

TOPRO

WP1: Model for vindspredning af pollen

Geels^{*}, C., P. Løfstrøm^{*}, L. M. Frohn^{*}, J. Brandt^{*}, G. Kjellsson^{**}

^{*}Afdeling for Atmosfærisk Miljø

^{**}Afdeling for Terrestrisk Økologi, har bidraget til scenariegrundlaget
Danmarks Miljøundersøgelser



1	MODEL FOR VINDSPREDNING AF POLLEN.....	3
1.1	OML-DEP MODELLEN	3
1.1.1	<i>Model domæne og opløsning.....</i>	5
1.2	DEPOSITIONSPROCESSER	6
1.3	METEOROLOGISKE DATA	8
1.3	DE NØDVENDIGE INFORMATIONER OM POLLEN.....	9
1.3.1	<i>Vinterraps.....</i>	10
1.3.2	<i>Vinterrug.....</i>	12
1.3.3	<i>Rajgræsser</i>	12
2	MODELSIMULERINGER AF VINDSPREDNING AF POLLEN.....	14
2.1	RESULTATER FOR VINTERRAPS	14
2.1.1	<i>Sammenligning med andre studier.....</i>	16
2.1.2	<i>Andelen af GM-rapspollen over ikke-GM marker.....</i>	18
2.1.3	<i>Fordelinger i landskabet: et case study fra Bjerringbro-Hvorslev</i>	26
2.1.4	<i>Metode til vurdering af mængden af GM-pollen fra vindspredning.....</i>	28
2.2	RESULTATER FOR VINTERRUG	30
2.2.1	<i>Andelen af GM-rapspollen over ikke-GM marker.....</i>	31
2.2.2	<i>Fordelinger i landskabet og scenarier for afstandskrav: et case study fra Bjerringbro-Hvorslev</i>	31
3	SAMMENDRAG OG KONKLUSIONER.....	39
3.1	<i>Fremtidige forbedringer.....</i>	40
4	REFERENCER.....	41
	APPENDIKS 1.....	44

1 Model for vindspredning af pollen

Typiske landbrugsafgrøder som raps, rug, græsser er delvist eller helt fremmedbestøvende og afhængige af vindbestøvning og/eller insektbestøvning. Brugen af genmodificerede planter (GMP) har derfor ført til en debat om den mulige risiko for forurening af frøafgrøden via atmosfærisk spredning af GM pollen mellem marker og over kortere og længere afstande. Hovedformålet med WP1 er at udvikle en model, der kan anvendes til at undersøge potentialet for transport af pollen i atmosfæren. En sådan model kan bruges som et værktøj til at vurdere spredningsrisikoen forbundet med at dyrke GM afgrøder i områder, hvor der samtidig dyrkes tilsvarende økologiske eller ikke-GM afgrøder. En atmosfærisk dispersionsmodel er derfor videreudviklet til at inkludere processer, som er relevante for simuleringer af pollentransport. De nødvendige processer og parametre er følgende:

Emission:

- Definition af begyndelse og længde af pollensæsonen samt mængden af frigivet pollen som funktion af tiden.

Transport:

- Den atmosfæriske spredning via vinden.
- Horisontal og vertikal opblanding pga. atmosfærisk turbulens under forskellige stabilitetsforhold i det atmosfæriske grænselag.

Deposition:

- Afsætningen af pollen på overfladen pga. tørdeponering og deponering pga. tyngden.

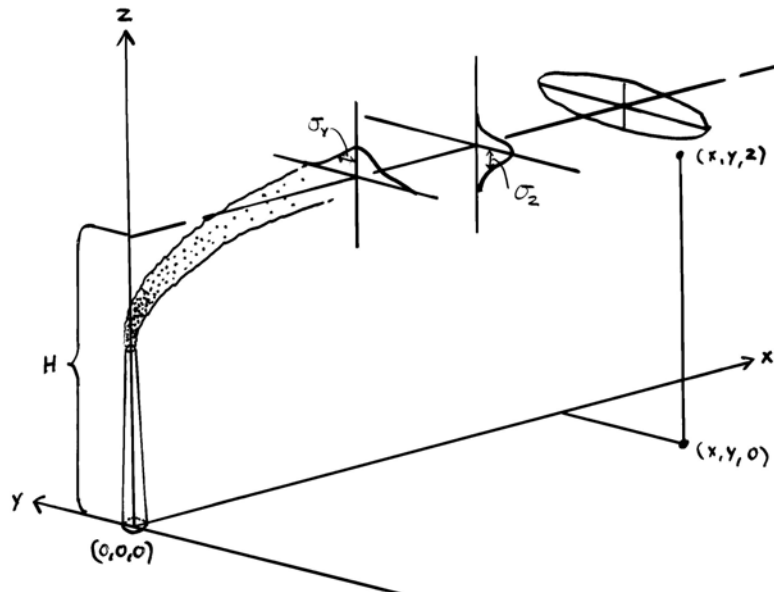
I det følgende er de enkelte processer og implementeringen i det anvendte modelsystem beskrevet. Forholdet mellem koncentrationen af GM-pollen over den økologiske mark og koncentrationen af ikke-GM pollen fra afgrøden antages at være proportional med GM-fremmedbestøvningen og sandsynligheden for et eventuelt utilsigtet GM-indhold i afgrøden.

1.1 OML-DEP modellen

Ved modellering af atmosfærisk transport benyttes forskellige modeltyper afhængig af de tidsmæssige og rumlige skalaer der fokuseres på. Tæt på kildeområderne anvendes ofte Lagrangeske modeller, hvor transporten af f.eks. pollen beskrives langs en trajektorie, der følger vinden. Den Operationelle Meteorologiske Luftkvalitetsmodel (OML) er en Lagrangesk model udviklet ved DMU/ATMI siden 1980'erne (se f.eks. Berkowicz et al., 1986; Olesen et al., 1992). OML modellen er konstrueret med henblik på at estimere spredning af luftforurening fra forskellige kilder på afstande op til 20-30 km. Modellen har været brugt til mange formål og benyttes bl.a. af de danske myndigheder til at vurdere luftforureningen i forbindelse med planlægning af nye industrielle anlæg. I dag findes der to versioner af modellen: 1) Punktkildemodellen OML-Point til at lave beregninger for en enkelt punktkilde og 2) Multikildemodellen OML-Multi, som kan anvendes til at beregne spredningen fra flere forskellige punkt – og arealkilder. I dette projekt anvendes OML-Multi modellens arealkildemetode. Udgangspunktet for modellens beskrivelse af spredning fra arealkilder er spredningen fra en samling af punktkilder.

OML-Multi modellen er en Gaussisk røgfanemodel. Det vil sige, at den rumlige fordeling af et stof på tværs af røgfanen fra en punktkilde er Gaussisk (normalfordelt) i både vertikal og horisontal retning. Den atmosfæriske spredning er beskrevet ud fra en moderne parameterisering baseret på grundlæggende fysiske parametre der karakteriserer turbulensen i

grænselaget. De Gaussiske spredningsparametre σ_y og σ_z antages således at være kontinuerte funktioner af typiske grænselagsparametre som friktionshastigheden,



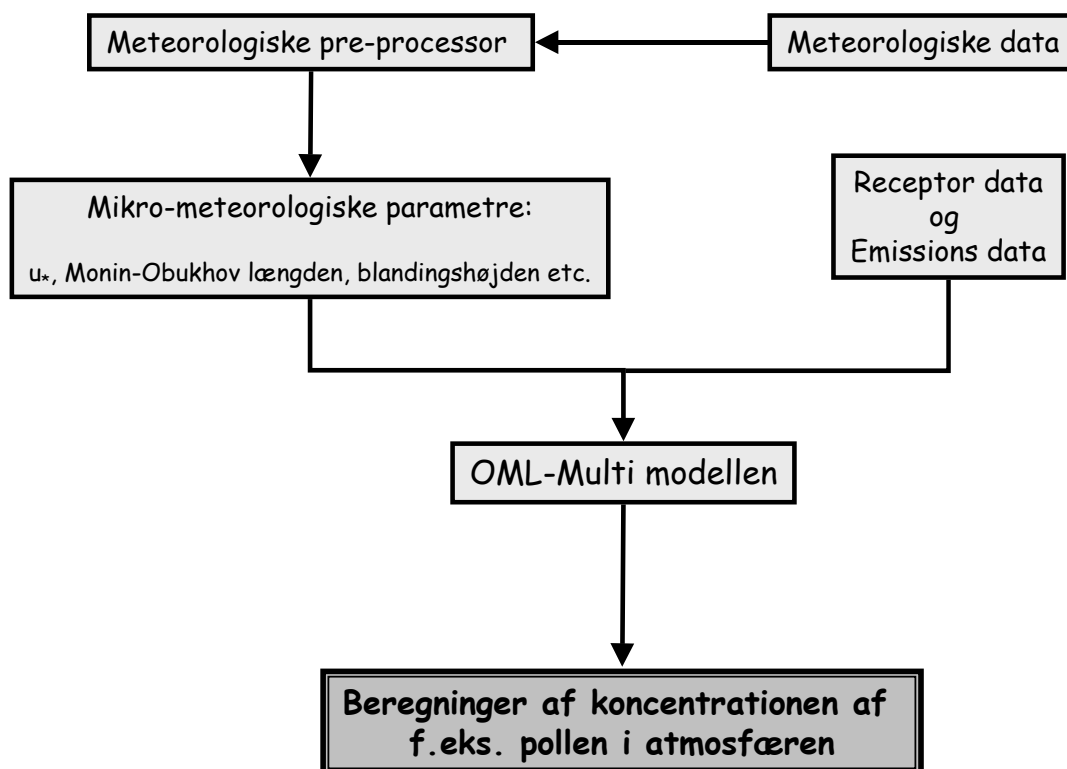
Figur 1. En illustration af de basale Gaussiske spredningsparametre i OML modellen.

Monin-Obukhov længden, opblandingshøjden, mm. Dermed sikres det at effekterne af flere forskellige processer, bl.a. mekanisk og termisk turbulens, og for punktkilder røgfanens opdrift og forstyrrelser pga. omgivende bygninger, bidrager til den samlede produktion af turbulens og spredning i modellen. Koncentrationen (c) fra en punktkilde i $(0,0,0)$ ved en given lokalitet (x, y, z) beregnes i modellen på følgende måde:

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

Q angiver kildestyrken, H er den effektive røgfanehøjde, u er vindhastigheden, mens σ_y og σ_z er hhv. den horisontale og vertikale spredningsparameter. De såkaldte refleksionsled beskriver den del af røgfanen der reflekteres efter at have ramt hhv. jordoverfladen eller toppen af grænselaget. Betydningen af disse parametre og definitionen af reference koordinatsystemet er illustreret i figur 1. Som det ses på figuren er σ_y og σ_z lig spredningen (dvs. standardafvigelsen) i koncentrationsfordelingen i hhv. det horisontale og vertikale plan. De afhænger af den termiske og mekaniske turbulens i atmosfæren og beregnes på basis af bl.a. varmekraften og andre meteorologiske parametre styret af stabilitetsforholdene på det pågældende tidspunkt. Den horisontale spredning behandles på en særlig måde under forhold med meget lave vindhastigheder og/eller systematiske ændringer af vindretningen. En detaljeret beskrivelse af de fysiske parameteriseringer er givet i de originale referencer nævnt ovenfor.

I OML-Multi antages emissionen at være jævnt fordelt inden for et eller flere rektangler af vilkårlig størrelse. Arealkilderne er inddelt i mange linjekilder på tværs af vinden. Ved at benytte ovenstående udtryk er den enkelte linjes bidrag til koncentrationsfordelingen beskrevet ud fra en analytisk løsning til et linjestykke bestående af uendeligt mange punktkilder. Den samlede koncentrationsfordeling omkring arealkilden er så fundet ved at summere bidragene fra alle linjekilderne. Metoden er den samme som anvendt i Atkinson et al. (1996).



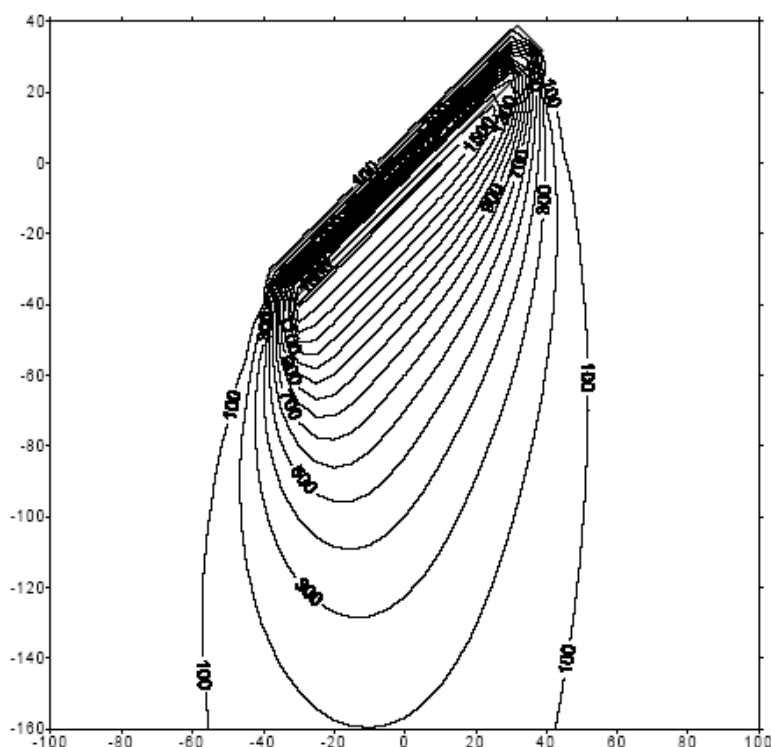
Figur 2. Diagram af det anvendte OML modelsystem med de nødvendige input data.

Et skematisk diagram af OML modellen og beregningsproceduren med de nødvendige input data er givet i figur 2. Modellen beregner koncentrationer for hver time i beregningsperioden. Tidsserier af standard meteorologiske parametre f.eks. fra rutinemæssige synoptiske observationer, benyttes som det første input til en meteorologisk pre-processor. Dermed beregnes de mikro-meteorologiske parametre, som er nødvendige for de videre beregninger med OML modellen. I næste skridt indlæses information om pollenfrigørelsen (emissionen) for de arealer/marker der indgår i beregningerne. Baseret på disse oplysninger beregner OML-Multi modellen spredning og deposition af pollen i atmosfæren.

1.1.1 Model domæne og opløsning

I den anvendte version af OML er beregningsområdet (domænet) bestemt af et sammenhængende kvadratisk område fuldstændigt dækket af arealkilder med eller uden pollenemission (frigørelse). Beregningerne med modellen gennemføres i et net af beregningspunkter/receptorpunkter placeret i centrum af arealkilderne. Resultaterne foreligger således i form af tidsserier af koncentrationer i hvert af disse punkter på time basis. Outputtet fra modellen kan fremstilles på mange forskellige måder, et eksempel er givet i figur 3.

I dette projekt anvendes et kvadratisk domæne på enten $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ eller $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$. Området er inddelt i et regulært gitter bestående af 40×40 arealkilder (celler) med tilhørende receptorpunkter, hvilket giver en modelopløsning på hhv $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ og $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$. Overfladen kan beskrives ved en blanding af kilder og dræn sådan at hver celle karakteriseres ved en bestemt emissionsrate og/eller depositionshastighed. Disse parametre beskrives i det følgende. Grupper af celler udgør dermed de enkelte marker.



Figur 3. Et eksempel på hvordan resultaterne fra OML modellen kan præsenteres. Her ses koncentrationsfordelingen om en arealkilde i et 200 m × 200 m domæne.

1.2 Depositionsprocesser

Den originale version af OML-Multi modellen inkluderer ikke parameteriseringer af depositionsprocesser. Som en del af dette arbejde har det derfor været nødvendigt at udvikle modellen sådan at de relevante fjernelsesprocesser er medtaget. Nedfald af luftbåret materiale (her pollen) til jordens overflade er under tørre atmosfæriske betingelser kontrolleret af en kombination af gravitationel nedsynkning og turbulent og molekylær diffusion. Den samlede deposition eller fluxen (F_d) til overfladen antages typisk at være proportional med koncentrationen (c) ved en reference højde (z_d) over ”overfladen”:

$$F_d(x, y) = v_d c(x, y, z_d)$$

Depositionshastigheden (v_d) vil afhænge både af det luftbårne materiales karakteristika og de aktuelle forhold i grænselaget. Reference højden for koncentrationen er her sat til 2 m over ”overfladen” der igen bliver defineret ud fra den såkaldte displacementhøjde plus ruhedshøjde. Det vil sige, den højde over jordoverfladen, hvor vindhastigheden i den såkaldte logaritmiske¹ vindprofil, er nul. For græsmarker er det nogle centimeter over jordoverfladen, for skov er det i trækrone og for marker med tæt afgrøde (f.eks. raps og vinterrug) er det omtrent i blomsterhøjde.

Ved at benytte den såkaldte resistansmetode kan depositionshastigheden for partikler, her pollen, beskrives ved (se f.eks. Seinfeld, 1986):

¹ Vindhastigheden vokser med god tilnærmelse logaritmisk med højden over jordoverfladen. Inde i tæt vegetation vil denne profil ikke være logaritmisk. Ved ekstrapolation af vindprofilen over en vegetation ned gennem vegetationen nås en højde hvor den teoretiske hastighed bliver nul; denne højde er omtrent displacementhøjden.

$$v_d = \frac{1}{r_a + r_b + r_a r_b v_g} + v_g$$

r_a og r_b refererer til hhv. den aerodynamiske modstand og den quasi-laminare overflademodstand, mens v_g er den gravitationelle faldhastighed. Den aerodynamiske modstand repræsenterer processen forbundet med transporten af partikler gennem den nederste turbulente del af atmosfæren og er her parameteriseret ved følgende udtryk:

$$r_a = \frac{1}{ku_*} \left(\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \Phi_h \left(\frac{z}{L} \right) \right)$$

I dette udtryk angiver k von Karman's konstant, u_* er friktionshastigheden og z_0 er overflade ruheden, mens z er højden over overfladen. Turbulensen vil afhænge af stabilitetsforholdene i atmosfæren og disse er her repræsenteret ved en korrektionsfunktion Φ_h og Monin-Obukhov længden L . Overflademodstanden beskriver diffusionen af materiale gennem det tynde laminare lag umiddelbart over overfladen og kan udtrykkes ved hjælp af Schmidt- (Sc) og Stokes- (St) tallene:

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

Schmidt-og Stokes- tallene er defineret ved følgende udtryk:

$$Sc = \frac{\nu}{D}, St = \frac{v_g u_*^2}{g \nu}$$

hvor ν er den kinematiske viskositet af luft, mens D er den molekylære diffusion.

Endelig vil v_g være en funktion af de enkelte pollentypers størrelse og massefylde. De anvendte værdier er fundet i litteraturen og er angivet i sektion 1.3. En detaljeret beskrivelse af de anvendte parameteriseringer og henvisninger til de originale referencer kan findes i Brandt (1998).

I Gaussiske røgfane modeller medtages effekten af tørdeponering typisk ved at inkludere 1) en "source depletion model" eller 2) en "surface depletion model". I den første type model, som er langt den letteste at programmere, medfører en deposition et dræn i den bidragende kildes emissionsrate, og dermed fordeles drænet urealistisk i hele 'røg'/pollen-fanen. I den anden type model medfører en deposition til en celle ingen ændring af kildens styrke; men derimod oprettes en negativ kilde i cellen med en styrke svarende til den deponerede mængde. Herved fås en realistisk vertikal fordeling af pollenkoncentrationen med lidt lavere koncentrationer nær jordoverfladen. Sammenligninger viser at den mere komplicerede "surface depletion model" giver de bedste resultater og denne type model er derfor valgt til dette studie. Princippet bag "surface depletion" er beskrevet i flere detaljer af Horst (1977). OML-Multi modellen med depositionprocesserne inkluderet kaldes i det følgende for OML-DEP.

Der er i OML-DEP ikke taget hensyn til perioder med regn og den efterfølgende udvaskning af pollen. Det skyldes for det første at pollenfrigørelsen vil være stærkt nedsat i perioder med regn. For det andet formodes det at de enkelte pollen-korn er relativt store og derfor meget hurtigt vil blive udvasket når nedbøren sætter ind. Det antages ligeledes at pollen der er

fjernet fra atmosfæren ikke kan løftes op i atmosfæren igen. Det er en rimelig antagelse for mange pollentyper pga. deres klæbrige overflade. Desuden er levetiden for pollen begrænset.

