

**Frieder Hofmann, Steffi Ober, Lutz Janicke, Ulf Janicke,
Ulrike Kuhn, Ulrich Schlechtriemen, Christian Unselt
und Klaus-Peter Wittich**

Eintrag von Maispflanzenteilen in die Umwelt: Abschätzung der Umweltextposition für die Risikobewertung transgener Pflanzen

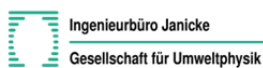


Eintrag von Maispflanzenteilen in die Umwelt: Abschätzung der Umweltexposition für die Risikobewertung transgener Pflanzen

**Endbericht des F+E Vorhabens
(FKZ 3509 89 0300)**

**Im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz unter Beteiligung
des Umweltministeriums des Landes Brandenburgs**

**Frieder Hofmann
Steffi Ober
Lutz Janicke
Ulf Janicke
Ulrike Kuhn
Ulrich Schlechtriemen
Christian Unselt
Klaus-Peter Wittich**



Bonn - Bad Godesberg 2013

Vorbemerkung

Die hier präsentierten Ergebnisse zum Eintrag von Maispflanzenteilen in die Umwelt basieren auf einem gemeinsamen Forschungsvorhaben des Bundes (BMU/BfN) mit dem Land Brandenburg (MUGV/LUGV) und auf einem interdisziplinären Projektteam. Während für das BfN die wissenschaftlichen Grundlagen für die Expositionsabschätzung der Umwelt mit transgenen Pflanzenmaterial im Vordergrund standen, wurden im Auftrag des Landes Brandenburgs gezielt Lösungsansätze und Handlungsempfehlungen für die naturschutzfachliche Praxis erarbeitet, um möglichen Schäden an Schutzgebieten beim Anbau von GVO vorbeugen zu können.

Mit einer Fachveranstaltung am 8.10.2012 in Berlin wurden die Ergebnisse des gesamten Forschungsvorhabens der Öffentlichkeit vorgestellt. Die Präsentationen der Fachveranstaltung wurden zusammen mit den aus dem Forschungsvorhaben abgeleiteten Handlungsempfehlungen in einem Tagungsband des Landesumweltamtes Brandenburg (Vögel et al. 2013)¹ publiziert.

Der hier vorliegende Bericht stellt die methodischen und fachlichen Grundlagen sowie die Ergebnisse der Messungen und Modellrechnungen zur Expositionsabschätzung detailliert in Form eines wissenschaftlichen Abschlussberichts dar.

In dem Forschungsvorhaben wurden drei Themenbereiche behandelt: 1) Validierung eines Ausbreitungsmodells zur Maispollenexposition anhand von Freilanddaten, 2) Erfassung der Variabilität der Maispollendeposition auf Pflanzenblättern und 3) Ermittlung der Exposition von Gewässerökosystemen.

Die komplexen Fragestellungen erforderten die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Wissenschaftlern verschiedener Disziplinen. Auftragnehmer des Vorhabens war das Institut für Ökologie und Naturschutz (IFÖN, jetzt IFAB, Institut für Agrarökologie). Die Projektkoordination lag in den Händen von Dr. Steffi Ober (NABU), für die wissenschaftliche Projektleitung war Frieder Hofmann (Ökologiebüro, TIEM Integrierte Umweltüberwachung GbR) zuständig.

Als Ausbreitungsmodell für Maispollen wurde ein weit verbreitetes, über eine VDI-Richtlinie standardisiertes Partikelmodell (LASAT) benutzt, das bereits Grundlage für das TA-Luft Modell AUSTAL2000 ist und sich bei zahlreichen Anwendungen im Umweltbereich bewährt hat. Die Arbeiten zur Ausbreitungsrechnung wurden vom Ing.-Büro Janicke (Dr. Ulf Janicke, Dr. Lutz Janicke) übernommen.

¹ http://www.lugv.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.3310.de/fb_133_agrogen.pdf

Hinsichtlich der meteorologischen Freilandmessungen wurde das Projekt vom Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung (ZAMF) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Braunschweig unterstützt. Dr. Klaus-Peter Wittich und Mitarbeiter stellten die erforderlichen Sensoren zur Verfügung und führten die Messungen durch, während vom DWD in Offenbach (Johann Hessel, Anja Ohrt) Grundlagendaten zur Ausbreitungsrechnung (AKTerm) eingebracht wurden. Weiterhin wurden die Arbeiten durch die örtliche Wetterwarte des DWD in Angermünde begleitet; Gundolf Sperling und Mitarbeiter stellten sowohl Logistik als auch weitere Daten zur Meteorologie bereit.

Die für die Validierung notwendigen Freilandmessungen zur Pollenimmission wurden von TIEM Integrierte Umweltüberwachung unter Leitung von Frieder Hofmann (Ökologiebüro, TIEM) und Mitwirkung von Ulrich Schlechtriemen (Sachverständigenbüro, TIEM) und Ulrike Kuhn (Büro Kuhn, TIEM) durchgeführt. Hierfür kamen standardisierte Verfahren zur Erfassung der räumlichen Verteilung der Pollendeposition (VDI-RL 4330 Bl. 3) zum Einsatz. Des weiteren wurden volumetrische Pollenmonitore für eine zeitlich hochaufgelöste Erfassung eingesetzt, die mit Unterstützung des Fraunhofer Instituts für Aerosolforschung (ITEM) in Hannover (Prof. Dr. Wolfgang Koch, Hubert Lödding) entwickelt wurden. Vergleichsmessungen wurden in Zusammenarbeit mit Pollenflug Nord (Dr. Reinhard Wachter) an der Referenzstelle für den ländlichen Raum in Ganderkesee durchgeführt und es wurden von dort stammende langjährige Zeitreihen zum Maispollenflug ausgewertet.

Die Arbeiten wurden begleitet und tatkräftig unterstützt durch die Mitarbeiter des Ministeriums für Umwelt, Gesundheit, Landwirtschaft und Verbraucherschutz in Brandenburg (MUGV). Die Betreuung erfolgte durch Rudolf Vögel, der neben anderem mit Anke Schrade von der Naturwacht die regelmäßige Bonitierung der Maisbestände vornahm. Die erforderlichen GIS-Daten zu Maisanbau und Naturraum wurden von Jörg Peil (LUGV) unter Mitwirkung von Berry Boessenkool, Uni Potsdam, erarbeitet. Die Freilandmessungen erfolgten vor allem auf Maisflächen des Landwirtes Johannes Niedeggen vom Gut Kerkow, der mit seinen Mitarbeitern engagiert die Studien unterstützte.

Die Arbeiten zur Deposition von Maispollen auf Pflanzenoberflächen wurden von TIEM unter Leitung von Frieder Hofmann in Kooperation mit Ulrich Schlechtriemen und Ulrike Kuhn sowie einer studentischen Projektgruppe des Instituts für Erd- und Umweltwissenschaften der Universität Potsdam (Prof. Dr. Boris Schröder, Berry Boessenkool, Susanne Haase, Elaine Niemann, Laura Schiebel, Robert Schütz) durchgeführt. Die erforderlichen umfangreichen Freilandarbeiten wurden über eine ergänzende Förderung durch die Walter-Hermesen-Stiftung ermöglicht.

Die Arbeiten zur Exposition von Nicht-Ziel-Organismen (NZO) in Gewässerökosystemen wurden von Christina Mante als Doktorantin der Freien Universität Berlin (Betreuer: PD Dr. Werner Kratz, FU Berlin und Prof. Dr. Klaus Tockner, IGB) unter Leitung von Frieder Hofmann im Jahr 2009 aufgenommen. Die Freilandmessungen wurden nach einem beruflichen Wechsel von Christina Mante von Frieder Hofmann unter Mitwirkung von Ulrike Kuhn und Ulrich Schlechtriemen in den Jahren 2010 und 2011 fortgeführt. Die amerikanischen Wissenschaftlerinnen Dr. Emma Rosi-Marshall und Prof. Dr. Jennifer Tank unterstützten die Arbeiten und gewährten in einer gemeinsamen Arbeitswoche im Dezember 2009 vor Ort Einblick in ihre Arbeitstechniken und Kenntnisse. Auf einer Fachveranstaltung des NABU in Berlin am 17.12.2009 (siehe unten) wurden aktuelle Ergebnisse der beiden Forscherinnen Dr. Rosi-Marshall und Prof. Dr. Tank aus ihren Arbeiten in den USA präsentiert.

Inhalte und Zwischenergebnisse des Forschungsvorhabens wurden auf verschiedenen Veranstaltungen, Tagungen und Symposien wie folgt vorgestellt und veröffentlicht:

- Fachkolloquium „GVO und Naturschutz“ des Landesumweltamtes Brandenburg am 28.4.2009 in Potsdam, Vortrag Dr. Mathias Otto „Eintrag des *Bt*-Proteins aus Maisflächen in die Umwelt“, veröffentlicht auf der Webseite des BfN.²
- Sitzung des VDI-Fachausschusses „Amphibien“ des Fachbeirates „Gentechnik / Monitoring der Umweltwirkungen von GVO“ am 27.7.2009 in Frankfurt, Vortrag Dr. Steffi Ober „Agrogentechnik & Biodiversität: GVO-Maisanbau - ökotoxikologische Risiken für aquatische Ökosysteme?“
- Veranstaltung des Landesumweltamtes Brandenburg am 7.8.2009 in Potsdam, Vortrag F. Hofmann „Agrogentechnik & Naturschutz: GVO-Maisanbau, ökotoxikologische Risikoabschätzung und Sicherung von Schutzgebieten.“
- Fachtagung des NABU am 17.12.2009 in Berlin zum Thema „Untersuchungen zum Eintrag und zu Risiken von *Bt*-Mais in Gewässerökosysteme“³, organisiert von Dr. Steffi Ober, Vortrag Frieder Hofmann „*Bt*-Corn: Exposure and Risk Management for Freshwater Ecosystems in Brandenburg – a new Research Project“.⁴

² http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/09-04-28_Exposition LUA_end_internet.pdf

³ <http://www.nabu.de/themen/gentechnik/biologischeVielfalt/11966.html>

⁴ <http://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/gentechnik/hintergrund/hofmann-bt-corn-exposure-nabu-tagung-20091217.pdf>

- Workshop am 18.12.2009 beim NABU in Berlin mit internationaler Beteiligung unter Leitung von Dr. Steffi Ober, auf der weitere konzeptionelle Aspekte zum Thema erörtert wurden.
- GLMS 2010 - International Conference on Implications of GM Crop Cultivation at Large Spatial Scales am 25.-26.3.2010 in Bremen, Vortrag PD Dr. Werner Kratz „*Bt*-Corn: Exposure and Risk Management for Nature Reserve Areas and Freshwater Ecosystems in Brandenburg“, Publikation in den Proceedings (Kratz et al. 2010).⁵
- IXth European Congress of Entomology (ECE) am 22.-27.8.2010 in Budapest, Ungarn, Vortrag Dr. Mathias Otto “A new method for in-situ measurement of *Bt*-maize pollen deposition on host-plant leaves“, Publikation in der Zeitschrift „Insects“ (Hofmann et al. 2011).⁶
- VDI/KRdL Fachbeiratssitzung des Fachbereiches II in Fulda am 12.10.2012, Vortrag Dr. Ulf Janicke „Modellrechnungen und Messungen zur Ausbreitung von Maispollen“.
- Internationale Fachtagung „Biomonitoring und Bioindikation – Einsatzbereiche und neue Entwicklungen“ der AGES / VDI / oÖ Akademie f. Umwelt u. Natur am 27.-28.1.2010 in Linz, Österreich, Vortrag Frieder Hofmann „GVO-Pollenmonitoring“.⁷
- Tagung des NABU am 21.6.2011 in Berlin, organisiert von Dr. Steffi Ober, zum Thema „*Bt*-Maisanbau in Brandenburg - Stand und Perspektiven“⁸, Vorträge Frieder Hofmann „Ausbreitung von Maispollen und Ernterückständen in der Umwelt: Ergebnisse aus Brandenburg“⁹ und Rudolf Vögel „Entwicklung des Maisanbaus in Brandenburg: Stand und Perspektiven“¹⁰.
- GLMS 2012 - International Conference on Implications of GM Crop Cultivation at Large Spatial Scales (GLMS) am 14.-15.6.2012 in Bremen, Vortrag Frieder Hofmann „Temporal and Spatial Variation of Maize Pollination in North Germany and

⁵ http://www.gmls.eu/beitraege/GLMS2_Kratz.pdf

⁶ <http://www.mdpi.com/2075-4450/2/1/12>

⁷ http://www.oekologiebuero.de/Pollenmonitoring_Vortrag_%20Linz_%2020100128-pdf.pdf

⁸ <http://www.nabu.de/themen/gentechnik/hintergrund/13785.html>

⁹ http://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/gentechnik/tagungsergebnisse/210611_hofmann-nabu_20110621_pdf.pdf

¹⁰ http://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/gentechnik/tagungsergebnisse/210611_vortrag_rudi_v_gel.pdf

its Relevance for GMO-Monitoring", Publikation in den Proceedings (Hofmann et al. 2013).¹¹

- 43. LAG-Sitzung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Gentechnik am 8.5.2012 in Mainz, Vortrag Frieder Hofmann „Konfliktbereich GVO-Anbau und Naturschutz: Ansätze zur Regelung über die Exposition“.
- 31. Deutscher Naturschutztag (DNT) vom 17.-21.9.2012 in Erfurt, Vortrag Frieder Hofmann „Spannungsfeld GVO-Anbau und Natura 2000: Fallbeispiele und Herausforderungen aus Sicht eines freiberuflichen Gutachters“ in der Fachveranstaltung zum Thema „Künftige Herausforderungen für das Netzwerk Natura 2000“, veröffentlicht auf der Website des DNT.¹²
- KTBL/vTI-Fachgespräch zur VDI-Richtlinie 4251/3 (VE) am 17.9.2012 in Braunschweig, Vortrag von Dr. Ulf Janicke „Anlagenbezogene Ausbreitungsmodellierung von Bioaerosolen“.
- Abschlusspräsentation des Forschungsvorhabens am 8.10.2012 in der Landesvertretung Saarland, Berlin. Vorträge von Dr. Mathias Otto, Dr. Steffi Ober, Frieder Hofmann, Dr. Ulf Janicke und Dr. Klaus-Peter Wittich. Die Vorträge mit Handlungsempfehlungen wurden in einem gesonderten Tagungsband vom LUGV Brandenburg publiziert (Vögel et al. 2013).¹³

Wir möchten allen, die das Vorhaben unterstützt haben, unseren herzlichen Dank aussprechen. Ergänzend sei an dieser Stelle namentlich gedankt: Den Landwirten Herrn Jänicke (Welsow), Herrn Knie (Kerkow) und Herrn Böhling (Schmargendorf); J. Kienast und G. Beyer mit ihrem Team vom NABU-Zentrum Blumenberger Mühle; M. Meyer, W. Müller, A. Meßling, R. Hennings, T. Vogt und H. Salinski vom ZAMF des DWD in Braunschweig; Fam. Winkler aus Kerkow; VERN e.V. in Greiffenberg.

