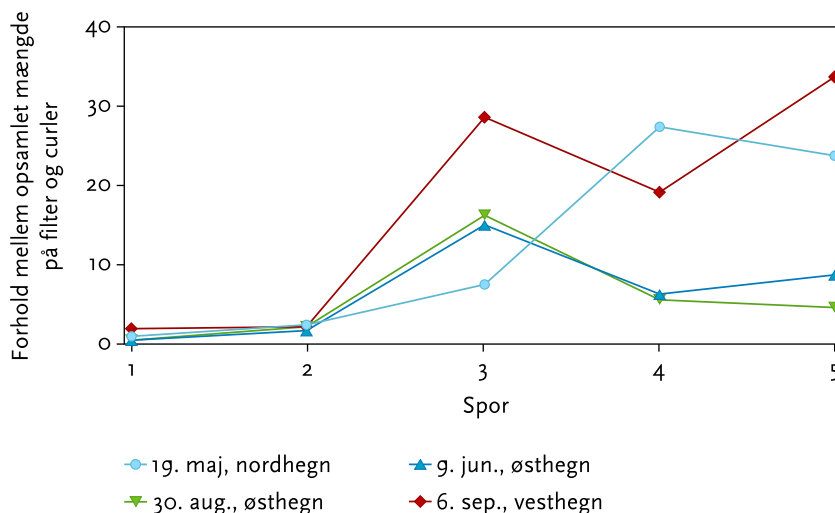


Figur 3.9. Sammenligning af målinger og beregninger med afdriftmodellen på lineær og logaritmisk skala. Alle dråbestørrelser indgår i modelberegningen. 'Ekstra' refererer til ekstrarforsøg på de 3 sidste forsøgsdage, hvor der blev sprøjtet 10 gange i 24-28 m afstand fra målere (3. spor). Regressionslinierne er for curlere. Linien for funktionel regression går gennem tyngdepunktet og har hældning $\text{varians}(\text{model})/\text{varians}(\text{måling})$. Enheden er μg natriumfluorescein /curler. Alle data er normeret til tankkoncentration på 1,63 g/l og en udsprøjtning af 200 l/ha.

Det skal bemærkes, at spredningen på alle typer af målinger ligger omkring 60 %. For målinger, der viser lavt indhold af stof, dvs. lave afdriftsværdier, beregner modellen større afdrift. Det kan skyldes, at de lave værdier er knyttet til større afstande fra sprøjtesporet og dermed situationer med længere tid til fordampning af dråber, som når at blive så små, at de ikke afsættes på curlerne, hvilket understøttes af nedenstående.

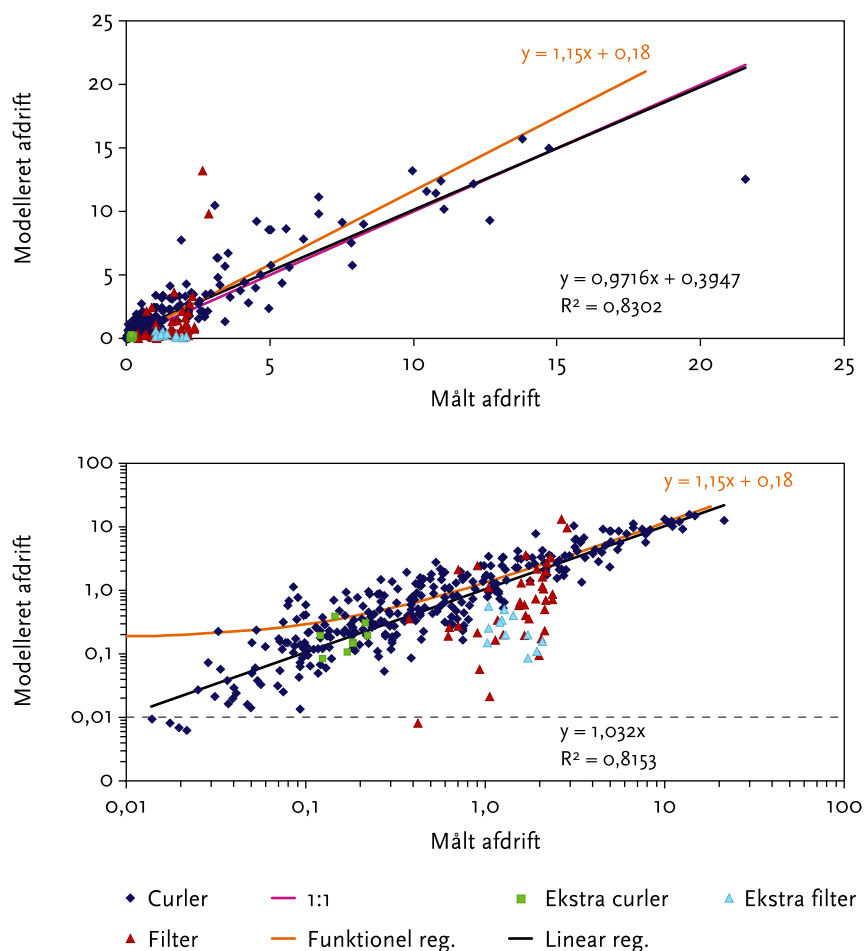
Figur 3.10 viser forholdet mellem den gennemsnitlige mængde af fluorescein, der blev opsamlet på sugefiltrene og curlerne i 2 m højde i hegnet, fordelt på de fem sprøjtespor. Resultaterne fra sugefiltrene er omregnet, således at de svarer til curlernes projicerede areal og den vindhastighed, som curlerne i gennemsnit er eksponeret ved. Alle målingerne er behæftet med stor variation, men det ses, at forholdet øges markant efter andet spor. Chemvol-partikelopsamlingerne tyder på, at mængden af stof mellem 10 og 20-25 μm er lille, uanset sprøjtespor (Figur 2.9), og det må formodes, at sugefiltrene derfor hovedsagelig repræsenterer stof med en størrelse under 10 μm . Da sugefiltrene viser betydeligt højere værdier end curlerne ved de fjernere liggende sprøjtespor, kunne dette bekræfte, at curlerne ikke opsamler dråber/partikler af så lille størrelse, idet der vil være relativt flest små dråber i stor afstand, hvor der er mest tid til fordampning. En sammenligning af vindhastighederne under spredningsforsøgene for de enkelte spor viser således også, at de laveste hastigheder for et givent spor korrelerer med de største forholdstal, altså svagere vind giver mere tid til at danne små dråber.

Dette støttes af sammenligningen i Figur 3.11, hvor målingerne er sammenlignet med modelberegninger for dråber større end 20 μm . Her er der god overensstemmelse mellem modelberegnet afdrift og afsætning på curlere. Dette indikerer, at emissionen/den initiale afdrift af små dråber underestimeres i modellen. Da den senere vurdering af effekter fra afdrift bygger på den empiriske relation mellem afsætning på curlere og blade, har vi derfor valgt hovedsagelig at modellere scenarier for afdrift af stof fra dråber større end 20 μm .

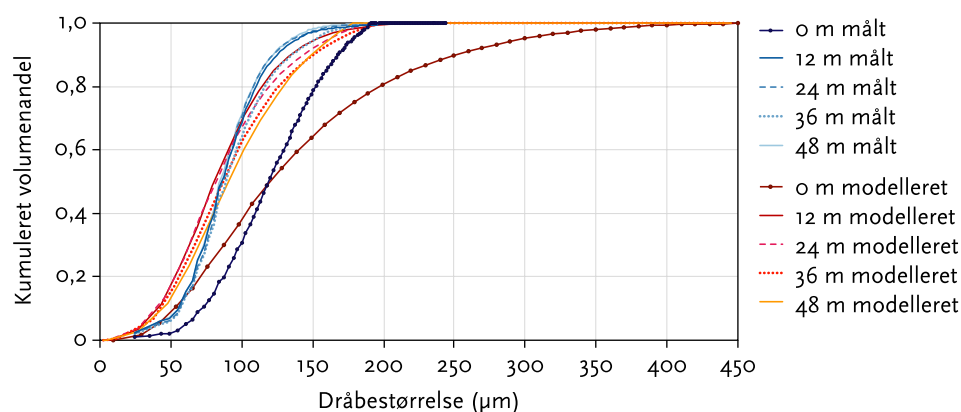


Figur 3.10. Forholdet mellem den fluorescein der blev opsamlet på sugefiltrene og curlerne i 2m højde i hegnet, fordelt efter sprøjtespor. Hvert sprøjtespor var 12 m bredt. Resultaterne fra sugefiltrene er omregnet, således at de tilsvarende curlernes projicerede areal og den vindhastighed, som curlerne i gennemsnit er eksponeret ved. Filterværdierne er gennemsnit af fire målinger, mens curlerværdierne er gennemsnit af ti. Alle opsamlingerne er behæftet med stor variation, og det er forholdstallet derfor også.

På trods af at vi ikke kunne fremskaffe data for den initiale dråbestørrelsesfordeling for den anvendte dyse og i stedet har anvendt tilsvarende data for dysen XR 11002, er der temmelig god overensstemmelse mellem den målte og den modellerede dråbestørrelsesfordeling i hegnet for alle sprøjtespor undtagen det nærmest hegnet (Figur 3.12). Årsagen til, at der er målt en større andel små dråber i spor 1, end modellen forudsiger, skal formentlig findes i det faktum, at der den 19. maj fejlagtigt blev sprøjtet med 5,5 atm dysetryk, mens modellen har regnet på 4,1 atm tryk. Der var ikke tilgængelige data for højere tryk, idet man normalt ikke vil sprøjte med et tryk højere end ca. 4 atm i denne type dyser.



Figur 3.11. Sammenligning af målinger og beregninger med afdriftmodellen på lineær og logaritmisk skala. Kun dråber større end 20 μm indgår i modelberegningen. (Se også tekst til Figur 3.9.)



Figur 3.12. Målte og modellerede dråbestørrelsesfordelinger i ½ m højde i hegnet ved sprøjtning i forskellig afstand fra hegnet den 19. maj.

3.7 Beregningseksempler på afdrift til hegn

Ved vurdering af afsætningen af sprøjtemiddel i læhegn i forhold til påvirkningen på børsætningen har forskellige parametre betydning. Idet børsætningen relaterer sig til bestemte højder i læhegnene, får denne parameter betydning. Sprøjtetågen udsendes i lav højde (i nærværende forsøg 0,5 m), og dens videre forløb afhænger af de meteorologiske forhold, både med hensyn til dråbernes størrelse og dermed deposition til marken inden læhegnet og selve spredningen med turbulensen. Spredningen tager tid (sekunder), og det betyder, at der er en betydelig variation over højden, når man er tæt på kilden (sprøjten). Jo længere væk kilden er, jo mere vil tågen fordele sig over højden. I forhold til læhegnet betyder det, at sprøjtesporet tæt på hegnet har størst indflydelse i lavere højder, mens sprøjtespor længere væk i højere og højere grad vil påvirke læhegnet over hele højden, men samtidig vil mængden af stof reduceres, både pga. fortynding og fordi mere stof kan nå at afsættes til marken.

Som nævnt i introduktionen til dette kapitel, vil en dråbe, der forlader en dyse på en sprøjtebom, straks begynde at fordampe, men graden af fordampning er afhængig af dråbens størrelse. Store dråber vil umiddelbart falde til jorden uden nævneværdig ændring af størrelse. Er dråben mindre, øges sandsynligheden for, at dråben 'fanges' af turbulente hvirvler i luften. Dette øger dråbens opholdstid i luften betydeligt, og den kan dermed transporteres længere. Dråbernes fordampning er afhængig af luftens relative fugtighed og temperatur samt transport med turbulensen, der har en afhængighed til vindhastigheden. Meteorologiske forhold har derfor en indflydelse på sprøjtetågens "levetid" og spredning. Selve dysen og det tryk, der sprøjtes med, har indflydelse på fordelingen af dråbestørrelserne, og dette får således også en indflydelse på sprøjte-tågens videre forløb i forhold til deposition i marken samt fordampning.

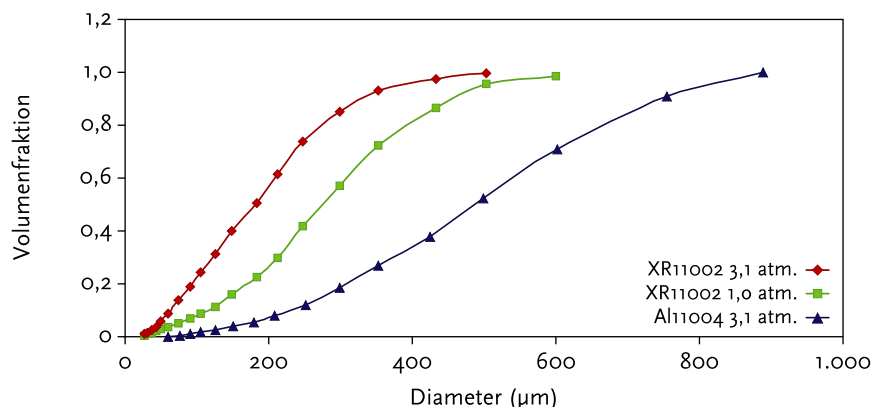
3.7.1 Valg af parametre for dyser og meteorologi til modelberegninger

For at kunne belyse betydningen af meteorologiske forhold, sprøjtefrie randzoner og valg af sprøjteudstyr/-indstillinger har vi valgt et sæt af parametre til brug for modelberegningerne. Disse parametre er beskrevet nedenfor.

3.7.1.1 Valg af dyser og dysetryk

Betydningen af dyser er illustreret med scenarieberegninger for 2 typer af dyser: XR11002 og AI11004 ved 3,1 atm. tryk og udsprøjtning af 300 l/ha samt

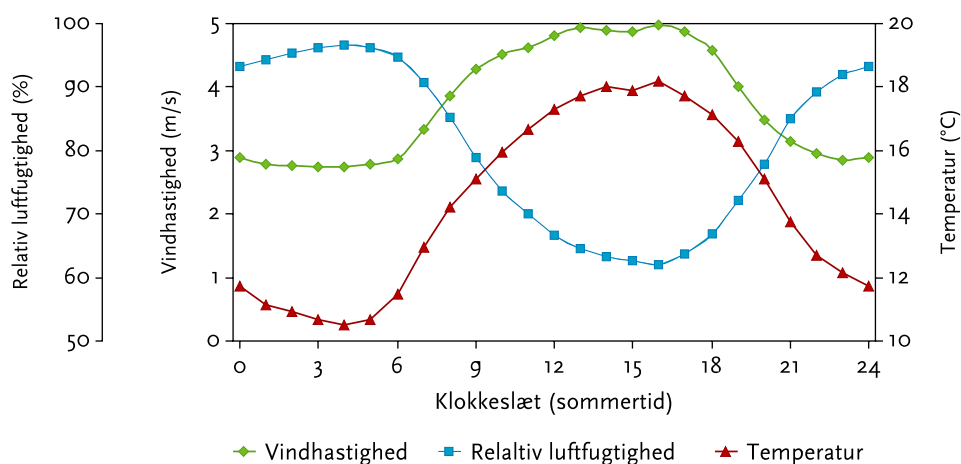
XR11002 ved 1,0 atm. tryk og 300 l/ha. De initiale dråbestørrelsesfordelingerne for de tre situationer fremgår af Figur. 3.13, hvor fordelingen er taget fra data i Klein & Golus (2004).



Figur 3.13. De anvendte dråbestørrelsesfordelinger ved modelberegninger for de 3 scenarier (dysetyper og -tryk). Fordelingen er taget efter data i Klein & Golus (2004).

3.7.1.2 Valg af meteorologiske betingelser

Der er i princippet uendelig mange forskellige meteorologiske scenarier, for hvilke der kunne foretages beregninger. Vi har her valgt at beregne for tre typiske situationer, som forekommer i løbet af en sommer-/sprøjtesæson. I Figur 3.14 er vist den gennemsnitlige døgnvariation af 3 meteorologiske parametre, som er vigtige for graden af afdrift, nemlig luftfugtighed, vindhastighed og temperatur. Data er beregnet som gennemsnit for de 4 måneder maj til august for en lokalitet ved Ringsted i 2005. Forløbet og niveauerne af parametrene er som forventet. Der er foretaget beregninger for 3 klokkeslæt (kl. 6, 11 og 16) inden for den del af døgnet, hvor der kan forventes at blive sprøjtet. Kl. 6 repræsenterer forhold med forventet mindst afdrift, kl. 16 forventes størst afdrift, og kl. 11 repræsenterer gennemsnitlige forhold for dagtimerne. Centrale meteorologiske parametre er vist i Tabel 3.2. Den aerodynamiske ruhed er 0,1 m.



Figur 3.14. Meteorologiske parametres gennemsnitlige variation over en sommerdag. Forholdene kl. 6, 11 og 16 er anvendt ved scenarieberegninger.

Tabel 3.2. Centrale meteorologiske parametre brugt i scenarieberegningerne.

Klokkeslæt (sommertid)	Vindhast, (m/s)	Rel, fugtighed	Temp, (C)	u, (m/s)	Varmeflukt, (W/m ²)	w, (m/s)	Monin- Obukhov længde (m)
6	2,9	94,7	11,5	0,207	-3,4	0,000	269,1
11	4,6	70,1	16,7	0,415	102,2	0,656	-72,1
16	5,0	62,0	18,2	0,442	102,4	0,657	-87,0

w. beskriver størrelsen af den termiske genererede turbulens.

3.7.1.3 Parametre for højde af hegn, antal sprøjtespor og bredde af sprøjtefri zone

Der er beregnet afdrift til hegnet op til en højde på 8 m. Vi har valgt at beregne afdrift med bidrag fra op til 10 sprøjtespor. Da sprøjtebommen er 12 m lang, vil det sige, at der regnes på en sprøjtet arealbredde på op til 120 m. Der er lavet beregninger med en sprøjtefri zone op til 36 m.

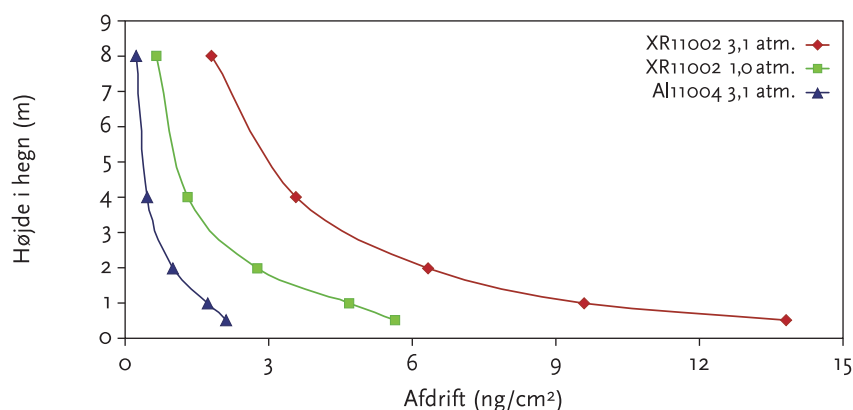
3.7.2 Modelresultater for forskellige dysetyper, sprøjtetidspunkter, doseringer og bredder af sprøjtefri bufferzoner

I det følgende gives nogle udvalgte eksempler på beregning af afdrift til læhegn. Eksemplerne belyser betydningen af forskellige dysetyper og dysetryk, meteorologiske forhold, antallet af sprøjtespor, afstand til sprøjten set som en sprøjtefri zone/bufferzone og højden over jorden.