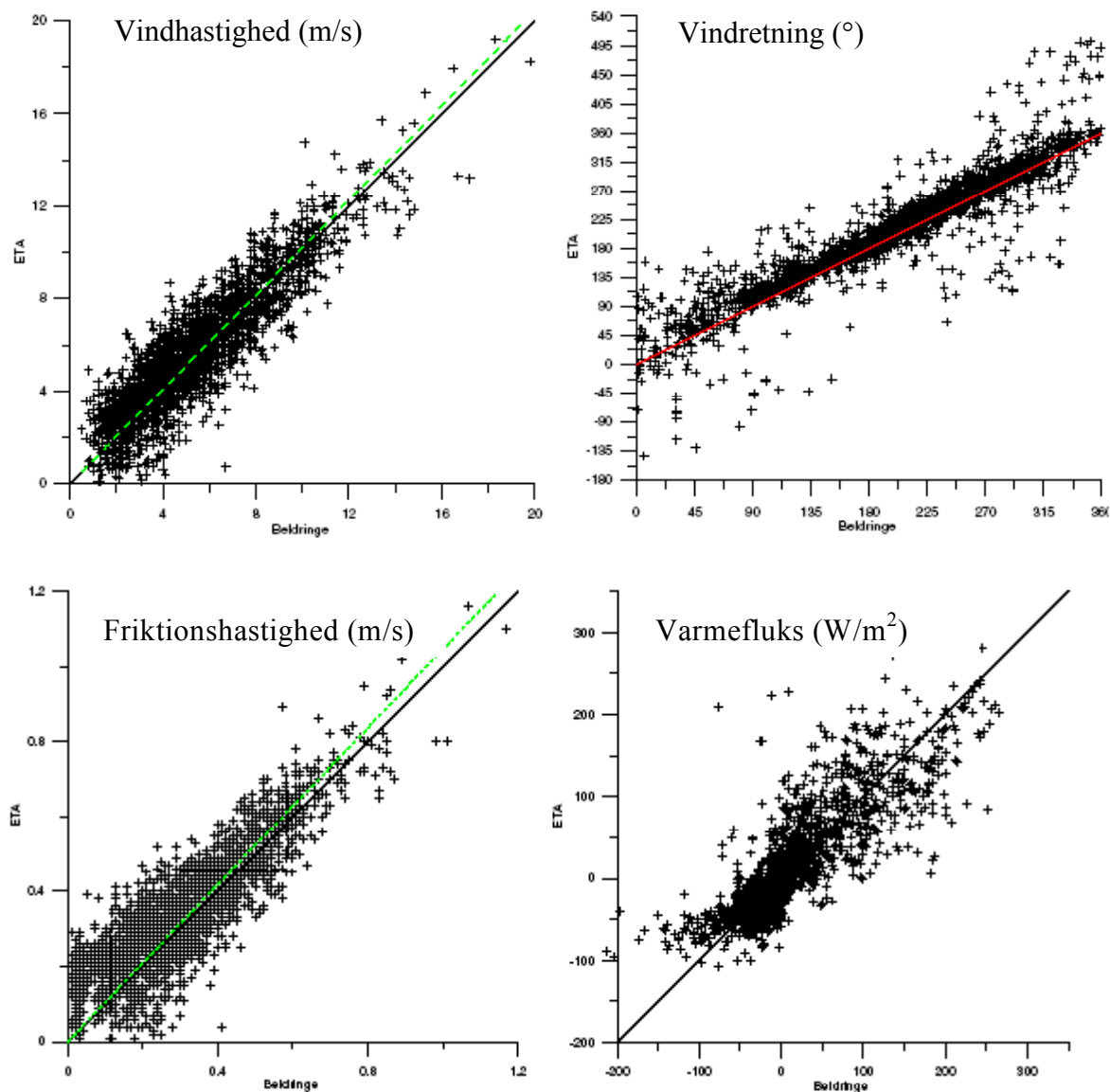
1.3 Meteorologiske data

OML-DEP er oprindeligt udviklet til at blive drevet af meteorologiske data fra en overflade målestation eller en vejr mast lokaliseret f.eks. i en lufthavn i kombination med to daglige bestemmelser af atmosfærens vertikale tilstand målt med radiosonde (ballon). Input data kan dog også komme fra en vejrmodel, hvorved man kan lave beregningerne med OML-DEP for flere lokaliteter og for perioder, som måske ikke er indeholdt i de tilgængelige observationer. I dette projekt er OML-DEP yderligere udviklet til at benytte input fra vejrprognosemodellen Eta. Den numeriske vejrprognosemodel (Eta) har kørt operationelt ved DMU/ATMI siden 1998. Eta er en tre-dimensionel model med en horisontal opløsning på 33 km x 33 km over Europa (Nickovic et al. 1998; Brandt et al. 2001) og er som mange andre vejrprognosemodeller initialiseret med data fra en global cirkulationsmodel fra "the National Centre for Environmental Protection", NCEP, USA. De meteorologiske data fra Eta modellen har i flere år været en del af luftforureningsprognosesystemet THOR udviklet ved DMU/ATMI (Brandt et al. 2001) og data er tilgængelige fra August 1998.

Forskellige meteorologiske parametre fra Eta modellen er valideret ved sammenligning med observationer fra forskellige lokaliteter i Danmark. En sammenligning er bl.a. udført for data fra Beldringe Lufthavn ved Odense. Formålet med en sådan sammenligning er at undersøge den overordnede kvalitet af de beregnede data fra Eta og et par korrektioner forbundet med forskelle i f.eks. overfladeruheden har været nødvendige. Det er også vigtigt at bemærke at observationerne repræsenterer data i et enkelt punkt påvirket af lokale forhold, mens modellen repræsenterer middelværdien for et område der dækker 33 km x 33 km. Derudover er der i sammenligningen for Beldringe Lufthavn en forskydning på ½ time mellem observationernes timemiddelværdier og Eta's øjeblikks værdier.

Den observerede og beregnede vindhastighed og vindretning er sammenlignet i figur 4 for år 2000 for denne lokalitet. Begge parametre er naturligvis meget vigtige for den beregnede spredning af pollen i OML-DEP modellen. Det ses at der generelt er en god overensstemmelse mellem de målte og estimerede værdier. Den spredning der ses omkring linjen gennem (0,0) er formentligt bl.a. forbundet med forskellen i tidspunkt og indflydelsen af arealmidlingen i Eta modellen og tidsmidlingen i målingerne. En tilsvarende sammenligning er udført for u_* og overfladevarme fluxen, se figur 4. Disse mikro-meteorologiske parametre er afgørende for beregningen af den turbulente tilstand af grænselaget og dermed for beregningen af spredningen og depositionen af pollen. Dette er en mere indirekte sammenligning da de to værdier må beregnes på basis af målte værdier ved masten, men der er en god overensstemmelse mellem de observerede og beregnede værdier. Der er dog en tendens til at Eta modellen overestimerer u_* en smule.

Generelt viser dette eksempel fra valideringen af udvalgte parametre fra Eta modellen, at disse data kan benyttes til at beskrive det meteorologiske grundlag for de videre beregninger med OML modellen.



Figur 4. Sammenligning af vindhastighed, vindretning, friktionshastighed og overfladevarmeffluks, som observeret og beregnet af Eta modellen ved Beldringe Lufthavn i år 2000. De fuldtoptrukne sorte eller røde linjer angiver linjer for perfekt overensstemmelse (statistisk bedste sammenhæng), mens den grønne stiplede linje angiver det bedste fit gennem (0,0). For vindretningen er Eta data og skala korrigeret således at størst forskel max er 180°.

1.3 De nødvendige informationer om pollen

Modelleringen af spredning af pollen i atmosfæren er fokuseret på de følgende tre afgrøder:

- Vinterraps (*Brassica napus*)
- Vinterrug (*Secale cereale*)
- Rajgræs (*Lolium perenne*, *Lolium multiflorum*)

Disse afgrøder er alle helt (rug og rajgræs) eller delvist (raps) afhængige af vindbestøvning. For raps er selvbestøvning væsentlig, men fremmedbestøvning via vind og insekter menes også at have betydning. For at kvantificere risikoen for spredning af GM i naturen er det

vigtigt at forstå processerne forbundet med de forskellige spredningsmekanismer. I denne del af projektet fokuseres kun på vindspredning af pollen.

Når et pollenkornd sendes vil det blive transporteret af den generelle luftstrømning over marken. Faldhastigheden vil typisk være meget mindre end den horisontale strømning der ved alm. vindhastigheder er omkring 5 m/sek. Vertikale hastigheder i eddies (hvirvler) og turbulens vil variere alt efter forholdene og kan ved svage vinde på sommerdage være af samme størrelsesorden som den horisontale bevægelse. Ved meget stabile atmosfæriske betingelser transporteres pollen ganske kort og deponeres evt. på de nærliggende planter. I perioder med stærke vinde og specielt i forbindelse med konvektive storme kan pollen dog transporteres over lange afstande. Igennem tiderne har man således observeret pollen flere hundrede km fra mulige pollenkilder. Det enkelte pollens evne til at bestøve andre planter aftager dog med tiden. UV-stråling, fugtighed, temperatur mm. vil påvirke pollen i atmosfæren og f.eks. raps- og rugpollen menes at kunne overleve i op til ca. 72 timer (se Treu & Emberlin, 2000; Feil & Schmidt, 2002 og referencer heri). Sandsynligheden for at pollentransporten fører til bestøvning vil ligeledes afhænge af konkurrencen med pollen fra marken selv, pollen fra andre marker osv. Da vi som allerede nævnt er fokuseret på vindspredningen af pollen i atmosfæren, medtager vi således ikke transporten via insekter eller forhold der påvirker den mulige bestøvning når pollen er fjernet fra atmosfæren og afsat på jord planter og støvfang.

1.3.1 Vinterraps

Feltstudier har gennem en årrække været udført i flere lande for at bestemme f.eks. produktionen af pollen og spredningen af pollen fra eksperimentelle forsøgsmarker eller kommercielle rapsmarker (f.eks. Williams, 1984; McCartney & Lacey, 1991; Timmonds et al., 1995). I England har McCartney & Lacey (1991) gennemført et detaljeret studie, hvor koncentrationen af rapspollen blev målt igennem fem sæsoner i perioden 1985 til 1989. Pollenfælder placeret i rapsmarker af varierende størrelse angav den daglige koncentration af pollen i blomsterhøjde. Pollensæsonen varede typisk 30 til 40 dage og ved at beregne en gennemsnitssæson over de fem år ses den generelle koncentration i atmosfæren at følge en klokkeformet kurve, som reflekterer den gradvist tiltagende og derefter aftagende blomstring af planterne henover sæsonen (se McCartney & Lacey, 1991 og referencer heri). Baseret på dette datasæt antages sæsonvariationen af frigørelsen (emissionen) af rapspollen at følge en Gaussisk (normal) fordeling med maksimum (middelværdi) den 3. juni (dvs. på den 154. Julianske dag, hvilket er antaget at falde 14 dage senere end i England), spredning på 8 dage samt start 20 dage hhv. før og efter maksimum. Fordelingen ses i figur 5 og tabel 1 angiver de væsentligste parametre og antagelser der indgår i modelberegningerne for raps. Den præcise forskydning af pollensæsonen i forhold til England er ikke så afgørende for de efterfølgende spredningsberegninger, idet en forskydning på en uge frem eller tilbage ikke vil ændre de meteorologiske data nævneværdigt i forhold til meteorologiens naturlige variation. Observationerne viste dog at der i løbet af de fem år var store forskelle i begyndelsestidspunktet for sæsonstart og store dag til dag variationer i koncentrationen af pollen over markerne.

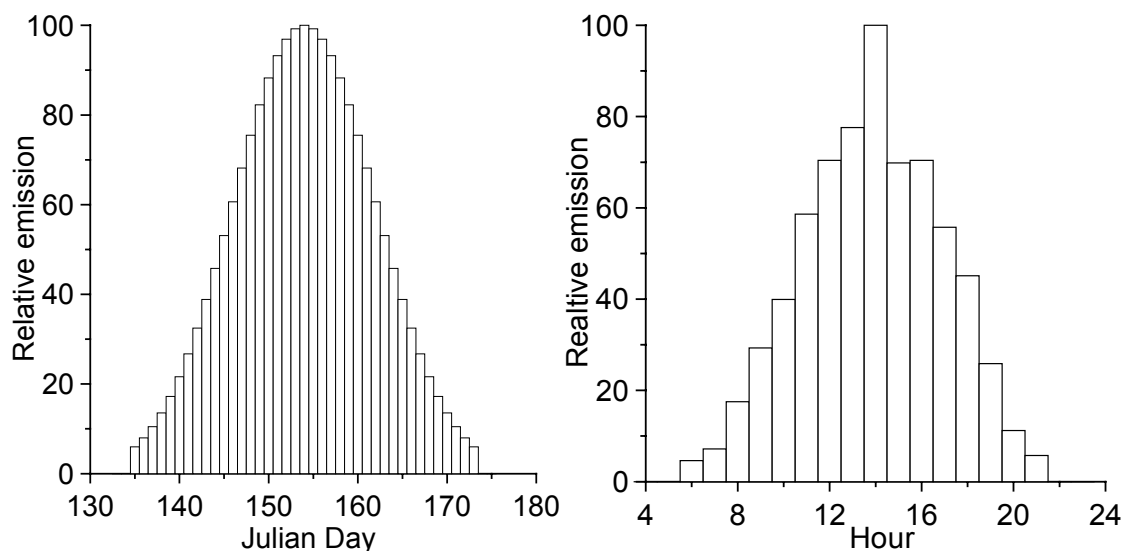
De biologiske processer der styrer produktionen af pollen er følsomme overfor ændringer i bl.a. mængden af solindstråling, nedbør mm. Større mængder af pollen vil typisk blive observeret på varme tørre solskinsdage, mens koncentrationen er lavest under kolde, stille og våde betingelser (Williams, 1984). I et forsøg på at sammenholde variationerne i koncentrationen med variationerne i vejret anvendte McCartney og Lacey ”multipel regressions analyser” og fandt frem til en lineær sammenhæng: $\text{koncentration} = A + B \times$

indstråling + $C \times$ vindhastigheden. A, B og C er empiriske konstanter, der angiver sammenhængen mellem pollenkoncentrationen (gennemsnit for et døgn) og solindstrålingen samt vindhastigheden. Denne lineære sammenhæng kunne dog kun forklare mellem 8 og 38 % af variationen i de enkelte sæsoner og ca. 19 % af variationen i et gennemsnitsår. Vi har derfor valgt ikke at medtage denne sammenhæng her.

Produktionen af pollen varierer også i løbet af det enkelte døgn. Timemålinger viser at koncentrationen er omtrent nul om natten (~ 22:00 til 05:00). Den maksimale koncentration måles typisk tidligt på eftermiddagen med en gradvis stigende/aftagende koncentration før/efter dette (McCartney og Lacey, 1991; Timmons et al., 1995). I figur 5 er døgnvariationen, som er inkluderet i dette studie vist.

Tabel 1. En oversigt over de oplysninger, der er anvendt til modelsimuleringerne af rapspollen. Ved beregning af mængdeforholdet mellem GM og ikke-GM pollen har værdierne af pollenproduktionen og pollenantallet ingen betydning.

<i>Parameter</i>	<i>Information</i>	<i>Reference</i>
Pollensæson	13 maj – 23 juni	Antaget 14 dage senere end sæsonstart i England
Sæsonvariation	Antager en Gaussisk fordeling	McCartney & Lacey (1991)
Døgnvariation	Maksimum om eftermiddagen og nul om natten.	McCartney & Lacey (1991)
Den samlede pollenproduktion	18,66 kg pollen/ha	Szabo (1985)
Antal	79.3×10^3 pollen/mg	Szabo (1985)
v_g	2.7 cm/sek	McCartney & Lacey (1991)



Figur 5. Den relative sæson- og døgnvariation af frigørelsen (emissionen) af rapspollen. Baseret på observationer af pollen foretaget af McCartney og Lacey (1991).

1.3.2 Vinterrug

GM-rug dyrkes endnu ikke kommercielt noget sted i verden og der findes endnu ikke offentliggjorte data fra eksperimentelle forsøg med GM-rug og spredning (Tolstrup et al, 2003). Generelt findes der færre data om spredning af rug end om raps, men i tabel 2 angives de nødvendige oplysninger vi har fundet frem til i litteraturen. Emissionen (frigørelsen) af vinterrugspollen antages at være Gaussisk fordelt med maksimum den 11. juni, spredning på 2.4 dage samt start 6 dage før og slut 6 dage efter maksimum.

Tabel 2. En oversigt over de oplysninger der er anvendt til modelsimuleringerne af rugpollen. Ved beregning af mængdeforholdet mellem GM og ikke-GM pollen har størrelsen af pollenproduktionen ingen betydning.

<i>Parameter</i>	<i>Information</i>	<i>Reference</i>
Pollensæson	Starter typisk mellem 1-10 juni og en hel mark blomstrer mellem 8-12 dage.	Andersen (1993)
Sæsonvariation	Antager en Gaussisk fordeling	Ifl. B. Boelt fra Danmarks JordbrugsForskning er dette en rimelig antagelse
Døgnvariation	Fra solopgang til solnedgang – med max. omkring tidlig eftermiddag. Der er i modellen antaget samme relative variation som for raps.	Jensen and Bøgh, (1942)
Den samlede pollenproduktion	200 – 250 planter pr m ² som blomstrer med 400 – 500 aks pr m ² Pollen pr aks: 4.240.940 ±49.654 udfra ovenstående fås: 1680 til 2100 mill. pollen pr m ² eller ² 200 kg/ha	Ifl. oplysninger fra C. Haldrup, Dansk Landbrugsrådgivning Pohl (1937)
v _g	9-16 cm/s for frisk pollen gennemsnit på 12,5 cm/s er anvendt i modellen	Gregory (1973)

1.3.3 Rajgræsser

Rajgræsser anvendes i Danmark både i landbruget og til rekreative formål i forbindelse med golfbaner, parker osv. Den danske produktion af græsfrø udgør ca. 40 % af EU's samlede frøproduktion. GM foder- eller plænegræsser dyrkes på nuværende tidspunkt ikke indenfor EU (Tolstrup, et al. 2003).

Græsser producerer typisk store mængder pollen, men det har ikke været muligt at finde et direkte estimat af emissionen for de græsser vi her kigger på. Blomstringen starter typisk mellem 1. juni og 20. juni (fra tidligste til seneste sort) og varer ca. 2-3 uger for den enkelte sort/mark (pers. comm. Birte Boelt fra Danmarks JordbrugsForskning). Da det heller ikke har været muligt at finde oplysninger om faldhastigheden af pollen fra rajgræsser har vi ikke udført modelsimuleringer for denne pollentype.

Et ældre feltstudie fra 1939 og 1940 giver dog et indtryk af potentialet for vindsspredning (Jensen & Bøgh, 1942). På enkelte dage i løbet af de to sæsoner blev spredning i vindens

² Ved denne udregning antages det at emissionen er 2000 mill pollen pr m² og at der går 100 × 10³ pollen pr mg.

retning målt i forskellige afstande fra marker på hhv. 10 og 3,5 ha. Koncentrationen af pollen i luften var ved 100 m aftaget til mellem 17 og 23 % af koncentrationen ved markranden, mens den ved 200 og 300 m var faldet til hhv. 4 til 22 % og 5-25 %. Variationerne skyldes formentlig forskellen i vindstyrke mellem de enkelte dage med målinger. I 1939 blev der ved en enkelt lejlighed målt i 1200 m afstand fra marken, hvor koncentrationen blev fundet til at være 5 % af koncentrationen ved randen. Andre eksperimenter med gen-spredning indikerer at bestøvningen af flerårig rajgræs for en stor del afhænger (ca. 40 %) af bestøvningen fra naboplanterne i marken (se Tolstrup et al. 2003 og referencer heri). Rajgræs er også almindeligt forekommende langs veje og på græsningsarealer i det meste af landet hvorfra yderligere hybridisering og genspredning kan foregå. Det bioteknologiske udviklingsarbejdet er især foregået med han-sterile sorter med nedsat spredningsrisiko (JRC, 2001). Fuldt fertile sorter vil næppe blive godkendte til markedsføring.