Dr. Steffi Ober, NABU

Frieder Hofmann, TIEM Ökologiebüro

Christian Unseld, IFAB

Rudolf Vögel, LUGV

Dr. Mathias Otto, BfN

¹¹ http://www.gmls.eu/beitraege/19_Hofmann.pdf

¹² http://www.deutscher-naturschutz-tag.de/fileadmin/DNT/documents/DNT_2012/Vortraege2012/FV3_3_Hofmann_GVO_N2000.pdf

¹³ http://www.lugv.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.3310.de/fb_133_agrogen.pdf

Inhalt

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2. DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET	1
3. VALIDIERUNG DER AUSBREITUNGSMODELLIERUNG ZUR MAISPOLLENIMMISSION.....	4
3.1 Aufgabenstellung und stufige Vorgehensweise.....	4
3.2 Untersuchungsphase I: Anpassung der Modellierungsgrundlagen	5
3.2.1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise	5
3.2.2 Ausbreitungsrechnungen für Maispollen - Detailuntersuchungen und Parameterfestlegungen	5
3.2.2.1 Grenzschichtverlauf über dem Maisfeld	5
3.2.2.2 Konzentrationsverlauf über dem Maisfeld.....	10
3.2.2.3 Konzentrationsabfall mit zunehmender Entfernung vom Maisfeld.....	14
3.2.2.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen der Modellrechnungen zur Parameterfestlegung	17
3.2.3 Erfassung der räumlichen Verteilung der Maispollendeposition mittels Pollenmassenfilter PMF.....	18
3.2.4 Testrechnungen zur Festlegung des Probenahmedesigns für die Freilandmessungen in Angermünde	28
3.3 Untersuchungsphase II: Freilandmessungen im Jahr 2010	36
3.3.1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise	36
3.3.2 Untersuchungsdesign.....	37
3.3.3 Erfassung der zeitlichen Variation des Maispollenfluges.....	40
3.3.4 Erfassung der räumlichen Verteilung der Maispollendeposition	49
3.3.5 Meteorologische Messungen	56
3.3.6 Pollenschüttung und Meteorologie.....	63
3.3.7 Ausbreitungsrechnungen für Maispollen – Nachrechnung der Freilandmessungen 2010	68
3.3.7.1 Auswertung der meteorologischen Messungen	68
3.3.7.2 Ausbreitungsrechnungen	75
3.3.7.2.1 Konfiguration der Eingabedaten	75
3.3.7.2.2 Auswerteverfahren zu den zeitaufgelösten Messungen	76
3.3.7.2.3 Vergleich der 3-Stunden-Mittel.....	78
3.3.7.2.4 Vergleich der Tages-Mittel	83
3.3.7.2.5 Vergleich mit den PMF-Langzeitmessungen	85
3.3.7.2.6 Zweidimensionale Pollenverteilung	89
3.3.7.2.7 Zeitreihen der Pollenimmission.....	89

3.3.8	Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus der Untersuchungsphase II.....	91
3.4	Untersuchungsphase III: Ergänzende Freilandmessungen im Jahre 2011.....	92
3.4.1	Aufgabenstellung.....	92
3.4.2	Untersuchungsdesign.....	92
3.4.3	Messung der zeitlichen Variation des Maispollenfluges	97
3.4.4	Messung der räumlichen Variation der Maispollendeposition	112
3.4.5	Ausbreitungsrechnung	122
3.4.5.1	Standardfestlegungen	122
3.4.5.2	Abschätzung der Emissionsraten	123
3.4.5.3	Mathematische Formulierung.....	125
3.4.5.4	Ergebnisse.....	127
3.4.5.4.1	PMO-Messung versus PMF-Messung.....	127
3.4.5.4.2	Modellrechnung versus PMF-Messung.....	128
3.4.5.5	Schlussfolgerungen	133
4.	VARIATION DER MAISPOLLENDEPOSITION AUF BLATTOBERFLÄCHEN.....	134
4.1	Einleitung und Aufgabenstellung	134
4.2	Vorgehensweise.....	136
4.2.1	Erfassung der Blattdeposition <i>in situ</i> mit mobilem USB-Mikroskop.....	136
4.2.2	Entwicklung eines strukturierten Probenahme-Designs.....	137
4.2.2.1	Zufallsbeprobung im Raster.....	138
4.2.2.2	Cluster.....	138
4.2.2.3	Transsekte.....	139
4.2.2.4	Strukturiertes Design.....	139
4.2.3	Auswahl geeigneter Pflanzenarten und Standorte	139
4.2.4	Erfassung der Maispollendeposition im Freiland	144
4.3	Ergebnisse.....	145
4.3.1	Verteilung der Messwerte zur Maispollendeposition auf den Pflanzenblättern.....	145
4.3.2	Maispollendeposition auf Blättern von Mais.....	148
4.3.2.1	Variation der Pollendeposition.....	148
4.3.2.2	Zeitlicher Verlauf der Maispollendeposition auf Maisblättern.....	153
4.3.3	Maispollendeposition auf Blättern der Brennnessel	156
4.3.3.1	Variation der Pollendeposition.....	156
4.3.3.2	Zeitlicher Verlauf der Maispollendeposition auf Blättern der Brennnessel	159
4.3.4	Maispollendeposition auf Gänsefuß-Blättern.....	161
4.3.4.1	Variation der Pollendeposition.....	161
4.3.4.2	Zeitlicher Verlauf der Maispollendeposition auf Gänsefuß-Blättern.....	164
4.3.5	Maispollendeposition auf Blättern von Ampfer und Brombeere	165

4.3.5.1	Variation der Pollendeposition.....	165
4.3.5.2	Zeitlicher Verlauf der Maispollendeposition auf Blättern von Ampfer und Brombeere	169
4.3.6	Vergleich der Maispollendeposition auf verschiedenen Pflanzenarten: Artspezifische Äquivalenzfaktoren	171
4.4	Zusammenfassende Bewertung der Blattdepositionsmessungen	173
5.	EXPOSITION VON GEWÄSSERÖKOSYSTEMEN DURCH DEN MAISANBAU MIT POLLEN UND STREU.....	176
5.1	Anlass und Zielstellung	176
5.2	Exposition von Gewässerökosystemen	177
5.3	Aufgabenstellungen.....	180
5.4	Das Untersuchungsgebiet.....	181
5.5	Quantifizierung des aerogenen Polleneintrages in Gewässer	183
5.6	Charakterisierung und Quantifizierung von Streueinträgen aus der Maisernte (Häcksel) im Versuchsjahr 2009	185
5.6.1	Erfassung des Streu-Eintrages im Nahbereich der Erntemaschine	185
5.6.2	Ermittlung der Trockensubstanz von erntefrischer Maisstreu (Häckselgut).....	187
5.6.3	Differenzierung von Grob- und Feinfraktionen der Maisstreu	187
5.7	Quantifizierung des Maisstreueintrages in Relation zur Entfernung vom Maisfeld in 2009	191
5.7.1	Erfassung des Streueintrages mittels Streufall-Netzen	193
5.7.2	Erfassung des Streueintrages per Metallwannen-Streufalle	195
5.7.3	Erfassung von Feinstreupartikeln mittels Sporewatch	197
5.8	Quantifizierung der Streueinträge in Relation zur Entfernung im Jahr 2010 .	202
5.9	Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse zum Pollen- und Streufalleintrag in Gewässerökosysteme	213
6.	ZUSAMMENFASSUNG.....	219
6.1	Validierung der Ausbreitungsmodellierung für Maispollen anhand von Freilanddaten	219
6.2	Variabilität der spezifischen Maispollendeposition auf Futterpflanzen von Schmetterlingen	223
6.3	Exposition von Gewässerökosystemen durch Maispollen und -streu.....	225

7. SUMMARY	229
7.1 Validation of maize pollen dispersal modeling by 3-years field measurements.....	229
7.2 Spatial distribution of maize pollen deposition on host plants of butterflies	232
7.3 Exposure to freshwater ecosystems by pollen and harvest by-products of maize cultivation	234
8. VERZEICHNISSE.....	237
8.1 Literaturverzeichnis	237
8.2 Abbildungsverzeichnis.....	243
8.3 Tabellenverzeichnis.....	251
8.4 Abkürzungsverzeichnis	252

1. Einleitung und Zielsetzung

In Deutschland war in den Jahren 2006 bis 2009 MON 810, ein gentechnisch veränderter Mais, zugelassen. MON 810 besitzt ein zusätzliches Toxin des *Bacillus thuringiensis* (*Bt*), das ihn resistent gegen seinen Hauptschädling, den Maiszünsler, macht. Seit 2009 ist der Anbau von *Bt*-Mais in Deutschland verboten. Das Verbot begründet das zuständige Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz mit ungeklärten Risiken für die Umwelt. Nun stehen jedoch in der EU mehrere neue gentechnisch veränderte (gv) Maissorten mit verschiedenen Events¹⁴, die ebenfalls mit *Bt*-Toxinen ausgestattet sind, zur Zulassung an, so dass für die Zukunft mit vermehrtem gv-Maisanbau gerechnet werden muss.

Die vorliegenden Untersuchungen zur Risikobewertung konzentrieren sich daher auf Mais. Gv-Pflanzen unterliegen bei der Zulassung in der EU prinzipiell einer Umweltrisikoprüfung. Tatsächlich jedoch steht diese im Fall von gv-Mais aktuell in der Kritik der Mitgliedsstaaten, da die Datenlage unzureichend ist. Um eine wissenschaftlich abgesicherte Risikoabschätzung vorzunehmen, fehlen grundlegende Untersuchungen zur Exposition von Pollen und Ernterückständen von Mais.

In diesem Vorhaben wurden drei Themenbereiche behandelt:

1. Validierung der Ausbreitungs-Modellierung für Maispollen anhand von Freiland-Daten: Hierzu werden die Meteorologie, der zeitliche Verlauf der Maispollenkonzentration sowie die räumliche Verteilung der Deposition auf standardisierte Weise erhoben.
2. Erfassung der Variabilität der spezifischen Maispollendeposition auf Futterpflanzen von Schmetterlingen: Hierzu wird eine neue Methodik eingesetzt, die eine direkte Erhebung im Freiland erlaubt.
3. Messung der Exposition von Gewässerökosystemen durch Maispollen und -streu.

ad 1) Validierung der Ausbreitungs-Modellierung für Maispollen

Ziel der vorliegenden Arbeiten ist es, ein Ausbreitungsmodell zur Maispollenexposition anhand von Freilanddaten zu validieren (aufbauend auf bisherigen Arbeiten für die Vollzugspraxis) und offenen Fragen zur Exposition in Gewässerökosystemen nachzugehen.

Es ist gesichert, dass *Bt*-Toxine in Pollen mit dem Wind verfrachtet und *Bt*-haltige Pflanzenteile oder *Bt*-Proteine aus den Anbauflächen in die umgebenden Ökosysteme eingetragen werden. Für die Vollzugspraxis dürften Ausbreitungsmodelle zur Maispollenexposition

¹⁴ Gentechnische Veränderung.

analog zu anderen Umweltbereichen eine wichtige Rolle spielen. Bislang fehlen jedoch Grundlagendaten zur Exposition von Ökosystemen in der Nähe von Anbauflächen. Das Bundesamt für Naturschutz (BfN) gab zwischen 2006 und 2008 zwei Gutachten in Auftrag, um bereits vorhandene Daten zur Maispollendeposition auswerten zu lassen (HOFMANN 2007) und die Anwendung eines bestehenden Ausbreitungsmodells zu prüfen (HOFMANN ET AL. 2009a). Weitere Ergebnisse zur Maispollen-Exposition lagen aus aktuellen Untersuchungen vor, die im Auftrag des Landesumweltamtes und des Umweltministeriums in Brandenburg für ein Schutzgebiet in Brandenburg mit umgebenden *Bt*-Mais durchgeführt worden waren (OBER ET AL. 2008; HOFMANN ET AL. 2008; HOFMANN ET AL. 2009b; HOFMANN ET AL. 2010).