Det er ikke afsætningen i hegnet, men den modellerede afdrift, der vises. Som tidligere nævnt stemmer den beregnede afdrift af dråber større end 20 µm godt overens med afsætningen på curlere. Omregning til afsætning på blade i tjørnehegn kan foretages efterfølgende med den empiriske relation, der er fundet mellem curler og blade (se kapitel 2).

3.7.2.1 Betydning af dyser og dysetryk

Figur 3.15 viser den beregnede afdrift af sprøjtemiddel som funktion af højden i hegnet med dyserne XR 11002 og AI11004 ved et dysetryk på 3,1 atm. For XR 11002 er der også udført beregninger ved et dysetryk på 1 atm, hvilket i praksis vil kræve flere dyser på sprøjtebommen, idet den normale 60 graders spredningsvinkel ved 3 atm vil mindskes ved det lavere tryk. Afdriften er modelleret i forskellige højder umiddelbart op ad en sprøjtet mark (ingen bufferzone), og der er medtaget afdrift fra de 10 nærmeste spor. Det er meget tydeligt, at dysen XR 11002 ved 3,1 atm, som er den med de mindste dråber (jf. Figur 3.13), giver den største afdrift. Hvor andet ikke er anført, er der anvendt meteorologidata for kl. 11 fra Tabel 3.2 samt bidrag fra 10 sprøjtespor (120 m).

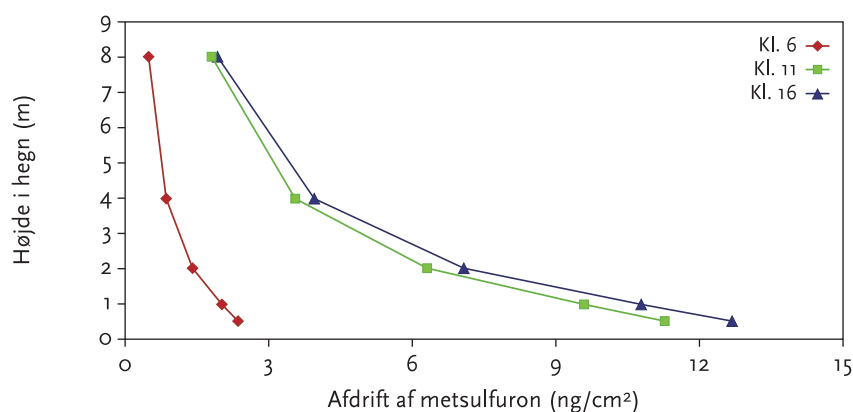


Figur 3.15. Modelleret afdrift af dråber > 20 µm til en vertikal flade for tre forskellige dysetyper/-tryk som funktion af højde i hegnet. Uden bufferzone, sprøjtning kl. 11. Bidrag fra 10 spor (120 m).

3.7.2.2 Betydning af sprøjtetidspunkt

Figur 3.16 illustrerer den modelberegnete afdrift af stof med en dråbestørrelse større end $20\text{ }\mu\text{m}$ i forhold til højden, og der er beregnet afdrift for de tre ovennævnte meteorologiske situationer (karakteriseret gennem tidspunktet på dagen).

Sammenholdes afdriften kl. 6 med afdriften kl. 11 og kl. 16, ses, at afdriften af stof er markant mindre tidligt om morgenen. Kl. 16-scenariet viser lidt højere værdier end kl. 11. Den markante forskel mellem den tidlige morgensprøjtning og sprøjtningen senere på dagen relaterer sig til dråbernes afhængighed af relativ luftfugtighed (og temperatur) samt vindhastigheden. Kl. 6-scenariet har høj luftfugtighed, lav temperatur og lav vindhastighed. Det betyder, at dråberne fordamper ”langsommere” og dermed i højere grad vil afsættes på marken, og da vindhastigheden er lav, mindskes transporten også. Selve mønstret i afdriften med højden ændres ikke markant i forhold til tid på dagen. Af Figur 3.16 ses også, at effekten af sprøjtetidspunkt er den samme i alle højder i hegnet.

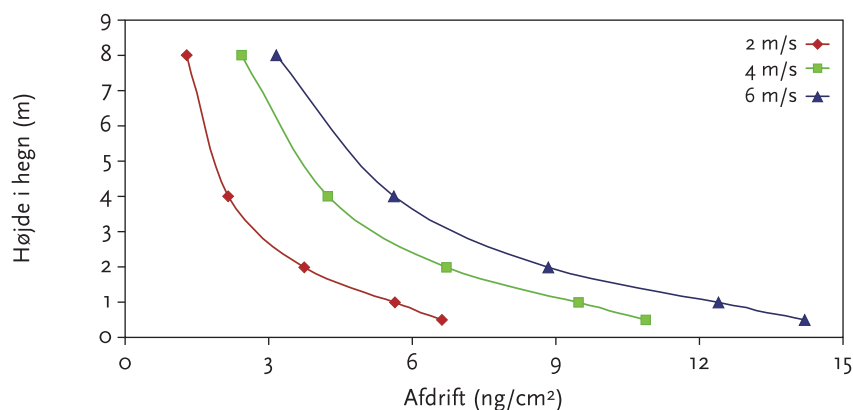


Figur 3.16. Modeleret effekt af sprøjtetidspunkt på herbicidafdrift af dråber større end $20\text{ }\mu\text{m}$ i forskellige højder i læhegn. Bidrag fra 10 spor (120 m).

For at afdække betydningen af de meteorologiske forhold, der er forskellige ved de forskellige sprøjtetidspunkter, gennemgås effekten af vindhastighed, luftfugtighed og temperatur i det følgende.

Betydningen af vindhastighed

I Figur 3.17 er vist beregninger af afdriften som funktion af vindhastigheden i 4 m højde. Effekten af vindhastigheden er isoleret ved dels at anvende 100 % fugtighed, således at dråberne beholder deres initiale størrelse, og dels at antage at den initiale afdrift er konstant og uafhængig af vindhastigheden. Det ses, at en øget hastighed øger afdriften. Det skyldes, at i en given afstand vil en større vindhastighed betyde kortere tid til, at dråberne kan deponere. Den relative ændring med højden er næsten ens ved de forskellige vindhastigheder.

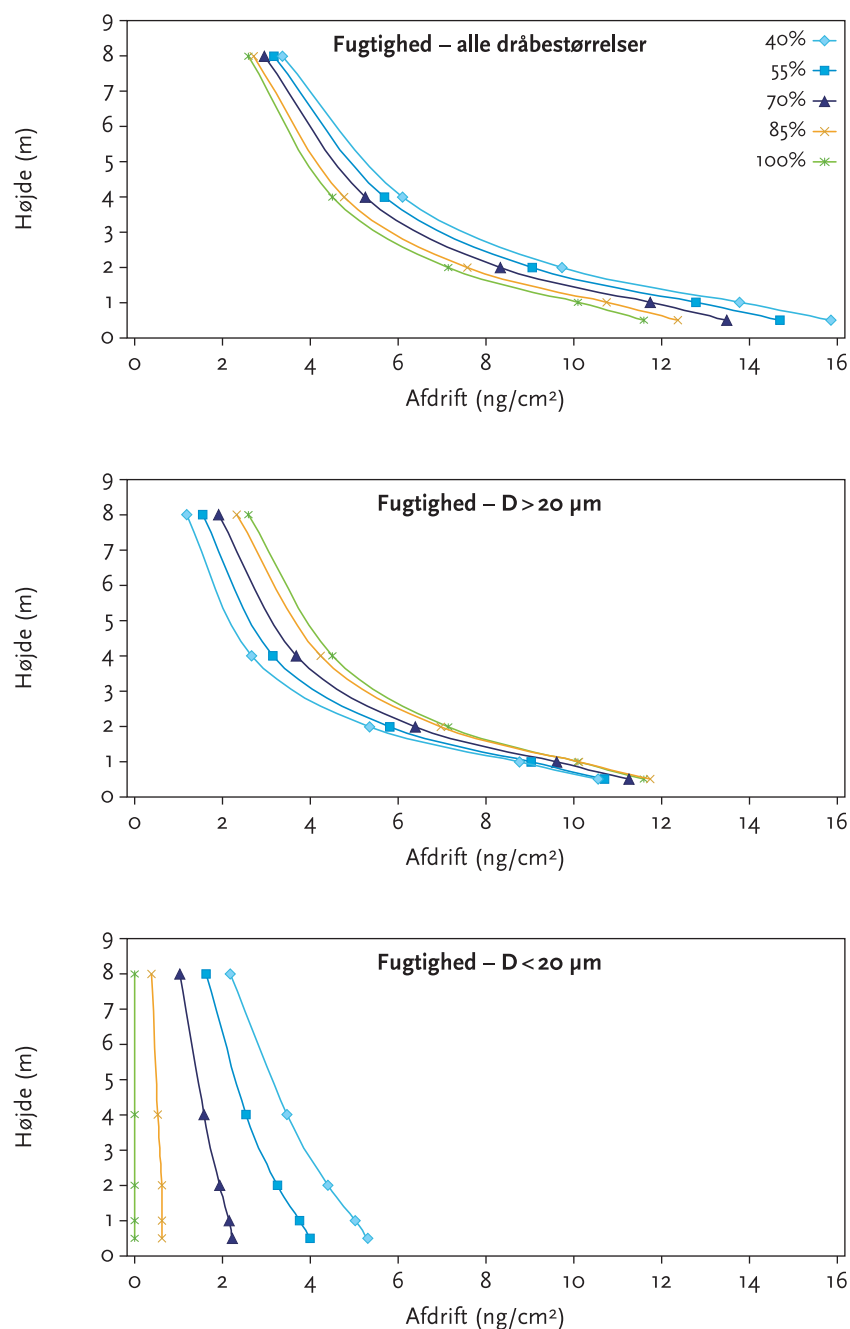


Figur 3.17. Modelleret effekt af vindhastighed i 4 m højde på herbicidafdrift af dråber i forskellige højder i læhegn. Den initiale afdrift er her antaget konstant og uafhængig af vindhastigheden. Meteorologi: rel. fugtighed 100 %, 15° C, varmefluks 100 W/m² og vindhastighed 2, 4 og 6 m/s. Bidrag fra 10 spor (120 m).

Betydningen af luftfugtighed

I Figur 3.18 ses afdriften som funktion af luftens relative fugtighed, når andre parametre holdes konstante. Den samlede afdrift for alle dråbestørrelser (øverst) stiger med faldende fugtighed, hvilket skyldes, at ved lav fugtighed fordamper dråberne hurtigere og bliver mindre, således at depositions-hastigheden til jorden også bliver mindre, hvorved en større andel af dråberne bliver 'hængende' i luften.

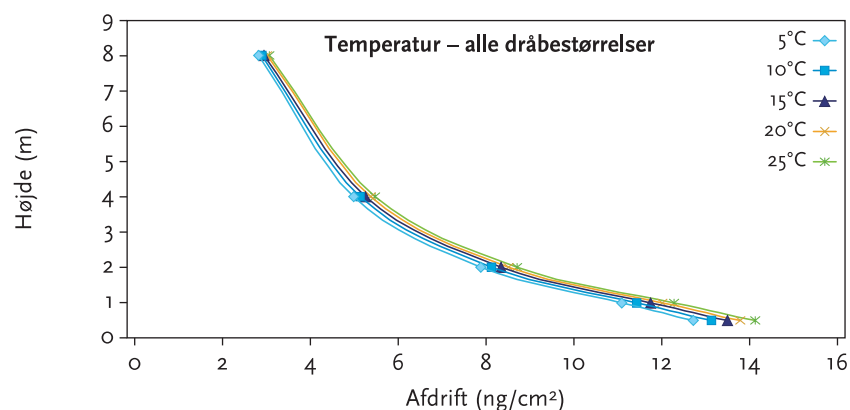
Ses kun på dråber større end 20 µm, forholder sagen sig modsat (midten). Afdriften aftager med faldende fugtighed. Det skyldes, at en stor del af dråberne fordamper til en diameter under 20 µm og således ikke indgår i opgørelsen. Denne effekt er altså mere betydende, end at depositions-hastigheden til jorden mindskes. Dråber mindre end 20 µm (nederst) dominerer således det samlede billede mht. effekten af fugtighed.



Figur 3.18. Modelleret effekt af luftfugtighed på herbicidafdrift af dråber i forskellige højder i læhegn for alle dråbestørrelser (øverst) og for diameter større end 20 μm (midten) og diameter mindre end 20 μm (nederst). Bidrag fra 10 spor (120 m).

Betydningen af temperatur

Betydningen af luftens temperatur på afdriften af sprøjtemiddel ses i Figur 3.19. Effekten af en stigende temperatur er, at afdriften stiger. Stigende temperatur virker i samme retning som en faldende luftfugtighed; dog er effekten betydeligt mindre. Opdeles afdriften mellem dråbediameter større og mindre end 20 μm (ikke vist), ses - som for fugtigheden - den modsatte effekt for dråbediameter større end 20 μm , dvs. afdriften aftager med stigende temperatur. Forklaringen er den samme som for fugtigheden.



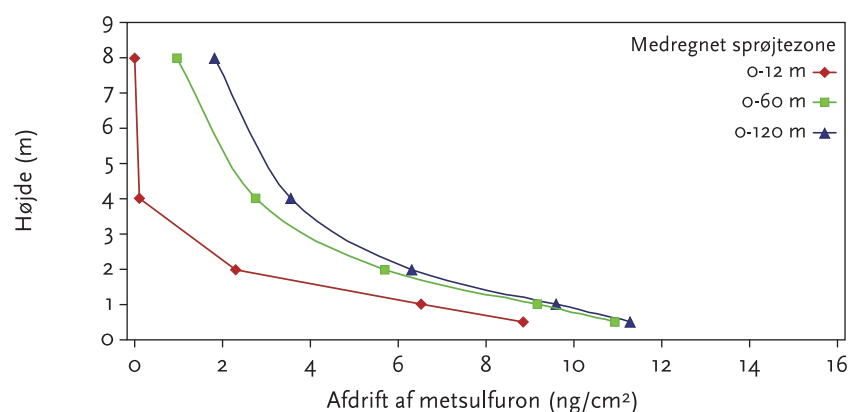
Figur 3.19. Modelleret effekt af lufttemperatur på herbicidafdrift i forskellige højder i læhegn. Alle dråbestørrelser indgår. Bidrag fra 10 spor (120 m).

3.7.2.3 Betydningen af koncentration i sprøjteblandingen

Der er beregnet afdrift for sprøjtninger, hvor koncentrationen i sprøjteblandingen er reduceret, uden at dyseoutputtet er ændret. I alle tilfælde er afdriften direkte proportional med sprøjtekoncentrationen. Således giver den halve koncentration den halve afdrift. Det er kun på 4. betydende cifre, at der ikke er proportionalitet. Grunden til denne linearitet er, at dråbernes fordampningshastighed først influeres af sprøjtekoncentrationen, når dråberne bliver ekstremt små og nærmer sig deres mindste ligevægtsstørrelse, hvor deres faldhastighed ikke længere har betydning for deres depositions hastighed.

3.7.2.4 Betydning af antal sprøjtespor

Betydningen af antallet af sprøjtespor, som bidrager til afdriften, skal ses i forhold til højden i hegnet. Således ses af Figur 3.20 (uden sprøjtefri zone), at en eksponering i 0,5 m højde hovedsagligt vil bestå af bidrag fra første sprøjtespor (1 spor), hvorefter bidraget fra første sprøjtespor aftager med højden.



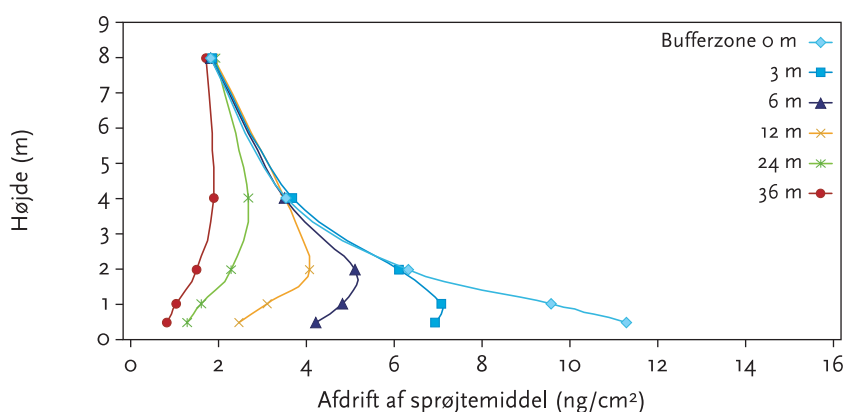
Figur 3.20. Modelleret effekt af den medregnede sprøjtezone (antal sprøjtespor) på herbicidafdrift af dråber større end 20 µm i forskellige højder i læhegn.

Højere oppe i hegnet vil der være en eksponering, der hidrører fra sprøjtespor, der ligger længere væk. Vurderes afdriften af sprøjteågen i højden, er det således afgørende, at der medtages fjernereliggende sprøjtespor, da disse har stigende indflydelse med stigende højde. En udeladelse af fjernereliggende sprøjtespor vil give en betydelig undervurdering af eksponeringen.

3.7.2.5 Betydning af sprøjtefri bufferzoner

I Figur 3.21 vises eksempler på, hvordan afdriften til hegnet afhænger af bredden af den sprøjtefri zone. I den nederste del af hegnet aftager dosis forholdsvis hurtigt. I større højder kræver det en bredere zone, for at afdriften reduceres. I fx 4 m højde er afdriften omtrent konstant med bredden de første 12 m, hvilket skyldes, at bidraget fra første sprøjtespor ikke kan nå at blandes op til højden på den korte afstand, og det er således de fjernere spor, som bidrager til afdriften her. I 8 m højde er der stort set ingen effekt af sprøjtefri bufferzoner (Figur 3.21).

Fordelingen af sprøjtemiddel over højden i hegnet er mest varierende, når der ikke er en bufferzone. Tæt på sprøjtesporet optræder de største doser i den laveste højde. Jo bredere den sprøjtefri zone er, jo mere jævnt eksponeres hegnet over højden. Bredden af en eventuel sprøjtezone har indflydelse på den absolutte mængde, der afsættes. I takt med en øget bufferzone, øges fortynningen, og samtidig får depositionen til marken større indvirkning, hvorved de største doser i profilerne optræder i større og større højder.