2 Modelsimuleringer af vindspredning af pollen

Mere eller mindre komplicerede modeller har været brugt til at beskrive spredningen af pollen fra forskellige typer afgrøder og evt. den efterfølgende bestøvning (f.eks. McCartney & Lacey, 1991; Hunt et al., 2001; Walklate et al., 2004). Eksempelvis har Giddings og kolleger (1997a, b, 2000) testet forskellige simple versioner af Gaussiske røgfane modeller og konkluderet at atmosfæriske parametre som vindretning og turbulens skal inkluderes før realistiske simuleringer af pollenspredning kan foretages. OML-Multi modellen har været anvendt gennem en årrække og er blevet testet på adskillige sæt af måledata fra både Danmark og udlandet (Berkowicz et al., 1986, 1985; Olesen et al., 1992; Olesen 1995). Evalueringerne under forskellige meteorologiske forhold og for både høje og lave kilder viser at den grundlæggende OML model beregner koncentrationer, som er i overensstemmelse med de observerede værdier. Spredningsparametrene er altså realistisk reproduceret med denne model. I dette projekt skal modellen anvendes som et værktøj til at undersøge forskellige spørgsmål som er relevante for spredningen af GM-pollen i atmosfæren og dermed medvirke til at belyse mulighederne for sameksistens mellem økologiske, konventionelle og GM-landbrug. Et par af de spørgsmål vi vil søge at besvare er:

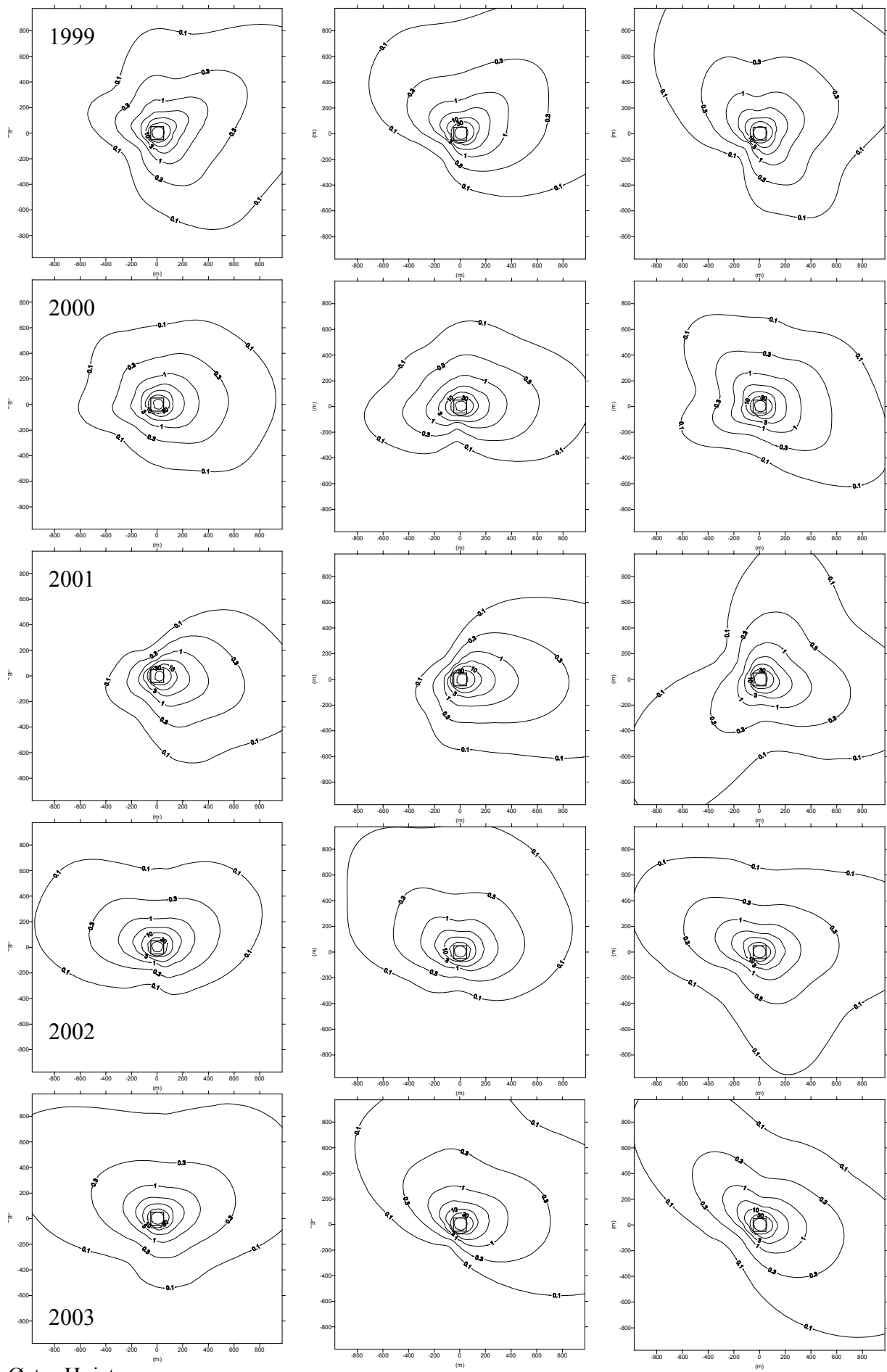
- Hvad betyder afstanden mellem markerne for risikoen for spredning af GM til en ikke-GM mark?
- Hvad betyder størrelsen af de enkelte marker for risikoen for spredning af GM?
- Hvor stor betydning har de regionale meteorologiske forhold for spredningen af pollen?
- Hvad betyder ændringerne af disse parametre fra år til år og fra sted til sted?

OML-DEP modellen er her anvendt til at simulere spredningen af pollen igennem 5 sommersæsoner fra 1999 til 2003 ved at inkludere meteorologiske data fra Eta modellen. Der er fokuseret på tre forskellige lokaliteter i Danmark for at kunne vurdere betydningen af de regionale forskelle i f.eks. vejrforhold. Disse lokaliteter er tilfældigt udtaget i forskellige landsdele og inkluderer to Jyske områder: Øster Højst (mellem Tønder og Åbenrå) og Tange (nær Bjerringbro), samt Lille Valby nær Roskilde på Sjælland. Mange forskellige modelkørsler er blevet udført i løbet af projektet, hvor f.eks. størrelsen af markerne og afstanden mellem markerne varieres. Resultaterne for vinterraps og vinterrug vil blive diskuteret i de følgende afsnit. For begge afgrøder er der antaget ens tidsmæssig variation af pollenemissionen fra GM og ikke-GM marker i området.

2.1 Resultater for vinterraps

Den tidsmæssige og rumlige variation af koncentrationen af rapspollen omkring og over GM og ikke-GM marker er undersøgt og beskrevet i det følgende.

For at illustrere den rumlige variation fra år til år og fra sted til sted er den sæson-gennemsnitlige koncentration af pollen omkring en mark for alle fem år og for de tre lokaliteter vist i figur 6. Eksemplerne her er fra modelkørsler med et domæne på 2 km × 2 km med en rapsmark på 100 m × 100 m (1 ha) placeret i centrum. Det ses at fordelingen (ved 2 m højde) varierer betydeligt mellem de tre lokaliteter og fra år til år alt efter hvilken vindretning der dominerer henover blomstringssæsonen. Nogle år har spredningen en tilnærmelsesvis cirkulær fordeling omkring marken (f.eks. ved Øster Højst i år 2000), mens spredningen andre år dominerer i en eller flere retninger (f.eks. Lille Valby og Tange i 2001).



Øster Højst

Tange

Lille Valby

Figur 6. Modelleret gennemsnitlig koncentration af rapspollen (pollen/m³, i 2 m's højde over blomsterhøjden) henover sæsonen for 5 år på tre lokaliteter i Danmark. Beregningen er for en 100 m x 100 m rapsmark placeret i centrum af domænet. Se også appendiks 1.

2.1.1 Sammenligning med andre studier

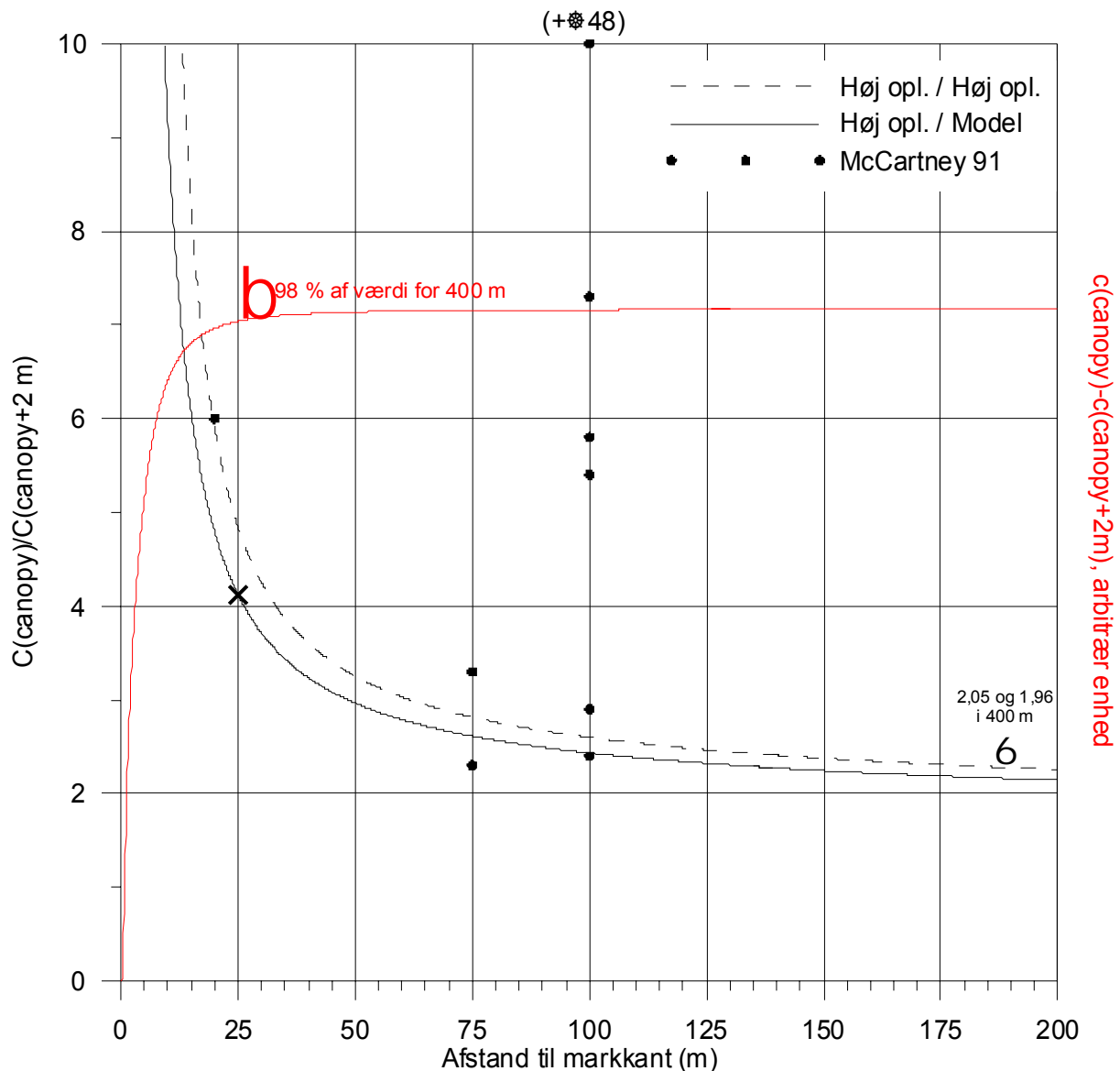
I alle fordelingerne i figur 6 ses koncentrationen af pollen i luften at falde kraftigt med afstanden fra marken. Dette er hovedsageligt forbundet med den horisontale og vertikale spredning i atmosfæren, mens depositionsmechanismerne kun har mindre betydning for den samlede ”fortynding” af pollenkoncentrationen. For at vurdere om denne fordeling af rapspollen er rimelig, sammenlignes med data fra to feltstudier.

Timmons et al. (1995) har gennem to sæsoner opsamlet pollen i afstande på 0, 100 og 360 m fra kommercielle rapsmarker på hhv. 10 og 3 ha. Pollenfælderne var placeret på en linje parallelt med den dominerende vindretning. Pollenkoncentrationen ved randen af marken varierede meget mellem de to sæsoner bl.a. pga. forskellen i størrelsen af markerne. Men generelt viste dette studie at koncentrationen ved 100 m var mellem 27 og 69 % af koncentrationen ved markranden, mens den ved 360 m var aftaget til ca. 10 % af koncentrationen ved randen.

Det allerede nævnte (afsnit 1.3.1) feltstudie udført af McCartney og Lacey (1991) kombinerede observationer med en spredningsmodel for at estimere koncentrationen af pollen nær overfladen ved forskellige afstande fra marken. Baseret på data fra fem sæsoner omkring marker på mellem 0.5-1 ha kom de frem til at koncentrationen ved hhv. 50 og 100 m fra marken var nede på mellem 3-20% og 2-11 % af koncentrationen ved markranden.

Estimaterne af hvor hurtigt koncentrationen aftager med afstanden fra marken er altså markant forskellige i disse to studier, hvilket ifl. Timmons et al. (1995) hovedsageligt skal tilskrives forskellene i markstørrelser, men variationer i de meteorologiske forhold spiller også en væsentlig rolle.

OML-DEP modellen beregner koncentrationen ved 2 m's højde over blomsterhøjden (displacementhøjden, beskrevet i afsnit 1.2), mens pollenfælder typisk er placeret i højden af den pågældende vegetation (den såkaldte canopy højde). Pga. spredningen i atmosfæren vil koncentrationen af pollen aftage med højden umiddelbart over kilden (marken), mens der i større afstande fra marken ikke vil være nogen væsentlig vertikal gradient mellem koncentrationen nær overfladen og ved få meters højde. For at kunne lave en direkte sammenligning mellem model resultater og observationer har det været nødvendigt at udføre specialberegninger med OML-DEP til vurdering af koncentrationsforskelle mellem blomsterhøjden og 2 m over denne. I denne beregning inkluderes en højere horisontal opløsning, hvilket gør det muligt at studere koncentrationen nær markranden i selve marken mere detaljeret. I figur 7 ses den beregnede koncentrationsforskel fra markranden og til 200 m inde i marken, som et sæson-gennemsnit for 2001 ved Tange. Det er dog her antaget, at vindretningen er den samme i hele sæsonen. Herved angiver figurens værdier i en afstand x koncentrationen i centrum af en cirkulær mark med radius x under en korrekt variation i vindretningen. Dette kan approksimere forholdene i centrum af en kvadratisk mark med sidelængde $2x$. Det ses at den vertikale koncentrationsforskel (rød kurve) stiger kraftigt fra starten af marken til ca. 25 m inde i marken, hvorefter forskellen bliver konstant. Den røde kurve viser således at for et givet punkt inde i en mark, vil den beregnede vertikale fordeling af koncentrationen op til 2 m's højde kunne opdeles i to bidrag: et bidrag fra de nærmeste 25 m rundt om, som vil bidrage til koncentrationsforskellen mellem blomsterhøjden og 2 m over, samt et bidrag fra den øvrige del af marken (og andre marker), som bidrager med den samme koncentration i de to højder. I figuren er også vist forholdet mellem koncentrationen i blomsterhøjden og 2 m over (sorte kurver). Den stiplede kurve viser forholdet beregnet alene med specialberegninger med høj



Figur 7. Specialberegning med høj horisontal opløsning med OML modellen til vurdering af koncentrationsforskelle mellem blomsterhøjden og 2 m over denne. Forskellen stiger til 4,1 ved 25 m fra markkanten, hvorefter den er nogenlunde konstant. Se tekst for yderligere forklaring.

opløsning, og den fuldt optrukne kurve viser forholdet når koncentrationen i blomsterhøjden er beregnet med høj opløsning og 2 m koncentrationen med OML-DEP.

McCartney og Lacey (1991) målte i ni kortere perioder også vertikale profiler af pollenkoncentrationen over rapsmarkerne. Disse målte værdier er angivet i figuren og fem af punkterne ses at være i overensstemmelse med modelberegningerne, mens de øvrige fire værdier ses at være noget højere end det beregnede. Modelberegningerne er angivet som et gennemsnit for hele sæsonen og de ekstreme episoder der er målt på enkelte dage vil derfor ikke være inkluderet i den midlede kurve i figur 7.

Ud fra dette beregningseksempel antager vi for Tange 2001, at koncentrationsbidraget indenfor det "nærmeste" 50 m × 50 m markfelt vil være en faktor 4,1 højere ved blomsterhøjden end ved 2 m over denne (angivet som et x i figur 7), mens bidraget fra større afstande ikke vil give en nævneværdig forskel. Ved at benytte denne faktor og fordelingerne i

figur 6 (2 m over blomsterhøjden) har vi estimeret hvordan koncentrationen typisk aftager med afstanden fra en 1 ha mark:

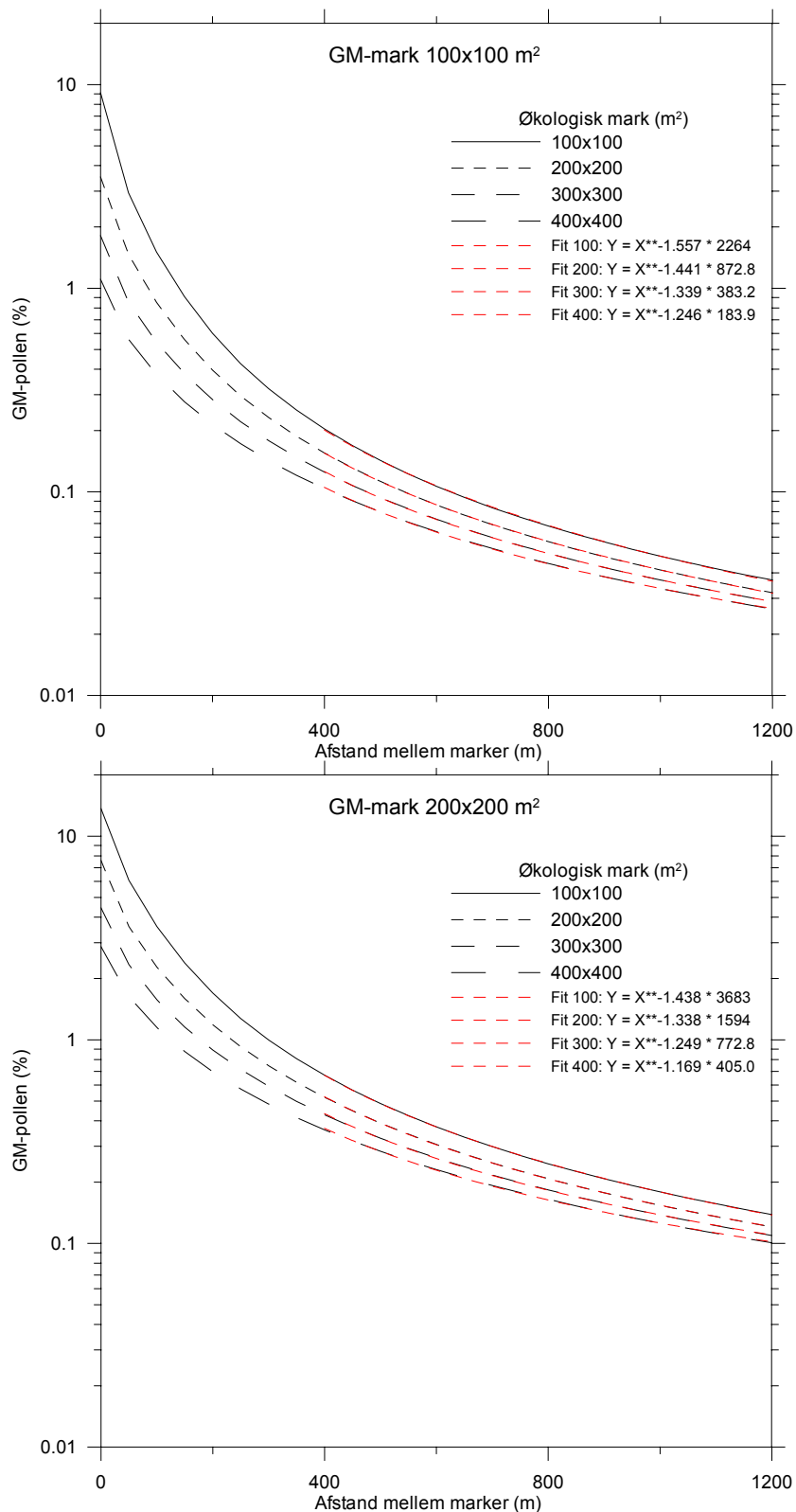
- ved randen (0 m) er koncentrationen 100 %
- ved 50 m er koncentrationen aftaget til 7-14 % af koncentrationen ved markranden
- ved 100 m er koncentrationen nede på ca. 3 %
- og 200 m fra randen vil koncentrationen være nede på ca. 0,7 %

Disse værdier falder altså indenfor de intervaller McCartney og Lacey (1991) kom frem til ved afstande på 50 og 100 m fra mindre marker. Koncentrationen aftager dog langt hurtigere end rapporteret af Timmons et al. (1995) for de større marker. For at kunne lave en mere direkte sammenligning har vi lavet en tilsvarende beregning for en større mark på 9 ha: ved 50 m er koncentrationen 16 % af værdien ved randen, mens den ved hhv. 100 og 200 m er nede på ca. 6 og 2,5 %. Modelresultaterne er dermed stadig lavere end de observerede. Beregningerne er dog lavet for andre lokaliteter, under andre meteorologiske forhold mm. og vi kan dermed ikke forvente at kunne reproducere de målte data fra et par enkelte feltforsøg helt nøjagtigt.