In dem Gutachten von HOFMANN ET AL. (2009a) wurde die Ausbreitung von Maispollen in der Umgebung eines Maisfeldes mit Hilfe von Ausbreitungsrechnungen unter Worst-Case-Bedingungen untersucht. Es konnte anhand vorliegender Messdaten und der Literatur gezeigt werden, dass Ausbreitungsrechnungen mit einem Lagrangeschen Partikelmodell nach Richtlinie VDI 3945-3 (2000) prinzipiell in der Lage sind, die Ausbreitungsvorgänge von Maispollen zu beschreiben sowie entsprechende Messbefunde zu erbringen. Allerdings ergaben sich sowohl bei HOFMANN ET AL. (2009a) als auch bei anderen Autoren Widersprüche zwischen Modell und Freilandmessungen hinsichtlich des Gradienten der Maispollenausbreitung, der in Freilandmessungen deutlich flacher verläuft als nach Modell vorhergesagt, was faktisch zu höheren Werten im Entfernungsbereich über 100 m führt (long extending tail, z.B. AYLOR ET AL. 2003). Ähnliche Befunde wurden auch von anderen berichtet, u.a. von LOOS ET AL. (2003), AYLOR & BOEHM (2006), BRUNET ET AL. (2003), ARRITT ET AL. (2007), BOEHM ET AL. (2008).

In HOFMANN ET AL. (2009a) wurden verschiedene mögliche Gründe dafür angegeben: Einerseits sind große Partikel wie Maispollen möglicherweise hinsichtlich der Grenzschicht-Vorgänge ungenügend parametrisiert, andererseits fehlen eventuell Kenntnisse zum exakten zeitlichen Verlauf der Pollenschüttung und zu meteorologischen Vorgängen, wie beispielsweise den thermischen Aufwinden über Maisfeldern während der Pollenschütte. Zudem wurden bislang die Überlagerungseffekte entfernter Maisfelder nicht ausreichend berücksichtigt.

Aufgabe der hier vorliegenden Untersuchungen war es, diesen Fragen nachzugehen und die Annahmen zur Ausbreitung von Maispollen anhand von Freilanddaten zu überprüfen. Für die im Ergebnis erfolgreiche Validierung der Ausbreitungsmodellierung wurden sukzessive über mehrere Phasen genaue meteorologische Daten, die Verteilung der Maisfelder in einem größeren Untersuchungsraum, der zeitliche Verlauf der Maispollenschütte und die räumliche Verteilung der Maispollendeposition herangezogen und ausgewertet.

ad 2) Erfassung der Variabilität der spezifischen Maispollendeposition auf Futterpflanzen von Schmetterlingen

Für die Risikobewertung von *Bt*-Mais im Hinblick auf Nichtzielorganismen wären sichere Aussagen zur spezifischen Deposition von Maispollen auf den Pflanzenoberflächen der Futterpflanzen von NZO wie Schmetterlingen erforderlich, allerdings konnten bislang auf Grund mangelnder Datenlage hierzu keine ausreichenden Angaben gemacht werden. Aufgabe in diesem Vorhaben war es, über ein neues Verfahren, das erstmals die Direkterfassung im Freiland erlaubt, grundlegende Daten zur Variabilität der spezifischen Maispollendeposition auf Futterpflanzen von Schmetterlingen zu erheben.

ad 3) Messung der Exposition von Gewässerökosystemen durch Maispollen und -streu

In der Risikobewertung von *Bt*-Mais wurde eine Exposition und Wirkung von Nicht-Ziel-Organismen (NZO) in Gewässerökosystemen lange Zeit nicht beachtet bzw. negiert¹⁵. Neuere Untersuchungen¹⁶ wiesen jedoch nach, dass sowohl Köcherfliegenlarven als auch Daphnien auf *Bt*-Toxin empfindlich reagieren und dass transgene DNA von *Bt*-MON810 in Muscheln angereichert und vervielfältigt wird. Zur Exposition und Wirkung auf einzelne Wasserorganismen und aquatische Systeme lagen bisher für Deutschland keine Daten vor. Dem geltenden Vorsorgeprinzip folgend bestand daher Handlungsbedarf, wie der Schutz von besonders sensiblen Lebensgemeinschaften und Arten im Gewässerbereich zu gewährleisten ist. Aufgabe dieses Vorhabens war es, zunächst geeignete Methoden und Handlungsoptionen für den Bereich der Gewässerökosysteme zu evaluieren und erste Freilandversuche in Brandenburg zur Quantifizierung des Eintrages von Pollen und Streu in Gewässer vorzunehmen.

¹⁵ Monitoring-Plan von Monsanto an BVL 2007 sowie darin befindliches Auftragsgutachten von K. Schmidt.

¹⁶ 2007 und 2008 veröffentlichte Publikationen: ROSI-MARSHALL ET AL. 2007, BØHN ET AL. 2008, DOUVILLE ET AL. 2007.

2. Das Untersuchungsgebiet

Die Untersuchungen wurden in Brandenburg in der Umgebung von Kerkow bei Angermünde durchgeführt (siehe Abb. 1 und Abb. 2.)

Die Maisflächen für die Versuche stellte das Gut Kerkow¹⁷ bereit. Gut Kerkow verfügt über 710 ha Gesamtfläche, auf 340 ha davon wurde im Jahr 2010 Mais angebaut. Er dient der Fütterung von Milchkühen und wird zur Energiegewinnung in der Biogasanlage genutzt. Der Hof wird seit 2011 zum Biolandbetrieb umgestellt. Das Gelände ist leicht hügelig und liegt in einer typischen Brandenburger Endmoränenlandschaft. Angrenzend an Gut Kerkow befindet sich das Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin. Des Weiteren konnten Flächen benachbarter Landwirte für die Untersuchungen genutzt werden.

Der gewählte Untersuchungsraum ist Teil der nordöstlichen Brandenburger Agrarlandschaft. Er grenzt westlich an die bewaldeten Kernzonen des Biosphärenreservats Schorfheide-Chorin mit dem Naturschutzgebiet (NSG) Blumberger Teiche, nördlich und östlich an die Agrarlandschaft der Uckermark. Die Landschaftsformen umfassen zum einen die kupfigen Endmoränen-Bereiche der letzten Vereisung (Pommersches Stadium der Weichselkaltzeit) bis zu flachwellig ausgedehnten Grundmoränen-Zungen. Bestimmend sind stark wechselnde Bodenarten von Braunerden, über Fahlerden bis hin zu hydromorphen Böden unterschiedlicher Güte mit sandig-lehmigen bis lehmigen Substraten. Auf den erodierten Kuppen finden sich Trockenrasen mit hohem Naturschutzwert. Die abflusslosen Senken sind durch Moore und Kleingewässer, sogenannte Sölle, unterschiedlicher Größe und Qualität geprägt. Abgesehen von dem durchfließenden Bach, der Welse, mit gering ausgebildeter Talaue, ist das Gebiet typisch jungglazial oberflächlich abflusslos, allerdings durch Grabenmelioration in Teilen stark verändert.

Das Gebiet wird überwiegend ackerbaulich für die Marktfrucht-Produktion genutzt. Es ist charakterisiert durch unterschiedliche Betriebsformen und Betriebstypen bei relativ geringer Tierhaltung und einem überdurchschnittlich hohen Anteil ökologischer Wirtschaftsweise. Das Klima ist bereits leicht kontinental geprägt mit im Durchschnitt wenig mehr als 500 mm Jahresniederschlag (DWD-Station Angermünde). Insgesamt kann das Untersuchungsgebiet naturräumlich und auch agrarisch als typisch für die jungglazial geprägten Agrarlandschaften in Brandenburg betrachtet werden. Mit der aktuellen Nutzungsstruktur und der naturräumlichen Ausstattung ist es vergleichbar mit den vorherrschenden Agrarstandorten Nordostdeutschlands.

¹⁷ <http://www.gut-kerkow.de/>

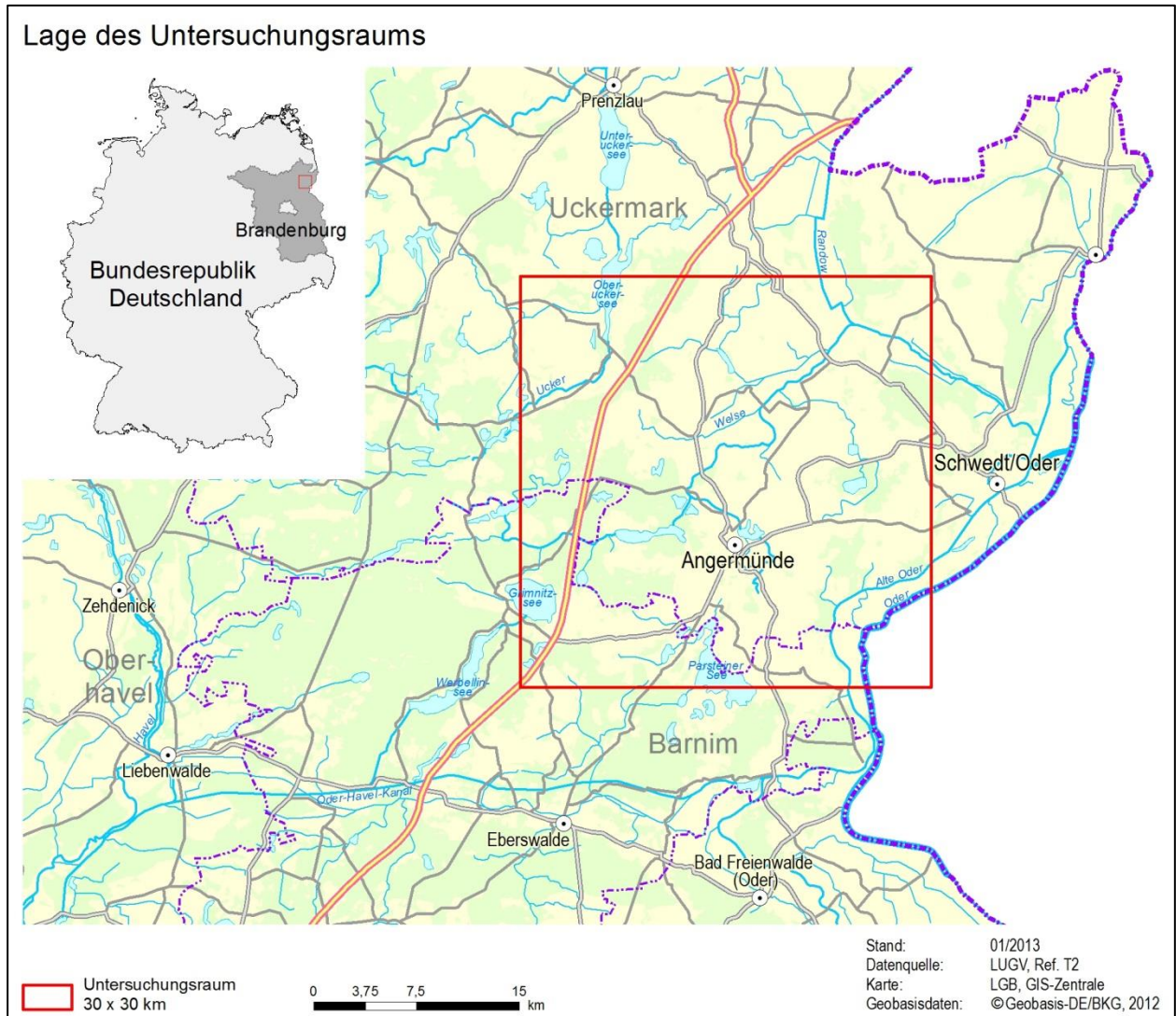


Abb. 1: Lage des Untersuchungsraumes bei Angermünde, Uckermark, Brandenburg (Grafik: Lehmann/Peil/Vögel, LUGV).