Figur 3.21. Modelleret effekt af sprøjtefri bufferzoner på herbicidafdrift af dråber større end 20 µm i forskellige højder i læhegn.

Den beregnede afdrift i 4 m højde svarer til ca. 10 % af den udsprøjtede mængde metsulfuron (4 g/ha), mens den i ½ m højde er ca. 30 %, når der ikke er nogen usprøjtet bufferzone. Med en bufferzone på 6 m er afdriften i 4 m højde stadig ca. 10 % af det udsprøjtede, mens afdriften i ½ m højde falder til ca. 12 %.

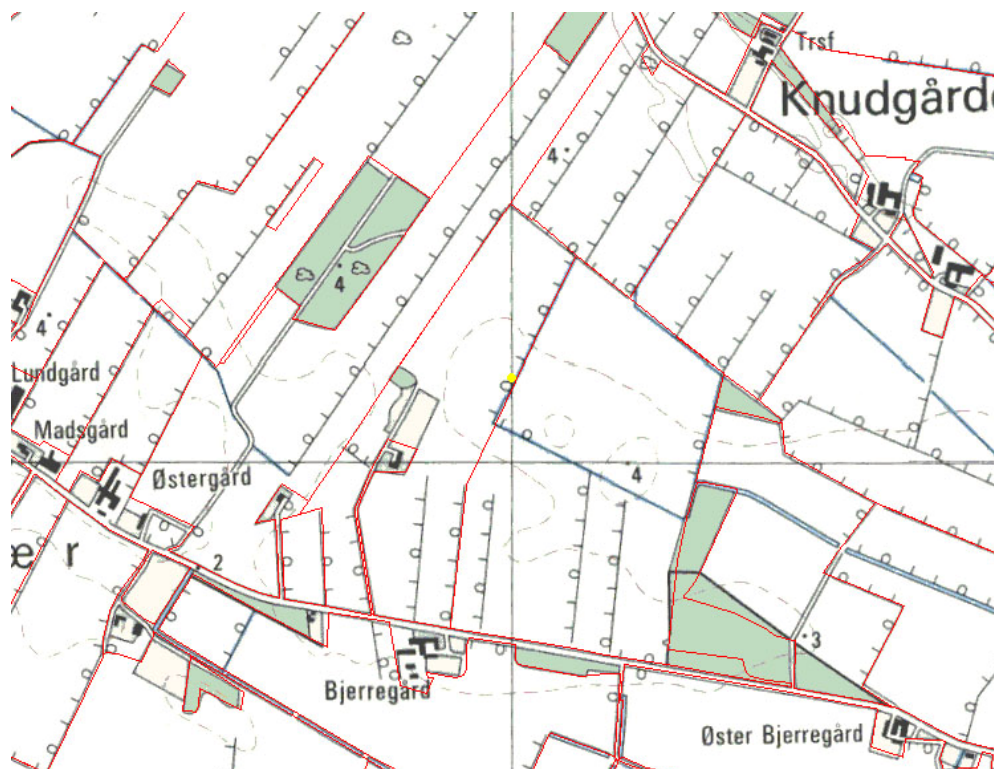
4 Udbredelse af hegn der sætter bær

4.1 Introduktion

Betydning af sprøjtemiddelafdrift på læhegnstræer, der sætter bær, er ikke kun bestemt af størrelsesordenen af giftvirkningen på det enkelte træ, men også af træernes udbredelse i Danmark. Vi har derfor ønsket at bestemme forekomsten af forskellige læhegnsarter i Danmark og beregne den samlede hegns længde for de enkelte hegnsarter.

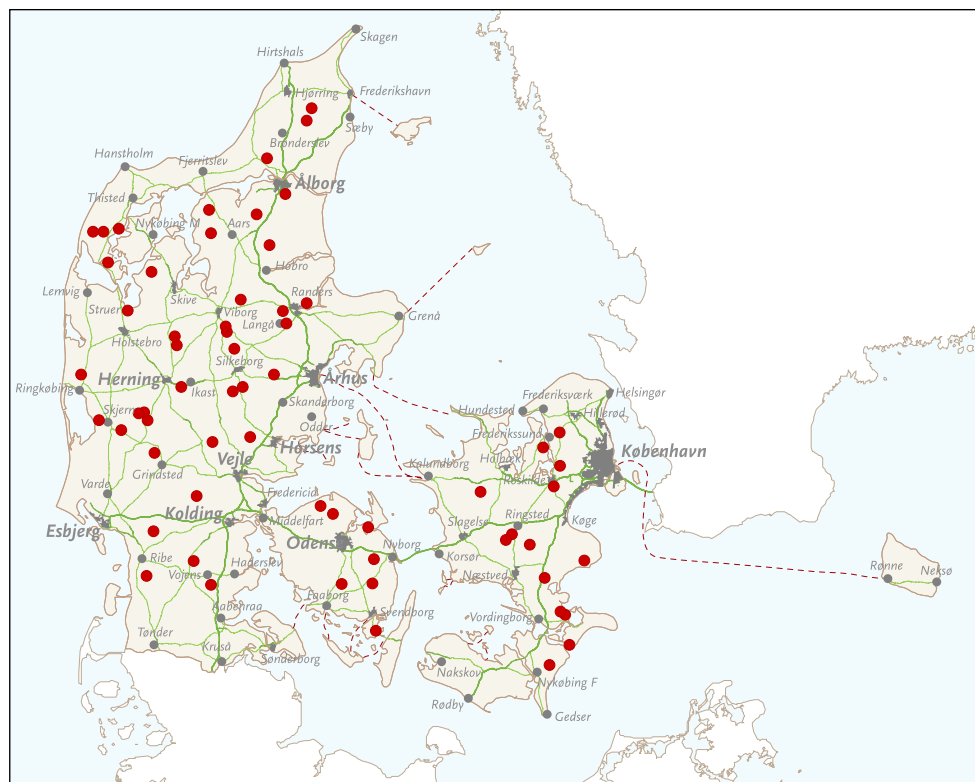
4.2 Metoder

Beregningen af hegns længde og træartsfordeling er baseret på en stikprøve af danske hegn bestående af 62 tilfældigt udvalgte markblokke (Figur 4.1 og 4.2). En markblok er defineret som "en geografisk sammenhængende enhed bestående af marker med permanente ydre grænser i form af veje, jernbaner, vandløb, levende og faste hegn etc.". I vores undersøgelse er der, for hver udvalgt markblok, foretaget en opmåling af hegns længden på hhv. kanten af blokken og for det indre af blokken ud fra et 4 cm kort. Der er desuden for hver af de 62 markblokke foretaget en feltregistrering af træartsfordelingen for 100 m tilfældigt udvalgt hegn. Til brug for opskaleringen til landsplan er omkreds og areal af de udvalgte markblokke fundet på markblokkortet.



Figur 4.1. Eksempel på afgrænsning af markblokke. De røde markeringer afgrænser den enkelte markblok.

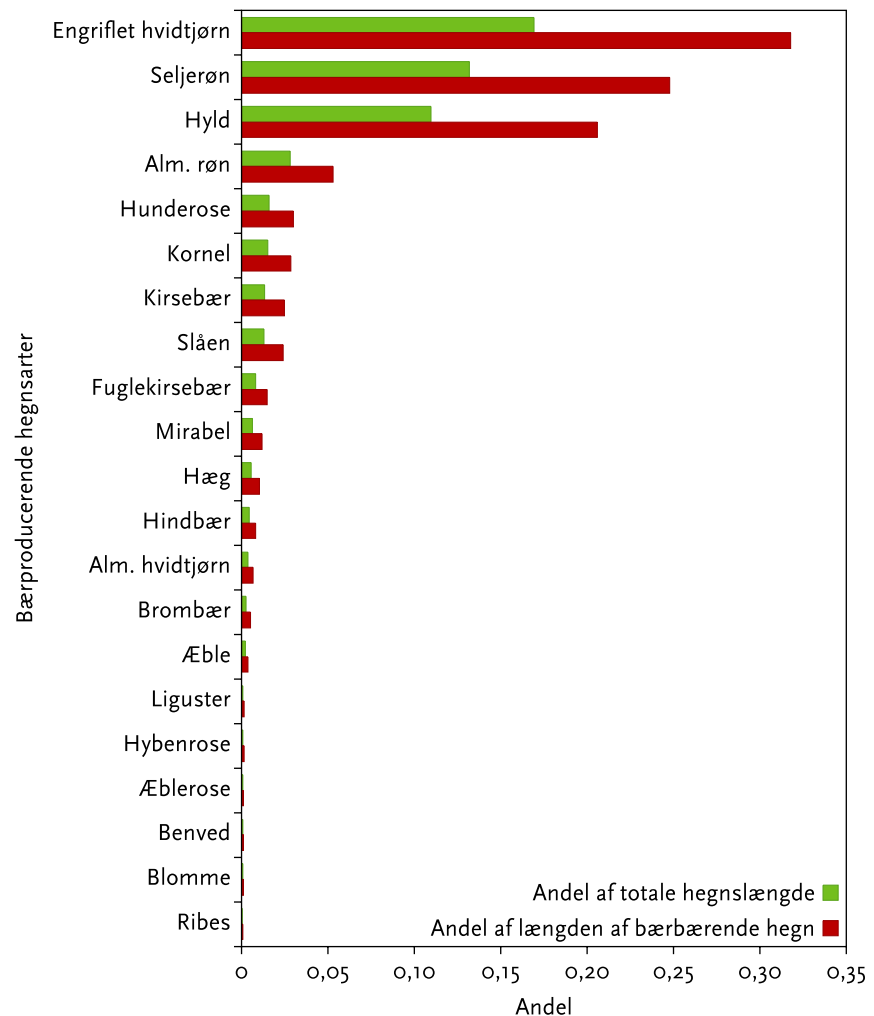
De udvalgte markblokke indeholder udelukkende landbrugsarealer, medens markblokkortet også indeholder mindre arealer med anden arealanvendelse. Det er valgt at basere opskaleringen på arealer, der både forekommer på markblokkortet og som er registreret som landbrug (kode 2112) på arealanvendelseskortet i AIS. Dette areal udgør 30.762 km². For at undgå at tælle hegn, der ligger på kanten mellem to markblokke dobbelt, er der foretaget en separat opskalering for hhv. hegn på kanten af markblokke og hegn i det indre af markblokkene. Opskaleringen for hegnene i det indre af markblokkene er foretaget arealvægtet, medens opskaleringen af hegnene på kanten af markblokkene er vægtet i forhold til omkredsen. Forholdet mellem areal og omkreds for alle markblokke er (arealvægtet) 108 m² / m kant. Forholdet for stikprøven er 100 m² / m. Arealet af stikprøven udgør 12,9 km², eller 21 ha per markblok. Omkredsen udgør i gennemsnit 2116 m. Vægtet efter arealet af de enkelte markblokke er den gennemsnitlige hegnslængde for det indre af de undersøgte markblokke 330 m. Den gennemsnitlige hegnslængde for kanten er 557 m, vægtet efter omkreds. Således kan hegnslængden for det indre af markblokkene opskaleres som 330 m × 30.762 km² / 0,21 km² ≈ 48.340 km. For kanten giver opskaleringen 557 m × (3,07·10¹⁰ m / 108 m²/m) / 2116 m ≈ 74.947 km. 70 % af den samlede kantlængde er delt mellem markblokkene, og det opskalerede tal skal derfor reduceres med 35 %, dvs. den samlede længde af hegnene på kanten af markblokkene udgør 48.531 km. Den samlede kantlængde for markblokkene er estimeret ud fra det samlede areal og det arealvægtede forhold mellem areal og kantlængde. Den samlede hegnslængde på landsplan kan dermed beregnes til ca. 96.871 km. Længden af hegn med de enkelte træarter er opskaleret på samme måde, idet længderne for de enkelte markblokke er vægtet efter hhv. areal for de indre hegn og omkreds for hegnene på kanten. Summen af hegnslængden for de enkelte træarter er lidt større end ovennævnte total, idet summen for de undersøgte stikprøver kan være mere end 100 m, hvis de forskellige træarter fx forekommer samtidig i flere etager.



Figur 4.2. Placering af de 62 tilfældigt udtagne indsamlingssteder i Danmark.

4.3 Resultater

Vores undersøgelse viser at tre ud af de fire mest hyppige hegnstræer er arter der sætter bær (Figur 4.3). Disse tre arter er netop de arter, der er valgt som forsøgsarter i dette projekt. Figur 4.3 viser, at hvidtjørn, seljerøn og hyld udgør cirka 80 % af de hegnsarter, der sætter bær.



Figur 4.3. Forekomsten af hegnsarter, der sætter bær, som andel af den totale hegnslængde i Danmark og som andel af længden af bærbærende hegn.

5 Konsekvenser af afdrift af ukrudtsmidler i hegn

Tidligere undersøgelser har vist, at tjørn er meget følsom over for metsulfuron. Formålet med denne del af projektet var at undersøge, om det er et generelt træk for bærbærende træer, eller om den høje følsomhed er specifik for tjørn. Data har desuden dannet grundlag for en bedømmelse af effekten af en reduktion af herbicidafdriften til danske læhegn.

5.1 Metoder

5.1.1 Effekter af metsulfuron på tjørn – validering af eksisterende data

Efter marksprøjtningen med metsulfuron den 19. maj blev effekten på bær-sætningen i det eksponerede tjørnehegn bestemt for at kunne validere de eksisterende data for effekten af eksperimentel sprøjtning med metsulfuron direkte ind i tjørnehegn (Kjær et al. 2004). Effekten af traktorsprøjtningen med metsulfuron på tjørnehegnet blev bestemt ved at tælle grønne bær (10. august 2005) og modne bær (6. september 2005) på sideskud, der var afmærket på forhånd (10 sideskud per træ for hver type bær, 29 sprøjtede og 29 usprøjtede træer).

5.1.2 Seljerøns følsomhed over for metsulfuron

Feltforsøgene er gennemført som sprøjteforsøg i 4 hegn af seljerøn. I markerne, der grænser op til disse hegn, sprøjtede landmanden ikke i det yderste sprøjtespor (12-18 m). Vi sprøjtede hegnene med 5 doser (0, 5, 10, 20 og 40 % af maksimum dosis for kornmarker) den 15. juni 2005. Kontrolplanter blev ikke sprøjtet. Hvert hegn blev inddelt i fire blokke (replikater), undtagen i et hegn, hvor der kun var plads til et replikat. Hvert replikat bestod af tre træer pr. dosis. Der blev anvendt formuleret metsulfuron (Ally). Hegnene blev sprøjtet med en eksperimentel sprøjte, som holdtes lodret, således at sprøjtemidlet blev afsat i et bælte fra jordoverfladen og ca. 2,5 m op. Herved opnås en ensartet afsætning i hele højden. Afsætningen blev bestemt ved en samlet metsulfuronbestemmelse for hver dosis i hvert af de fire hegn, idet der blev indsamlet 10 tilfældigt udvalgte blade per dosis på tværs af replikaterne. Variationen inden for hver koncentration er estimeret ved at analysere prøver for en enkelt koncentration fra hver af de fire blokke enkeltvis. I hver blok er indsamlet ca. 10 blade.

Der blev høstet fem prøver af blade, grønne og modne bær i hvert træ; dog blomstrede det ene hegn ikke i 2005, hvorfor der ikke kunne tages bærprøver i dette hegn. Da blomstringen havde toppet på sprøjtetidspunktet, blev der ikke indsamlet knopper og blomster i 2005. Tilsvarende indsamlinger blev foretaget året efter sprøjtningen (2006).

5.1.3 Hylds følsomhed over for metsulfuron

Hyld findes generelt ikke som sammenhængende hegn, men er udbredt i mange hegn. Vi har dog fundet to sammenhængende hyldehegn hos en enkelt landmand og udført sprøjteforsøgene i disse. Der blev sprøjtet med Ally i 5 doser (0, 2,5, 5, 10 og 20 % af maksimum dosis for kornmarker) den 15. juni 2005 på samme måde som i seljerøn, bortset fra at hvert hegn blev inddelt i fem blokke (replikater) med en busk per replikat for hver dosis.

Afsætningen blev bestemt på samme måde som for seljerøn.

Der blev i 2005 indsamlet prøver af knopper, blomster, blade, umodne bær og modne bær. For hver busk blev der taget 5 prøver for hver målevARIABLE. Der blev også gennemført indsamlinger året efter sprøjtningen (2006).

5.1.4 Højdemæssig variation i bærproduktionen

I tilfældigt udvalgte, formentlig usprøjtede hylde- og seljerøntræer blev der i juli 2007 indsamlet næsten modne bær fra 0 til 5 m højde for at få et skøn over bærproduktionen som funktion af højden. For begge arter blev der indsamlet data på to forskellige lokaliteter. Der blev taget prøver i 5 hylde træer og 10 seljerøn ved i hver træ at tælle bæklaserne inden for den ramme, som mellemrummene mellem trinene på en stige danner. Dermed fik vi mål for den arealmæssige bærproduktion. For at få et skøn over klase- og bærvægtens variation med højde blev der i tilfældigt udvalgte træer afklippet 10 klaser i hver højde på hver lokalitet. Hyldebærrene blev vejede, mens seljerønbærrene blev talt.

5.1.5 Dataanalyser

Målvariable for knopper, blomster og blade viste sig at kunne antages at være normalfordelte, og der blev derfor lavet en variansanalyse af disse med sprøjtemiddeldoseringen som systematisk effekt og hegn og blok som tilfældige effekter. Blok faktoren er 'nested' inden for hegns faktoren. Modellen er:

$$Y_{dthb} = \mu + \alpha_d + \beta_t + E_h + F_{h,b} + U_{dthb}$$

hvor Y_{dthb} er responsvariablen målt under træer i hegn h , blok b , med behandling d og til tidspunkt t . μ , α_d og β_t betegner middelværdi og de systematiske effekter af henholdsvis sprøjtemiddelbehandling d og tidspunkt t . De tilfældige effekter af hegn h og af blok b i hegn h betegnes E_h og $F_{h,b}$ residualledet betegnes U_{dthb} . Alle de tilfældige effekter og residualledene antages uafhængige og normalfordelte.