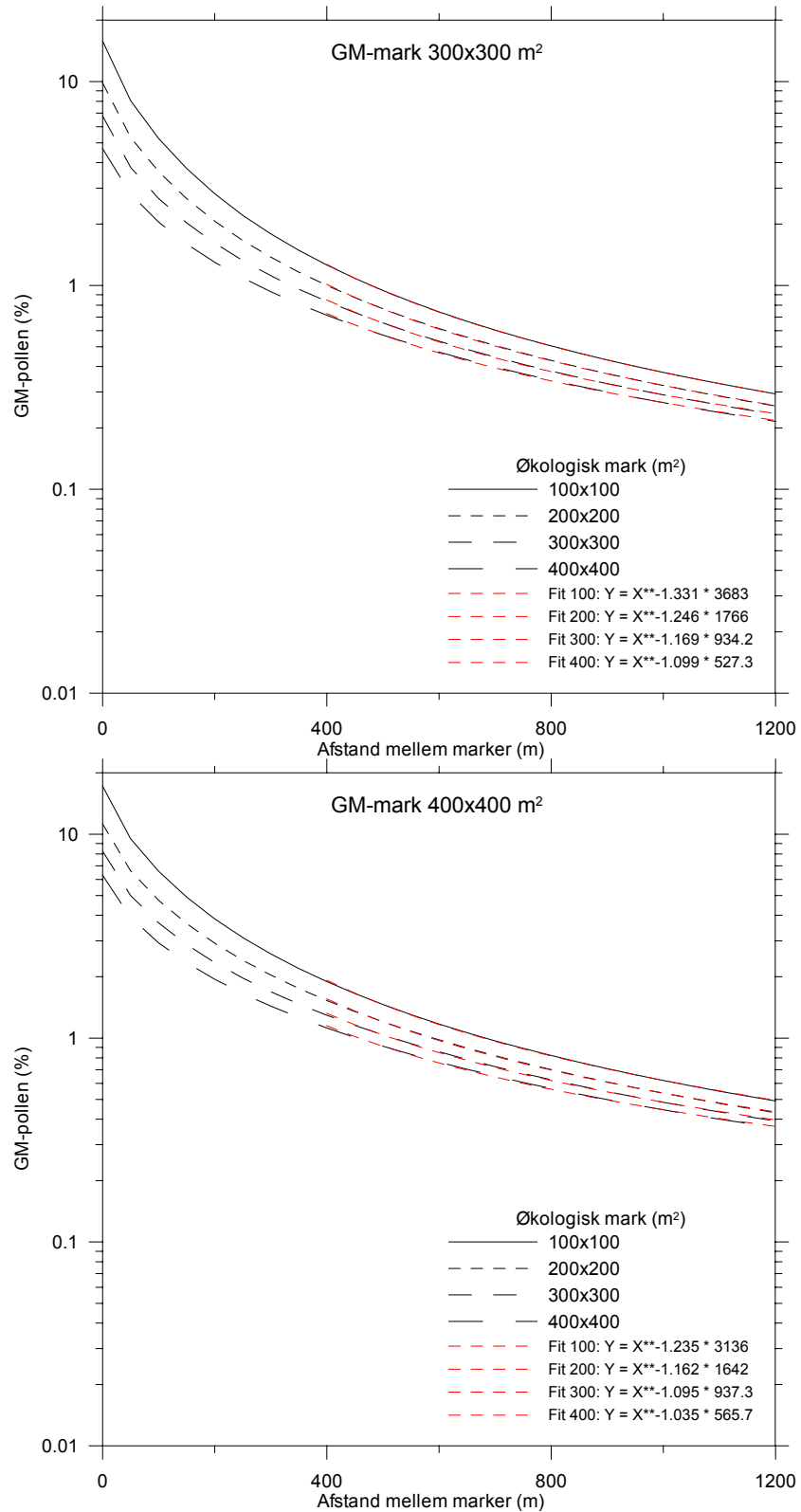
2.1.2 Andelen af GM-rapspollen over ikke-GM marker

For at belyse risikoen for ”forurening” med GM via vindspredning af pollen er det vigtigt at undersøge hvor stor en andel af den luftbårne pollen over en mark der stammer fra marken selv og hvor stor en andel der kommer fra andre marker. Her fokuseres på den relative andel af pollen fra en GM mark i blomsterhøjden over en økologisk ”modtager” mark. I figur 8 ses resultaterne fra forskellige modelsimuleringer, hvor både afstanden mellem de to marker og størrelsen af markerne varierer. Eksemplerne er for sæsonen i 2001 ved Tange, hvor spredningen er koncentreret i én retning (se figur 6). Året er valgt fordi det er det mest kritiske år for denne retning. GM-marken er derfor placeret vest for ”modtager” marken for at den størst mulige belastning kan indgå i vurderingen. Beregningerne er lavet som et gennemsnit henover hele marken og for den samlede pollensæson. Graferne kan bl.a. benyttes til at vurdere spredningsrisikoen i konkrete tilfælde, hvor man kender størrelserne af de involverede marker og afstanden mellem dem eller f.eks. under planlægningen af markfordelingen. I figur 9 er de samme kurver for koncentrationen af GM-pollen fra forskellige størrelser GM-marker angivet for hver af de fire størrelser økologiske marker. Denne figur kan være nemmere at anvende ved konkrete tilfælde af vurderingen af GM risikoen. Ønskes % - andelen af GM pollen over en økologiske mark på 4 ha f.eks. at være under 1 % skal afstanden til en GM mark på 16 ha være minimum 600 m. Er der flere GM-marker i området kan bidraget fra hver mark summeres op for at få den samlede GM andel over ”modtager” marken. Et eksempel på dette gives i afsnit 2.1.4. For hver kurve er en tilpasset kurve og det tilhørende udtryk estimeret. Disse udtryk kan benyttes til at vurdere GM-andelen ved større afstande mellem markerne end inkluderet i figuren.

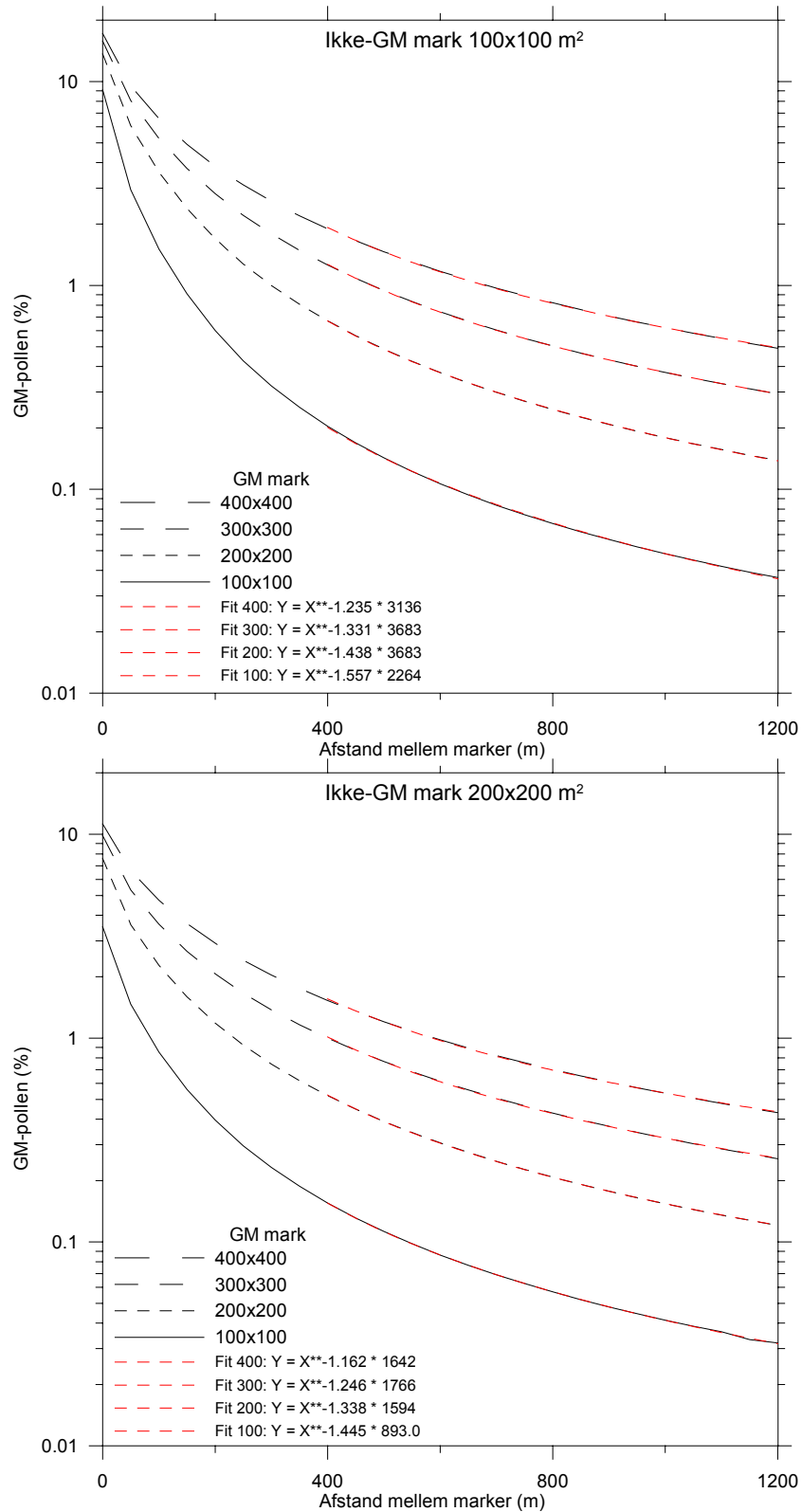
Fra resultaterne i figur 8 ses det at separationsafstanden mellem markerne er den mest effektive parameter for at nedsætte den relative andel af GM-pollen over en ikke-GM mark. Derudover ses det at for afstande over ca. 400 m er størrelsen af GM marken vigtigere (forskellen mellem de fire sæt af kurver i de fire grafer) end størrelsen af ”modtager” marken (forskellen mellem de enkelte kurver i hver graf). Generelt kan man fra en lille GM mark forvente en lille bidrag til større økologiske marker, mens små økologiske marker vil være meget udsat for pollen bidrag fra store GM marker.



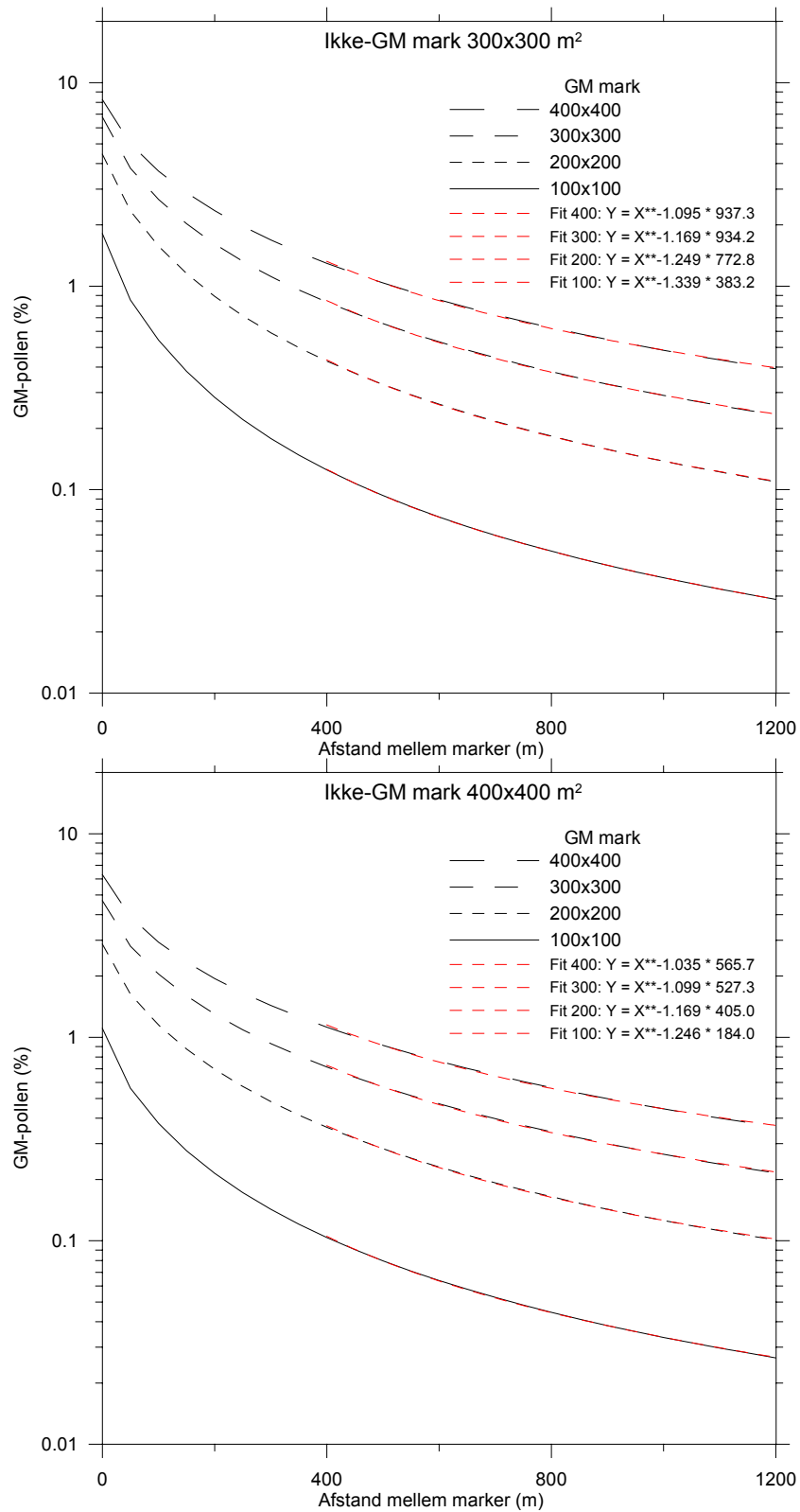
Figur 8. Beregnede relative koncentrationer af pollen fra GM-rapsmarker i blomsterhøjde over ikke-GM marker. Sæson- og markgennemsnit for en lokalitet ved Tange i år 2001, hvor belastningen pga. de meteorologiske forhold var relativ stor (se også figur 6). GM marken er placeret vest for ikke-GM marker for at belyse effekten af den dominerende vestlige vindretning i denne sæson. De røde kurver og ligningerne under hver graf angiver de tilpassede linjer til kurverne for afstande større end 400 m.



Figur 8. Fortsat



Figur 9. Som i figur 8, men opdelt for hver af de fire størrelser af ikke-GM marker.

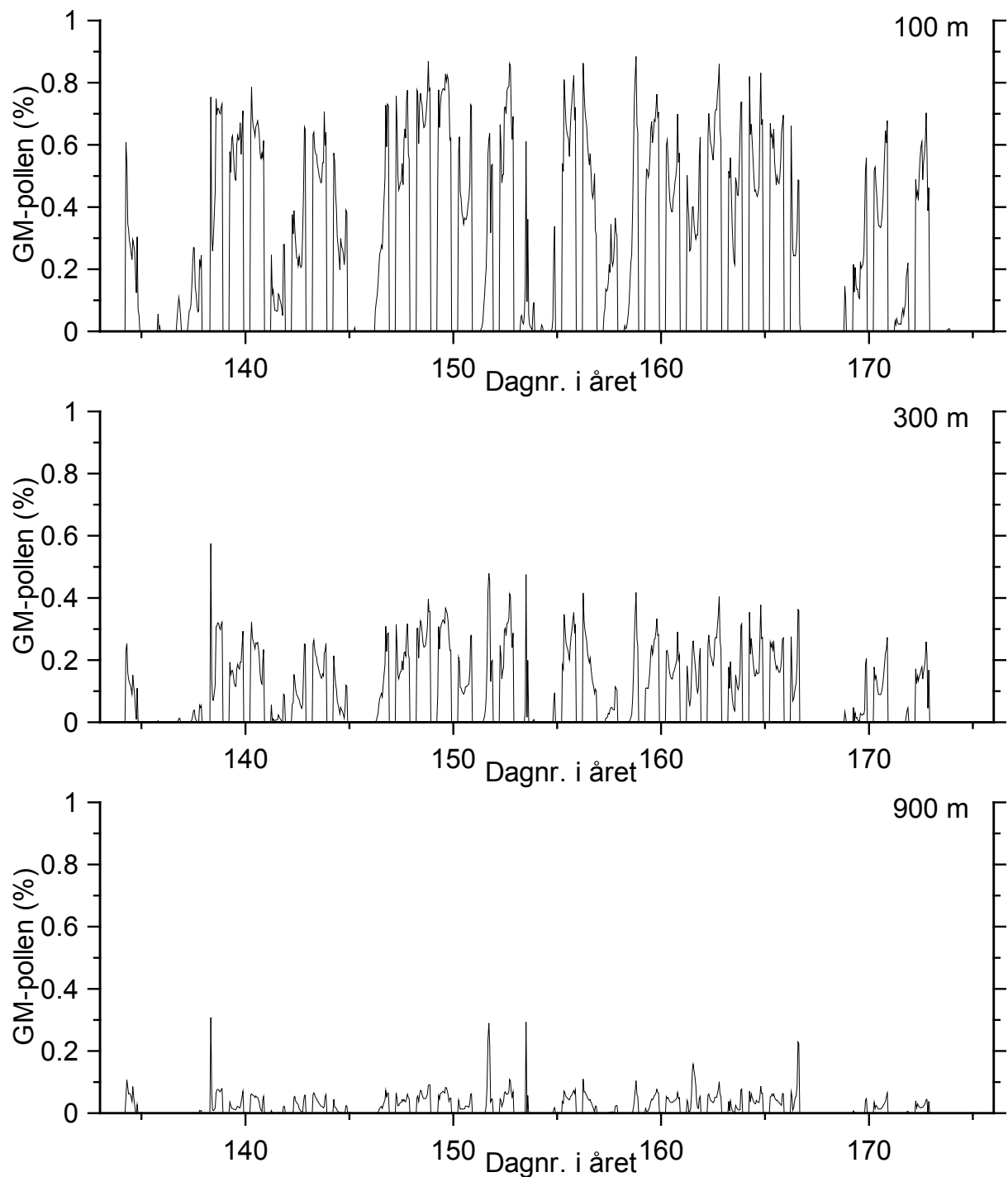


Figur 9. Fortsat.