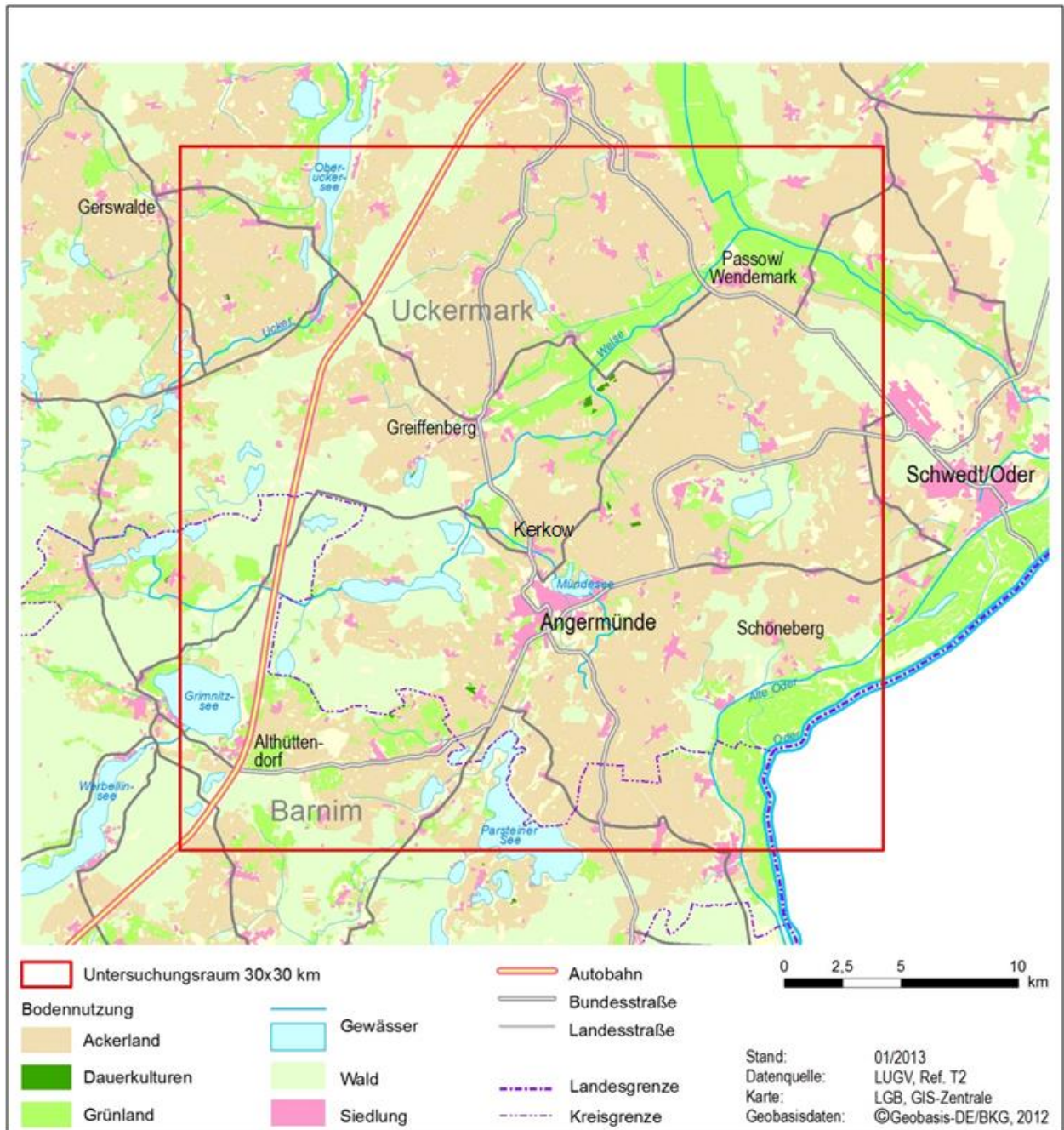


Abb. 2: Überblick über die Landnutzung im Untersuchungsraum. Die Hauptversuchsflächen befinden sich bei Kerkow im Zentrum (Grafik: Lehmann/Peil/Vögel, LUGV).

3. Validierung der Ausbreitungsmodellierung zur Maispollenimmission

3.1 Aufgabenstellung und stufige Vorgehensweise

Die Aufgabenstellung bestand in der Validierung eines Lagrangeschen Ausbreitungsmodells nach Richtlinie VDI 3945-3 (2000), wobei soweit wie möglich die im Anhang 3 der TA Luft (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) festgelegten Standardisierungen übernommen werden sollten¹⁸. Hierzu wurden Freilandmessungen durchgeführt und Worst-Case-Bedingungen berücksichtigt. Die Untersuchungen erstreckten sich über mehrere Phasen, verteilt über die Jahre 2009 bis 2012, in denen jeweils abwechselnd und aufeinander aufbauend Modellrechnungen und Freilandmessungen vorgenommen wurden.

Die erste Phase im Jahr 2009 diente der Prüfung und Anpassung der Modell-Grundlagen. Hierzu wurden Literaturdaten ausgewertet, Ausbreitungs-Szenarien durchgerechnet sowie Freilandmessungen während der Maispollenblüte im Sommer 2009 durchgeführt. Die Ergebnisse aus der Modellierung wurden mit den Ergebnissen der Freilandmessungen verglichen und auf der Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse erfolgte die Planung von Phase 2.

In der zweiten Phase im Jahr 2010 wurde das Ausbreitungsmodell mittels detaillierter Freilandmessungen im Hinblick auf den zeitlichen Verlauf von Maispollenschütte und -immission sowie auf die räumliche Verteilung der Maispollenimmission überprüft.

In der dritten Phase im Jahr 2011 wurden ergänzende Freilandmessungen im Hinblick auf die Variabilität der Maispollenschütte und deren Berücksichtigung im Ausbreitungsmodell durchgeführt. Das Ausbreitungsmodell wurde sodann erfolgreich validiert.

In der Abschlussphase 2012 wurde das Modell für eine naturschutzfachliche Bewertung und Regelung von gv-Maisanbau zu Rate gezogen.

Im Folgenden werden die Arbeiten und Ergebnisse der drei ersten Phasen zur Validierung vorgestellt.

¹⁸ siehe <http://www.AUSTAL2000.de> und Janicke & Janicke (2003).

3.2 Untersuchungsphase I: Anpassung der Modellierungsgrundlagen

3.2.1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

Die Arbeiten der ersten Phase dienten der Anpassung der Modellierungs-Grundlagen sowie der Festlegung des Probenahme-Designs für die ersten Freilandmessungen. Im ersten Schritt wurden Ausbreitungs-Szenarien auf der Datenbasis der vorhergehenden Untersuchungen und der Literatur durchgerechnet sowie die Detailuntersuchungen zur Parameter-Festlegung vorgenommen, die in Kap. 3.2.2 beschrieben sind.

Die Aufgabenstellung für die anschließenden Freilandmessungen wurde präzisiert und die Freilandbedingungen wurden vor Ort geprüft. Im Hinblick auf Modellierung und Meteorologie ergab sich aus den Modellszenarien und Detailuntersuchungen die Frage, inwieweit thermische Aufwinde einen wesentlichen Einfluß auf die Pollenausbreitung haben und wie groß der Einfluß weiter entfernter Maisfelder ist.

Nach eingehender Ortserkundung wurde ein geeignetes Maisfeld für die Freilandmessungen im Jahr 2009 ausgewählt, das am besten die topografischen, meteorologischen sowie ausbreitungstechnischen Aspekte abdeckte.¹⁹ Im Jahr 2009 wurde die räumliche Verteilung der Maispollendeposition (nach Vorgaben der Ausbreitungs-Modellierung über Freilandmessungen mit dem standardisierten Verfahren des Pollenmassenfilters PMF (VDI 4330-3 2007) erfasst.

3.2.2 Ausbreitungsrechnungen für Maispollen - Detailuntersuchungen und Parameterfestlegungen

Die atmosphärischen Grenzschichtprofile und der Abfall der Pollenkonzentration über einem Maisfeld sowie der Abfall der Pollenkonzentration mit zunehmender Entfernung von einem Maisfeld wurden mit theoretischen Methoden untersucht und die Ergebnisse mit Messungen verglichen. Als Ergebnis wurden Parameter festgelegt, die es erlauben, die Ausbreitung von Maispollen mit dem Lagrangeschen Partikelmodell LASAT (Lagrangesches Partikelmodell gemäß Richtlinie VDI 3945-3) realitätsnah zu beschreiben.

3.2.2.1 Grenzschichtverlauf über dem Maisfeld

Für das Transportverhalten der Maispollen ist die Struktur der atmosphärischen Grenzschicht unmittelbar über dem Maisfeld von Bedeutung. Sie bestimmt, in welchem Maße Maispollen entgegen dem gravitativen Absinken vertikal eingemischt werden und so der Ablagerung auf den Maispflanzen entkommen. Als Ergebnis stellt sich über dem Maisfeld ein charakteristisches Vertikalprofil der Pollenkonzentration ein.

¹⁹ Dies erfolgte in Zusammenarbeit von IFÖN, TIEM, Ökologiebüro, Büro Kuhn, Ing.-Büro Janicke sowie Beratung durch die Meteorologen (DWD) und dem Landwirt.

SHAW ET AL. (1983) haben umfangreiche Messungen zur Turbulenzstruktur über einem Maisfeld durchgeführt. Das Maisfeld hatte eine Höhe von $h = 2,25$ m. In und unmittelbar über dem Feld wurde das Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit u , der Schubspannungs-Geschwindigkeit u_* und der vertikalen Geschwindigkeits-Fluktuationen σ_w vermessen. Aus den Profilen der Windgeschwindigkeit und der Schubspannungs-Geschwindigkeit kann zusätzlich das Profil des vertikalen Diffusions-Koeffizienten K abgeschätzt werden. Diese Profile wurden mit den theoretischen Profilen, die das Standard-Grenzschichtmodell von LASAT für die Ausbreitungsrechnung verwendet, verglichen. Aus dem Vergleich wurden Parameterwerte, mit denen sich eine möglichst gute Übereinstimmung von gemessenen und theoretischen Profilen ergibt, festgelegt und auf Plausibilität geprüft.²⁰

Abb. 3 zeigt die gemessenen Profile von Windgeschwindigkeit $u(z)$ (blau), Schubspannungs-Geschwindigkeit $u_*(z)$ (hellblau), vertikalen Geschwindigkeits-Fluktuationen $\sigma_w(z)$ (grün) und abgeleitetem Diffusions-Koeffizienten $K(z)$ (lila).

²⁰ Es wurde das Standard-Grenzschichtmodell von LASAT verwendet (Version 2.1), siehe JANICKE & JANICKE (2000).

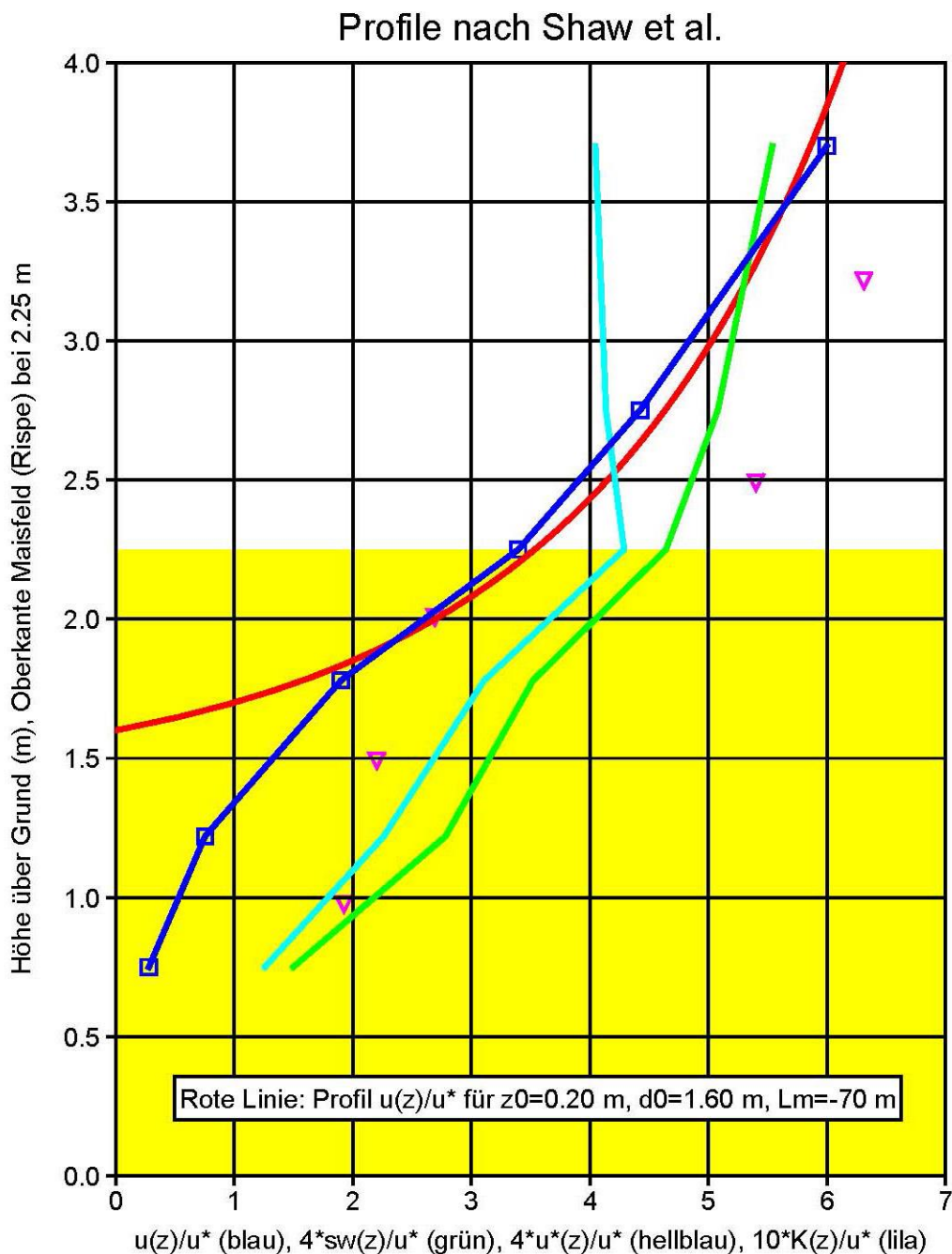


Abb. 3: Gemessene Vertikalprofile in und über einem Maisfeld nach SHAW ET AL. (1983)

(Grafik: Janicke)

Blau: Windgeschwindigkeit $u(z)/u_{*,\infty}$

Hellblau: Schubspannungs-Geschwindigkeit $4 \cdot u^*(z)/u_{*,\infty}$

Grün: Vertikale Geschwindigkeits-Fluktuationen $4 \cdot \sigma_w(z)/u_{*,\infty}$

Lila: Vertikaler Diffusionskoeffizient $10 \cdot K_w(z)/u_{*,\infty}$

Die rote Linie zeigt das theoretische Geschwindigkeits-Profil.

Der gelbe Bereich gibt die Vertikalausdehnung des Maisfeldes wieder.