Hverken biomassedata eller antalsdata for bær kunne med rimelighed beskrives ved en normalfordeling. Vi har valgt at benytte Spearman's rang korrelation (r_s) stratificeret efter blokke til at vurdere, om der er en monoton sammenhæng mellem respons og dosis. For at lave den stratificerede test benyttes de reciproke varianser som vægte på de blok-specifikke korrelationer. Det vil sige

$$\bar{r}_s = \frac{\sum_{\text{blokke}} (n_i - 1) \cdot r_{s,i}}{\sum_{\text{blokke}} (n_i - 1)}, \quad \text{Var}(\bar{r}_s) = v = \sum (n_i - 1), \quad \bar{r}_s \sim N(0, v)$$

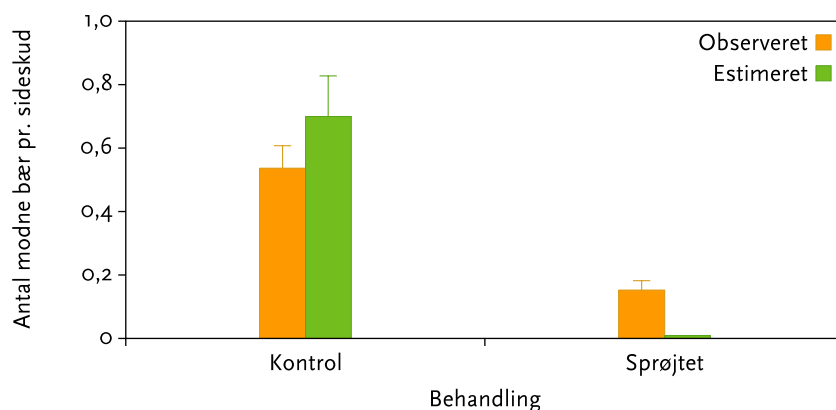
Effekten af det afsatte metsulfuron på hyld og seljerøn blev fittet til en sigmoid kurve med modellen

$$y = \frac{k}{1 + e^{\frac{\ln 9 \left(\frac{\ln(1+afsætning) - \ln EC_{50}}{\ln EC_{50} - \ln EC_{10}} \right)}}}$$

5.2 Resultater

5.2.1 Effekter på tjørn

Som set i tidligere projekter var der en negativ effekt af metsulfuronsprøjtningen på børsætningen i tjørnehegnene (Figur 5.1). Børsætningen blev målt i 1,5 m højde. De tilsvarende målinger af afsætningen af metsulfuron fra sprøjtesporet nærmest hegn viste en middelværdi på 2,1 og 3,2 ng/cm² i højderne 1 og 2 m. Da der ikke blev målt metsulfuronafsætning fra sprøjtespor 2-5, blev bidraget fra disse sprøjtespor til den samlede afsætning beregnet ud fra målingerne af afsat fluorescein under antagelse af, at metsulfuronafsætningen fra disse spor i forhold til spor 1 vil være proportional med afsætningen af fluorescein. Den samlede afsætning af metsulfuron på bladene blev på den måde estimeret til 5,9 ng/cm². På basis af dosis-responsligningen for modne bær i Kjær et al. (2006) estimeres produktionen af modne bær per sideskud ved denne eksponering til 8·10⁻⁹ bær pr. sideskud, dvs. så godt som ingen bærproduktion set i forhold til en estimeret bærproduktion på ca. 0,7 pr. sideskud i kontroltræer. Den estimerede effekt af den målte metsulfuronafsætning er dermed lidt større end den observerede effekt i dette ene hegn (se Figur 5.1).



Figur 5.1. Antal røde bær samt SEM pr. sideskud (29 træer, 10 sideskud/træ for hver behandling) og værdier estimeret på baggrund af tidligere forsøg (Kjær et al. 2006) på sprøjtet og usprøjtet hvidtjørn 2005.

5.2.2 Seljerøns og hylde følsomhed over for metsulfuron

Afsætningen af metsulfuron på hyld og seljerøn fremgår af Tabel 5.1 og 5.2, idet der dog kun er tale om en enkelt samlet måling for hver koncentration i hvert hegn. Idet 10 ng metsulfuron/cm² svarer til 1 g/ha, skulle 10 % af den maksimale godkendte dosering (4 g/ha) give en afsætning på 4 ng/cm², og dermed er der en nogenlunde god overensstemmelse mellem den nominelle og den faktiske dosering. Der er temmelig store variationer på afsætningen inden

for samme nominelle dosering, men på baggrund af nærværende data er det ikke muligt at sige, om variationen primært skyldes upræcis udsprøjtning af herbicidet, eller om variationen er forårsaget af bladenes forskellige placering på træet og dermed forskellige eksponeringsforhold.

Tabel 5.1. Afsætning af sprøjtemidlet metsulfuron på blade af hyld målt i to hegn behandlet med doseringer svarende til 0-20 % af den maksimale godkendte for korn (4 g/ha). Målingerne er foretaget på en prøve per dosering for hvert hegn, og hver prøve består af 10 blade taget tilfældigt inden for en given sprøjtemiddeleksponering i hegnet.

Hegn nr.	Nominel dosering	ng metsulfuron/cm ²
4	0 %	n.d.
4	2,5 %	0,8
4	5 %	1,3
4	10 %	3,6
4	20 %	2,7
5	0 %	n.d.
5	2,5 %	0,5
5	5 %	1,2
5	10 %	4,6
5	20 %	19,1

Tabel 5.2. Afsætning af sprøjtemidlet metsulfuron på blade af seljærøn målt i fire hegn behandlet med doseringer svarende til 0-40 % af den maksimale godkendte dosis for korn (4 g/ha). Målingerne er foretaget på en prøve per dosering for hvert hegn, og hver prøve består af 10 blade taget tilfældigt inden for en given sprøjtemiddeleksponering i hegnet.

Hegn nr.	Nominel dosering	ng metsulfuron/cm ²
1	0 %	n.d.
1	5 %	1,7
1	10 %	3,9
1	20 %	7,5
1	40 %	17,2
2	0 %	n.d.
2	5 %	3,0
2	10 %	7,5
2	20 %	6,0
2	40 %	17,8
3	5 %	11,7*
3	10 %	0,8
3	20 %	2,6
3	40 %	6,4
6	0 %	n.d.
6	5 %	3,0
6	10 %	3,5
6	20 %	7,0
6	40 %	6,3

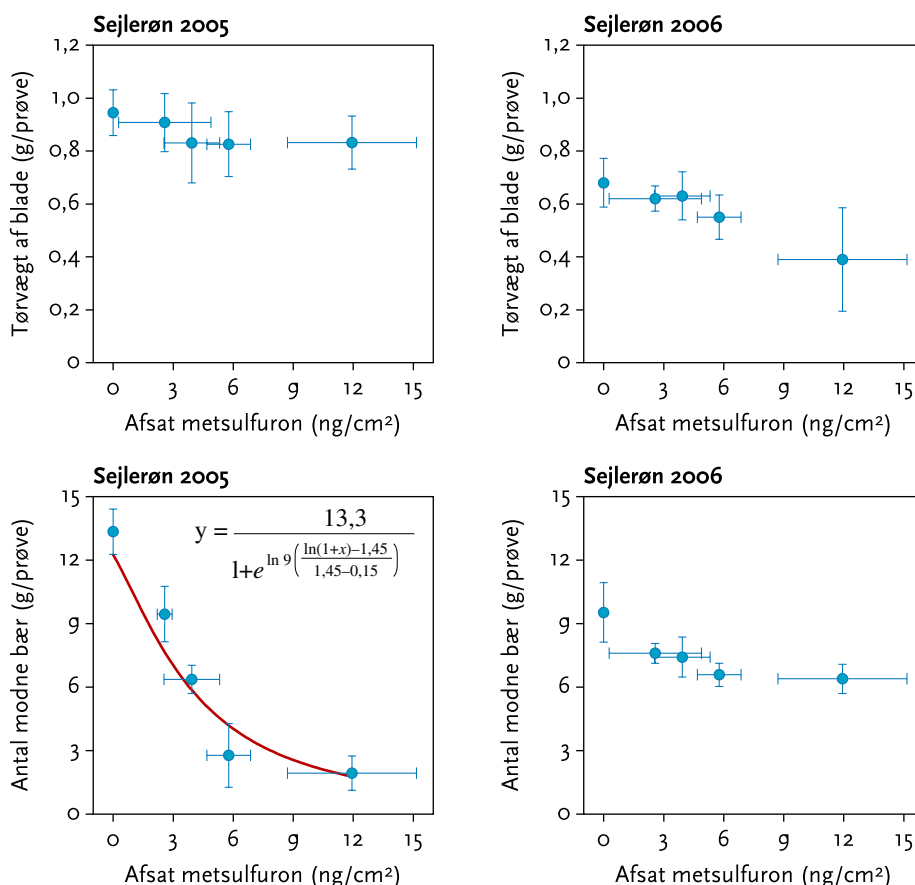
*meget lille prøve; betragtes som outlier

Variationen mellem blokkene inden for en given koncentration (10 % af maksimale godkendte dosis) i hver hegnstype er præsenteret i Tabel 5.3. Denne variation er noget mindre end variationen mellem hegn beskrevet ovenfor.

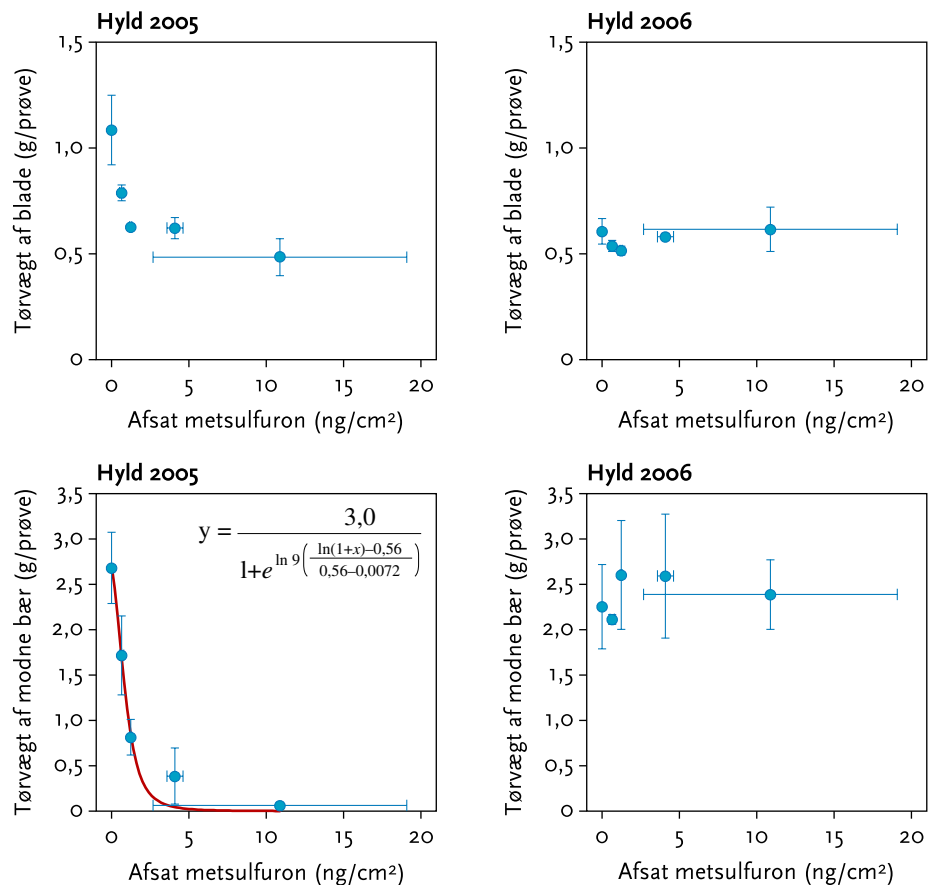
Tabel 5.3. Variation mellem blokke (replikater) inden for en enkelt dosering. For hver prøve er indsamlet ca. 10 blade.

Hegn	Dosering	Blok	ng metsulfuron/cm ²
1	10 %	1	5,4
1	10 %	2	3,7
1	10 %	3	8,2
1	10 %	4	3,7
5	10 %	1	3,2
5	10 %	2	3,2
5	10 %	3	4,7
5	10 %	4	2,7
5	10 %	5	2,9

Som det ses af Figur 5.2 og 5.3 samt Tabel 5.4 og 5.5 var der det år, der blev sprøjtet, tydelige, signifikante effekter på bærsetningen hos både seljerøn og hyld, mens effekten på bladstørrelsen var mindre udtalt, især i seljerøn, men dog stadig signifikant. Hyld er tilsyneladende mere følsom end seljerøn, idet bærsetningen i hyld ved en eksponering på 10 % af den maksimale godkendte dosis (svarende til 4 ng/cm²) kun er ca. 20 % af bærsetningen i kontrollerne, mens den samme dosering kun halverer bærsetningen i seljerøn. Billedet var dog modsat året efter sprøjtningen, idet der ingen effekter var på hyld, men små effekter på seljerøn (se Figur 5.2 og 5.3).



Figur 5.2. Effekter af den afsatte mængde metsulfuron på bladtørvægt og antal modne bær på seljerøn i sprøjteåret (venstre) og året efter (højre). Punkter repræsenterer middelværdier med SEM.



Figur 5.3. Effekter af den afsatte mængde metsulfuron på bladtørvægt og tørvægten af modne bær på hyld i sprøjteåret (venstre) og året efter (højre). Punkter repræsenterer middelværdier med SEM.

Tabel 5.4. Variansanalyse (proc mixed) af effekten af den systematiske variabel, dosis, og de tilfældige variable, hegn og blok, inden for hegn 2005. For dosis er angivet p-værdien, for hegn og blok andelen af den samlede tilfældige variation.

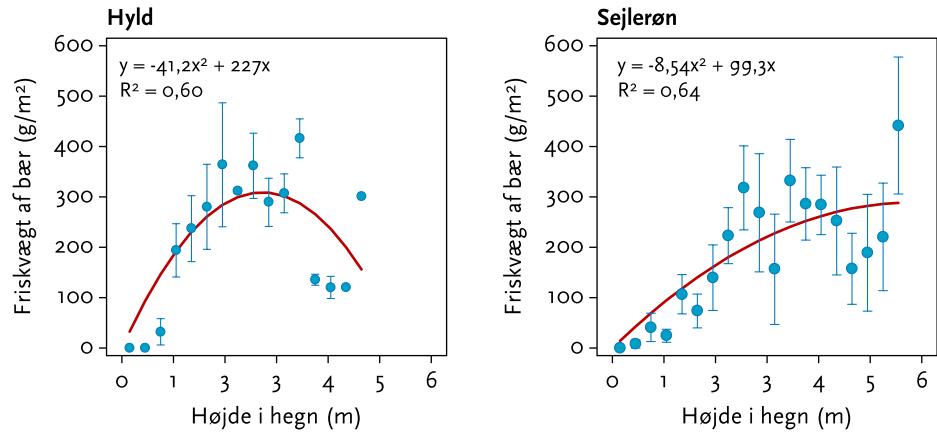
	Seljerøn (4 hegn)			Hyld (2 hegn)		
	Dosis	Hegn	Blok	Dosis	Hegn	Blok
Tørvægt blade	p < 0,0001	0,4	0,03	p < 0,0001	0,02	0
Tørvægt knopper	-	-	-	p < 0,0001	0,02	0,03
Tørvægt blomster	-	-	-	p < 0,0001	0	0,05

Tabel 5.5. Spearmans rang-korrelation, vægtet beregning for alle blokke og alle hegn med hhv. seljerøn og hyld 2005. Tabellen viser testværdien (z) og p-værdien for analysen af sammenhængen mellem metsulfuron-doseringen og de enkelte målevariable inden for hver hegnstype.

	Seljerøn		Hyld	
	z	p-værdi	z	p-værdi
Tørvægt blade	-1,9	0,029	-7,1	< 0,0001
Tørvægt knopper	-	-	-7,7	< 0,0001
Tørvægt blomster	-	-	-8,6	< 0,0001
Tørvægt umodne bær	-13,7	< 0,0001	-7,9	< 0,0001
Antal umodne bær	-13,1	< 0,0001	-	-
Tørvægt modne bær	-13,2	< 0,0001	-9,7	< 0,0001
Antal modne bær	-13,5	< 0,0001	-	-

5.2.3 Bærproduktion som funktion af højden

Bærvægten pr. m^2 er for seljerøn beregnet ved at gange bærvægten fra ovenstående med antal bær pr. m^2 og omregne fra tørvægt til friskvægt på baggrund af data fra Eriksson & Ehrlen (1991). Som det ses af Figur 5.4, varierer bærproduktionen i hyld og seljerøn en del med højden. Bærproduktionen pr. løbende meter hegn er beregnet ved at integrere under de fittede kurver. Den beregnede bærproduktion er 1103 g friskvægt pr. meter for hyld og 1172 g friskvægt pr. meter for seljerøn.



Figur 5.4. Bærproduktion som funktion af højde i hyld og seljerøn. Hvert punkt repræsenterer gennemsnit for hhv. 5 (hyld) og 10 (seljerøn) træer.

6 Scenarieberegninger: Effekter af afdriftsreducerende tiltag

6.1 Metode

Beregningerne af konsekvenserne af forskellige tiltag, der skal reducere afdriften af herbicider til danske læhegn (bufferzoner, alternative dysetyper og optimalt valg af sprøjtevejr) baserer sig som beskrevet i kapitel 1 på en kombination af modellens beregninger af afdriften under forskellige omstændigheder (kapitel 3), estimerne for forekomsten af forskellige bærbærende hegnsarter (kapitel 4), data for effekten af en given metsulfuronafsætning på tjørn, hyld og seljerøn (kapitel 5; Kjær et al. 2004, Kjær et al. 2006) og data for den højdemæssige fordeling af bærproduktionen (kapitel 5 samt Kjær et al. 2004). Kombinationen af disse data er brugt til at give et skøn over effekten af de forskellige afdriftsreducerende tiltag på produktionen af bær i danske læhegn. Derudover har vi ud fra data om stand- og trækfugles konsumtion af bær i læhegn (Snow & Snow 1988, Herrera 1998) samt bærrenes næringsværdi (Eriksson & Ehrlén 1991, Snow & Snow 1988) skønnet betydningen af reduceret herbicidafdrift for overvintrende drosselfugle i forhold til deres fødebehov.

I scenarieberegningerne indgår også omregning mellem tørvægt og friskvægt for tjørn på basis af eksisterende data (Kjær et al. 2004 og 2006, Snow & Snow 1988, Eriksson & Ehrlén 1991). Da output fra modellen er relateret til forventet afsætning på curlere, er der desuden anvendt en omregningsfaktor fra curlere til blade (se Figur 2.4).