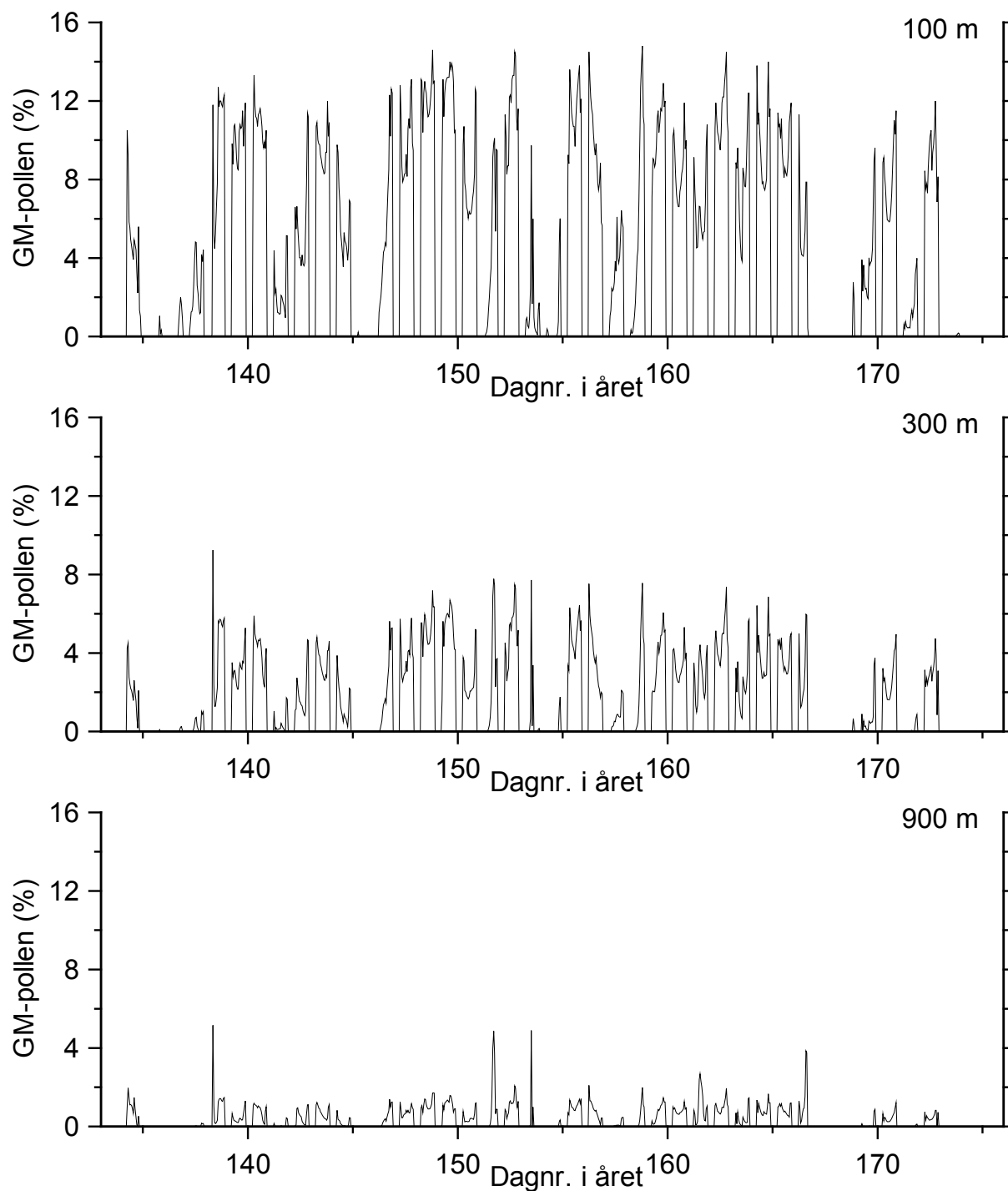
Disse beregninger er foretaget for et gennemsnit henover hele den ca. 40 dage lange pollensæson for raps. Indenfor sæsonen vil der dog være store tidsmæssige variationer i koncentrationen, som på enkelte dage vil forøge risikoen for spredning af GM-pollen. For at illustrere dette gives i figur 10 og 11 to eksempler på daglige tidsserier af andelen af GM-pollen over den økologiske mark. Igen er størrelsen (1 og 16 ha) og afstanden (100, 300 eller 900 m) mellem de to marker varieret og modellen er kørt med meteorologiske data fra sommersæsonen 2001 ved Tange. Andelen af GM-pollen er som forventet størst i eksemplet med en stor GM mark og en lille økologisk mark, men i begge eksempler ses GM andelen at variere kraftigt fra dag til dag. Denne variation er hovedsageligt styret af ændringer i vindretningen, hvor dage med vestlige vinde i dette eksempel giver den højeste andel af GM-pollen over ”modtager” marken.

Sæsongennemsnittet (er angivet under figur 10 og 11) for den enkelte kombination af markstørrelser og afstande kan findes ved at gå ind i graferne i figur 8 eller 9. Udfra dette ses det at GM andelen 100 m fra GM marken på nogle dage er ca. 2 gange højere den gns. andel for hele sæsonen, mens den ved 300 og 900 m kan være helt op til hhv. 3 og 8 gange højere på enkelte dage.

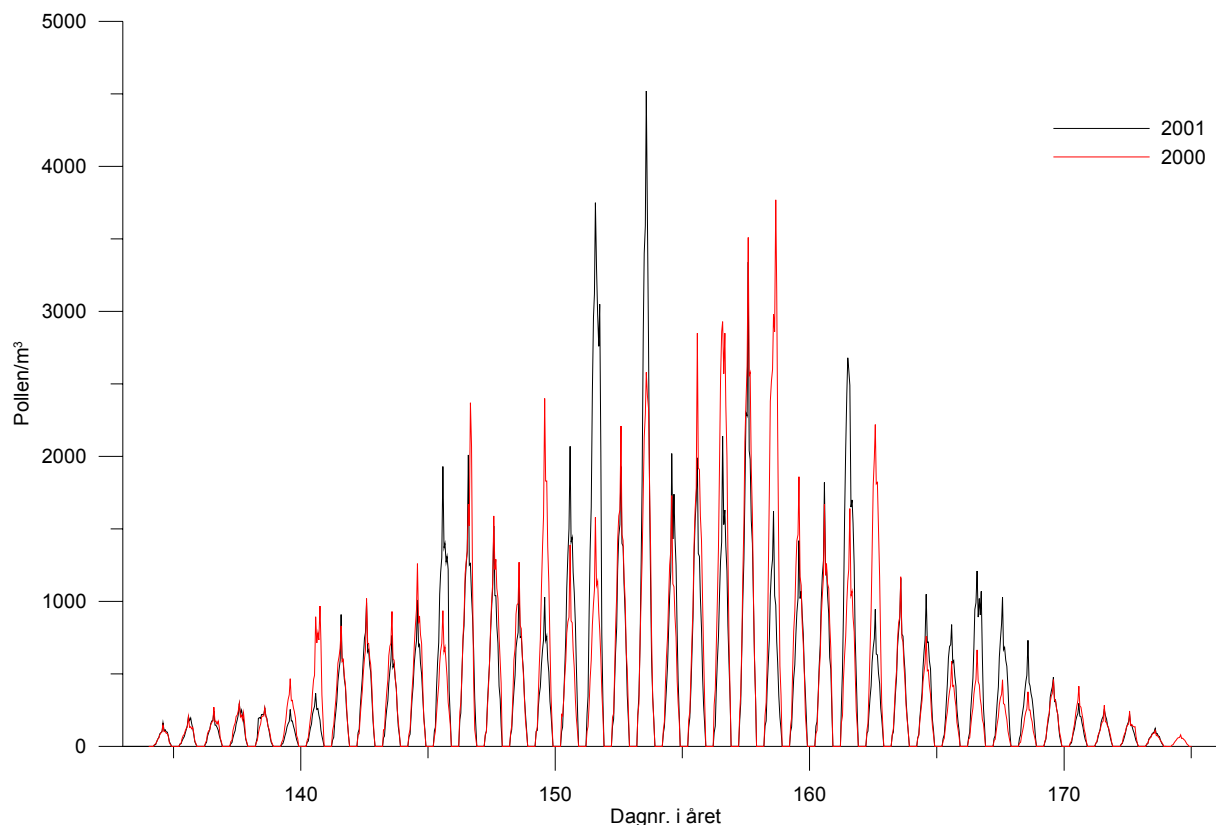
Variationer i den turbulente tilstand af det atmosfæriske grænselag medfører også ændringer i pollenkoncentrationen. Dette er illustreret i figur 12, hvor koncentrationen ved blomsterhøjden over en blomstrende rapsmark (1 ha) er angivet for to forskellige sæsoner (2000 og 2001). Frigørelsen (emissionen) af pollen er den samme gennem de to sommersæsoner, men alligevel ses forskellene i de meteorologiske betingelser at medføre forskelle på 20 % i den maksimale sæsonkoncentration af pollen over marken. Feltstudier hvor pollenkoncentrationen typisk er målt hver time i enkelte dage i sæsonen melder også om store variationer fra dag til dag og fra år til år (Williams, 1984; McCartney and Lacey, 1991; Timmons et al., 1995). Under disse studier blev maksimal koncentrationer mellem ca. 2300 – 2800 pollen/m³ rapporteret. Fra figur 12 ses det at modelresultaterne er i rimelig overensstemmelse med disse niveauer. Kun få dage i løbet af de to sæsoner estimeres koncentration at komme over ca. 3000 pollen/ m³.



Figur 10. Daglige tidsserier af andelen af GM-pollen over en økologisk mark i forskellige afstande fra GM-marken. Resultater for lokaliteten Tange i 2001 med en GM-mark på 1 ha og en økologisk mark på 16 ha. Modelopsætningen er som beskrevet i figur 8. Den gennemsnitlige GM-pollen andel for hele sæsonen er ca. 0,4%, 0,2% og 0,04 % ved hhv. 100, 300 og 900 m afstand.



Figur 11. Daglige tidsserier af andelen af GM-pollen over en økologisk mark i forskellige afstande fra GM-marken. Resultater for lokaliteten Tange i 2001 med en GM-mark på 16 ha og en økologisk mark på 1 ha. Modelopsætningen er som beskrevet i figur 8. Den gennemsnitlige GM-pollen andel for hele sæsonen er ca. 7%, 3% og 1 % ved hhv. 100, 300 og 900 m afstand.



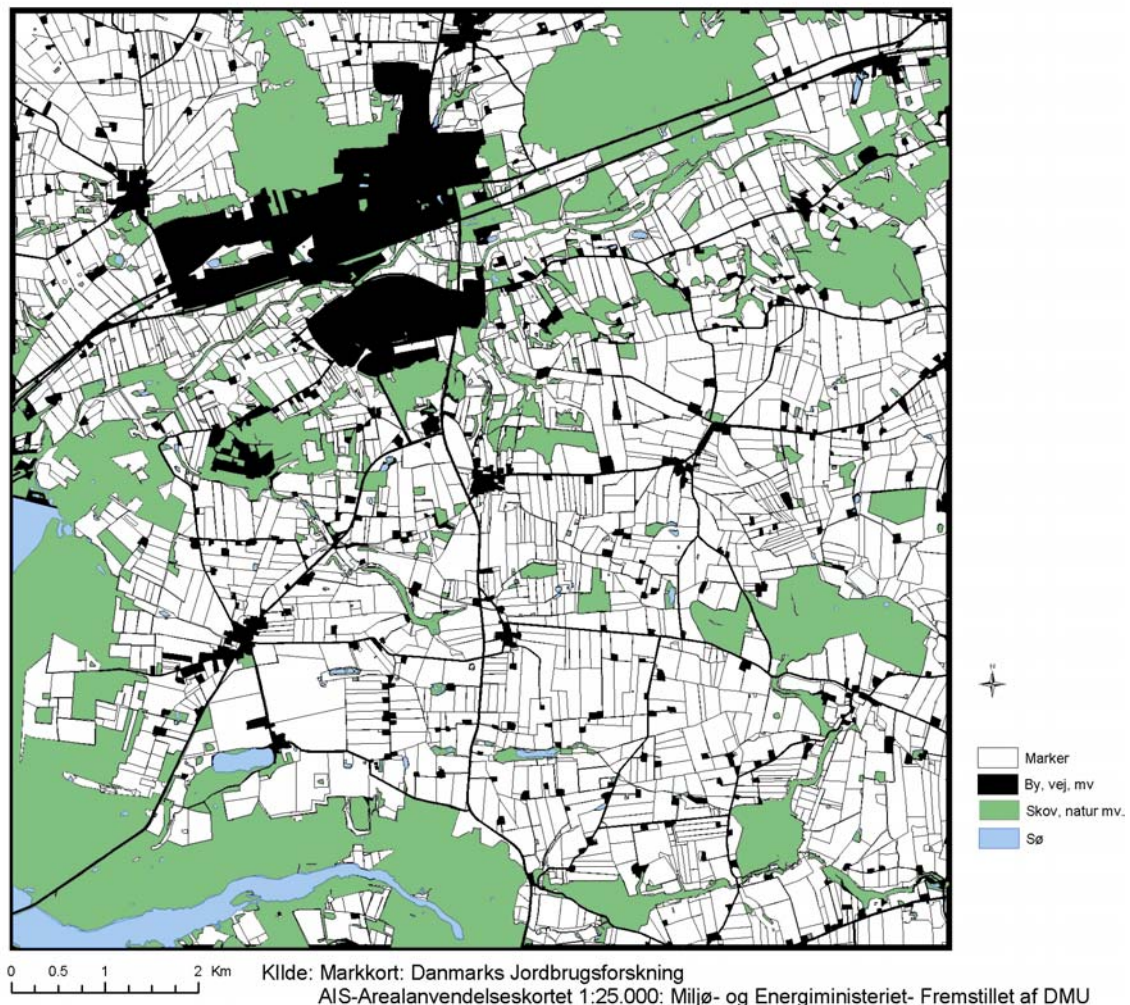
Figur 12. Beregnede tidsserier af pollenkoncentrationen i blomsterhøjde over en rapsmark. Modelberegningerne er for en mark på 1 ha og inkluderer meteorologiske data fra Tange for sæsonen i 2000 og 2001. Transporten fra andre omkringliggende marker er ikke medtaget.

2.1.3 Fordelinger i landskabet: et case study fra Bjerringbro-Hvorslev

Den anvendte OML-DEP model giver som allerede beskrevet også mulighed for at beregne spredningen fra flere marker med pollenemission. Dermed er det muligt at studere betydningen af både fordelingen og størrelsen af GM, konventionelle og økologiske marker i landskabet for den samlede vindspredning af GM-pollen. I den netop publicerede rapport om sameksistens (Tolstrup et al., 2003) studeres et case-studie fra Bjerringbro og Hvorslev kommuner i Viborg Amt, hvor mark- og bedriftsstruktur er digitaliseret baseret på data fra 1998. Pga. tilgængeligheden af relevante data har vi valgt at inkludere det samme testeksempel her, se figur 13.

Tabel 3. Arealanvendelsen i området omkring Bjerringbro-Hvorslev for et scenarie hvor en udbredt økologisk rapsdyrkning er antaget. Ved placeringen af GM-markerne er der ikke taget højde for evt. afstandskrav til ikke-GM-marker.

Rapsarealet udgør af det totale landbrugsareal	6,4 %
GM-raps udgør af rapsarealet	38 %
Konventionel raps (ikke-GM) udgør af rapsarealet	56 %
Økologisk raps udgør af rapsarealet	6 %



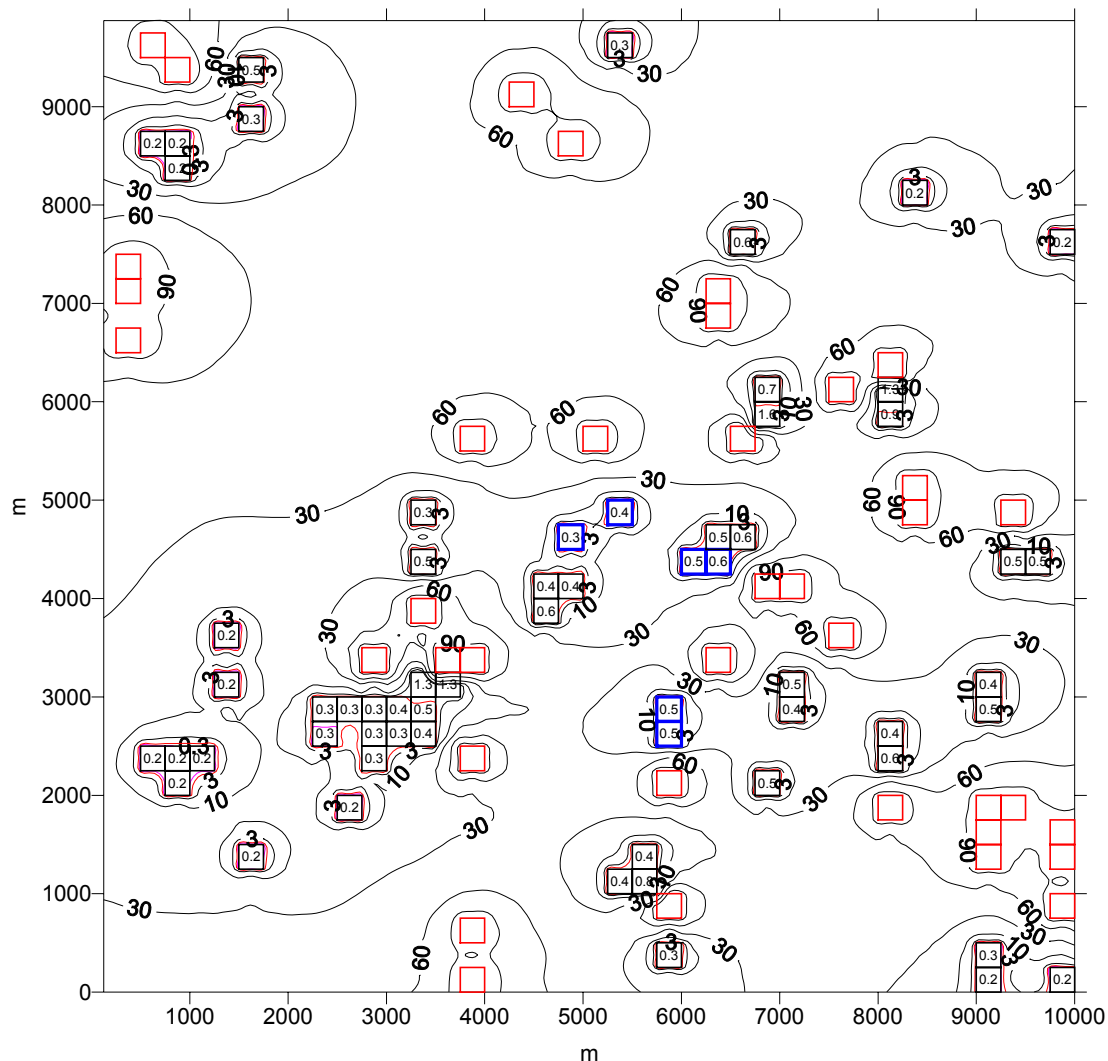
Figur 13. Kort over test-eksemplet fra Bjerringbro og Hvorslev Kommuner i Viborg amt. Kilde: Tolstrup et al. (2003).

Området dækker 10 km × 10 km og er i modelarbejdet inddelt i 40 × 40 felter af 250 m × 250 m kvadrater svarende til 6,25 ha. 65 % af arealet anvendes til landbrug, mens de resterende 35 % udgøres af bymæssig bebyggelse, skove, søer osv., hvilket er i nogenlunde overensstemmelse med fordeling indenfor det samlede areal i Danmark. Arealanvendelsen og fordelingen indenfor GM-, konventionel og økologisk raps i test-eksemplet er givet i tabel 3. Andelen af landbrugsarealet der er anvendt til rapsdyrkning er 6,4% i modelscenariet, hvilket er højere end landsgennemsnit (3%) men lavere end for Ø-Jylland og dele af Sjælland (9%).

Modelkørslen er for år 2000 og inkluderer meteorologiske data fra Eta modellen fra Tange området. Selve Tange er lokaliseret lidt vest for test-området i figur 13 og de meteorologiske data vil være repræsentative for området.

Figur 14 viser sæsongennemsnittet af GM andelen af den totale pollenkoncentration i blomsterhøjde over rapsmarkerne i Bjerringbro-Hvorslev området. Simuleringerne viser at for denne kombination af placeringer og størrelser af GM og ikke-GM rapsmarker vil andelen af GM-pollen minimum være 0,2 % over de økologiske og konventionelle marker. I områderne hvor GM markerne støder direkte op til ikke-GM markerne kan koncentration over markerne komme op på mellem 0,9 til 1.6 % Det sidste ses over en konventionel mark hvor

kombinationen af kort afstand og retningen til en GM mark giver de høje koncentration (pga. en dominerende vestlige vindretning).



Figur 14. Den procentuelle andel af GM rapspollen i blomsterhøjde i test-eksemplet med et 38% GM-scenarie fra Bjerringbro-Hvorslev. Tomme (røde) kvadrater angiver placeringen af GM-rapsmarker mens ikke GM-rapsmarker er vist med angivelse af GM-procent (sort=konventionel og blå=økologisk). Isokurverne angiver koncentrationniveauerne. For at vise detaljerne omkring ikke-GM markerne er de følgende ikke-sortede isokurver også angivet: rød=1 % og lilla=0.3 %.

2.1.4 Metode til vurdering af mængden af GM-pollen fra vindspredning

Som nævnt i afsnit 2.1.2 kan resultaterne af modelsimuleringerne (figur 8 og 9) anvendes til at lave en simpel additiv vurdering af det procentuelle bidrag af vindspredt GM rapspollen over en given ikke-GM modtagermark. Denne metode beskrives via et eksempel i det følgende. Derefter sammenlignes resultatet for eksemplet med den simple metode med det tilsvarende resultat af de mere detaljerede modelsimuleringer for Bjerringbro-Hvorslev området.

Samlet bidrag til en modtagermark

Først kortlægges afstanden til og størrelsen af GM marker i nærområdet (op til 2000 m). For at gøre det simpelt og konservativt (for at være ”på den sikre side”), bestemmes afstanden som korteste afstand mellem de to marker. En mere præcis afstandsmetode omtales i næste eksempel. Den enkelte marks areal omregnes til et kvadrat med samme areal. Ud fra størrelsen af ikke-GM marken fastlægges hvilken kurve i figur 9 som skal anvendes. Den enkelte GM marks bidrag aflæses fra figuren evt. via interpolation mellem linierne for størrelsen af GM marker. Alle GM markernes bidrag adderes, hvorved det samlede vindbidrag findes. Et eksempel med beregning af bidraget fra fem omkringliggende GM marker er givet i tabel 4.

Hvis modtagermarken ikke har en ækvivalent størrelse som svarer til et af kurvesættene i figur 9, så kan en lidt mere præcis vurdering fås ved at udføre det viste eksempel to gange for to størrelser af ikke-GM marker og derefter interpolere. Dette er blandt andet vist i næste eksempel.