Die Werte sind mit der Schubspannungs-Geschwindigkeit in größerer Höhe über dem Maisfeld $u_{*,\infty}$ skaliert. Für eine kompaktere Darstellung wurden die Profile $\sigma_w(z)/u_{*,\infty}$ und $u^*(z)/u_{*,\infty}$ mit dem Faktor 4 und das Profil $K(z)/u_{*,\infty}$ mit dem Faktor 10 multipliziert. Die

Ordinate ist die Höhe über dem Erdboden, die vertikale Ausdehnung des Maisfeldes ist durch den gelben Bereich gekennzeichnet.

Das ungestörte Windprofil reicht knapp einen halben Meter in das Maisfeld und nimmt dann in charakteristischer Weise bis zum Erdboden hin ab. Zum Vergleich ist das theoretische Windprofil als rote Linie mit eingezeichnet, das sich für den Vertikalversatz $d_0 = 1,6$ m, die Rauigkeitslänge (charakteristisches Maß für die Oberflächen-Beschaffenheit) $z_0 = 0,2$ m und die Monin-Obukhov-Länge (Maß für die Schichtungsstabilität der Atmosphäre) $L_M = -70$ m ergibt. Die Rauigkeitslänge hat einen für landwirtschaftliche Felder typischen Wert. Der Wert der Monin-Obukhov-Länge entspricht einer indifferenten bis leicht labilen Schichtung. Mit diesen Werten wird das gemessene Windprofil im Bereich der Maisfeldoberkante – also dort, wo Emission und Anfangstransport der Maispollen stattfinden – recht gut wiedergegeben.

Aus den Messungen und Vergleichen können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Das gemessene Windprofil wird mit dem theoretischen Standardansatz und typischen Parameterwerten zufriedenstellend wiedergegeben. Die Verdrängungshöhe beträgt etwa 70 % der Maisfeldhöhe.
In einer Ausbreitungsrechnung muss diese Verdrängungshöhe nicht explizit in den Profilen berücksichtigt werden. Vielmehr wird die Quellhöhe um diese Höhe nach unten versetzt. Hiermit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass das Windfeld über das Maisfeld strömt, also an der windzugewandten Seite des Feldes angehoben und an der windabgewandten Seite wieder abgesenkt wird.²¹
- Im Bereich der Maisfeldoberkante hat der skalierte vertikale Diffusionskoeffizient $K(z)/u_{*,\infty}$ einen Wert zwischen 0,4 m und 0,5 m. Das ist ein Wertebereich, den man für diese Situation auch mit den theoretischen Standardansätzen erhält, wenn man den Minimalwert des Diffusions-Koeffizienten geringfügig erhöht.²²
- Die skalierten vertikalen Geschwindigkeits-Fluktuationen $\sigma_w(z)/u_{*,\infty}$ nähern sich über dem Maisfeld schnell dem üblichen Standardwert $f_w = 1,3$ an (siehe z.B. JANICKE & JANICKE 2000), an der Maisfeldoberkante ist der Wert etwas kleiner.

²¹ Dieses Vorgehen wurde bereits in den Vorstudien (HOFMANN ET AL. 2009a) gewählt. Kleinräumige Effekte an den Rändern des Maisfeldes können bei den später betrachteten größeren Entfernungen vom Maisfeld vernachlässigt werden.

²² In der Grenzschichtparametrisierung ist der Minimalwert der Lagrangeschen Korrelationszeit $T = K / \sigma_w$ gleich $\beta z_0 / u_{*,\infty}$, wobei β von dem Standardwert 1 auf einen Wert von etwa 2 erhöht werden muß.

In einer neueren Untersuchung wurden von VAN HOUT ET AL. (2008) umfangreiche Messungen zur Meteorologie über einem Maisfeld durchgeführt. Das Maisfeld hatte eine Ausdehnung von etwa 300 m mal 700 m und eine Höhe von $h = 3$ m.

Abb. 4 zeigt für drei Messperioden den zeitlichen Verlauf der Windgeschwindigkeit in der Höhe 6 m über dem Maisfeld und der vertikalen Geschwindigkeits-Fluktuationen unmittelbar über dem Maisfeld sowie das Verhältnis der beiden Größen multipliziert mit 10, also $10\sigma_w(h)/u(3h)$.

Auffallend ist, dass dieses Verhältnis über lange Zeiträume hinweg relativ konstant in einem Wertebereich zwischen etwa 1,2 und 1,5 bleibt. Das deutet darauf hin, dass die Atmosphäre in diesem Höhenbereich unabhängig von der Tageszeit durch eine indifferent bis leicht labile Schichtung charakterisiert ist, denn bei stark labiler Schichtung müsste das Verhältnis deutlich größere Werte und damit zeitlich größere Schwankungen aufweisen. Zum Vergleich zeigt Tab. 1 das Verhältnis, das sich aus den theoretischen Profilansätzen für verschiedene Schichtungsstabilitäten ergibt ($z_0 = 0,2$ m, $\beta = 2$).

Tab. 1: Wertebereiche von Schichtungsparametern: Monin-Obukhov-Länge L_M und das in Abb. 4 verwendete Verhältnis von vertikalen Geschwindigkeits-Fluktuationen unmittelbar über dem Maisfeld und der Windgeschwindigkeit in 6 m Höhe multipliziert mit 10, also $10\sigma_w(h)/u(3h)$.

Schichtung	L_M (m)	$10\sigma_w(h)/u(3h)$
Indifferent	99999	1,44
Indifferent bis leicht labil	-100	1,54
Leicht labil	-70	1,59
Labil	-30	1,70
Sehr labil	-10	2,02

Dieser Befund ist konsistent mit dem aus den Messungen von SHAW ET AL. (1983) abgeleiteten Wert der Monin-Obukhov-Länge von -70 m.

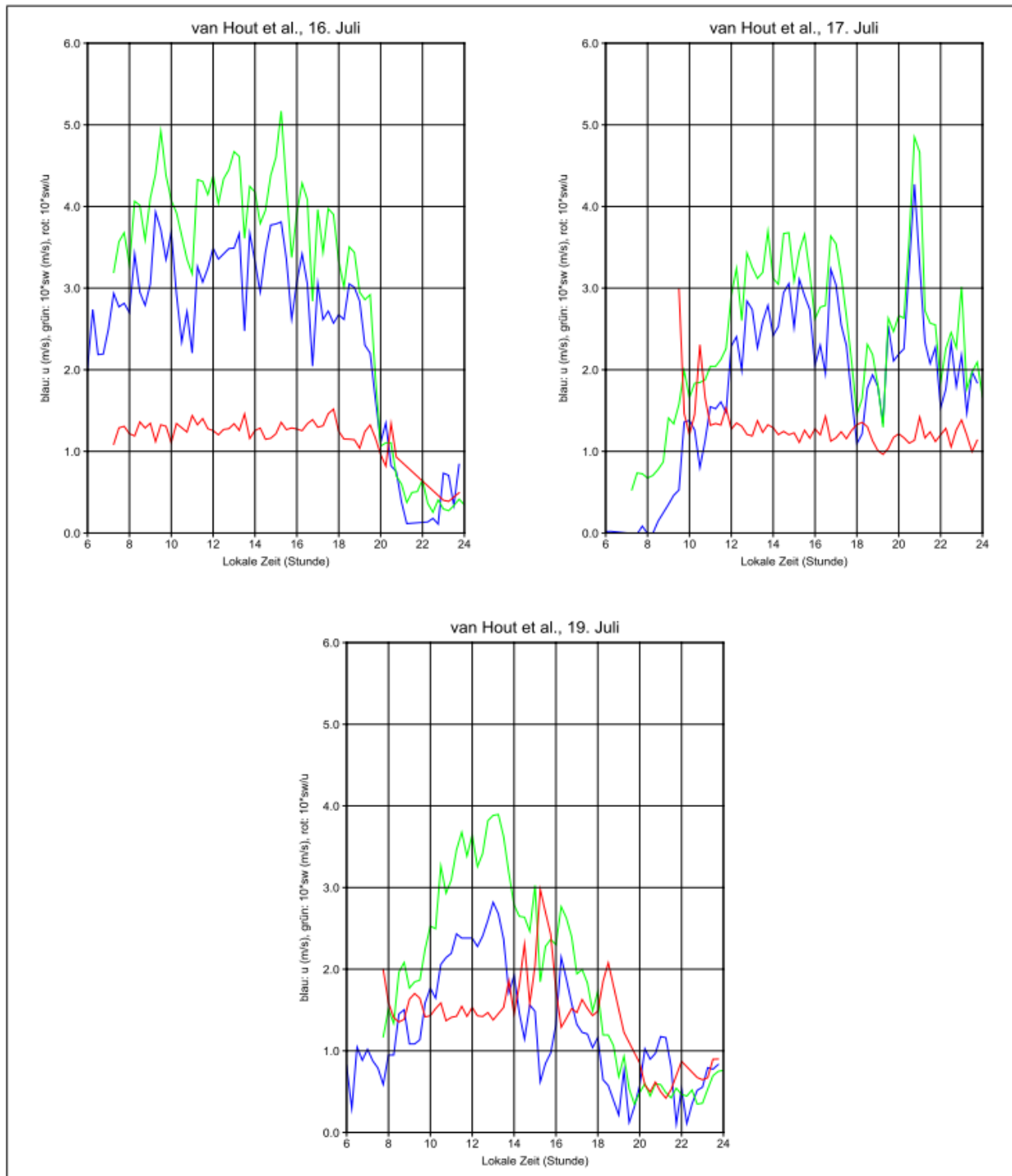


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf meteorologischer Größen über einem Maisfeld nach VAN HOUT ET AL. (2008) (Grafik: Janicke):

Blau: Windgeschwindigkeit in 6 m Höhe über dem Maisfeld der Höhe 3 m, $u(3h)$.

Grün: Vertikale Geschwindigkeits-Fluktuationen unmittelbar über dem Maisfeld, $\sigma_w(h)$.

Rot: Verhältnis $10\sigma_w(h)/u(3h)$.

3.2.2.2 Konzentrationsverlauf über dem Maisfeld

In der Untersuchung von VAN HOUT ET AL. (2008) wurden auch Pollenmessungen in verschiedenen Höhen über dem Maisfeld durchgeführt und der Konzentrationsabfall zwischen

der Maisfeld-Oberkante $z = h$ und der doppelten Höhe $z = 2h$ bestimmt. Zuerst soll jedoch überlegt werden, welcher Abfall aus theoretischer Sicht zu erwarten ist.

Für ein stationäres Konzentrationsprofil sedimentierender Partikel $c(z)$ gilt folgende klassische Diffusionsgleichung:

$$-v_s \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (1)$$

Hierbei ist v_s die Sedimentationsgeschwindigkeit. Findet keine Deposition statt,²³ dann erhält man nach einmaliger Integration:

$$-v_s c(z) = K(z) \frac{\partial c}{\partial z} \quad (2)$$

Nochmalige Integration liefert:

$$\log c(z) = -v_s \int \frac{dz}{K(z)} \quad (3)$$

$$c(h + \delta h) = c(h) \exp \left(-v_s \int_h^{h+\delta h} \frac{dz}{K(z)} \right) \quad (4)$$

Mit $K(z) = K(h) + 0,4u_*(z - h)$ erhält man (im folgenden $u_* \equiv u_{*,\infty}$)

$$c(h + \delta h) = c(h) \exp \left(-v_s \int_0^{\delta h} \frac{dz}{K(h) + 0,4u_*z} \right) \quad (5)$$

$$= c(h) \exp \left(-\frac{v_s}{0,4u_*} \int_0^{\delta h} \frac{dz}{L_h + z} \right) \quad (6)$$

$$= c(h) \exp \left(-\frac{v_s}{0,4u_*} \log \left[1 + \frac{\delta h}{L_h} \right] \right) \quad (7)$$

$$= c(h) \exp \left(-\frac{v_s}{\sigma_w} A_h \right) \quad (8)$$

mit

$$L_h = \frac{K_h}{0,4u_*} \quad (9)$$

²³ Diese Annahme ist äquivalent zur Annahme einer stationären Situation, bei der sich Emission und Deposition die Waage hält.

$$A_h = \frac{\sigma_w}{0,4u_*} \log \left[1 + \frac{\delta h}{L_h} \right] \quad (10)$$

Aus den Untersuchungen von SHAW ET AL. (1983) ergibt sich $K(h)/u_* \approx 0,45$ m. Da L_h eine geometrische Größe ist, die die Oberflächenstruktur des Maisfeldes kennzeichnet, wird angenommen, dass sie entsprechend der Wuchshöhe skaliert. Bei dem von van Hout et al. (2008) untersuchten Feld sollte also $L_h \approx 0,45(3,0/2,25)/0,4 = 1,5$ m sein. Ferner gilt nach der Standardparametrisierung $\sigma_w \approx 1,3u_*$, mit $\delta h = h = 3$ m erhält man also

$$A_h \approx 3,57 \quad (11)$$

Abb. 5 zeigt die hergeleitete Beziehung (8) (rote Linie) zusammen mit den Ergebnissen von VAN HOUT ET AL. (2008) (blaue Quadrate), skaliert mit $v_s = 0,21$ m. Die Bedeutung der roten und grünen Quadrate wird unten erläutert.