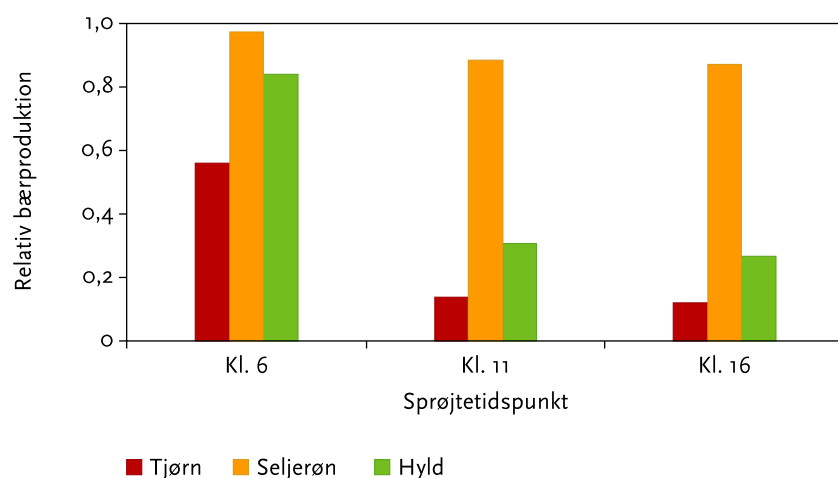
6.2 Scenariebetingelser

Som Figur 3.16 viser, bidrager sprøjtesporene 2-10 væsentligt til den samlede herbicidafdrift til hegn, og da den gennemsnitlige markstørrelse i Danmark er ca. 16 ha, vil der typisk være i hvert fald 10 sprøjtespor af 12 m bredde i hver mark. Den relative betydning af bidraget fra spor 2-10 stiger med afstanden mellem sprøjte og hegn og afhænger også i nogen grad af sprøjtetidspunktet. De følgende scenarieberegninger har vi valgt primært at basere på afdriften fra de 10 sprøjtespor nærmest hegn. Tilsvarende har vi anvendt estimerne for sprøjtning kl. 11 i de scenarier, hvor sprøjtetidspunktet ikke varierer, da afdrift ved sprøjtning kl. 11 repræsenterer en mellemting mellem afdriften fra sprøjtning kl. 6 og kl. 16. Vi har ydermere antaget, at der på bladene og curlerne ligesom på papir kun afsættes dråber med en diameter større end 20 µm, og derfor kun regnet på variationen i afsætning af disse dråber.

6.3 Meteorologi: Timing af sprøjtning

Figur 3.15 viser, at det har stor betydning for afdriften af herbicid til hegn, hvornår der sprøjtes. I overensstemmelse med gældende anbefalinger giver sprøjtning tidligt på dagen mindst afdrift til læhegnene. Denne variation i afdriften afspejles også i de beregnede effekter på bærindsamlingen (Figur 6.1).

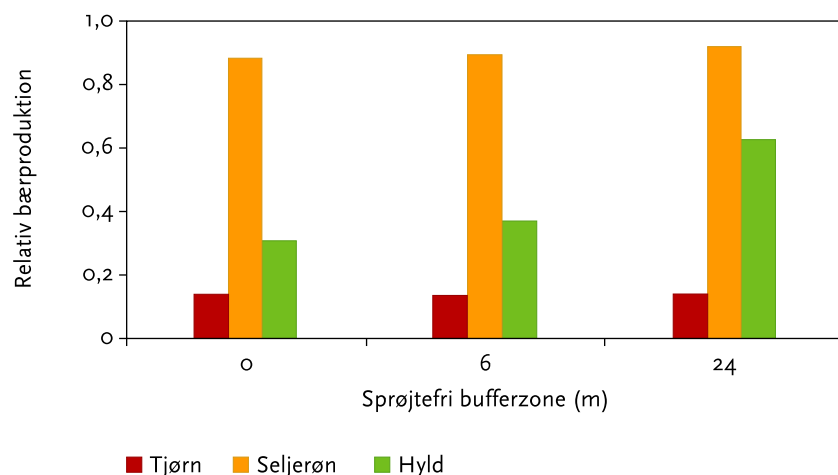
Forskellen i effekt afhænger dog af arten, idet sprøjtetidspunktet har større betydning for tjørn og hyld end for seljerøn. Dette hænger sammen med højden af de forskellige arter samt fordelingen af bærproduktionen over højden (se Figur 5.5).



Figur 6.1. Bærproduktion ved sprøjtning på forskellige tidspunkter i forhold til bærproduktionen uden sprøjtning. For hver art er der summeret over bærproduktionen i hele hegnets højde. Værdierne er beregnet ud fra den modellerede afdrift af dråber > 20 µm fra 10 sprøjtespor for dysetypen XR11002 ved 3,1 atm og uden sprøjtefri bufferzone.

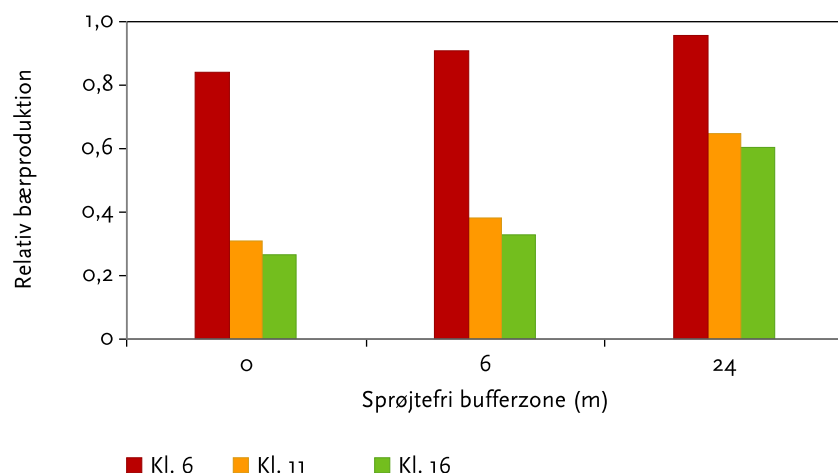
6.4 Sprøjtefrie randzoner: Betydning af bredde

Som vist i Figur 3.21 falder afdriften til den nederste del af hegnet med stigende bredde af den sprøjtefrie bufferzone, mens reduktionen i afdriften falder med højden, så der stort set ingen effekter er i den øverste del af hegnet. Den beregnede betydning af bredden af en sprøjtefri randzone på børsætningen i tjørn, seljerøn og hyld fremgår af Figur 6.2. Bredden af bufferzonen har kun ubetydelig effekt på børsætningen i tjørn og seljerøn, mens der for hyld er en stigende bærproduktion med stigende bufferzonebredde. Forskellen mellem arterne skyldes den højdemæssige fordeling af børsætningen og forskelle i følsomhed over for sprøjtemidlet.



Figur 6.2. Estimeret bærproduktion som funktion af bredden af sprøjtefri randzone i forhold til bærproduktionen uden sprøjtning. For hver art er der summeret over bærproduktionen i hele hegnets højde for 10 sprøjtespor. Alle tal er for dysetypen XR11002 ved 3,1 atm og sprøjtetidspunkt kl. 11.

Til supplement er i Figur 6.3 vist interaktionen mellem bredden af en sprøjtefri randzone og sprøjtetidspunkt for børsætningen i hyl, hvoraf ses, at randzonens bredde har størst betydning, når der sprøjtes på tidspunkter med forholdsvis høj vindhastighed og lav luftfugtighed (kl. 11 og 16 i forhold til kl. 6). For tjørn og seljerøn er der ingen forskel i betydningen af bufferzonen for de forskellige sprøjtetidspunkter.

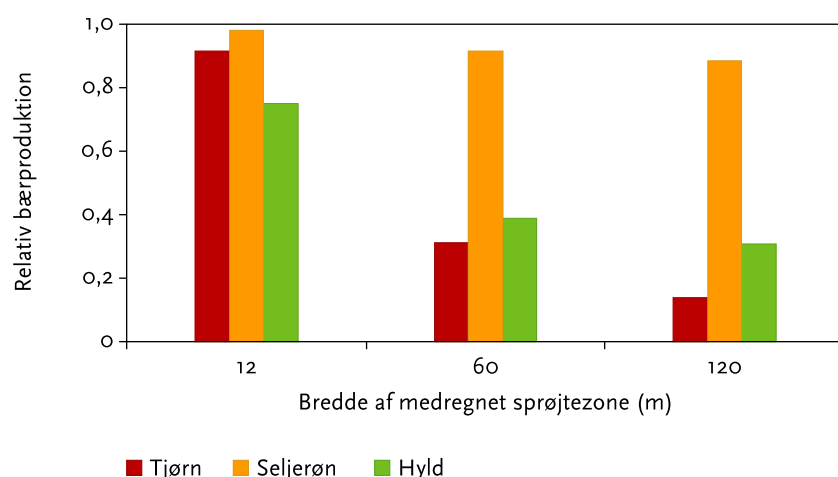


Figur 6.3. Betydning af bufferzonebredde ved forskellige sprøjtetidspunkter for børsætningen i hyl i forhold til børsætningen uden sprøjtning. Data er for dysetypen XR11002 ved 3,1 atm summeret over 10 sprøjtespor.

6.5 Betydning af antal sprøjtespor

Modelberegningerne viste, at det har stor betydning for estimeringen af afdriften, hvor mange sprøjtespor der medregnes (Figur 3.20), og at betydningen øges med højden i læhegnet.

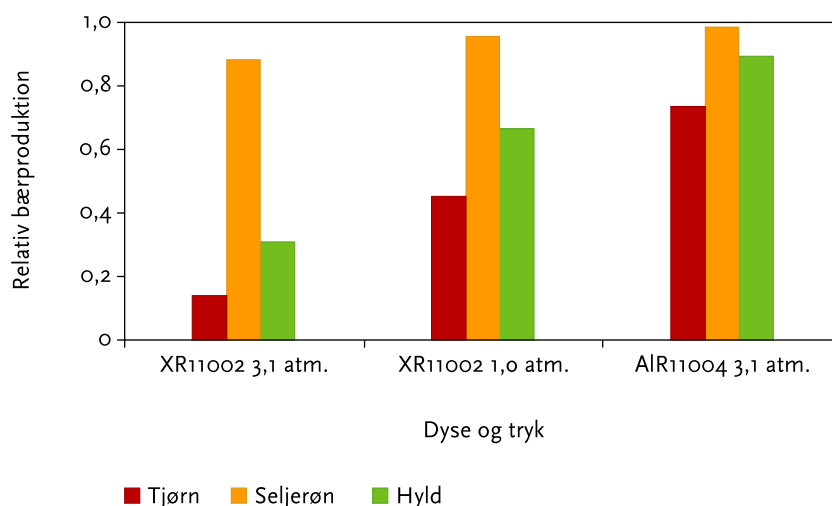
Figur 6.4 viser, at det også for effektivvurderinger af nogle arter er væsentligt at medregne flere sprøjtespor.



Figur 6.4. Estimeret bærproduktion som funktion af antal medregenede sprøjtespor i forhold til bærproduktionen uden sprøjtning. For hver art er der summeret over bærproduktionen i hele hegnets højde. Alle tal er for dysetypen XR11002 ved 3,1 atm og sprøjtetidspunkt kl. 11 uden sprøjtefri bufferzone.

6.6 Dyser: Typer og sprøjte-tryk

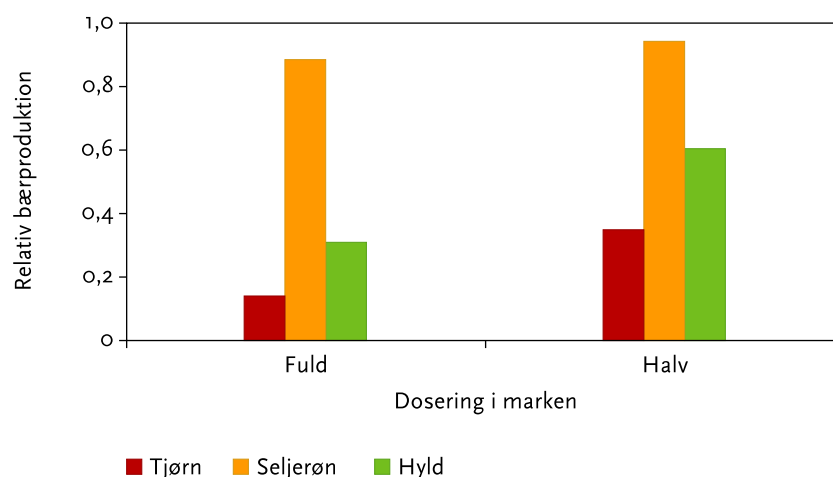
Som vist i Figur 3.15, betyder dysetype og -tryk meget for afdrift af sprøjtemiddel til hegnet. Effekten af at anvende alternative dysetyper eller -tryk er illustreret i Figur 6.5. Anvendelse af dysetypen AI 11004 giver en betydelig større bærproduktion i tjørn og hyld end standarddysen XR 11002 ved 3,1 atm dysetryk, mens anvendelse af et lavere dysetryk i XR-dysen giver en lidt mindre stigning i bærproduktionen i tjørn og hyld. For seljerøns vedkommende har dysetype og -tryk ikke den store betydning for børsætningen. For hyld aftager effekten af dysevalget med stigende bufferzonebredde, mens der for tjørn og seljerøn ikke er nogen interaktion mellem effekt af bufferzonebredde og valget af dysetype/-tryk (ikke illustreret).



Figur 6.5. Bærproduktion ved sprøjtning med forskellige dysetyper og -tryk som funktion af bredden af sprøjtefri randzone i forhold til bærproduktionen uden sprøjtning. For hver art er der summeret over bærproduktionen i hele hegnet højde. Alle datapunkter er beregnet ud fra den modellerede afdrift fra 10 sprøjtespor ved sprøjtning kl. 11.

6.7 Effekten af reduceret dosis

Som omtalt i kapitel 3 vil afdriften til hegnet falde proportionalt med en reduktion i den anvendte herbiciddosering. Idet fx en halvering af doseringen vil resultere i en halveret afsætning i hele hegnet højde, vil effekten heraf på en given træarts børsætning primært afhænge af artens følsomhed over for sprøjtemidlet og ikke af den vertikale fordeling af bærrerne. Som følge deraf vil en reduceret metsulfurondosering have større effekt på tjørn og hyld end på den mindre følsomme seljerøn (Figur 6.6).



Figur 6.6. Bærproduktion ved sprøjtning med fuld dosis (4 g/ha) og halv dosis i forhold til bærproduktionen uden sprøjtning. For hver art er der summeret over bærproduktionen i hele hegnets højde. Alle datapunkter er beregnet ud fra den modellerede afdrift fra 10 sprøjtespor ved sprøjtning kl. 11 uden sprøjtefri bufferzone.

6.8 Betydning for tilgængelig fugleføde

Det er kendt, at bær fra tjørn, seljerøn og hylde er vigtige fødeemner for drosselfugle på træk og for standfugle gennem vinteren. Formålet med dette afsnit er at evaluere, om de estimerede effekter af herbicidafdrift på bærproduktionen i hegn kan være biologisk betydende for bærspisende fugle, og i givet fald om fuglene vil påvirkes nævneværdigt ved anvendelse af afdriftreducerende tiltag. Dette gør vi ved hjælp af viden og antagelser om danske tjørne-, hylde- og seljerønhegns produktion af bær, bærrenes betydning for fugles vinterfouragering, og herbiciders påvirkning af frugtsætning hos bærbærende buske og træer. Afsnittet er opbygget, således at det først gennemgår de forskellige delforudsætninger, der indgår i ovennævnte vurdering. Dette gøres dels argumenterende, dels ved hjælp af den viden der findes rapporteret fra området. I tilfælde, hvor den eksisterende viden ikke er afklaret, har vi måttet træffe et argumenteret valg mellem de foreliggende resultater. Argumentet kan være, at undersøgelsen er lavet under betingelser, der er sammenlignelige med de danske forhold, eller en vurdering af resultaternes pålidelighed. Da beregningerne i dette afsnit således vil basere sig på en række mere eller mindre realistiske antagelser, må de ikke betragtes som præcise svar, men som overslag over mulige ændringer i de bærspisende fugles tilgængelige fødemængde i områder, hvor de primært finder deres føde i hegnene.

6.8.1 Bedømmelse af produktionen af bær i læhegn i Danmark

Vi har i kapitel 4 beregnet, at der er 17.339 km tjørnehegn, 13.518 km seljerønhegn og 11.235 km hyldehegn i Danmark, og ud fra kapitel 4 samt Kjær et al. (2002) har vi beregnet bærproduktionen for hylde, seljerøn og tjørn pr. km hegn til hhv. 1103, 1172 og 252 kg friskvægt. Det betyder, at der er en produktion på 15.843, 4.389 og 12.392 tons for hhv. seljerøn, tjørn og hylde i danske læhegn.

6.8.2 Hvilke fugle spiser bærrerne i hegnene?

Det er primært drosselfugle, som spiser tjørnebær og seljerønbær (Hartley 1954; Snow og Snow 1988), men de spises også af andre fuglearter (Tabel

6.1). Hyld spises også af drosselfugle, men specielt stærne fortærer mange hyldebær.

Tabel 6.1 fugle der, på basis af engelske observation over 5 år, hyppigst spiser tjørnefrugter, rønnebær og hylde.

Fugleart	Tjörn	Seljerøn	Hyld	Reference
Vindrossel <i>Turdus iliacus</i>	×	×		Hartley (1954), Sorensen (1981), Guitian (1992)
Solsort <i>Turdus merula</i>	×	×	×	(Hartley, (1954), Sorensen (1981), Fuentes (1994)
Sjagger <i>Turdus pilaris</i>	×	×		Hartley (1954), Sorensen (1981), Guitian (1992)
Misteldrossel <i>Turdus viscivorous</i>	×	×		Hartley (1954)
Sangdrossel <i>Turdus hilomelos</i>	×	×	×	Snow og Snow (1988)
Ringdue <i>Columba palumbus</i>	×	×	×	Sorensen (1981), Snow og Snow (1988)
Stær <i>Sturnus vulgaris</i>	×	×	×	Snow og Snow (1988)
Rødhals <i>Erithacus rubecula</i>	×	×	×	Snow og Snow (1988)
Silkehale <i>Bombycilla garrulus</i>	×			Snow og Snow (1988)
Blåmejse <i>Parus caeruleus</i>	×	×	×	Snow og Snow (1988)
Kernebider <i>Coccothraustes coccothraustes</i>	×			Snow og Snow (1988)

Collinge (1941) angiver, at vild frugt udgør fra 26,5 til 30,5 % af føden hos solsort set over hele året, og det er derfor klart, at den vilde frugt må have stor betydning i efterår og vinter. Da solsort samtidig regnes som specialist i tjørnefrugter (Snow og Snow 1988), er det sandsynligt, at størstedelen af dens fødeindtag i perioden fra oktober til januar er tjørnebær.

Antagelse: Det er hovedsagelig drosselfugle, der spiser tjørnebær og seljerøn. Blandt drosselfuglene er solsorten den eneste, som ikke trækker væk fra Danmark. Vi antager, at den mængde bær, der er tilbage, når de øvrige drosler trækker væk, er af betydning for solsortens vinteroverlevelse.

6.8.3 Antallet af fugle der spiser bær i hegn

Det er hovedsageligt drosselfugle, som fouragerer i hegn. Derfor omfatter den følgende estimering af antallet af fugle, der søger deres føde i hegn, drosselfuglene og stær, der fortærer mange hyldebær.