Tabel 4. Eksempel med additiv vurdering af GM -pollen (%) over ikke-GM rapsmark ved bidrag fra fem GM rapsmarker.

	Størrelse af mark m ²	Ækvivalent kvadrat	GM-%
Modtagermark	160x250	200x200	via aflæsning i figur 9
Afstand til GM mark (m)	GM mark		
200	100x200	140x140	0,6
500	200x200	200x200	0,4
800	100x100	100x100	0,06
1000	400x100	200x200	0,15
1500	300x300	300x300	0,20 ^{*)}
Samlet bidrag			1,4

*) Via formelen $1766 * x^{-1,246}$ i figur 7.2.

Eksempel med sammenligning af en additiv vurdering med en præcis beregning

De mere detaljerede resultater af modelberegninger af GM-andelen for rapsmarker i Bjerringbro-området er beskrevet i det foregående afsnit og vist i figur 14. Disse resultater sammenlignes i det følgende med et eksempel på anvendelsen af ”den simple metode” til vurdering af GM-procenten. GM-bidraget vurderes for en økologiske mark med det sydvestlige hjørne placeret i koordinaten (6250,4250) og med den angivne GM koncentration på 0,6 %. Der ses kun på bidrag fra de 5 nærmeste GM marker som er angivet i tabel 5. Da markerne i figur 14 er 250 m × 250 m kvadrater, er afstanden beregnet mere præcist og i overensstemmelse med data anvendt til figur 9 ved at beregne afstanden mellem centrum af markerne og derefter fratække 250 m. Den simple vurdering resulterer i en GM-andel på 2,0 % , hvilket er ca. 3 gange større end den præcist beregnede på 0,6 % .

Forskellen skyldes til dels at vurderingen er baseret på data for år 2001, mens den præcise beregning er udført for år 2000. Men forskellen ligger først og fremmest i at den simple vurdering anvender kurvedata (figur 9) for den mest kritiske/hyppigste vindretning, som for denne lokalitet er en vestlig vindretning det pågældende år. I Bjerringbro-området ligger GM markerne dog spredt rundt omkring modtagermarken. Kurvedata i figur 9 antager (som det jo bevidst er valgt) dermed altid de mest kritiske forhold/vindretning for bidrag fra en enkelt GM mark, men dette vil ved bidrag fra flere GM marker placeret i forskellige retning altid give en for høj værdi, da pollenspredningen her kan forekomme fra andre vindretninger end de hyppigste i et givet år. Den additive metode overvurderer dermed spredningen af GM-pollen.

En overvurdering af GM-spredningsprocenten vil dog give en sikkerhedsmargin måske svarende til en "worst case" situation. Som tidligere nævnt kan den beregnede GM-procent ikke direkte tolkes som at der er et tilsvarende GM-indhold i frøene i non-GM marken. Omsætningsfaktoren mellem det relative indhold af GM-pollen over marken og bestøvningsprocenten af non-GM afgrøden kendes dog ikke. GM-indholdet i frøene vil formentlig være lavere end hvad GM-procenten af pollen indikerer, bl.a. på grund af selvbestøvning hos non-GM planterne.

Der er dog muligt (for dette konkrete år 2000) at korrigere den additivt vurderede GM-%, således at den bedre repræsenterer de faktiske meteorologiske forhold det år. Det er gjort i tabel 5 ved at tage hensyn til den retning, hvori GM markerne er placeret, i forhold til retningen anvendt til figur 9. Disse korrektionsfaktorer er fundet ud fra figur 6 for Tange 2001 ved at sammenligne koncentrationer i retningen mod øst (svarer til retningen brugt til kurvesættet i figur 9) med koncentrationer for Tange 2000 i de relevante retninger hvor GM markerne faktisk er placeret. Da markstørrelsen i figur 7 er 100 m x 100 m og den konkrete beregning er for 250 m x 250 m er det ikke helt præcist at sammenligne data, men det er bedst at benytte afstande i enheder af markbredder. Den grove korrektion resulterer i et GM-bidrag på 0,5 %, hvilket er mindre end i den detaljerede beregning, men rimeligt præcist i forhold til det grove skøn af korrektionsfaktorerne og det begrænsede antal anvendte GM marker.

Tabel 5. To eksempler på vurdering af GM-pollen over en økologisk mark på 250 m x 250 m i Bjerringbro-Hvorslev området (placeret i (6250,4250) i figur 14). Bidraget fra de fem nærmeste GM marker medtages i 1) en additiv vurdering baseret på de beregnede kurver i figur 9 og 2) den simple vurdering korrigeret for et fald i bidraget pga. placering af GM marker i forhold til den dominerende vindretning.

Placering af GM marker		Additiv vurdering			Additiv vurdering m. korrektion for placering og vindretning		
Afstand ¹⁾ (m) til GM-mark	Retning til GM-mark	GM-bidrag til 200x200 ikke-GM mark (figur 9)	(%) til 300x300 ikke-GM mark (figur 9)	Middel	Retning til økologisk mark	Korrektionsfaktor ²⁾	Korrigeret GM-bidrag (%)
310	SØ	0,95	0,75	0,85	NV	¼	0,21
540	SØ	0,49	0,42	0,46	NV	¼	0,12
750	S	0,31	0,30	0,31	N	¼	0,075
1000	N	0,21	0,20	0,21	S	1/10	0,021
1100	SØ	0,20	0,19	0,20	NV	¼	0,050
Sum				2,0	0,5³⁾		

1) Afstanden er beregnet som afstand mellem centrum af marker minus 250 m.

2) Korrektionen udføres for en konkret sammenligning med egentlige beregninger for forskellige år med forskellig fordeling af retninger til marker (se tekst for detaljer).

3) Det præcist beregnede bidrag er på 0,63 %. Forskellen skyldes dels de groft vurderede korrektionsfaktorer og dels at små bidrag fra fjernere GM marker ikke er medtaget her.

2.2 Resultater for vinterrug

Ved at inkludere de nødvendige oplysninger om pollenfrigørelse (emission), faldhastighed mm (se afsnit 1.3) er der foretaget tilsvarende modelberegninger for pollen fra vinterrug som for raps. Spredningen og dermed koncentrationen af pollen vil som for raps afhænge af de meteorologiske forhold og ændringerne i disse fra år til år og fra sted til sted. Pollen fra rug

har dog en større faldhastighed end rapspollen og depositionsmechanismerne vil derfor have en større betydning for spredningen af denne type pollen.

Den store faldhastighed for vinterrug i forhold til raps betyder, at de numeriske beregninger i OML-DEP bliver mere usikre i forhold til for raps. Det skyldes, at den numeriske fejl vokser når depositionen bliver relativ stor i forhold til emissionen.

2.2.1 Andelen af GM-rapspollen over ikke-GM marker

Vurderingen af risikoen for spredning af GM-pollen er igen illustreret ved hjælp af kurver der angiver den procentvise andel af GM-pollen over ikke-GM-marker ved forskellige afstande og for forskellige markstørrelser (se figur 15). Som forventet betyder den større depositions-hastighed at koncentrationen af GM-pollen aftager hurtigere med afstanden fra GM-marken end i de tilsvarende beregninger for raps (figur 8). Ønskes %-delen af GM-pollen fra en 16 ha mark at være lavere end 1% over en økologisk mark på 4 ha skal separationsafstanden således være ca. 300 m, mens den er ca. 600 m for raps. Dette afspejles også i udtrykket for de tilpassede kurver hvor eksponenten er et større negativt tal i tilfældet med rug.

I figur 16 er de tilsvarende kurver grupperet i forhold til størrelsen af ikke-GM markerne. En risikovurdering for den enkelte ikke-GM mark kan dermed estimeres ved at addere de enkelte bidrag fra GM marker i området på tilsvarende måde som for raps (beskrevet i afsnit 2.1.4).

2.2.2 Fordelinger i landskabet og scenarier for afstandskrav: et case study fra Bjerringbro-Hvorslev

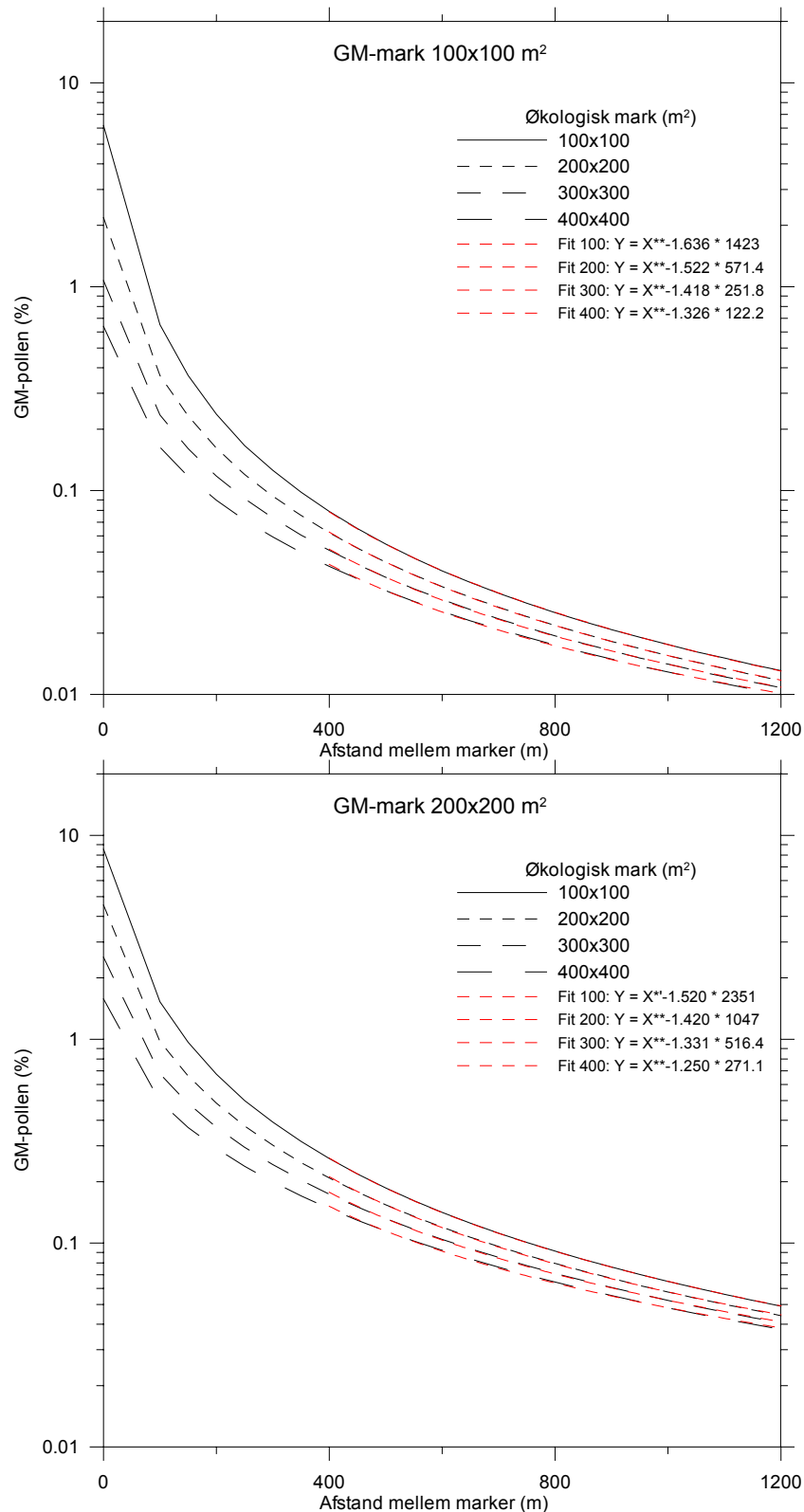
For test-området ved Bjerringbro-Hvorslev kommuner har vi ligeledes lavet modelscenarier for rug. Oplysninger fra sameksistensrapporten (Tolstrup et al., 2003) samt data om udbredelsen af danske landbrugsafgrøder i 2002 (Dalgaard & Kristensen, 2003) er anvendt som grundlag for beregninger af relative og absolutte markarealer for scenarierne. Området er igen opdelt i 40×40 dvs. i alt 1600 kvadrater og med samme opløsning som for raps.

I gennemsnit udgør det samlede rugareal ca. 1,6 % af det dyrkede areal baseret på data fra 2002 (Tolstrup et al., 2003). I modelscenarierne anvendes en værdi på 10 % rugareal af det samlede areal, hvilket svarer til forholdene i områder med relativ høj koncentration af rugdyrkning (5-16 % af dyrkningsarealet) i Nordjyllands Amt, Århus Amt og Nordsjælland. Således allokeres samlet i scenarierne 104 kvadrater (10% af 1040 kvadrater) eller i alt 650 ha til rugdyrkning (Tabel 6).

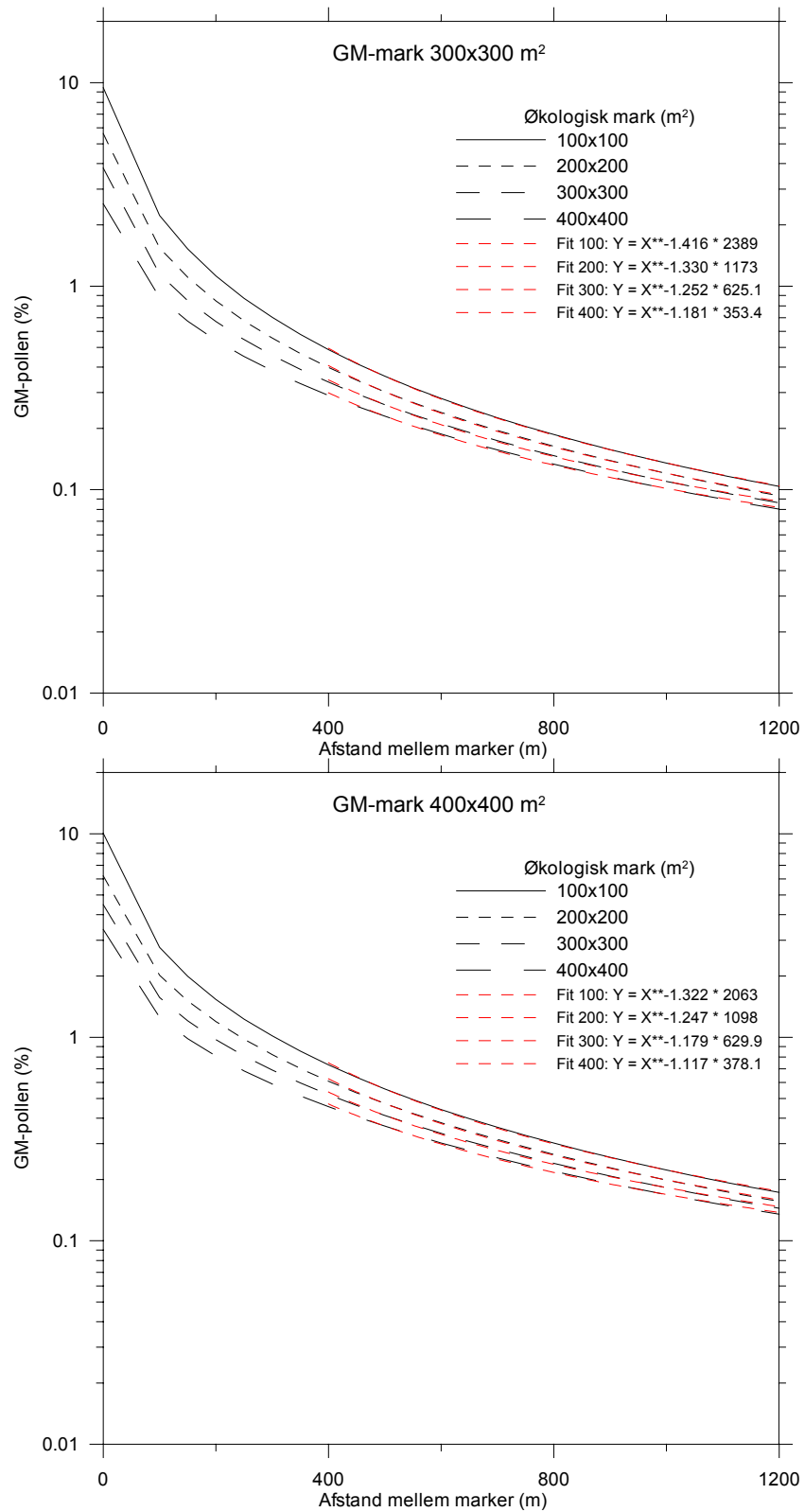
Den gennemsnitlige størrelse af rugmarker er 4,1 ha i Danmark. For områderne anvendt i modelscenarierne forventes det at være højere, anslået til ca. 7 ha. På grundlag af oplysninger om fordeling af markstørrelser (Tolstrup et al., 2003, tabel 4.4) er der foretaget en tilnærmet procentmæssig fordeling af markerne i tre størrelsesklasser, som er vist i tabel 6.

Tabel 6. Fordelingen af markstørrelser i et spredningsscenarie med 50 % GM-rug og 50 % konventionelt og økologisk (dvs. ikke-GM) rug.

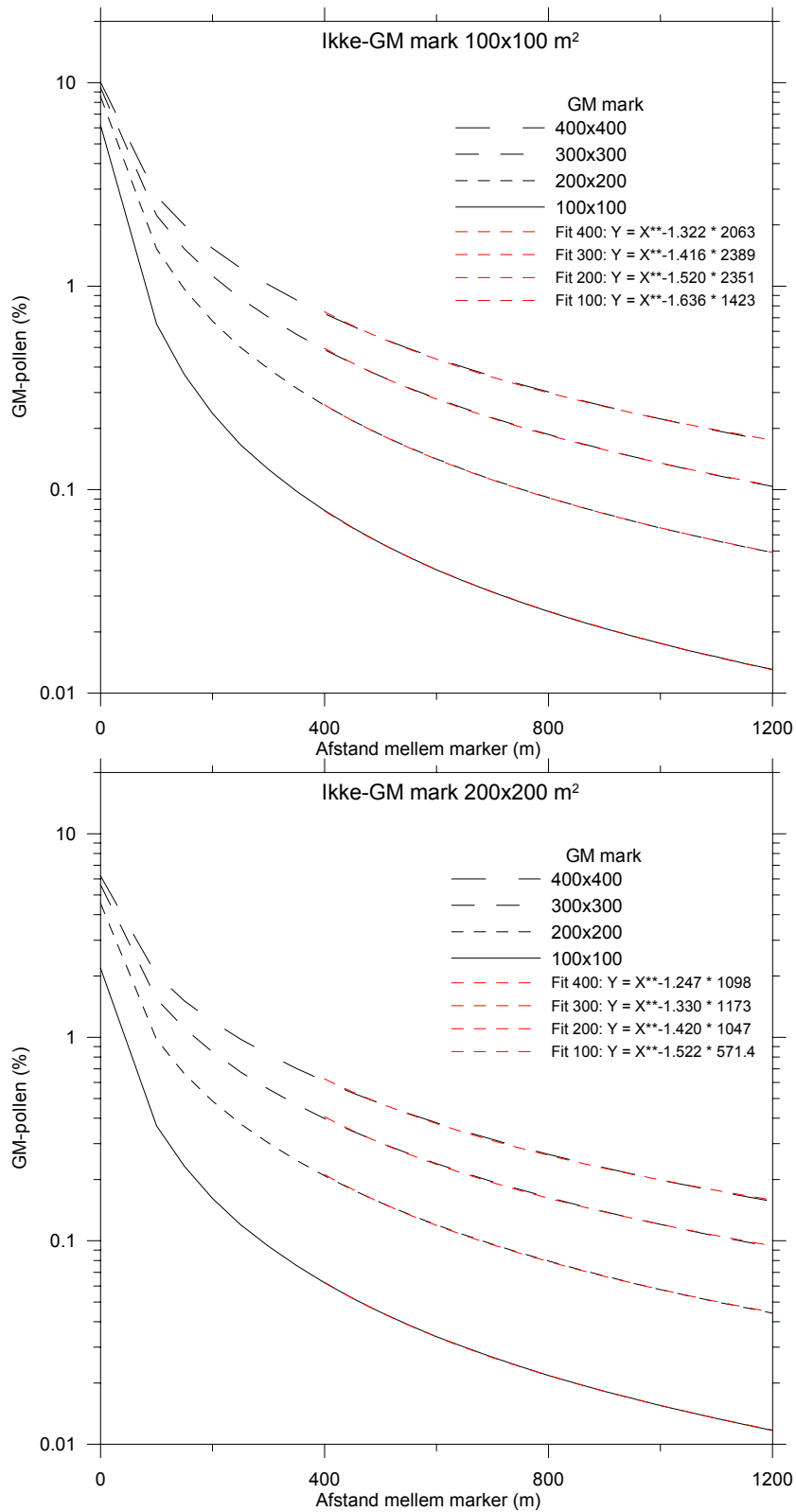
		Markareal / antal kvadrater			Total
		6,25 ha / 1	12,5 ha / 2	18,75 ha / 3	
Scenarie-fordeling i %		75 %	20 %	5 %	100 %
Alle marker (GM, konv., økol.)					
	Antal kvadrater	78	20	6	104
	Antal marker	78	10	2	90
	Areal i ha	487,5	125	37,5	650
GM-marker, 50 % / ikke-GM-marker (konv. og økol.), 50 %					
	Antal kvadrater	39	10	3	52
	Antal marker	39	5	1	45
	Areal i ha	243,75	62,5	18,75	325