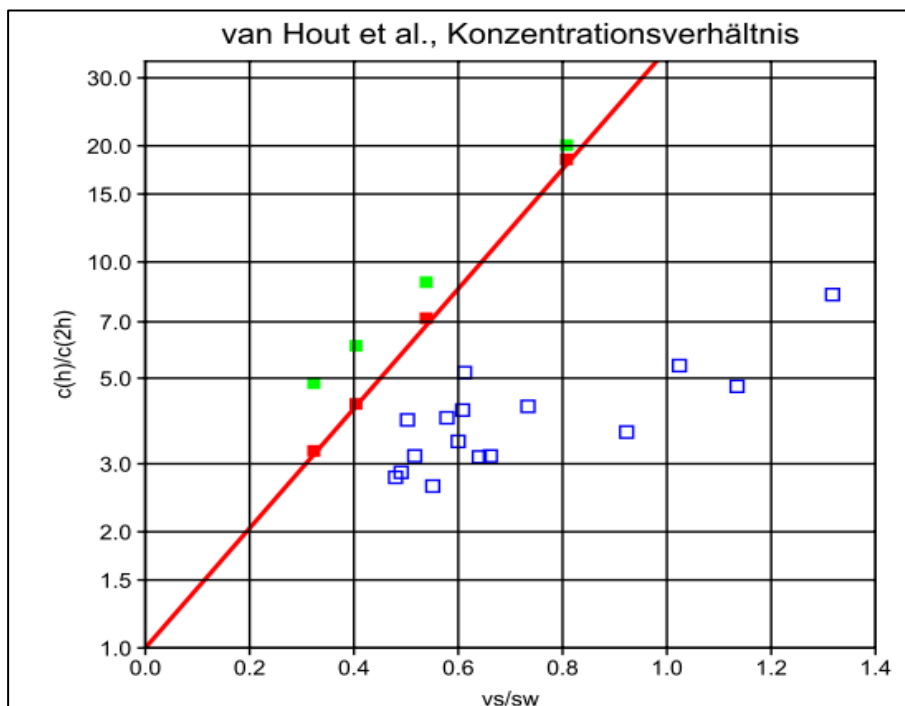


Abb. 5: Verhältnis der Pollenkonzentration an der Oberkante des Maisfeldes und der doppelten Höhe $c(h)/c(2h)$ als Funktion von v_s/σ_w (Sedimentationsgeschwindigkeit v_s ; vertikale Geschwindigkeits-Fluktuationen an der Maisfeld-Oberkante σ_w). Je größer die Geschwindigkeitsfluktuation, desto weiter links liegt ein Wert. Je stärker der Konzentrationsabfall nach Höhe, desto weiter oben liegt der Wert. (Grafik: Janicke)

Blaue Quadrate: Messergebnisse von VAN HOUT ET AL. (2008).

Rote Linie: Theoretisch abgeleiteter Verlauf für zeitlich konstantes σ_w .

Rote Quadrate: Ausbreitungsrechnungen für ein unendlich ausgedehntes Maisfeld und zeitlich konstantes σ_w .

Grüne Quadrate: Ausbreitungsrechnungen für ein Maisfeld der Ausdehnung 300 m mal 700 m und zeitlich konstantes σ_w (Aufpunkt in der Mitte des Feldes und Anströmung senkrecht zur langen Feldkante).

Die experimentell gefundenen Konzentrationsverhältnisse sind geringer als von den theoretischen Überlegungen her erwartet, welche anscheinend nur eine obere Grenze darstellen. Eine denkbare Erklärung hierfür kann die zeitliche Variabilität von σ_w sein. Den Hauptbeitrag zu den Konzentrationswerten erwartet man von Situationen, bei denen σ_w größer ist als im ausgewiesenen Mittel, denn hier ist die Emission am höchsten (siehe z.B. VAN HOUT ET AL. 2008, Abb. 12). Diese Situationen zeigen aber auch den geringsten Konzentrationsabfall, so dass man die experimentellen Konzentrationsverhältnisse eigentlich höheren Werten von σ_w zuweisen müsste, die blauen Quadrate wären also etwas nach links zu verschieben.

Man kann sich diesen Effekt durch folgendes sehr einfaches Beispiel verdeutlichen. Es wird angenommen, dass sich die betrachtete Situation, die ja einen Mittelwert über einen bestimmten Zeitraum darstellt, aus zwei Einzelsituationen zusammensetzt:

1. Mit der Häufigkeit α : $\sigma_w = \hat{\sigma}$, es gilt Gleichung (8) mit $c(h) = \hat{c}$.
2. Mit der Häufigkeit $1 - \alpha$: $\sigma_w = 0$ und daher auch $c(h + \delta h) = 0$ und $c(h) = 0$.

Das mittlere σ_w erhält man durch quadratische Mittelung der Fluktuationen:

$$\langle \sigma_w^2 \rangle = 0 + \alpha \hat{\sigma}^2 \quad (12)$$

$$\overline{\sigma_w} = \sqrt{\langle \sigma_w^2 \rangle} = \sqrt{\alpha} \hat{\sigma} \quad (13)$$

Die Mittelung der Konzentrationswerte ergibt:

$$\langle c(h) \rangle = \alpha \hat{c} \quad (14)$$

$$\langle c(h + \delta h) \rangle = \alpha \hat{c} \exp\left(-\frac{v_s}{\hat{\sigma}} A_h\right) \quad (15)$$

$$\langle c(h + \delta h) \rangle = \langle c(h) \rangle \exp\left(-\sqrt{\alpha} \frac{v_s}{\overline{\sigma_w}} A_h\right) \quad (16)$$

Eine zeitliche Variation von σ_w , also $\alpha < 1$, bewirkt somit eine Erhöhung der Konzentration $[c(h + \delta h)]$, die rote Gerade in Abb. 5 verläuft dann flacher und kommt den experimentellen Resultaten näher.

Zur Prüfung, ob das Ausbreitungsmodell sich so verhält wie hier theoretisch vorausgesagt, wurden Ausbreitungsrechnungen mit dem gleichen Turbulenz-Profil wie in den Messungen durchgeführt. Das Ausbreitungsgebiet und das Maisfeld wurden als unendlich ausgedehnt angesetzt (horizontal periodische Randbedingungen) und es wurden die Konzentrationswerte zweier Schichten von 0,5 m Dicke und 3 m mittlerem Abstand verglichen (direkt über dem Maisfeld und 3 m darüber).

Entsprechend den Ergebnissen aus dem vorigen Abschnitt und dem in den Vorstudien (HOFMANN ET AL. 2009a) angewandten Vorgehen wurden folgende Parameterwerte verwendet: Effektive Verdrängungshöhe 2 m und daraus folgend Quellausdehnung von 0,5 m bis 1 m über Grund,²⁴ $z_0 = 0,2$ m, $\beta = 2$, $L_M = -70$ m, $v_s = 0,21$ m, $v_d = 0,24$ m.²⁵ Das Ergebnis ist in dem Diagramm in Form roter Quadrate eingezeichnet, die fast exakt auf der roten Geraden liegen.

Führt man die Rechnungen für ein Maisfeld durch, das eine dem von VAN HOUT ET AL. (2008) untersuchten Feld vergleichbare Ausdehnung besitzt (300 m mal 700 m, Aufpunkt in der Mitte des Feldes, Anströmung senkrecht zur längeren Feldkante), dann ergeben sich die in Abb. 5 in Form grüner Quadrate eingezeichneten Ergebnisse. Im Vergleich zum unendlich ausgedehnten Maisfeld ist der Konzentrationsabfall mit der Höhe etwas stärker, da Beiträge des Ferntransportes, die mit zunehmender Höhe wichtig werden, fehlen. Die Unterschiede werden mit abnehmendem σ_w geringer, da hier die Windgeschwindigkeit abnimmt und damit die Transportzeit über dem Feld zunimmt, so dass das Feld einem unendlich ausgedehnten Feld immer ähnlicher wird.

3.2.2.3 *Konzentrationsabfall mit zunehmender Entfernung vom Maisfeld*

Nachdem die Transportvorgänge in unmittelbarer Umgebung über dem Maisfeld untersucht und geeignete Parametersätze für Ausbreitungsrechnungen gefunden wurden, wird in Erweiterung zu den Vorstudien der Abfall der bodennahen Konzentration mit zunehmender Entfernung vom Maisfeld noch einmal näher betrachtet. Hierbei wurde insbesondere der Entfernungsbereich zwischen 10 und 1000 m betrachtet.

Für das im vorigen Abschnitt betrachtete Einzelfeld der Ausdehnung 300 m mal 700 m und den dort festgelegten Modellparametern wurde eine Ausbreitungsrechnung mit einer meteorologischen Zeitreihe über den Zeitraum von einer Woche im Sommer durchgeführt. Das Feld emittierte an jedem Tag zwischen 9:00 und 14:00 Uhr mit einer Stärke von 300 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde. Im Umkreis des Feldes wurden in zufälliger Anordnung Mess-Positionen gewählt, für jede einzelne wurde die mittlere Pollenkonzentration und der Abstand der Messposition von der Feldkante bestimmt.

²⁴ Mit der Vertikalausdehnung wird der Unsicherheit in der genauen Emissionshöhe Rechnung getragen.

²⁵ Um Rundungsfehler bei der Ausbreitungsrechnung möglichst gering zu halten, wurde wie in den Vorstudien keine Depositionsgeschwindigkeit v_d vorgegeben, sondern eine Depositionswahrscheinlichkeit von 1. Dies bedeutet, dass Maispollen, die während der Ausbreitung einmal den Boden berühren, dort endgültig deponiert werden.

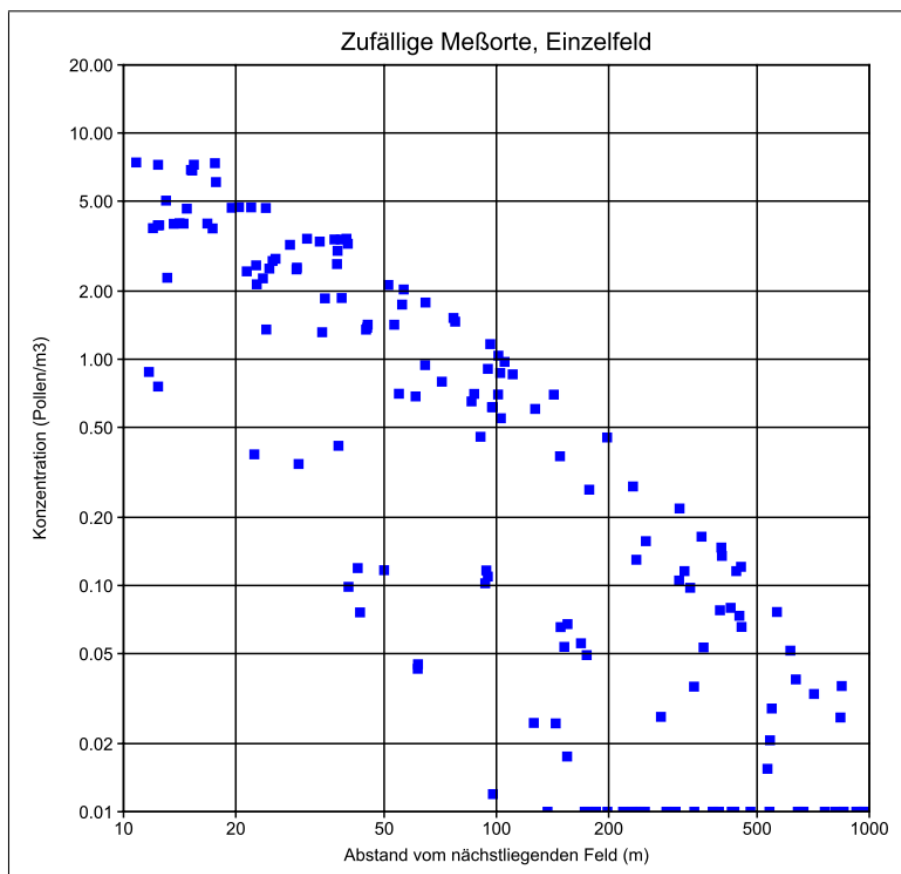


Abb. 6: Mittlere Konzentration als Funktion des Abstandes von einem Maisfeld (Ausdehnung 300 m mal 700 m) für eine zufällige Anordnung von Messpositionen. Die Werte wurden mit einer Ausbreitungs-Rechnung über eine Woche im Sommer bestimmt (Emission zwischen 9:00 und 14:00 Uhr der Stärke 300 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde). (Grafik: Janicke).

Das Ergebnis ist in Abb. 6 dargestellt. Die Nullwerte für größere Abstände beziehen sich auf Messpositionen, die in der Versuchswoche gar nicht beaufschlagt wurden. Der mittlere Konzentrationsabfall zwischen 10 m und 1000 m vom Feld beträgt etwa 2 Größenordnungen. Der Abfall zwischen 100 m und 400 m beträgt etwa einen Faktor 5 und ist konsistent mit den Messungen von JAROSZ ET AL. (2005) an einem Einzelfeld.

Wie bereits in den Vorstudien gezeigt, nimmt mit zunehmender Entfernung der Beitrag von anderen, entfernteren Maisfeldern zu. Um diesen Fall näher zu untersuchen, wurden Kopien des Einzelfeldes und der dazugehörigen Konzentrationsverteilung erstellt und in einem Gebiet von 32 km mal 32 km mit einer Raumbedeckung von 10 Prozent (488 Felder) statistisch verteilt. Die Anordnung entspricht vom Prinzip her der Situation, die von HOFMANN (2007) bei der Auswertung von Maispollenmessungen im Raum Deutschland betrachtet wurde; auch hier wurde die (gemessene) Maispollenkonzentration bzw. -Deposition als Funktion des Abstandes vom nächstliegenden Maisfeld analysiert.