Drosselfuglene i Danmark kan deles i to hovedgrupper, standfugle og træk-gæster. Solsorten er en standfugl, medens de øvrige drosler altovervejende kommer igennem Danmark på deres træk fra Skandinavien til deres overvin-tringsområder. I følge Dansk Ornitologisk Forening er der ca. 2,25 mio. ynglepar af solsorte i Danmark. Med de unger, de får, og den dødelighed, der finder sted, er der formentlig mindst fem millioner solsorte i Danmark om vinteren. Det er dog langt fra alle solsortene, der lever i tjørnehegn. I dagens Danmark er solsorten i høj grad blevet til en havefugl, og det er kun en mindre del af populationen, som findes i mere naturlige habitater som hegn, krat og skov. Vi anslår, at halvdelen af solsortene energibehov i vinterperioden dækkes af bær fra hegn.

Antallet af trækfugle er det endnu sværere at anslå; men der findes formentlig mindst 20 millioner andre drosler end solsorte i Sverige, Norge og Finland tilsammen (Asbirk 1997) (Tabel 6.2). Mange af disse passerer Danmark på deres trækrute. Derfor er det sandsynligt, at ca. 10 millioner trækkende drosler passerer Danmark. Det vides ikke, hvor længe de opholder sig her. Der er vel også tale om stor variation mellem år. På baggrund af antallet af potentielle trækfugle antager vi, at der i gennemsnit er en halv million trækdrosler til stede hver dag fra midten af oktober til midten af november, hvorefter antallet formodes at falde til nær nul omkring udgangen af november.

Tabel 6.2. Ynglende drosler og stære i Skandinavien (antal millioner par) efter (Asbirk et al., 1997).

	Sverige	Finland	Norge	Danmark
Sjagger	0,75 – 1,5	0,8 – 1,2	1,0 – 3,0	
Sangdrossel	1,5 – 3,0	1,0 – 1,5	0,5 – 1,0	
Vindrossel	1,0 – 2,0	1,5 – 3,0	1,0 – 1,5	
Misteldrossel	0,075 – 0,2	0,05 – 0,08	0,01 – 0,05	
Solsort	1,0 – 2,0	0,15 – 0,2	0,1 – 1,0	2,25
Stær				0,66

Antagelse: Der passerer 10 millioner drosselfugle gennem Danmark i løbet af efteråret. Dertil kommer at der findes ca. 5 millioner danske solsorte som normalt bliver i lande og 660.000 stære som forlader landet i løbet af september og oktober.

6.8.4 Drosselfugles energibehov om vinteren

En fugl på ca. 100 g skal ved 0 °C bruge ca. 50 kcal/døgn for at opretholde sin kropsvægt ved et lavt aktivitetsniveau (Kendeigh, 1970). Tilsvarende skal en fugl på 130 g bruge 55 kcal/døgn. Drosselfugle vejer typisk omkring 100 g i den del af sæsonen, hvor der er modne tjørnebær (Tabel 6.3).

Tabel 6.3. Nogle bærspisende fugles vægt (efter Snow & Snow 1988).

Art	Vægt (g)	Sæson
Solsort	113,9	November – januar
Sangdrossel	95,9	November – februar
Misteldrossel	144,0	November – februar
Sjagger	117,9	September – januar
Vindrossel	64,9	September – november
Stær	92,1	November – februar

Antagelse: Som gennemsnit skal drosselfugle bruge 50 kcal/døgn for at opretholde livet ved en lav aktivitet ved danske efterårstemperaturer.

Når man skal vurdere betydningen af, at bærbærende hegnsarters frugtsætning ændres, er det vigtigt at kende bærrenes værdi som fødekilde for fugle. Til belysning af dette foreligger der materiale først og fremmest fra England. Vi har ikke fundet danske undersøgelser, som kan supplere dette.

Ud fra kendskab til energiudnyttelse af føden og energiindhold i bærrerne kan følgende fødebehov i form af bær beregnes (Tabel 6.4).

Det gennemsnitlige energibehov per døgn for en drossel udtrykt i gram tjørnebær er således 100 g tjørnebær, 74 g seljerønbær eller 179 g hyldebær. Denne mængde benævnes et drosseldøgn.

Antagelser: 100 g tjørnebær eller 74 g seljerønbær eller 179 g hyldebær kan forsyne en gennemsnitsdrosselfugl med den nødvendige energi per døgn. Denne mængde kaldes herefter drosseldøgnækvivalent eller blot drosseldøgn.

Tabel 6.4. Bærspisende fugles energi- og fødebehov per døgn under forudsætning af at energien skaffes fra tjørnebær, seljerønbær eller hyldebær (baseret på opgivelser hos (Snow og Snow, 1988; Herrera, 1998 og Eriksson og Erhlen, 1991)).

Art	Energi- behov Kcal/døgn	Frisk frugt Kcal/g	Energi udbytte %	Behov g fr. frugt	Bær til rådighed ton	Drossel- døgn millioner
Tjørn	50	0,68	75	100	4.389	43
Seljerøn	50	0,925 (0,78-1,07)	75	74	15.843	214
Hyld	50	0,38	75	179	12.392	69

6.8.5 Sammenligning af beregnet fødebehov og fødeproduktion

I beregningerne antages det, at hver mark i gennemsnit sprøjtes en gang med herbicid, samt at halvdelen af hegnene herved eksponeres i en eller anden grad. Det antages ligeledes, at alle herbicider har virkninger svarende til metsulfuron, eller at alle marker sprøjtes med metsulfuron. Det er selvfølgelig en simplificering, og de følgende beregninger kan derfor kun betragtes som over-slag.

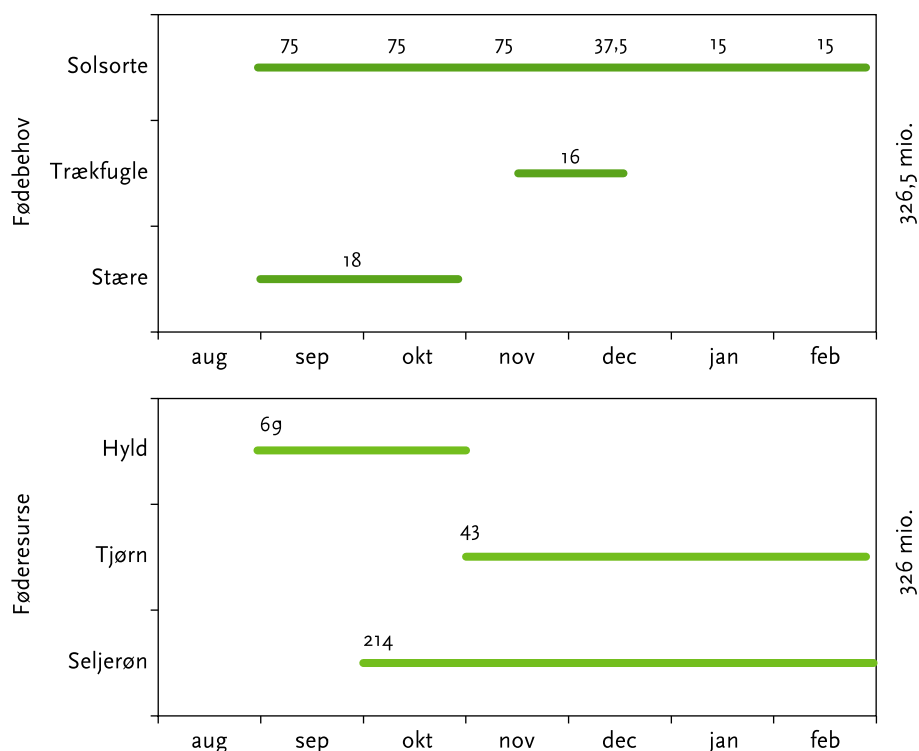
Fødemængde for fuglene beregnes ved at omsætte bærmængden til drosseldøgn for den enkelte hegnsart (Tabel 6.4). Reduktionen i fødemængden som følge af metsulfuron-afdrift beregnes ved at reducere i henhold til de effekter, der er beregnet tidligere i kapitel 6. I de præsenterede data er beregnet den bær-mængde der vil være til rådighed ved den beregnede afdrift af sprøjtemiddel efter brug af 3 dysetyper, 2 dysetryk og med/uden bufferzone på 12 m (se Tabel 6.5 nedenfor). Alle beregninger er gennemført for en sprøjtning, der er gennemført klokken 11 med en metsulfuron-dosering på 4 g/ha.

Tabel 6.5: Oversigt over den forventede procentvise reduktion i tilgængelig fugleføde som følge af sprøjtemiddelafrift ved tre dysetyper/-tryk og tilstedeværelse af 12 m bufferzone(jf. afsnit 6.4 og 6.5) sammenlignet med usprøjtede hegn.

Hegns- art	Dyse	AI11004	AI11004	XR11002	XR11002	XR11002	XR11002
	Dysetryk Buffer- zone	3,1 atm 12 m	3,1 atm 0 m	1 atm 12 m	1 atm 0 m	3,1 atm 12 m	3,1 atm 0 m
Hyld	0	4,7	11	16	34	56	69
Seljerøn	0	1,2	1,6	4,5	4,6	10	12
Tjørn	0	25	27,0	54	55	86	87

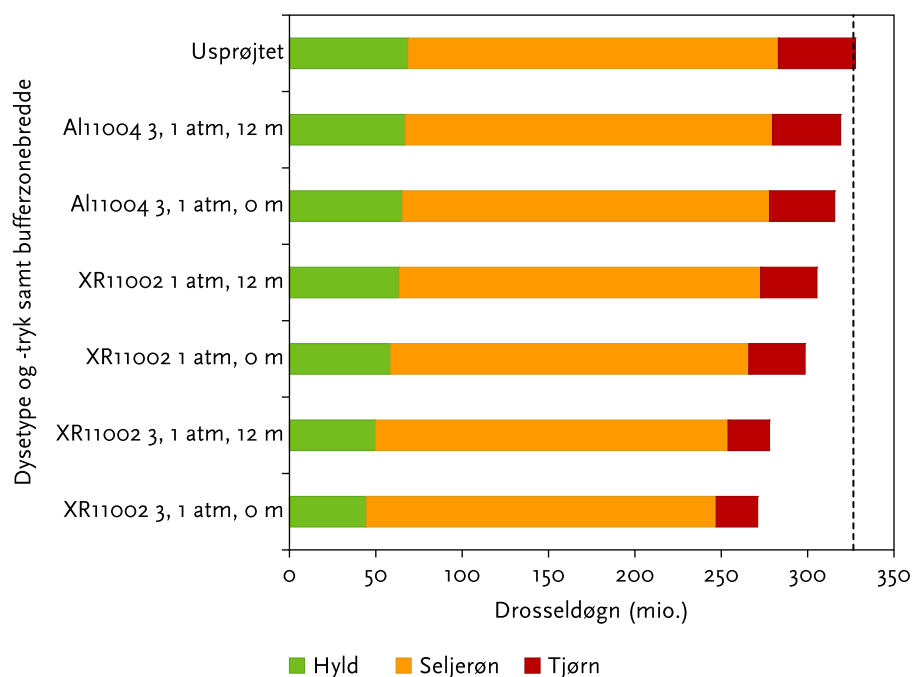
Dernæst anslås mængden af fugle, der fortærer bær, og denne mængde om-sættes til behovet i drosseldøgn. Som tidligere nævnt er det vores antagelse, at 10.000.000 trækfugle kommer gennem Danmark over en måned. Det er an-taget, at der er 500.000 drosler tilstede per dag i den periode. Derudover er der 5.000.000 solsorte, der få dækket 50 % af deres fødebehov ved at spise bær: Det betyder, at der er det, der svarer til 2.500.000 solsorte, fra september til november. I december udgør bær kun 25 % af solsortenes føde (1.250.000 solsorte), og i januar og februar falder andelen yderligere til 10 % (500.000 solsorte) (Snow og Snow 1988).

Beregningerne viser, som det fremgår af Tabel 6.4 og nedenstående Figur 6.7, at der er 326 millioner drosseldøgn til rådighed, ifald hegnene ikke påvirkes af herbicidafdrift. Samtidig har fuglene et fødebehov, der svarer til 326,5 millioner drosseldøgn.



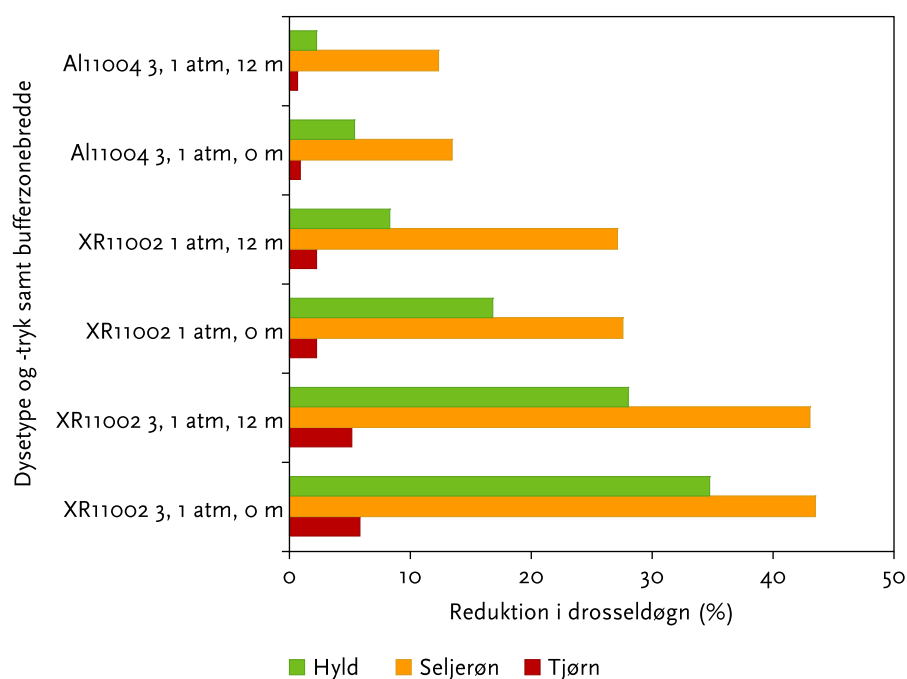
Figur 6.7. Oversigt over de antagelser der er gjort i beregningen vedrørende forekomsten af bær og bærspisende drosler og stære. Tallene præsenteret på den enkelte linje angiver drosseldøgn. Tallene ved de tre arter af bærbærende buske/træer er den skønnede mængde af drosseldøgn, der er til rådighed ved sæsonens start, ifald alle hegn er usprøjtede.

Beregningerne for de forskellige drifthændelser indikerer, at valget af sprøjteudstyr og sprøjtetryk kan betyde, at mængden af fugleføde er mindre end behovet (Figur 6.8). Sprøjtning med AI11004 dyser giver således en meget begrænset påvirkning af den samlede fødemængde, hvorimod XR11002 brugt med et dysetryk på 3,1 atm resulterer i en reduktion på ca. 20 %. En bufferzone på fx 12 m har kun i meget begrænset grad indflydelse på fødemængden.



Figur 6.8. Sammenhængen mellem den tilgængelige fugleføde ved forskellige sprøjtevilkår brugen af 3 forskellige sprøjteindstillinger (dyser, dysetryk) samt +/- 12 m bufferzone. Den lodrette streg ved 308,5 millioner drosseldøgn markerer drossel fuglenes og stærenes skønnede behov for bær i drosseldøgn.

Det er i beregningerne antaget, at alle bærrerne kan erstatte hinanden. Ved at sammenstille alle de tre hegnsarter ligevægtigt antager vi således, at fuglene ikke er specialiseret på en art. I det tilfælde, at der findes arter, der er specialiseret på bær af enten hylde eller tjørn, viser Figur 6.9, at de vil opleve en kraftig reduktion i fødemængden.



Figur 6.9. Procentvis reduktionen i tilgængelige fugleføde, udtrykt som drosseldøgn, for tre bærbærende hegnsarter ved forskellige sprøjtevilkår (3 forskellige sprøjteindstillinger (dyser, dysetryk) samt +/- 12 m bufferzone).

I det ovenstående regneeksempel er det ikke medtaget, at der også er andre fugle, der udnytter bærrerne gennem efteråret og vinteren. Det betyder, at man må forvente, at disse vil opleve en fødemangel, eller at drosselfuglene hurtigere vil fjerne bærrerne. Modsat er det heller ikke medtaget, at der findes flere bærbuske, som dog ikke har den samme store udbredelse (taks, kornel, slåen, kristtorn osv.).

Scenarieberegningerne tidligere i dette afsnit viste, at betydningen af sprøjte-tidspunkt og betydningen af valget af sprøjtedyse var af samme størrelsesorden. Det betyder, at det er muligt at reducere effekten betydeligt ved at sprøjte tidligt om morgenen i forhold til at sprøjte i løbet af dagen (afsnit 6.3, Figur 6.1), hvilket også er den generelle anbefaling til sprøjteførere.

Ud fra de ovenstående beregninger kan man konkludere, at det er sandsynligt, at sprøjtemiddelafdrift kan have effekt på vinteroverlevelse af solsort, men at det er muligt at reducere denne effekt betydeligt ved at vælge afdriftreducerende dysetyper, det rette sprøjte tidspunkt og i et vist omfang etablering af bufferzoner.

7 Diskussion

Eksperimenterne med seljerøn og hyld viser, at lige som tjørn (Kjær et al. 2004) påvirkes disse to arters børsætning af metsulfuron. Selv om seljerøn er mindre følsom end tjørn og hyld det år, der sprøjtes, er børsætningen for denne art lige som for tjørn påvirket året efter sprøjtning. Sammenholdt med målingerne af afdrift af metsulfuron til hegn ved marksprøjtning viser resultaterne, at en stor del af de bærproducerende træer, der optræder hyppigst i danske læhegn, vil kunne påvirkes, når en mark sprøjtes med metsulfuron. Forskellen i følsomhed samt den forskellige fordeling af bær over højde for de tre arter gør dog, at tjørn og hyld er mere udsatte for effekter af metsulfuron-afdrift end seljerøn. I udenlandske undersøgelser har fuglekirsebær vist sig at være følsom over for andre sulfonyleureaherbicider (fx Bhatti et al. 1995). Det er således efterhånden veldokumenteret, at denne type herbicider, som anvendes i stort omfang, kan have betydelige reproduktive effekter på træer, der ellers i kraft af deres størrelse og alder generelt anses for mindre følsomme end de enårige plantearter, der normalt indgår i standardtest i forbindelse med vurdering og godkendelse af sprøjtemidler.

Den anvendte afdriftsmodel fungerer godt med hensyn til at reproducere den målte afsætning på curlere og respons på variation af meteorologiske parametre. Formen af de vertikale afdriftsprofiler stemmer også overens med målingerne og de teoretiske forventninger; men der er stadig mulighed for forbedringer.