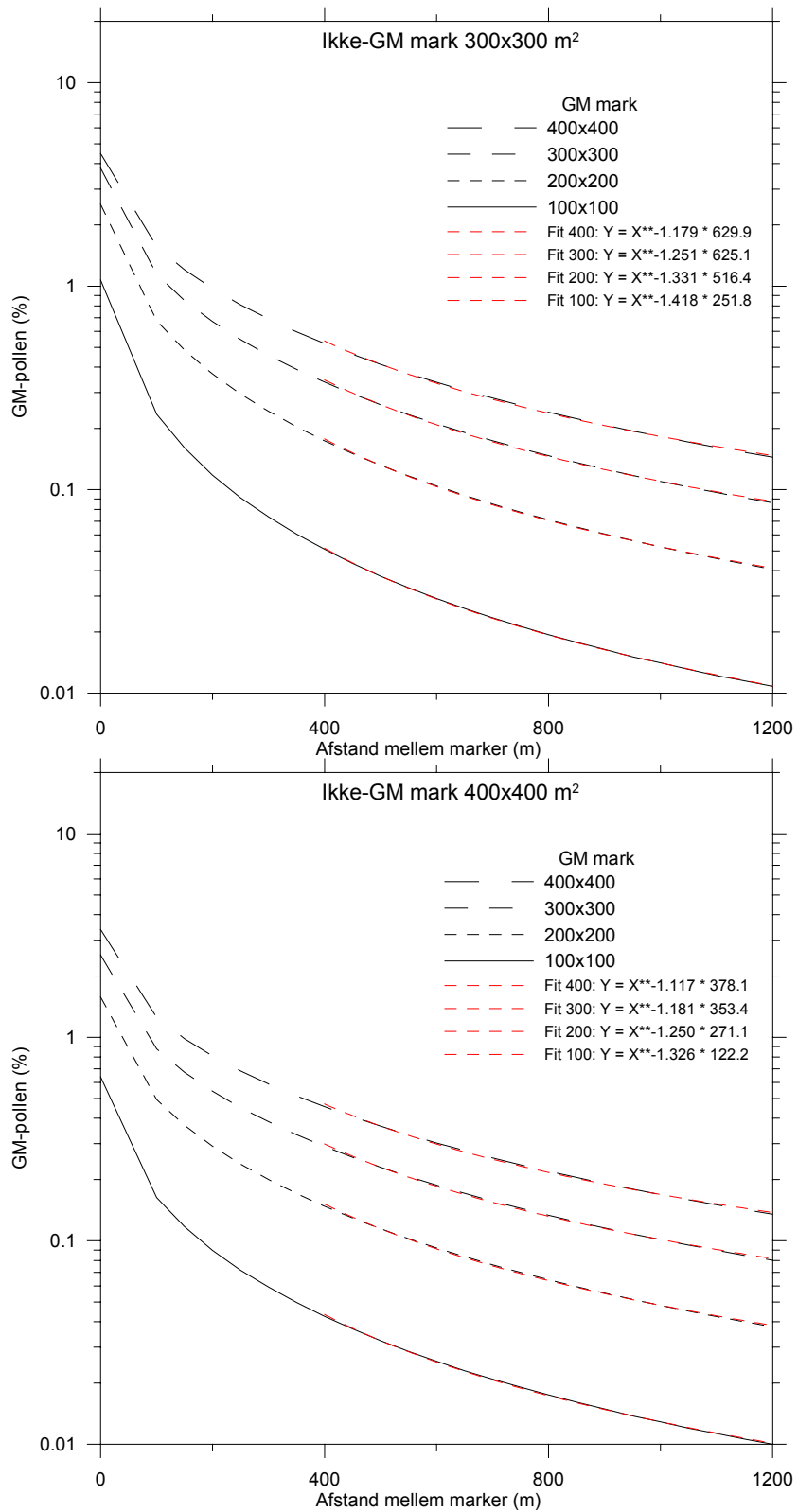
Figur 15. Beregnede relative koncentrationer af pollen fra GM rugmarker i blomsterhøjde over økologiske/ikke-GM marker. Sæsongennemsnit for en lokalitet ved Tange i år 2001. Ikke-GM markeren er placeret vest for GM markeren pga. den dominerende vestlige vindretning i denne sæson. De røde kurver og ligningerne ved hver graf angiver de tilpassede linjer til kurverne.



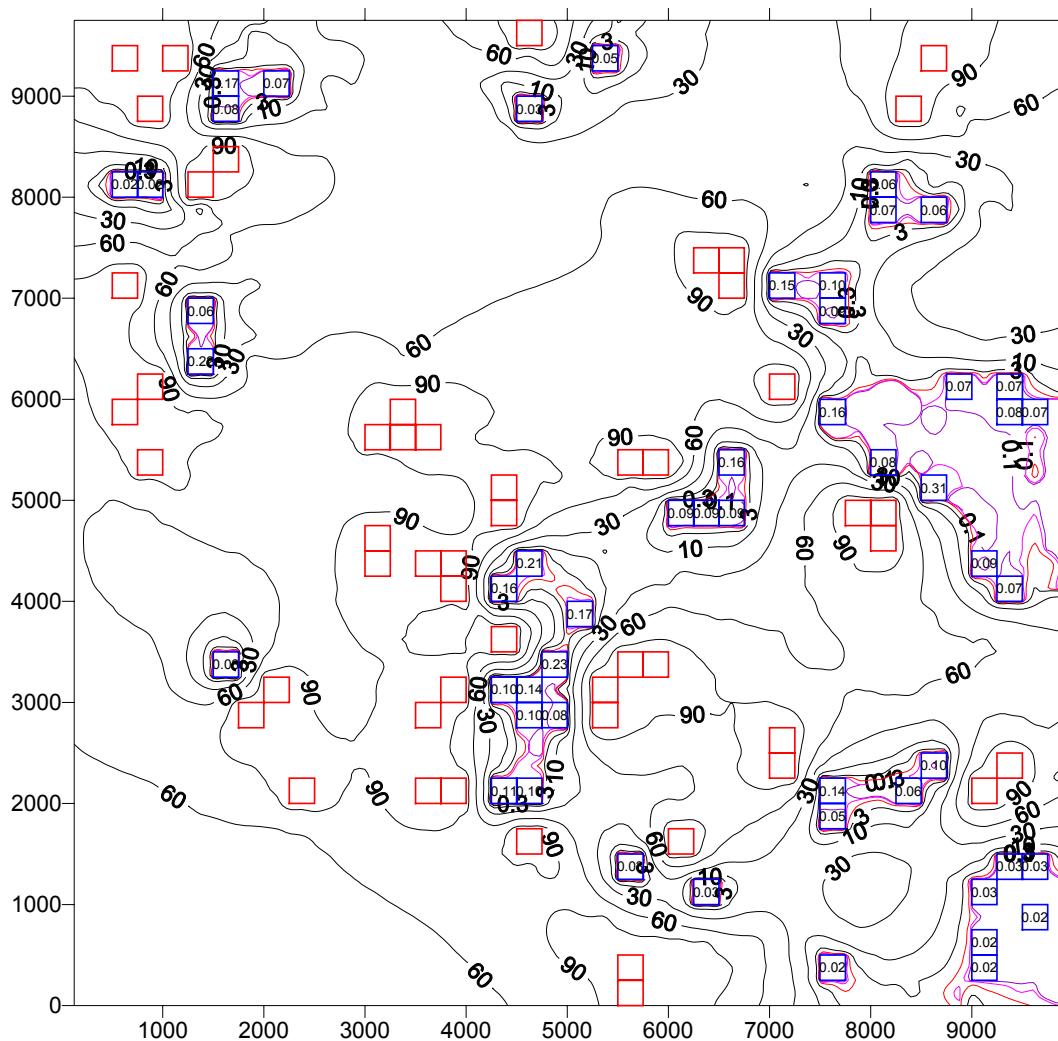
Figur 15. Fortsat



Figur 16. Som i figur 15, men opdelt for hver af de fire størrelser ikke-GM marker.



Figur 16. Fortsat



Figur 17. Den procentvise andel af GM rugpollen ift. den totale mængde pollen i blomsterhøjden. Fra scenarieberegning med afstandskrav på 250 m mellem GM og ikke-GM marker. Tomme (røde) kvadrater angiver placeringen af GM-marker, mens ikke-GM-marker er vist med angivelse af GM-procent (blå kvadrater). De ikke-sortede isokurver: rød=1%, pink=0.3% og lilla=0.1%.

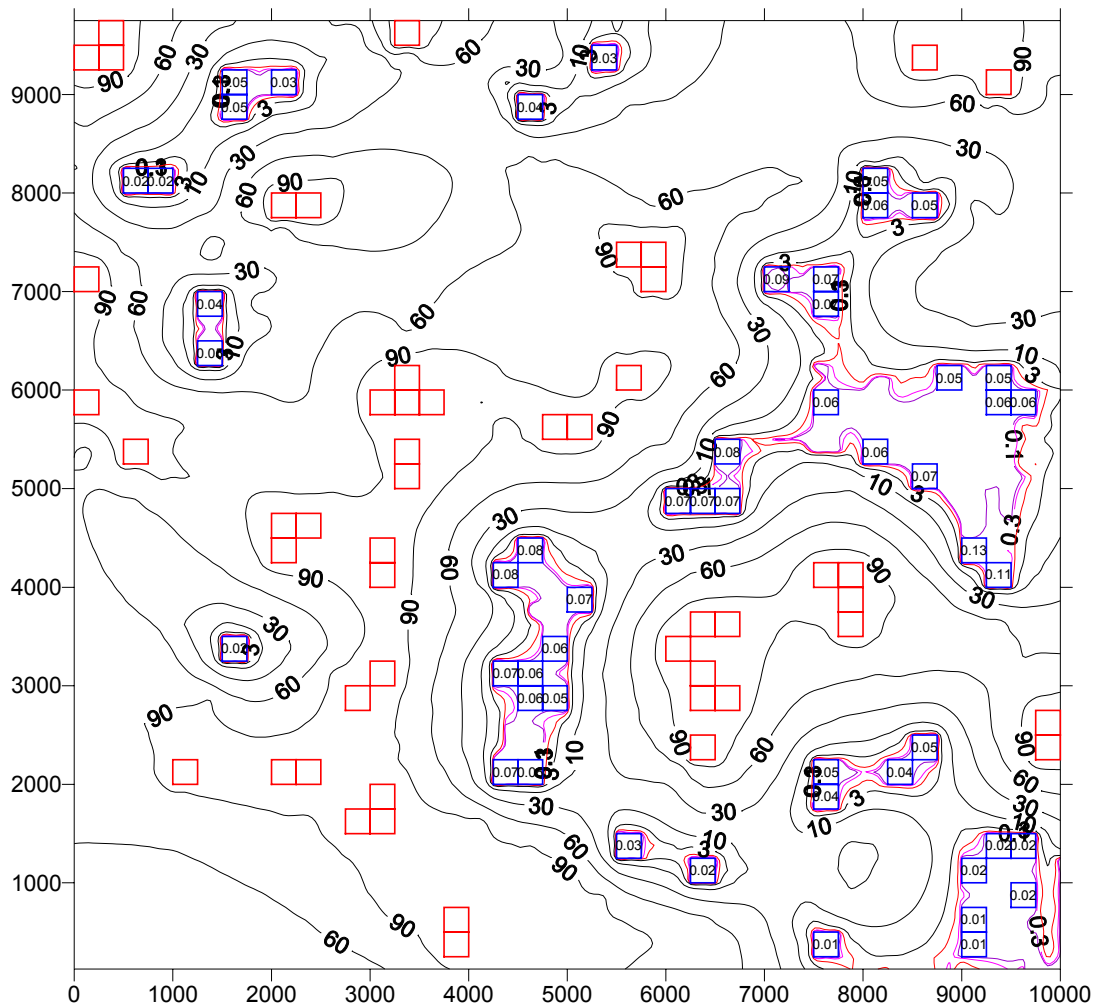
I modelsimuleringerne antages det at rugmarkerne er opdelt med 50 % GM-marker og 50 % ikke-GM-marker. Derudover anvendes to forskellige scenariesituationer med hensyn til afstandskrav mellem GM- og ikke-GM-rugmarker:

1. Basale afstandskrav på 250 m, som foreslået af udredningsgruppen vedr. sameksistens (Tolstrup et al., 2003). Dette krav svarer til de nuværende krav ved produktion af certificeret frø. Dette medfører at der er min. 1 kvadrat mellem GM- og ikke-GM-marker.
2. Udvidede afstandskrav på 1.000 m, der giver en øget sikkerhedsmargin. Dette medfører at der overalt er min. 4 kvadrater mellem GM- og ikke-GM-marker.

Scenarieberegninger for afstandskrav på 250 m:

Resultatet af beregningerne for test-området inkluderende afstandskravet på 250 m er givet i figur 17. GM og ikke-GM markerne er ikke homogent fordelt i området og størst

koncentrationer af GM-pollen er naturligvis fundet i områder med mange GM marker. Over ikke-GM markerne tættest på GM-kilderne ses typisk koncentrationer på 0,1-0,3 %. Er afstanden mere end det foreslåede basale afstandskrav på 250 m kommer GM-andelen af pollenkoncentration typisk ned under 0,1%. Enkelte undtagelser ses dog også i testområdet, hvor koncentrationen ved 250 m kommer op på f.eks. 0,31 % eller hvor koncentrationen ved 500 m kommer op på 0,16 %. Dette skyldes hovedsageligt placeringen af markerne i forhold til den dominerende vindretning. I denne sæson var vinden som tidligere nævnt ofte fra vest og de to eksempler med stor GM-spredning er fundet i områder hvor GM-marken er placeret vest for ikke-GM-markerne.



Figur 18. Den procentvise andel af GM rugpollen ift. den totale mængde pollen i blomsterhøjden. Fra scenarieberegning med afstandskrav på 1000 m mellem GM og ikke-GM marker. Tomme (røde) kvadrater angiver placeringen af GM-marker, mens ikke-GM-marker er vist med angivelse af GM-procent (blå kvadrater). De ikke-sortede isokurver: rød=1%, pink=0.3% og lilla=0.1%.

Tallene i kvadraterne angiver GM-koncentrationen henover det enkelte 250 m × 250 m kvadrat af marken. Koncentrationsgradienten er stor tæt på ikke-GM-markerne, hvor andelen af ikke-GM-pollen i luften stiger kraftigt. I randområdet af marken vil GM-koncentrationen således være højere end gennemsnittet for hele marken. Men for at studere dette i detaljer er modelkørsler med en højere horisontal opløsning nødvendig. Det er vigtigt at bemærke at

isokurverne er fremkommet ved interpolering mellem gitterpunkter og derfor giver et billede af den rummelige fordeling baseret på den 250 m × 250 m opløsning i modelsimuleringerne.

Scenarieregninger for afstandskrav på 1000 m:

Det øgede afstandskrav giver som forventet væsentligt lavere koncentrationer af GM-pollen over de konventionelle/økologiske marker, se figur 18. Typiske gennemsnitskoncentrationer over disse marker er nu nede på mellem 0,01-0,08 % af den totale pollenkoncentration. I et enkelt tilfælde kommer GM-andelen dog op på 0,11-0,13 % over en mindre ikke-GM mark lokaliseret øst for en stor GM mark.

3 Sammenlæg og konklusioner

Som en del af projektet *Tool for protection against contamination by GMO*, TOPRO, er en ny model for vindspredning af pollen udviklet. Modellen OML-DEP er en videreudvikling af den danske Operationelle Meteorologiske Luftkvalitetsmodel, der gennem en årrække er blevet udviklet og anvendt ved Danmarks Miljøundersøgelser. OML modellen er en moderne Gaussisk (røgfane) model, hvilket gør den velegnet til detaljerede studier af spredningen af stoffer i atmosfæren indenfor ca. 20-30 km afstand fra kilden. Pollenversionen af OML-DEP indeholder nu muligheden for at inkludere areal kilder (f.eks. marker) for pollen, den efterfølgende spredning i atmosfæren pga. vinden og de turbulente strømninger i det atmosfæriske grænselag og endelig fjernelsen af pollen fra atmosfæren via en gravitationel faldhastighed og tørdeponering. Deponeringen er inkluderet ved brug af metoderne i den såkaldte "surface depletion model", hvor depositionen antages at ske fra de nederste dele af atmosfæren. Denne metode sikrer den mest realistiske repræsentation af deponeringsmekanismerne i Gaussiske modeller som OML-DEP. I dette studie har vi fokuseret på modelleringen af spredningen fra vinterraps (*Brassica napus*) og vinterrug (*Secale cereale*), som begge er afhængige af bestøvning via vindspredning af pollen. For mange planter (deriblandt raps) er bestøvningen pga. insekter også en vigtig faktor, men den præcise fordeling mellem de to spredningstyper er ofte ikke velbestemt. For at kunne vurdere den mulige risiko for spredning af GM i naturen er det derfor vigtigt at undersøge processerne bag de mulige spredningsveje. Her anvendes OML-DEP modellen til at undersøge potentialet for vindspredning af de to pollentyper.

Modellen er kørt for fem pollensæsoner i perioden fra 1999 til 2003 ved at inkludere meteorologiske data fra vejrmødelen Eta. Disse data er testet med gode resultater mod lokale målinger fra en vejrstation i Danmark. For at vurdere ikke bare forskellene i spredning fra år til år, men også mulige regionale forskelle, er beregningerne lavet for tre lokaliteter i Danmark (Tange, Øster Højst og Lille Valby). Den nødvendige information om pollenfrigørelse (emission) (mængde og tidsmæssig variation) samt den gravationelle faldhastighed for de to pollentyper er fundet i litteraturen.

Modelberegningerne af den rumlige fordeling af rapspollen for de tre lokaliteter og for de fem pollensæsoner viser at spredning af pollen varierer væsentligt pga. variationer i de meteorologiske forhold fra sæson til sæson og fra sted til sted. Specielt har den dominerende vindretning betydning for koncentrationsniveauerne og fordelingen, men også den stærkt varierende turbulente tilstand af det atmosfæriske grænselag er vigtig for spredningen. Potentialet for vindspredningen af pollen varierer derfor meget på både korte og lange tidsskalaer, hvilket gør en generel risikovurdering af spredningen mere kompliceret.

Modelsimuleringer hvor både størrelsen af GM og ikke-GM markerne samt afstanden mellem dem varierer, er præsenteret som en gruppe kurver. Disse kurver kan bruges som et simpelt ”værktøj” til at vurdere spredningsrisikoen ved f.eks. planlægning af en GM-mark i et område med økologiske afgrøder. Vi har givet et par eksempler på hvordan man ved denne såkaldte additive metode kan beregne mængden af vindspredt GM-pollen over en given rapsmark.

OML-DEP har ligeledes været benyttet til at lave mere detaljerede beregninger for et testområde i Bjerringbro-Hvorslev området i Jylland. Udfra oplysninger om fordelingen af afgrøder mm. giver denne scenarieberegning et indblik i betydningen af fordelingen af marker i landskabet i et område med både GM og ikke-GM raps. Tilsvarende beregninger er foretaget for vinterrug, hvor to scenarier er analyseret med forskellige afstandskrav (250 m og 1000 m) inkluderet. Generelt indikerer modelresultaterne at separationsafstanden mellem markerne er den mest effektive parameter for at nedsætte den relative andel af GM-pollen over en ikke-GM mark. Dernæst synes størrelsen af GM-marken at være en smule vigtigere end størrelsen af modtager marken selv. Fordelingen af markerne i landskabet og den dominerende vindretning i det pågældende område er dog også yderst vigtig for den samlede transport af pollen og dermed for GM-andelen af den totale pollenmængde over en mark.

Vi har studeret den potentielle spredning af GM-pollen via vinden. Andre forhold som levetiden af de enkelte pollen, konkurrencen med andre pollen i modtager-marken, sandsynligheden for at lande på en ”moden” plante mm. vil have stor betydning for den endelige bestøvning. Med de korte transportafstande og dermed korte transporttider anvendt i dette studie, resulterer modellens manglende inddragelse af levetiden for pollen dog næppe i nogen større fejl. Alt i alt giver resultaterne i denne rapport et estimat af andelen af GM pollen der er til rådighed før den endelige bestøvning.