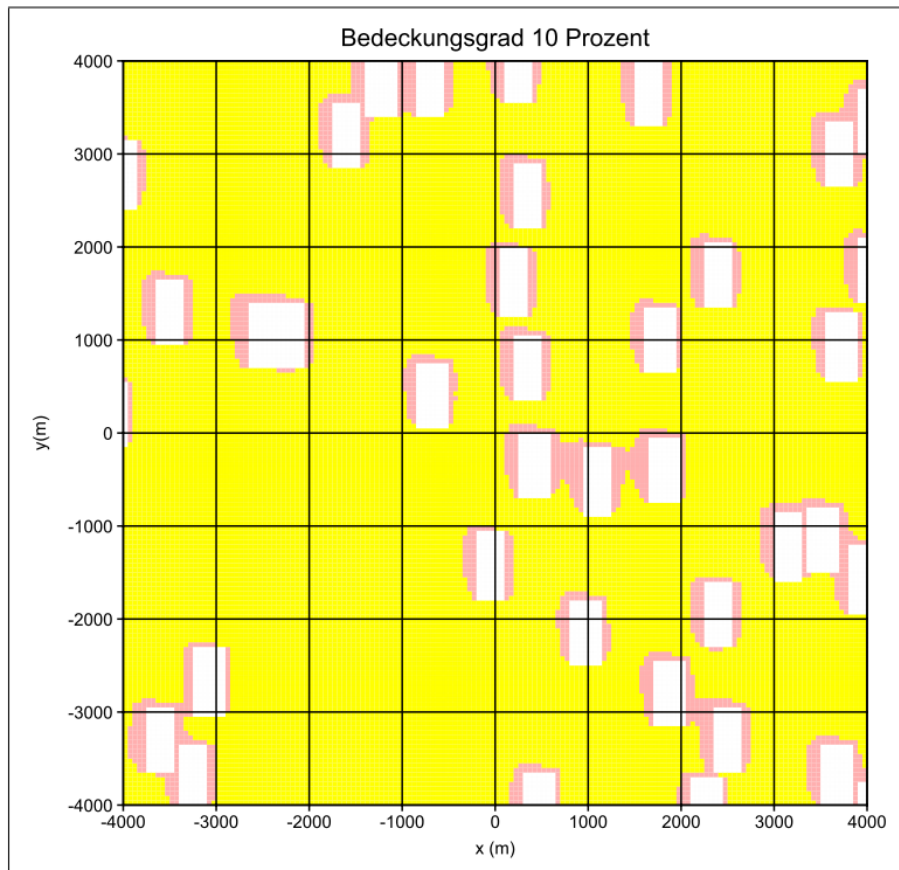


Abb. 7: Verteilung der statistisch angeordneten Maisfelder im Zentrum des Gebietes von 32 km mal 32 km und die dazugehörige Konzentrationsverteilung, die sich aus der Überlagerung der Verteilung für das vorher betrachtete Einzelfeld ergibt. Der Bedeckungsgrad beträgt 10 %. (Grafik: Janicke).

Abb. 7 zeigt die Lage der Felder und die Konzentrationsverteilung im Zentrum des Gebietes. In diesen Raumbereich wurden Messpositionen zufällig verteilt und die Pollenkonzentration als Funktion des Abstandes zum nächstliegenden Feld bestimmt. Abb. 8 zeigt das Ergebnis für 8 verschiedene Realisierungen der zufälligen Feldanordnung (je eine Farbe pro Realisierung).

Das Ergebnis zeigte, dass aufgrund der Beiträge von entfernteren Feldern der Abfall der Maispollenkonzentration schwächer als für ein Einzelfeld ausfällt und zwischen 10 m und 1000 m etwa eine Größenordnung beträgt (im Vergleich zu etwa zwei Größenordnungen beim Einzelfeld). Der Abfall ist konsistent mit der Erhebung von HOFMANN ET AL. (2009a).

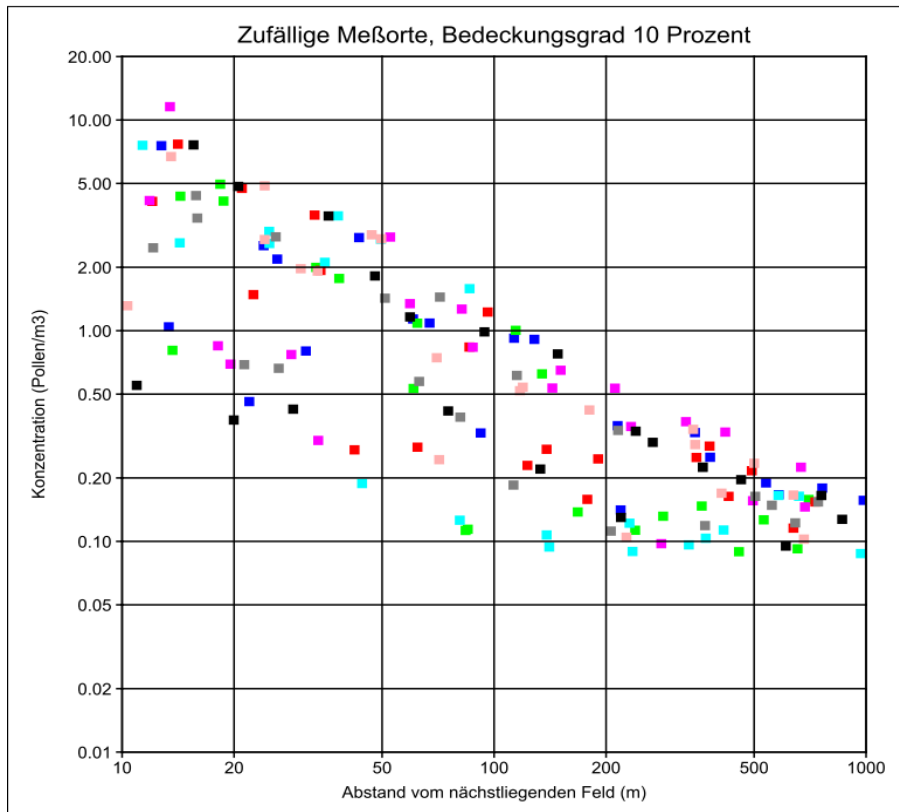


Abb. 8: Mittlere Konzentration als Funktion des Abstandes zum nächstliegenden Maisfeld, wie sie sich für die zufällige Anordnung von Maisfeldern mit einem Bedeckungsgrad von 10 % ergibt. Jede Farbe zeigt das Ergebnis für eine andere Realisierung der zufälligen Feldanordnung. (Grafik: Janicke).

3.2.2.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen der Modellrechnungen zur Parameterfestlegung

Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Wind-und Turbulenzprofile unmittelbar über dem Maisfeld können mit den im Ausbreitungsmodell LASAT verwendeten Standardansätzen in geeigneter Form wiedergegeben werden.
- Eine Annahme besonderer thermischer Verhältnisse über dem Maisfeld, wie sie in den Vorstudien als möglicher Effekt diskutiert worden sind, ist nicht erforderlich, um mit den Modellrechnungen eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den Messergebnissen bezüglich der Wind-und Turbulenzprofile sowie des Konzentrationsabfalls mit der Höhe und dem Abstand vom Maisfeld zu erzielen.
- Für ein Maisfeld von etwa 2 m Höhe sind die Modellparameter wie folgt zu wählen: Effektive Emissionshöhe zwischen 0 m und 0,5 m über Grund, Rauigkeitslänge 0,2 m, Verdrängungshöhe 0 m, Grenzschichtparameter $\beta = 2$, Sedimentationsgeschwindigkeit 0,21 m, Depositionswahrscheinlichkeit 1.

3.2.3 Erfassung der räumlichen Verteilung der Maispollendeposition mittels Pollenmassenfilter PMF

Für die Maispollenausbreitung lagen bereits aus früheren Freilandmessungen Erkenntnisse zu den zu erwartenden Gradienten über einen Entfernungsbereich vom Feld bis in wenige km Abstand vor (HOFMANN 2007, HOFMANN ET AL. 2009a) Kernaufgabe der Untersuchungen in Phase I war es, die Variation der Maispollendeposition innerhalb und im unmittelbaren Nahbereich eines größeren Maisfeldes abzuschätzen. Die Messdaten sollten der Parametrisierung des Ausbreitungsmodells dienen, so dass darüber schließlich eine Optimierung des Versuchsdesigns für Phase 2 erfolgen kann.

Aus Abb. 9 geht die Lage der Maisfelder im Untersuchungsgebiet hervor. Nach Ortsbesichtigung der Maisfelder wurde das Feld B auf Grund seiner Größe und topografischen Lage als gut geeignet für die Freilandmessungen ausgewählt.

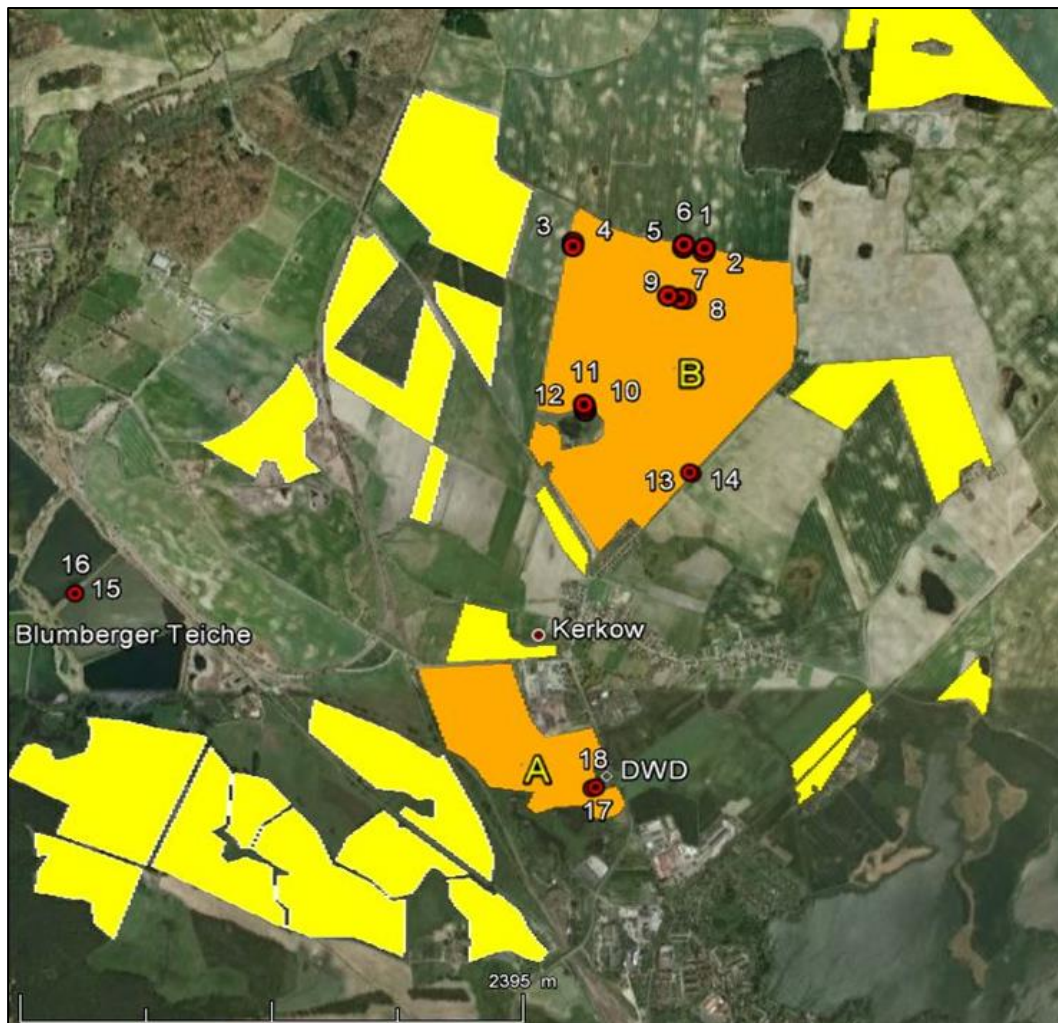


Abb. 9: Maisanbau 2009 im Untersuchungsgebiet Angermünde (Kerkow-Blumberger Mühle) und Standorte der Pollensammler PMF
 B: zentrales Maisfeld für Freilandmessungen in 2009
 A: zweites Maisfeld bei DWD-Wetterwarte.

Für die Erfassung der Pollendeposition wurde das nach VDI-Richtlinie 4330-3 (2007) standardisierte Verfahren der Passivsammler-Kombination Sigma-2/PMF²⁶ eingesetzt (Abb. 10) (s.a. HOFMANN 2002, HOFMANN & BREITFUSS 2002, HOFMANN ET AL. 2001, 2003 UND 2005). Die Bestimmung der Maispollendeposition erfolgte hierbei über den Pollenmassenfilter PMF (HOFMANN 2007, HOFMANN ET AL. 2010, FOLLONI ET AL. 2012). Der PMF besteht aus einem luftdurchlässigen Filterkörper, der bevorzugt größere Aerosole über 10 µm aus dem Luftstrom abscheidet, zu denen die Pollen mit Durchmessern von 10–150 µm gehören. Maispollen weisen in der Regel einen Durchmesser von 80–125 µm auf und zählen zu den größeren Pollen. Der PMF weist eine projizierte Querschnittsfläche von 80 cm² auf (10 cm Höhe x 8 cm Breite).