En af svaghederne i afdriftsmodellen er, at den initiale afdrift er empirisk bestemt alene ud fra luftens turbulens via friktionshastigheden. Det er sandsynligt, at hastigheden af traktor har en betydning, som vil være relativ størst ved lave vindhastigheder. Traktorens hastighed har under alle målingerne været den samme, ca. 7 km/t. Heller ikke det faktum, at traktoren i sig selv udgør en fysisk forhindring, der har indflydelse på den initiale afdrift pga. turbulensdannelse, er specifikt medtaget i modellen. Visuelle indtryk fra forsøgene, hvor vi kunne iagttage den gulgrønne sprøjtetåge (se billeder i Appendiks 1), indikerer, at dette nok er af mindre betydning. CFD-modeller vil kunne simulere turbulensen omkring traktoren, men modellerne har også begrænsninger (afsnit 3.3.1). Det vil på sigt være muligt at udvikle afdriftsmodellen til specifikt at kunne parameterbeskrive denne effekt via en større vertikal startspredning for en del af dråbeskyen. Den initiale afdrift afhænger også af dråbernes størrelse, således at afdriften var størst for de mindste dråber. Det vil kunne forbedre afdriftsmodellen realisme betydeligt, hvis der i et eventuelt senere projekt tages hensyn til dette.

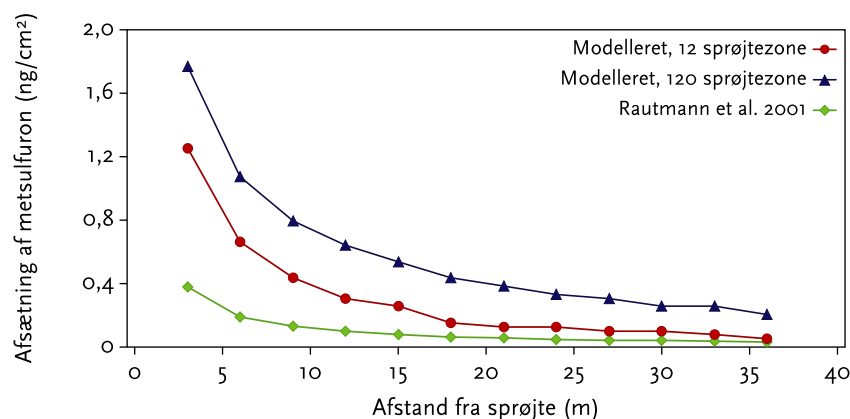
En anden svaghed er, at modellen ikke kan håndtere indflydelsen fra tætte læhegn, hvor en kraftig opbremsning af vinden foran hegnet vil tvinge dele af luftstrømmen op over hegnet.

En styrke ved afdriftsmodellen er, at den turbulente spredning er beskrevet meget præcist, idet den grundliggende OML-model er velafprøvet (Olesen et al. 2007). I modellen er spredningen, udover den initiale afdrift, den væsentligste faktor ved forudsigelse af afdriften til hegnet.

Modelleringen af afdriften viser, at der er et betydeligt bidrag til afdriften af herbicid til hegn fra flere sprøjtespor. Ved vurdering af afdriften til hegnet i forhold til en bufferzone vil bidraget fra flere sprøjtespor blive mere og mere betydeligt, jo bredere bufferzonen er, idet bidraget fra de fjernereliggende spor øges relativt. Således er afdriften i 4 m højde af dråber > 20 µm (dvs. dråber af en størrelse, der opfanges af bladene) op til 30 gange så stor, når man summerer bidraget fra 120 m (i dette tilfælde 10 sprøjtespor), som bidraget fra 12 m (sprøjtesporet nærmest hegnet) ved en sprøjtning uden sprøjtefri randzone, mens der i ½ m højde ikke er nær så store forskelle (ca. 1,3 gange så meget afdrift fra 120 m som fra 12 m) (se evt. også Figur 3.20). Idet den modelberegnete afdrift kan omsættes til afsætning i hegnet, er det muligt at sammenligne modelberegningerne med tidligere undersøgelser. Gilbert & Bell (1988), Nordby & Skuterud (1975) og Yates et al. (1978) fandt, at der maksimalt blev afsat 3,4-10 gange så meget fra 10 spor (70-120 m) som fra et spor, og dermed er der nogenlunde overensstemmelse mellem disse undersøgelser og nærværende projekt. Vores undersøgelse bekræfter således, at man ved vurdering af afdrift fra marksprøjtning bør medtage bidragene fra min. 120 m.

Der er ikke mange undersøgelser at forholde vore resultater til. Kun Weisser et al. (2002) har tilsyneladende lavet sammenlignelige studier af sprøjtemiddelafdrift til hegn. I deres undersøgelse indgår ikke effekten af sprøjtetidspunkt eller bufferzonebredde, men de har sammenlignet afdriften fra to dysetyper, en konventionel dyse (XR 11003 ved et tryk på 2 atm) og en afdriftsreducerende dyse (AI 120025 ved 3 atm), dvs. dysetyper, som er delvist sammenlignelige med dyserne anvendt i vores beregninger. I højden 0-50 cm i hegnet har Weisser et al. (2002) målt ca. 4,2 gange så stor afsætning fra den konventionelle som fra den afdriftsreducerende dyse. De tilsvarende forhold mellem afsætning fra de to dysetyper i intervallet fra 50-100, 100-150 og 150-200 cm højde i hegnet er 5,7, 5,0, og 5,1. Dermed svarer værdierne fra Weisser et al. (2002) meget godt overens med, at vores model beregner relationer i afdrift mellem XR 11002 ved 3,1 atm tryk og AI 11004 ved 3,1 atm på 6,6, 5,6, 6,3, 7,7 og 7,6 i hhv. ½, 1, 2, 4 og 8 m højde. Begge undersøgelser stemmer således nogenlunde overens med de tyske anbefalinger af dysetyper (BBA 2007), som antager, at der ved 3,1 atm dysetryk vil være en reduktion i afdriften til vandløb mv. (altså vandrette flader i eller lige over jordhøjde) på 75 % ved anvendelse af AI 11004 sammenlignet med konventionelle dysetyper.

I den nuværende risikovurdering af sprøjtemidler og ved udlægning af sprøjtefri bufferzoner, der skal beskytte vandløb mod pesticidafdrift, anvendes estimer for sprøjtemiddelafsætning i jordniveau baseret på Rautmann et al. (2001). I Figur 7.1 er disse estimer sammenlignet med de værdier for afsætningen i ½ m højde i hegn, som vi i dette projekt har estimeret ud fra modelberegningerne af afdriften. Modelberegningerne i nærværende projekt for afsætningen i ½ m højde i 3 m afstand fra sprøjten er 3-5 gange større end estimatet for afsætning på vandrette flader i Rautmann et al. (2001), afhængig af om man medregner 1 eller 10 sprøjtespor, og for større afstande op til 7 gange så stor. Årsagen til forskellen i estimerne for afsætning af sprøjtemiddel er bl.a., at de data, der ligger til grund for Rautmann et al. (2001), alle er målinger af de dråber, der sedimenterer på jorden. Prøvetagningerne og modelleringerne i nærværende projekt tager derimod udgangspunkt i de dråber, der findes i luften, og som fanges af plantedele. På basis af dette projekt må stille spørgsmålstejn ved, om de nuværende anbefalinger i tilstrækkelig grad tager hensyn til eksponeringen af marknære naturarealer ved afdrift af sprøjtemidler, specielt hvis man også vil tage hensyn til planter, der har en vis vertikal udstrækning og derfor eksponeres for den del af sprøjtemidlet, der driver væk fra marken.



Figur 7.1. Sammenligning af projektets estimer af metsulfuronafsætning i ½ m højde baseret på 1 og 10 sprøjtespor à 12 m bredde og de nuværende vejledende værdier for afdrift af sprøjtemiddel (Rautmann et al. 2001) for forskellige afstande fra sprøjten.

Scenarieberegningerne viser, at af de undersøgte arter vil kun hyld sætte væsentligt flere bær, hvis der indlægges sprøjtefrie bufferzoner mellem mark og hegn. Valg af afdriftsreducerende dyser, lavere dysetryk eller optimalt sprøjte-tidspunkt/-vejr vil kunne have en stor betydning for bær-sætningen i både tjørn og hyld, mens effekten på seljerøn vil være lille. Disse forskelle mellem arterne hænger sammen med højden af træerne, fordelingen af bær over højden og forskelle i de tre arters følsomhed over for metsulfuron. Seljerøn er en høj art, som sætter flest bær højt i træet. Derfor påvirkes seljerøns bær-sætning primært af afdrift af små dråber udsprøjtet langt inde i marken og dermed ikke påvirkes meget af sprøjteforholdene tæt på hegn. Desuden er seljerøn den mindst følsomme af de tre arter, i hvert fald i sprøjteåret. Hyld er generelt mest på-virket af ændringer i sprøjtebetingelserne pga. lav højde, primær bær-sætning i højden 1- 3,5 m og temmelig stor følsomhed over for sprøjtemidlet. Formentlig vil andre lave hegnstræer og – buske respondere på afdrifts-reducerende tiltag på samme måde som hyld, og de samme tiltag må også antages at kunne have en væsentlig effekt på hegnets fodpose, jf. målinger af afsætning på blade i afdriftszonen med forskellige dysetyper der viste, at den konventionelle XR 11003 dyse afsætter mellem 20 og 40 gange så meget sprøjtemiddel på engvegetation i afdriftszonen som den driftreducerende AI 110025 (Weisser et al. 2002).

Der blev ikke brugt sprøjtemidler i det yderste sprøjtespor af de marker, der grænser op til de hegn, der blev brugt til at etablere dosis-responssammen-hænge for tjørn, seljerøn og hyld. Denne bufferzone blev etableret for at undgå kontaminering af hegn. Vores undersøgelser af sprøjtemiddelafdrift til hegn har imidlertid vist, at en sådan bufferzone ikke kan forhindre sprøjtemid-deffekter i hegn, hvis marken sprøjtes. Det betyder, at det ikke kan udeluk-kes, at forskelle i dosis-responssammenhængen mellem hegn skyldes den kombinerede effekt af afdrift fra marken og vores eksperimentelle sprøjtning. Det er dog vores vurdering, at det ikke har spillet en stor rolle, idet bærpro-duktionen i et hegn, hvor der med sikkerhed ikke blev brugt sprøjtemidler på de tilstødende arealer, var af samme størrelse som de øvrige hegn, hvor vi ikke ved, om der er sprøjtet med herbicid. Endvidere var kontrolplanterne sam-menlignelige i alle hegnene. Hvis de fleste hegn rent faktisk har været ekspone-ret for afdrift af herbicider, kan dette indikere, at hyld og seljerøn ikke er så følsomme over for de anvendte sprøjtemidler som over for metsulfuron.

I beregningerne af hvorledes den modellerede afdrift vil påvirke bærmængden, har vi antaget, at der fra en given sprøjtesky afsættes sammenlignelige mængder af sprøjtemiddel (g/cm^2) på de tre hegnsarter, der indgår i undersøgelserne. Denne antagelse er usikker, idet flere undersøgelser har vist, at der afsættes forskellig mængde partikler/dråber på forskellige træarter (Ucar et al., 2003; Beckett et al., 2000 og Tiwary et al., 2005). Denne forskel er blandt andet udtryk for de morfologiske forskelle mellem arter (bladform, vækstform mm). En anden faktor, der sikkert også er af betydning, er den måde, hegnene bliver dyrket på (udplantningstæthed, beskæringsfrekvens etc.). Tiwary et al 2005 angiver, at afsætningen stiger med hegnets porøsitet/gennemtrængelighed, og de fandt, at tjørn var mere gennemtrængelig end både kristtorn og taks. Jo tættere et hegn er, desto større andel af luftstrømmen (og hermed de driftende dråber) tvinges over hegnet og ned i den turbulens der opstår på bagsiden af hegnet. Eksempelvis har Longley et al. (1997) fundet at der i flere tilfælde blev afsat sammenlignelige mængder sprøjtemiddel på for- og bagsiden af hegnet. Det er kendt, at seljerønhegn generelt er mere åbne end de to andre arter. Man kunne derfor forestille sig, at der ville være større effekt på seljerøn end estimeret i scenarierne. Kun yderligere forsøg med relevante arter kan give et bud på, hvordan dråber afsættes på forskellige hegnsarter og -typer.

Scenarierne i denne rapport ser primært på mulighederne for at reducere afdriften af herbicider til læhegnene sammenlignet med situationen i dag, under forudsætning af at de fleste sprøjtninger foregår med konventionelle dyser uden hensyntagen til sprøjtetidspunkt og uden sprøjtefri bufferzone. Et relevant spørgsmål i den forbindelse kunne være, hvilken målsætning man skal opstille for tilstanden i læhegnene og dermed afdriften af sprøjtemidler. Pesticidplanen forholder sig til 2010-målet om standsning af nedgang i biodiversiteten, men man kunne jo også fx for hegnenes vedkommende vælge at satse på en forbedring af biodiversiteten. Som nævnt i indledningen til denne rapport er mange insekt- og fuglearter knyttet til hegnene, hvilket også gælder for floraen i hegnets fodpose, som desuden i sig selv udgør en del af agerlandets biodiversitet. Derfor vil nedsat herbicidafdrift direkte eller indirekte kunne fremme biodiversiteten. Pesticidplanens midler til at nå 2010-målet er en reduktion af behandlingshyppigheden. Dette kan opnås på flere måder. Man kan fx nedsætte dosis generelt, eller man kan vælge at reducere pesticidbelastningen af den enkelte mark og samtidig afdriften til hegnets fodpose mv. ved at lægge en sprøjtefri randzone i kanten af marken. Behandlingshyppigheden kan dog også reduceres ved at reducere brugen af sprøjtemidler, der ikke nødvendigvis har en betydende effekt på biodiversiteten i hegnene. Resultaterne i denne rapport viser, at en sprøjtefri randzone ikke i alle tilfælde har den store effekt på selve hegnet, hvorimod der kan forventes en positiv effekt i hegnenes fodpose. Resultaterne viser også, at man kan reducere afdriften til den mark-nære natur ved at vælge sit sprøjteudstyr og/eller sit sprøjtevejr med omhu. Disse metoder kan således ses som alternativer til Pesticidplanens anvisninger. For landmanden vil det formentlig være attraktivt at have forskellige alternativer at vælge imellem, da det vil øge fleksibiliteten og dermed mulighederne for at sikre afgrøden, uden at det går ud over naturen.

I kapitel 6 er der givet et overslag over betydningen af sprøjtemiddelafrift for mængden af fugleføde. Beregningen viser, at omhyggeligt valg af sprøjteudstyr, sprøjtetryk og formentlig også sprøjtetidspunkt kan øge den tilgængelige mængde fugleføde sammenlignet med sprøjtning uden sådanne hensyn. Bufferzoner forventes at have en mindre betydning, hvilket selvfølgelig hænger sammen med, at bufferzoner kun har en tydelig effekt på den ene af de tre

omhandlede hegnsarter. Det er vigtigt at pointere, at hensigten med dette regneeksempel kun er at illustrere, at der er en tydelig effekt af sprøjtning på mængden af fugleføde i hegnene, og at afdriftreducerende tiltag kan have en betydelig effekt. Der er en række usikkerheder/antagelser, der gør, at estimerne for den enkelte fugleart og dens behov for netop disse tre bærbærende hegnsarter er behæftet med stor usikkerhed:

- Alternative fødekilder er ikke medtaget i regnestykket, og beregningerne gælder derfor kun for landbrugsområder, hvor hegnene er hovedkilden til de bær, fuglene æder
- Det er forudsat, at alle hegn eksponeres for metsulfuron, hvilket er urealistisk, men en nødvendig antagelse, da vi ikke kender effekten af andre herbicider på hegnene
- Det er sandsynligt, at andre (ikke-systemiske) herbicider vil have mindre effekter på hegnenes bærsetning end metsulfuron
- I en del tilfælde vil landmanden sprøjte tidligere på året, end vi har gjort i dette projekt, og der mangler viden om effekten af at sprøjte inden løvspring
- Der er ikke taget højde for, at andre fugle også udnytter de omtalte hegnsarter som føde
- Der er ikke taget højde for, at nogle fuglearter kan være specialiseret på enkelte typer bær
- Antallet af fugle meget usikkert bestemt

En mere nøjagtig udregning ville således kræve populationsøkologisk tilgang for de relevante fuglearter samt viden om effekten af alle anvendte herbicider på hegnene, hvilke er uden for rammerne af denne rapport. Scenarieberegningerne sandsynliggør dog, at der kan være fødekædeeffekter af afdriften af ukrudtsmidler fra marker til hegn.

8 Konklusioner

Beregningen af hegnslængde og træartsfordeling baseret på en stikprøve af danske hegn viser, at buske og hegnstræer, der sætter bær, er dominerende i danske læhegn. Det er anslået, at disse arter udgør ca. 50 % af den samlede hegnslængde, svarende til 50.000 km. De tre arter, der er undersøgt i dette projekt, udgør 77 % af alle bærbærende træarter i læhegn. Den tidligere etablerede dosis-responssammenhæng for effekten af metsulfuron på tjørn i afdriftszonen er verificeret under normale sprøjteforhold i marken. Projektets resultater viser, at seljerøn og især hyld også er følsomme over for små mængder af det valgte ukrudtsmiddel, men dog ikke helt så følsomme som tjørn.

Målingerne af afdrift af ukrudtsmiddel fra mark til hegn viser, at afdriften nederst i hegnet bliver mindre, jo længere der er mellem hegn og sprøjte, hvorimod afstanden ikke har den store betydning øverst i hegnet. Under alle omstændigheder bidrager flere sprøjtespor betydeligt til den samlede afdrift, dvs. man kan ikke nøjes med at tage hensyn til afdriften fra det sprøjtespor, der er nærmest hegnet.

På baggrund af de indsamlede målinger er der opstillet en model, der er i stand til at simulere observerede data. Det betyder, at det er muligt at modellere afdrift af sprøjtemidler med lavt damptryk i forhold til moderat varierende initial afdrift.

Modelberegningerne viser, at afdriften er mindst, når der sprøjtes ved lav vindhastighed, høj luftfugtighed og lav temperatur. Betragtes gennemsnitlige meteorologiske forhold i sprøjetidspunktet, betyder det, at afdriften vil reduceres væsentlig ved at sprøjte tidligt om morgenen i stedet for senere på dagen. Dette understøtter således de gældende anbefalinger om valg af sprøjetidspunkt. Desuden kan anvendelsen af afdriftsreducerende dyser i sprøjten eller et lavere sprøjtetryk nedsætte afdriften betydeligt, især nederst i hegnet.

Sammenholder man måleresultaterne og modelberegningerne med fordelingen af bær over højden i de undersøgte træarter samt disse arters følsomhed over for det undersøgte sprøjtemiddel, ses, at såvel tjørn som hyld og seljerøn vil kunne nyde godt af, at landmanden vælger sit sprøjetidspunkt med omhu, hvorimod der er stor forskel på betydningen af afstanden mellem sprøjte og hegn (fx sprøjtefri bufferzone) samt valg af dysetype og sprøjtetryk for de tre arter. Hyld, der ikke er så høj som tjørn og seljerøn og har mange bær nederst i hegnet, vil have større fordel af sprøjtefrie bufferzoner end tjørn og seljerøn, som har bærrerne placeret højt i hegnet. På grund af forskellene i følsomhed samt i den højdemæssige fordeling af bærrerne i de tre træarter, vil hyld og tjørn have større gavn af afdriftreducerende sprøjteudstyr og anvendelse af reducerede herbiciddoser i marken end seljerøn.