I rapporten har vi gennemgået to metoder til bestemmelsen af spredningen af GM pollen. Den additive metode er baseret på grupper af beregnede kurver for forskellige størrelser og afstande mellem marker. Denne metode kan generelt benyttes som et første estimat ved planlægning og forvaltning af GM og ikke-GM afgrøder. Den mere komplekse metode bygger på anvendelsen af OML-DEP for beregninger af andelen af GM-pollen i et specifikt område med en specifik sammensætning af afgrøder. Ved at inkludere de lokale meteorologiske forhold for aktuelle år og evt. for en længere årrække kan man opbygge et mere detaljeret billede af spredningsrisikoen i det pågældende område. Dette komplekse værktøj kan således i fremtiden benyttes til vurdering af f.eks. afstandskrav for GM marker i specificerede områder af Danmark.

3.1 Fremtidige forbedringer

Pollen frigørelse (emission) er en funktion af et komplekst system af biologiske processer og samspil med bl.a. de meteorologiske forhold. Som beskrevet i afsnit 1.3 antager vi her at emissionen af pollen gennem sæsonen følger en udglattet kurve med maksimum midt i sæsonen. De store dag til dag variationer i emissionen som følge af f.eks. dage med sol/ regn er altså ikke medtaget. For at gøre simuleringerne mere realistiske bør man i et fremtidigt studie inkludere effekter på emissionen som følge af ændringer i de meteorologiske parametre.

Der mangler detaljeret viden om sammenhængen mellem procentandelen af GM-pollen i luften over ikke-GM marken og GM-indholdet i de høstede frø. Kendskabet til den relative

betydning af vind- og insektbestøvning for pollenspredning og bestøvning hos raps er ligeledes mangelfuldt og væsentligt for videre modeludvikling.

OML-DEP beregningerne af pollenspredning er her valideret ved indirekte sammenligning med observerede data fra forskellige lokaliteter og feltforsøg. De observerede data vil dog være stærkt afhængige af markstørrelse, antallet af andre pollenkilder i området, højden af pollenfælden, vindretningen under målingen mm. For at lave en mere detaljeret og præcis afprøvning af modellen kræves derfor et mere detaljeret felteksperiment, hvor f.eks. informationer om de lokale meteorologiske forhold er til rådighed.

4 Referencer

Andersen, S. 1993, Landbrugsplanterne.

Atkinson, D. G., D. T. Bailey, J. S. Irwin & J. S. Touma, 1996, Improvements to the EPA industrial source complex dispersion model, *J. Appl. Mete.*, 36, 1088-1094.

Berkowicz, R., H. R. Olesen & K. B. Gislason, , 1986, The Danish Gaussian air pollution model (OML): Description, Test and sensitivity analysis in view of regulatory applications. In: *Air pollution Modelling and its applications*, Plenum Press, New York.

Berkowicz, R., H. R. Olesen & U. Torp, 1985, The Danish Gaussian air pollution model (OML): Description, test and sensitivity analysis in view of regulatory application. *Proceedings of the 15th International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Applications*. St. Louis, USA.

Brandt, J., 1998, *Modelling Transport, Dispersion and Deposition of Passive Tracers from Accidental Releases*, Ph.D. thesis, National Environmental Research Institute, Denmark.

Brandt, J., J. H. Christensen, L. M. Frohn, F. Palmgren, R. Berkowicz & Z. Zlatev, 2001, Operational air pollution forecasts from European to local scale, *Atm. Env., Sup. No. 1*, pp. S91-S98.

Bodmer, H., 1922, Über den Windpollen, *Natur U. Tech.*, Zürich 3.

Dalgaard, T. & I. T. Kristensen, 2003. Udbredelsen af udvalgte afgrøder i Dansk landbrug 2002. Notat vedrørende dyrkning af genetisk modificerede afgrøder, Danmarks JordbrugsForskning, Afd. for Jordbrugsproduktion og Miljø, 31 s.

Feil, B. & J. E. Schmid, 2002, Dispersal of maize, wheat and rye pollen: A contribution to determining the necessary isolation distances for the cultivation of transgenic crops, *Shaker*.

Gregory, P. H., 1973, *The microbiology of the atmosphere*, 2nd edition. Leonard Hill, Plymouth.

Giddings, G. D., N. R. Sackville Hamilton & M. D. Hayward, 1997a, The release of genetically modified grasses. Part 1: pollen dispersal to traps in *Lolium perenne*, *Theor. Appl. Genet.*, 94, 1000-1006.

Giddings, G. D., N. R. Sackville Hamilton & M. D. Hayward, 1997b, The release of genetically modified grasses. Part 2: the influence of wind direction on pollen dispersal, *Theor. Appl. Genet.*, 94, 1007-1014.

Giddings, G. D., 2000, Modelling the spread of pollen from *Lolium perenne*. The implications for the release of wind-pollinated transgenics, *Theor. Appl. Genet.*, 100, 971-974.

Hertel, O., P. Løfstrøm & S. S. Jensen, 2002, Partikelforurening fra industri og trafik i Esbjerg. Danmarks Miljøundersøgelser 45 s. – Arbejdsrapport fra DMU nr 160.

Horst, T. W., 1977, A surface depletion model for deposition from a Gaussian plume, *Atmos. Env.*, vol. 11, pp. 41-46.

Hunt, J. C. R., H. L. Higson, P. J. Walklate & J. B. Sweet, 2001, Modelling the dispersion and cross-fertilisation of pollen from GM crops, Report to Dep. of Env., Food and Rural Affairs, UK.

Jensen I. & H. Bøgh, 1942, Om forhold der har indflydelse paa Krydsningsfaren hos vindbestøvede Kulturplanter, *Tidsskrift for Planteavl*, statens Planteavlundvalg, Red. K. Skovgaard, bind 46.

JRC, 2001, Deliberat fields trials - Environmental releases of GMOs
<http://biotech.jrc.it/deliberate/NL.asp>

McCartney H. A & M. E. Lacey, 1991, Wind dispersal of pollen from crops of oilseed rape (*Brassica Napus* L.), *J. Aerosol Sci.*, Vol 22, No 4, pp. 467-477.

Nickovic, S., D. Mihailovic, B. Rajkovic & A. Papadopoulos, 1998, The Weather Forecasting System SKIRON, Vol. II, Description of the model, Athens June, 1998, pp. 228.

Olesen H. R., P. Løfstrøm, R. Berkowicz & A. B. Jensen, 1992, An improved dispersion models for regulatory use - the OML Model. In: *Air pollution Modelling and its applications*, Plenum Press, New York.

Olesen, H.R., 1995, The model validation exercise at Mol: overview of results. Workshop on Operational Short-range Atmospheric Dispersion Models for Environmental Impact Assessment in Europe, Mol, Belgium, Nov. 1994, *Int. J. Environment and Pollution*, Vol. 5, Nos. 4-6, 761-784.

Pohl, F, 1937, Die Pollenerzeugung der Windblütler, *Beih. bot. Zentralbl.* 56, 365-470.

Pohl, F, 1937, Die Pollenkorngewichte einiger Pflanzen und ihre ökologische Bedeutung, *Beih. bot. Zentralbl.* 57, 112-172.

Seinfeld, J. H., 1986, *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*, John Wiley & Sons.

Szabo, T. I., 1985, Variability of Flower, Nectar, Pollen and Seed Production in some Canadian Canola (*Rapeseed*) Varieties, *American Bee Jour.*, pp. 351-35 May.

Timmons, A.M., E. T. O'Brien, Y. M. Charters, S. J. Dubbels & M. J. Wilkinson, 1995, Assessing the risks of wind pollination from fields of genetically modified *Brassica napus* ssp. *oleifera*, *Euphytica*, 85, 417-423.

Tolstrup, K., S. B Andersen, B. Boelt, M. Buus, M. Gylling, P. B. Holm, G. Kjellsson, S. Pedersen, H. Østergård & S. A. Mikkelsen, 2003. Rapport fra udredningsgruppen vedrørende Sameksistens mellem genetisk modificerede, konventionelle og økologiske afgrøder. København, Fødevareministeriet, 151 s.

Treu R. & J. Emberlin, 2000, Pollen dispersal in the crops Maize (*Zea mays*), Oil seed rape (*Brassica napus* ssp *oleifera*), Potatoes (*Solanum tuberosum*), Sugar beet (*Beta vulgaris*) and Wheat (*Triticum aestivum*): Evidence from publications, A report for the Soil Association from the National Pollen Research Unit, University College, Worcester, WR2 6AJ.

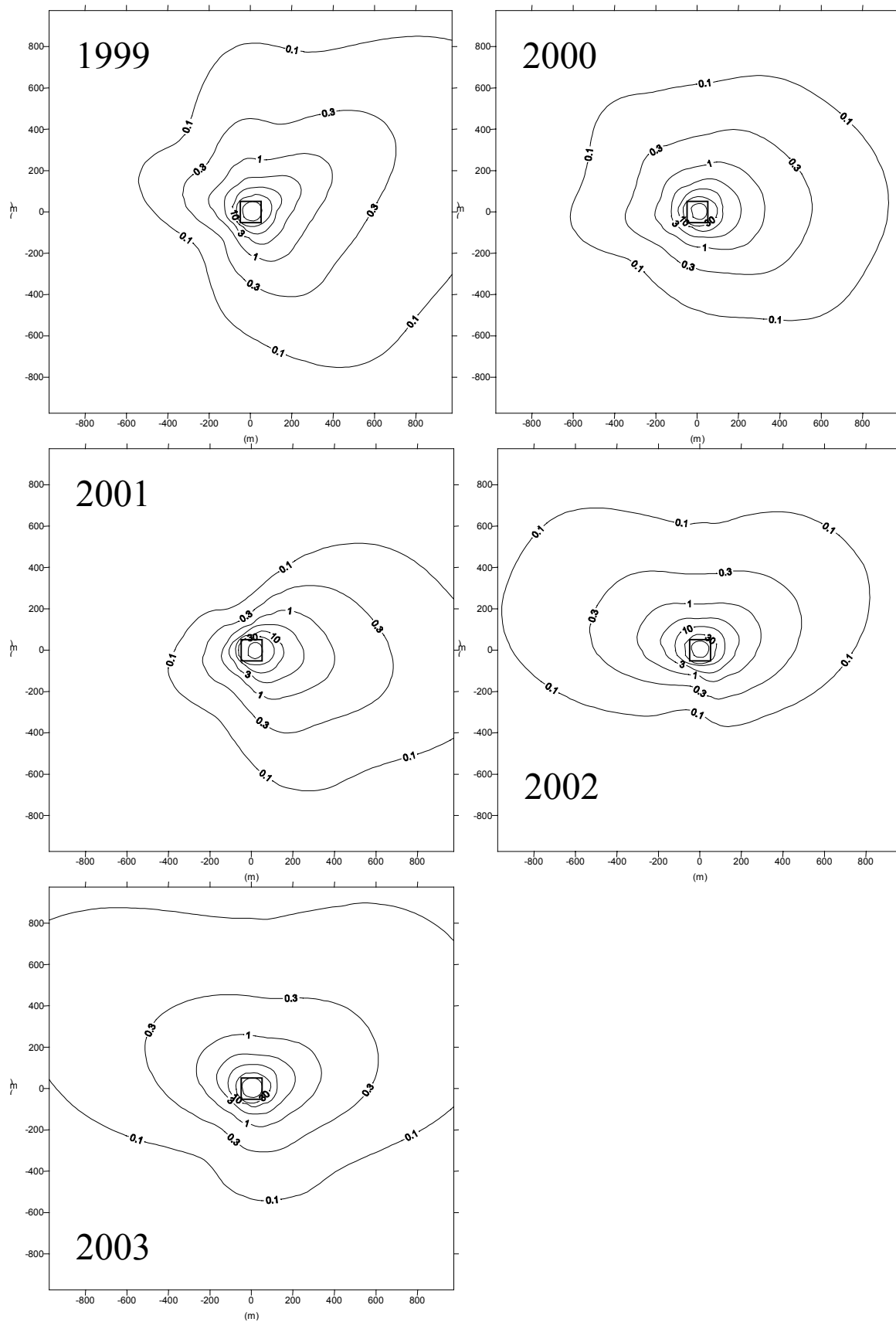
Walklate, P. J., J. C. R. Hunt, H. L. Higson & J. B. Sweet, 2004, A model of pollen mediated gene flow for oilseed rape, *Proc. R. Soc. Lond. B*, 271, 441-449.

Westcott, L. & D. Nelson, 2001, Canola pollination: an update. *Bee World*, 82, 115-129.

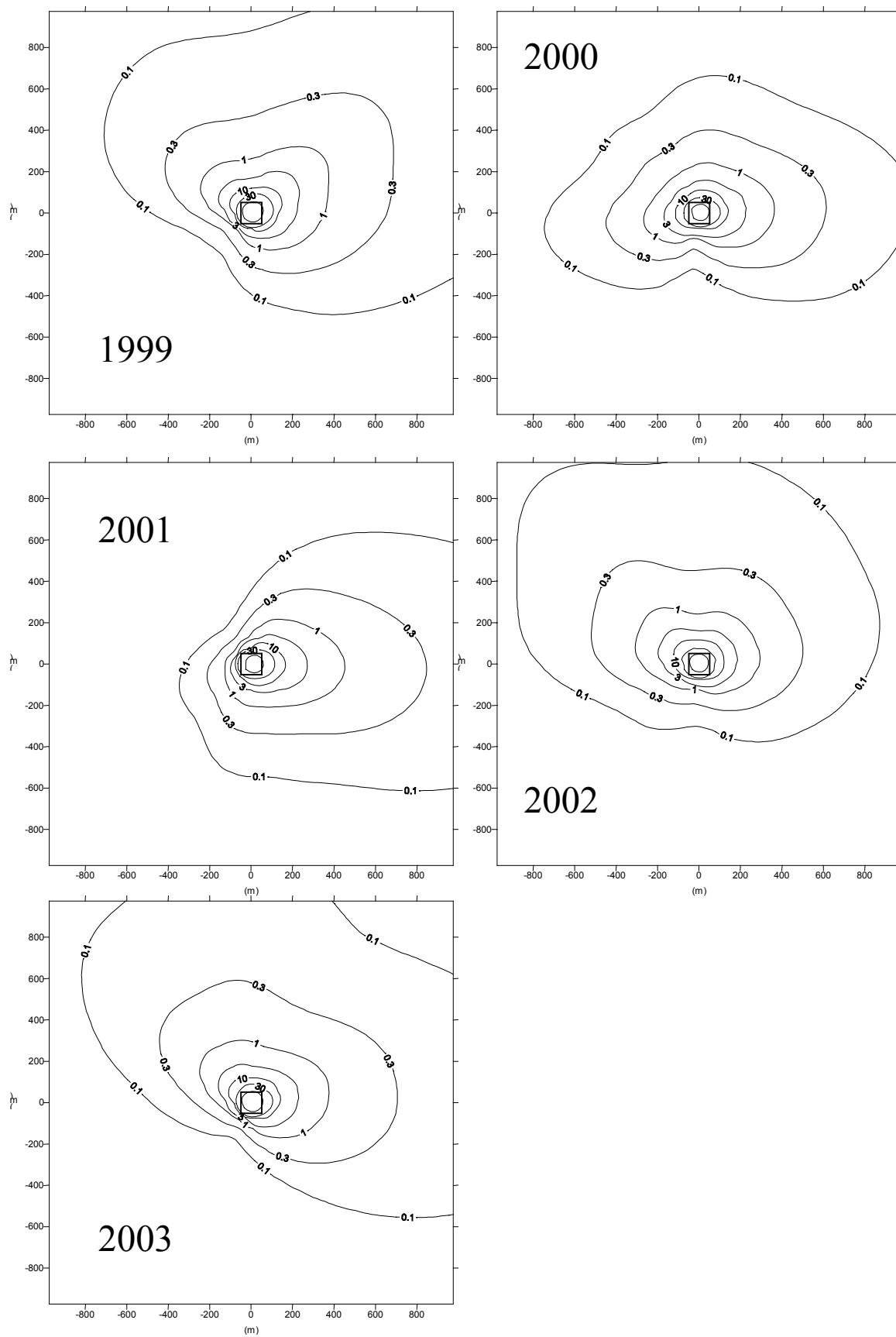
Williams, I. H., 1984, The concentration of air-borne rape pollen over a crop of oil-seed rape (*Brassica napus* L.), *J. Agric. Sci., Camb.*, 103, 353-357, 1984.

Appendiks 1

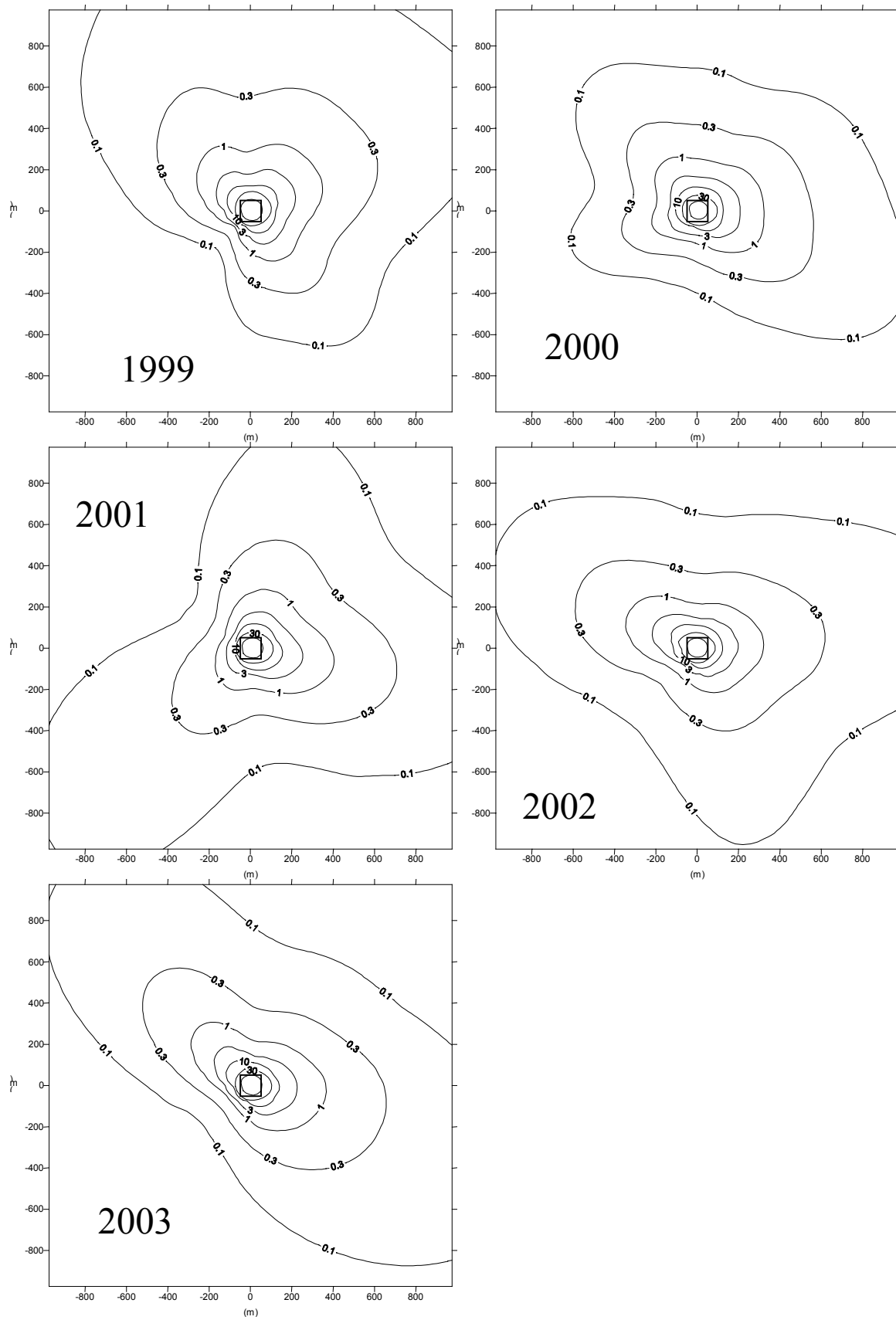
Den sæson-gennemsnitlige koncentration af rapspollen (pollen/m³, i 2 m's højde over blomsterhøjden) for de tre lokaliteter i Danmark er vist i det følgende. Modelkørslerne er for pollensæsonerne 1999 til 2003 og viser koncentrationsfordelingen omkring en 100 m × 100 m rapsmark i centrum af modelområdet på 2 km × 2 km. Resultaterne er også vist i figur 6, men er her gengivet i en større version for at gøre det muligt at se detaljerne i fordelingen tydeligere.



Figur 1. Fordelingen for Øster Højst.



Figur 2. Fordelingen for Tange.



Figur 2. Fordelingen for Lille Valby.