Overslaget over betydningen af reduceret afdrift af ukrudtsmidler for de fugle, der er afhængige af bærrerne i hegnene om vinteren, tyder på, at valget af sprøjetidspunkt samt dysetyper og sprøjtetryk vil kunne have betydning for vinteroverlevelsen af disse fugle. For fugle, der foretrækker hyldebær, vil det også være vigtigt at etablere bufferzoner.

9 Perspektiver

9.1 Forskningsmæssige perspektiver

Metodemæssigt repræsenterer denne undersøgelse en videreudvikling af tidligere projekter (fx Weisser et al., 2002; Kjær et al. 2004; Holterman, et al., 1997). Den udviklede model giver beregningsresultater, der er i god overensstemmelse med målingerne foretaget i marken. Der er tale om en prædiktiv model, hvor processerne under afdriften er beskrevet ved parameteriseringer, i modsætning til empiriske modeller, som regner på aktuelle data og ikke har samme generaliseringspotentiale. I forhold til andre afdriftsmodeller (fx Holterman et al. 1997) er denne models styrke, at den kan beregne den horisontale fluks i højden, hvilket er en forudsætning for at kunne forudsige eksponeringen af fx hegn. Da modellen baseres på parameteriseringer af bl.a. dråbefordampning, spredning og deposition, kan afdriften beregnes for en række forskellige meteorologiske og sprøjtetekniske forhold, hvilket giver mange anvendelsesmuligheder.

Der kan dog stadig peges på flere elementer, som burde indgå i denne type undersøgelser. Således er en kritisk forudsætning for scenarieberegningerne i denne rapport, at andre herbicider har cirka samme effekt på hegnene som metsulfuron, men det ved vi reelt ikke meget om for nuværende. En egentlig validering af modellen i forhold til fx de dysetyper, der indgår i scenarierne, ville yderligere underbygge modellens anvendelighed. Der mangler også undersøgelser af effekten af afdriften af herbicider på andre hegnsarter, herunder ikke mindst på arterne i hegnets fodpose og afledte effekter af herbicider på andre organismegrupper. Tilsvarende bør man i fremtiden inkludere insekticider og deres effekter på insekterne i markens omgivelser. Med sådanne undersøgelser vil man i højere grad være i stand til kvalificeret at sammenligne effekten af forskellige afdriftsregulerende tiltag som fx sprøjtefrie randzoner og afdriftsreducerende sprøjteudstyr.

Ved at udvide dråbemodellen til også at kunne håndtere stoffer, der i højere grad fordamper sammen med sprøjtevæsken og også medtage effekten af hjælpestoffer vil anvendeligheden af afdriftsmodellen kunne øges. Data, der beskriver, hvorledes luften bevæger sig i og omkring forskellige hegnstyper (herunder forskellige bladformer), og hvorledes vindretning og vindhastighed påvirker hegnets gennemtrængelighed/porøsitet, vil kunne gøre afdriftsmodellen anvendelig under flere forskellige betingelser.

Sammenholdes de opnåede resultater for mængderne opsamlet på curlere hhv. sugefiltre og fortolkes disse opsamlingsmedier som opsamlere af hhv. dråber/partikler større og mindre end ca. 20 μm , viser undersøgelsen, at de små partikler masse-mæssigt når et niveau, der er sammenligneligt med afdriften af dråber både i første og andet sprøjtespor. De små partikler bidrager forholds-mæssigt mere og mere i forhold til dråberne, jo længere væk fra sprøjten man befinder sig. Disse små dråber/partikler er dels ”direkte” emitteret fra sprøjtedyssen, dels ”genereres” de ved fordampning af større dråber. Hvor tidligere undersøgelser af spraydriftstabt oftest har været fokuseret på belastningen af randzonerne, viser dette forsøg, at der er et kvantitativt relevant

tab fra hele marken (alle sprøjtespor), som transporteres væk fra nærområdet. Det kunne være relevant at undersøge, hvor meget dette tab bidrager til en generel belastning af atmosfæren, og hvor disse partikler "bliver af".

I denne rapport er scenarieberegninger udført uden skelen til den reelle fordeling af hegn, hegnsarter, afgrøder og sprøjtemiddel anvendelse i det danske landskab. Ved inddragelse af data fx fra Danmarks Statistik og landbrugsregisteret samt anvendelse af fx GIS-værktøjer vil man på en finere skala kunne estimere pesticidafdriftens størrelse og betydning for de marknære biotoper og ikke mindst potentialet for biodiversitetsforbedringer ved forskellige afdriftsreducerende tiltag.

9.2 Administrative perspektiver

Det er både i denne og tidligere undersøgelser (fx Kjær et al., 2004; Bhatti et al., 1995) påvist, at flere hegnsarter er følsomme over for sulfonylhæmmer i doseringer, der kan forekomme ved afdrift fra marksprøjtninger. Disse data kan indgå i overvejelser af, hvordan man kan inddrage effekter på non-targetplanter i vurderingen af sprøjtemidler, fx i forbindelse med godkendelse.

Der er i nærværende rapport påvist flere muligheder for at reducere afdriften til hegn. I forbindelse med de reguleringsmæssige muligheder er det oplagt også at pege på behovet for at kunne kontrollere, om afdriften rent faktisk er reduceret. Til dette vil det være nødvendigt at udvikle en eksponeringsindikator, som med stor sikkerhed kan måle, i hvor høj grad fx hegnsplanter har været eksponeret for de sprøjtemidler, der er anvendt i de nærliggende marker.

Resultaterne af scenarieberegningerne for bufferzonebredder, sprøjtetidspunkt og valg af sprøjteudstyr bør indgå i overvejelser af, hvilke anbefalinger eller reguleringer der mest effektivt vil kunne mindske de utilsigtede virkninger af marksprøjtninger på den marknære natur. Hvis man ser på selve hegnene, vil afdriftsreducerende sprøjteudstyr fx give en bedre beskyttelse end reducerede doser eller sprøjtefrie bufferzoner. Som nævnt under de forskningsmæssige perspektiver vil det være ønskeligt i den forbindelse at se nærmere på, hvordan de samme reguleringsmuligheder vil påvirke fx planterne i hegnenes fodpose eller insekterne i hegnene. Hertil vil det være oplagt at videreudvikle den anvendte afdriftsmodel, ligesom modellen også vil kunne indgå i andre relaterede undersøgelser.

På basis af dette projekt må man stille spørgsmål ved, om de estimerer for afdrift, der for nuværende anvendes i forbindelse med risikovurdering af sprøjtemidler, i tilstrækkelig grad tager hensyn til eksponeringen af marknære naturarealer ved afdrift af sprøjtemidler. Dette gælder specielt den del af naturen, som har en vertikal udstrækning, fx hegn.

Projektets dokumentation af, at metsulfuron påvirker reproduktionen hos seljerøn og hyld, uden at der samtidig er en tilsvarende reduktion i den vegetative biomasse (blade), indikerer, at de nuværende standardøkologiske test med planter ikke dækker alle relevante effektparametre. Det bør tages op ved kommende revisioner af de relevante test-guidelines, herunder EUs "Guidance document on terrestrial ecotoxicology".

Konceptet med modelleringer og efterfølgende scenarieberegninger vil også kunne anvendes i forbindelse med en effektbaseret indikator for sprøjtemid-

delforbruget i Danmark, specielt hvis man supplerer med data for den regionale fordeling af afgrøder og sprøjtemiddelanvendelse samt den regionale forekomst af hegn og andre marknære småbiotoper, som beskrevet ovenfor. Et forslag til en sådan indikator har været diskuteret i udredningsrapporten benævnt "Indikatoren behandlingshyppighed (BH) som mål for pesticidbehandlingens miljøbelastning" (Kjær et al 2007).

Referencer

- Al-Khatib, K., Parker, R. & Fuerst, E.P. (1992): Sweet cherry (*Prunus avium*) response to simulated drift from selected herbicides. *Weed Technology* 6, 975-979.
- Anonym, (1992): Litteraturstudier om pesticiders afdrift, afsætning på kantbiotoper og fjerntransport. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen 59.
- Anonymous (2007): Bekæmpelsesmiddelstatistik 2006. Miljøstyrelsen.
- Arvidsson, T. (1997): Spray drift as influenced by meteorological and technical factors a methodological study. Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala 1997, Doctors Dissertation in Agraria 71, 1-144.
- Asbirk, S., Berg, L., Hardeng, G., Koskimies, P. & Petersen, A. (1997): Population sizes and trends of birds in the Nordic countries 1978 - 1994. *TemaNord*, 614: 1-88.
- Asman, W., Jørgensen, A. & Jensen, P.K. (2003): Dry deposition and spray drift of pesticides to nearby water bodies. *Pesticides Research* 66. Bekæmpelsesmiddelforskning fra Miljøstyrelsen.
- Astrup, P. (2005): Forskningscenter Risø, personlig kommunikation.
- Atkinson, M.D. & Atkinson, E. (2002): *Sambucus nigra* L. *Journal of Ecology* 90 (5), 895-923.
- BBA (2007): Verzeichnis Verlustmindernde Geräte. Findes på http://www.bba.bund.de/cln_044/nn_813794/SharedDocs/10__FA/Publikationen/Pflanzenschutzgeraete/verlustmind/verzeichnisverlustminderndegeraete__pdf,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/verzeichnisverlustminderndegeraete__pdf.pdf
- Beckett, K.P., Freer-Smith, P.H. & Taylor, G. (2000): Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed. *Global Change Biology* 6: 995-1003.
- Bhatti, M.A., Al-Khatib, K., Felsot, A.S., Parker, R. & Kadir, S. (1995): Effects of simulated chloresulfuron drift on fruit yield and quality of sweet cherries (*Prunus avium* L.). *Environmental Toxicology and Chemistry* 14 (3), 537-544.
- Bicheludvalget (1999): Rapport om Miljø og sundhed. Miljøstyrelsen.
- Bird, B.B., Stewart, W.W. & Lightfoot, E.N. (1960): *Transport Phenomena*. John Wiley & Sons.
- Boothroyd, R.G. (1971): *Flowing Gas-Solids Suspensions*. Chapman and Hall Ltd, London.
- Bruus Pedersen, M., Aude, E. & Tybirk, K. (2004): Adskillelse af effekter af herbicider og kvælstof på vegetation og leddyr i hegn og græslandsvegetation . Miljøstyrelsen. - Bekæmpelsesmiddelforskning fra Miljøstyrelsen 87: 103 s. (elektronisk). Findes på: <http://www.mst.dk/udgiv/publikationer/2004/87-7614 ... 7614-276-0/html>
- Bui, Q.D., Womac, A.R., Howard, K.D., Mulrooney, J.E. & Amin, M. K. (1998): Evaluation of Samplers for Spray Drift. *Transactions of the ASAE* 41: 37-41.
- Cilgi, T. & Jepson, P.C. (1995): The risk posed by deltamethrin drift to hedgerow butterflies. *Environmental Pollution* 87, 1-9.

- Collinge, W.E. (1941): The food of the blackbird *Turdus merula* in successive years. *Ibis*, 1941: 610-613.
- Davis, B.N.K. (1991): Bioassays of insecticide spray drift: the effect of wind speed on the mortality of *Pieris brassicae* larvae (Lepidoptera) caused by diflubenzuron. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 36, 141-149.
- Davis, B.N.K., Brown, M.J. & Frost, A.J. (1993): Selection of receptors for measuring spray drift deposition and comparison with bioassays with special reference to the shelter effect of hedges. Brighton Crop Protection Conference - Weeds 3: 139-144.
- Elliott, J.G. & Wilson, B.J. (1983): The influence of weather on the efficacy and safety of pesticide application - The drift of herbicides. In: Occasional publication no 3, BCPC.
- Eriksson, O. & Ehrlen, J. (1991): Phenological variation in fruit characteristics in vertebrate dispersed plants. *Oecologia*, 86: 463-470.
- Field, M.A., Gill, D.W., Morgan, B.B & Hawksley, P.G.W. (1967): Combustion of Pulverised Coal. The British Coal Utilisation Research Association.
- Fletcher, J.S., Pfleeger, T.G. & Ratsch, H.C. (1993): Potential Environmental Risks Associated with the New Sulfonylurea Herbicides. *Environmental Science & Technology* 27 (10), 2250-2252.
- Fuentes, M. (1994): Diets of Fruit-Eating Birds - What Are the Causes of Interspecific Differences. *Oecologia*, 97(1): 134-142.
- Gilbert, A.J. & Bell, G.J. (1988): Evaluation of the drift arising from spray application. *Aspects of Applied Biology* 17, 363-376.
- Goering, C.E. & Butler, B.J. (1975): Paired field studies of herbicide drift. *Transactions of the ASAE*, 28-34.
- Gunn, R. & Kinzer, G.D. (1949): The terminal velocity of fall for water drops in stagnant air. *J. Meteor.* 6, 243-248.
- Guitian, J. & Fuentes, M. (1992): Reproductive-Biology of *Crataegus-Monogyna* in Northwestern Spain. *Acta Oecologica-International Journal of Ecology*, 13(1): 3-11.
- Hartley, P.H.T. (1954): Wild fruits in the diet of British thrushes. A study in the ecology of closely allied species. *British Birds*, 47(4): 97-107.
- Herrera, C.M. (1998): Long-term dynamics of Mediterranean frugivorous birds and fleshy fruits: A 12-year study. *Ecological Monographs*, 68(4): 511-538.
- Holterman, H.J., van de Zande, J.C., Porskamp, H.A.J. & Huijsmans, J.F.M. (1997): Modelling spray drift from boom sprayers. *Computers and Electronics in Agriculture* 19, 1-22.
- Horst, T.W. (1977): A surface depletion model for deposition from a Gaussian plume, *Atmos. Env.*, vol. 11, pp. 41-46.
- Kennedy, C.E.J. & Southwood, T.R.E. (1984): The number of species of insects associated with British trees: A reanalysis. *Journal of Animal Ecology* 53, 455-478.
- Kendeigh, S.C. (1970): Energy requirements for existence in relation to size of bird. *Condor*, 72: 60-65.
- Kjær, C., Strandberg, M. & Elmegaard, N. (2002): Effekter af sprøjtemiddelafdrift på bærbærende buske og træer som indikator for biodiversitetsforandringer. *Bekæmpelsesmiddelforskning* 60.
- Kjær, C., Strandberg, M.T. & Erlandsen, M. (2004): Effekten af sprøjtemiddelafdrift på buske og træer i læhegn. *Miljøstyrelsen. - Bekæmpelsesmiddelforskning* 92: 62 s. (elektronisk). Findes på: [http://www.mst.dk/udgiv/publikationer/2004/87-7614 ... 7614-427-5/html](http://www.mst.dk/udgiv/publikationer/2004/87-7614...7614-427-5/html)

- Kjær, C., Strandberg, M.T. & Erlandsen, M. (2006): Metsulfuron spray drift reduces fruit yield of hawthorn (*Crataegus monogyna* L.). - *Science of the Total Environment* 356: 228-234.
- Kjær, C., Sørensen, P.B., Kudsk, P. & Jørgensen, L.N. (2007): Indikatoren behandlingshyppighed (BH) som mål for pesticidbehandlingens miljøbelastning. Findes på Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeris hjemmeside:
http://fvm.dk/Files/Filer/Nyheder/Udredning_om_BH_DOK289420.pdf
- Klein & Golus (2004): The effect of spray particle size and distribution on drift and efficacy of herbicides, *Aspects of Applied Biology* 71.
- Kristensen, H. Sastrup (1972): *Formler Til Varmetransmission*, 3. udgave. Polyteknisk Forlag, København.
- Longley, M., Cilgi, T., Jepson, P.C. & Sotherton, N.W. (1997): Measurements of pesticide spray drift deposition into field boundaries and hedgerows: 1: Summer application. *Environmental Toxicology and Safety* 16 (2), 165-172.
- Marrs, R.H. & Frost, A.J. (1997): A microcosm approach to the detection of the effect of herbicide spray drift in plant communities. *Journal of Environmental Management* 50, 369-388.
- Maybank, J., Yoshida, K. & Grover, R. (1978): Spray drift from agricultural pesticide applications. *Journal of the Air Pollution Control Association* 28 (10), 1009-1014.
- Nordby, A. & Skuterud, R. (1975): The effects of boom height, working pressure and wind speed on spray drift. *Weed Research* 14, 385-395.
- Olesen, H.R., Berkowicz, R. & Løfstrøm, P. (2007): OML: Review of model formulation. National Environmental Research Institute, University of Aarhus. - NERI Technical Report 609: 130 pp. (electronic). Available at: <http://www.dmu.dk/Pub/FR609.pdf>
- Rautmann, D., Streloke, M. & Winkler, R. (2001): New basic drift values in the authorization procedure for plant protection products. *Mitt. Biol. Bundesanst. Land- Forstwirtsch.* No. 383. Berlin.
- Richardson, C.M., Warklate, P.J. & Baker, D.E. (2002): Drift reduction characteristics of windbreaks. *Aspects of Applied Biology* 66, 201-208.
- Reichard, D.L., Zhu, H., Fox, R.D. & Brazee, R.D. (1992): Computer simulations of variables that influence spray drift. *Transactions of the ASAE*, 35, 1401-1407.
- Rogers, R.R. (1979): *A Short Course in Cloud Physics*, 2nd edition. Pergamon Press, Oxford, UK.
- Seinfeld, J.H., & Pandis, S.N. (1998): *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change*, John Wiley & Sons, Inc.
- Snow, B. & Snow, D. (1988): *Birds and berries - a study of an ecological interaction*. T & A D Poyser, Calton.
- Sorensen, A.E. (1981): Interactions between birds and fruit in a temperate woodland. *Oecologia*, 50: 242-249.
- Sparks, T.H. & Robinson, K.A. (1999): Hawthorn berry availability in autumn. *Aspects of Applied Ecology* 54, 241-244.
- Tiwary, A., Morvan, H.P. & Colls, J.J. (2005): Modelling the size-dependent collection efficiency of hedgerows for ambient aerosols. *J. Aerosol Science* 37: 990-1015.
- Ucar, T. & Hall, F.R. (2001): Windbreaks as a pesticide drift mitigation strategy: a review. *Pest Management Science* 57 (8), 663-675.
- Weisser, P., Landfried, M. & Koch, H. (2002): Off-crop drift sediments on plant surfaces - exposure of non-target organisms. *Aspects of Applied Biology* 66, 225-230.

Yates, W.E., Akerson, N.B. & Bayer, D.E. (1978): Drift of glyphosate sprays applied with aerial and ground equipment. *Weed Science* 26 (6), 597-604.