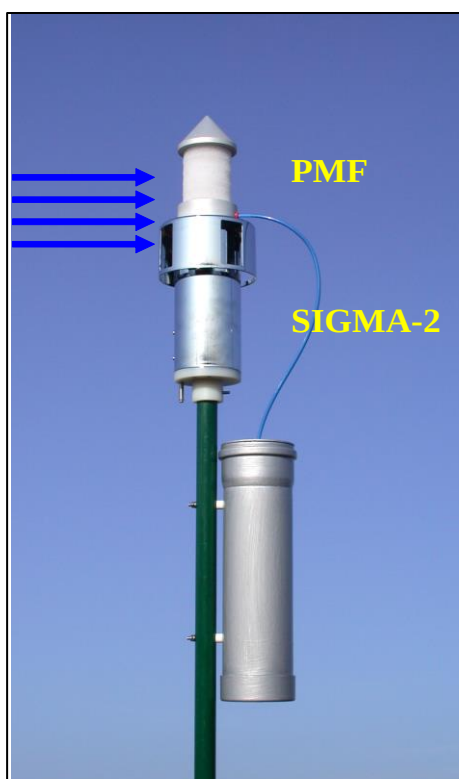


Abb. 10: Der technische Pollensammler PMF mit Sigma-2 gemäß VDI-Richtlinie 4330-3 (2007) (Bild: Hofmann).

Die technische Pollensammlung mit dem PMF stellt eine Punktmessung dar. Sie ist abhängig von der relativen Lage des Messpunktes zur Quelle. Mit der technischen Pollensammlung wird der Eintrag am Messort bestimmt, so dass sich die räumliche Variation des Polleneintrages ermitteln lässt. Die Exposition erfolgt über den Blühzeitraum, so dass die Pollendeposition als akkumulierte Gesamtdeposition über die Pollensaison gleichbedeutend mit der Jahresdeposition erfasst wird. Die Menge an Pollen, die von den Pflanzen potentiell

²⁶ TIEM technic GbR, Northeim/Bremen

in einer Saison freigesetzt werden können, ist bereits bei Blühbeginn festgelegt. Die Reifung und Freisetzung selbst erfolgt über sehr variable Tagesraten, so dass als einzelner Parameterwert Unterschiede in der standörtlichen Exposition auf vergleichbare Weise über die akkumulierte Deposition (Blühzeitraum umfassend) charakterisiert werden.

Während der Maispollenblüte wurden vom 14. Juni bis 11. August 2009 18 technische Pollensammler (PMF/Sigma-2 gemäß VDI 4330-3 2007) nach Vorgaben aus der Ausbreitungsmodellierung aufgestellt. 14 Sammler wurden innerhalb und außerhalb des Feldrandes in verschiedenen Windrichtungen sowie an einem Transsekt von einer Geländekuppe zu einem in einer Geländesenke liegenden Söll inmitten des Maisfeldes aufgestellt (Abb. 11). Für Vergleichszwecke wurden zudem Sammler in einem zweiten Maisfeld A bei der Wetterwarte des DWD sowie inmitten des NSG Blumenberger Teiche errichtet (Abstand zum nächstliegenden Maisfeld 620m).



Abb. 11: Standorte der Pollensammler PMF 1-14 am zentralen Versuchsfeld B.

Die Darstellungen in Abb. 12 illustrieren die Standorte der Pollensammler:





Standorte 3 (2,1 m) und 4 (-9,5 m) am westlichen Feldrand mit Blick auf Kuppe.



Standorte 7-9: Transsekt von Kuppe im Maisfeld in Richtung Söll in der Senke.



Standorte 10 bis 12 am südlichen Feldrand mit flacher Hangneigung, Blickrichtung vom Söll in der Senke ins Maisfeld.



Standort 13 (2 m) und 14 (-10 m) am östlichen Feldrand.

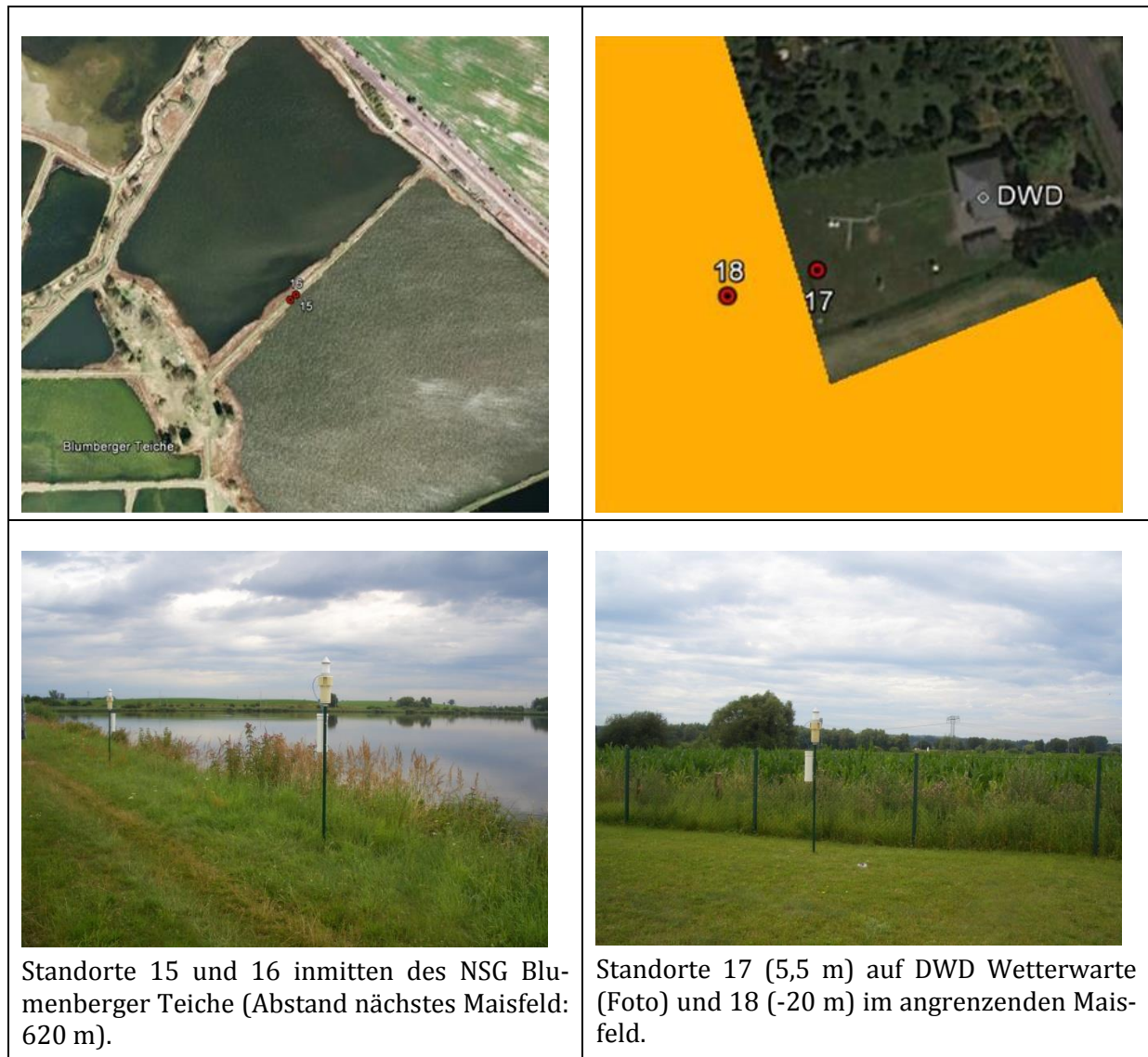


Abb. 12: Standorte der Pollensammler 1 bis 18 in Phase 1 im Jahr 2009. Abstandsangaben in m vom Feldrand, negative Zahlen für innerhalb des Feldes (Grafiken: Hofmann).

Die Pollenproben wurden nach der Exposition kühl und dunkel zwischengelagert und innerhalb von 48 Stunden im Labor gemäß der VDI-Richtlinie aufbereitet. Die Aerosolpartikel mit den Maispollen wurden aus den PMF-Filtern mittels Ultraschallanwendung rückgewonnen. Aus dem Aerosolgemisch wurde die Fraktion mit den Maispollen über eine Filterkaskade (Fritsch Analysette Pro, Testsiebe 100 mm Durchmesser, 125 μm und 60 μm Maschenweite) separiert und anschließend über Vakuumfiltration (Sartorius) auf einen 12 μm -Membranfilter (50 mm Durchmesser) abgeschieden. Der Filterkuchen mit der Maispollenfraktion wurde dann in 4 ml einer 50 %igen Glycerol-Suspension überführt. Die mikroskopische Pollenanalyse mit quantitativer Bestimmung der Maispollenanzahl erfolgte in mehreren Aliquots von 10-50 μl bei 100-facher Vergrößerung im Durchlicht-Mikroskop (Nikon MZ100) in dynamischer Zählweise, d.h. bis eine für statistische Auswertungen aus-

reichende Anzahl bestimmt wurde. Die ermittelte Maispollenanzahl wurde dann auf die Gesamtprobe hochgerechnet.

Mit dem PMF wird der horizontale Pollenfluss F über den Blühzeitraum erfasst, der als Anzahl an Pollen pro m^2 senkrechter Bezugsfläche per Wind verdriftet angegeben wird.

$$F_i = \frac{N_i \cdot 10^6}{E_{i,PMF} \cdot 8 \cdot 10^3} \quad \left[\frac{n}{m^2} \right] \quad (17)$$

wobei:

F_i	Horizontaler	Fluss	für	Pollenart	i	in	der	Luft	$[n/m^2]$
i	Pollenart,			hier					Maispollen
N_i	Pollenanzahl	der		Art	i	in	der		Probe
$E_{i,PMF}$	Sammeleffizienz des PMF	(0,35)	ermittelt im	Vergleich zum	volumetrischen	Standard			
	gerät Burkard 7-Tage Sporen- & Pollenfalle								

Unter Annahme einer mittleren Wind- und Depositionsgeschwindigkeit von $u = 2$ m/s bzw. $v_d = 0,2$ m/s (DI-GIOVANNI ET AL. 1995, CHAMECKI ET AL. 2011) sowie einer mittleren Sammeleffizienz für Maispollen von 35 % (HOFMANN 2007) wurde die Maispollendeposition ermittelt, die die Anzahl an Maispollen angibt, die sich pro m^2 ebener Bezugsfläche (standardisierte Deposition, inerter oder virtueller Akzeptor) über den Messzeitraum absetzen.

$$D_i = \frac{F_i \cdot v_{d,i}}{u} \quad \text{in} \quad \left[\frac{n}{m^2} \right] \quad (18)$$

wobei:

D_i	akkumulierte	Deposition	für	Pollenart	i	über	Blühzeitraum
u	mittlere					Windgeschwindigkeit	
$v_{d,i}$	mittlere Depositionsgeschwindigkeit für Maispollen						$[m/s]$.

Das Verfahren für Maispollen ist bei HOFMANN (2007) ausführlich beschrieben.

Die Auswertung der Daten erfolgte in Excel 2007 unter Verwendung des Statistiktools XLSTAT-Pro (Addinsoft, www.xlstat.com/de). Die Graphen wurden in Excel generiert.

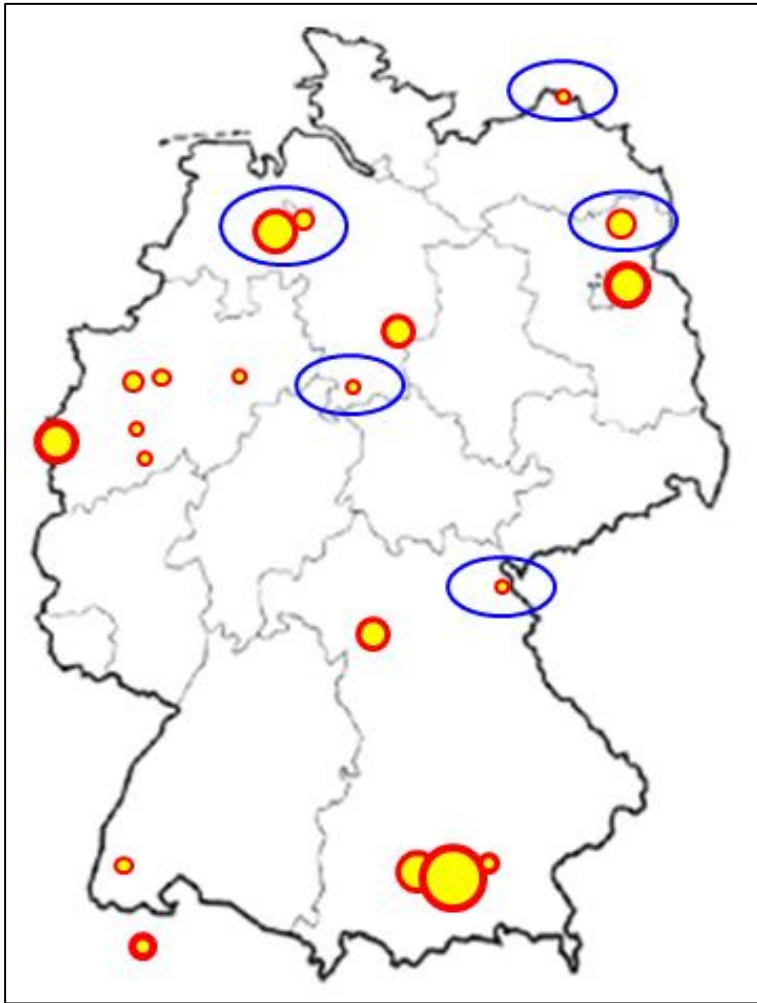


Abb. 13: Referenzstandorte: Standortbereiche Maispollen-Monitoring seit 2001. Standorte in 2009 blau markiert; Größe der Kreisflächen entsprechen der Standortanzahl: $N_{2009} = 27$; $N_{\text{Gesamt}} = 187$ (Grafik: Hofmann).

Ergebnisse

Die Ergebnisse aus den Maispollendepositionsmessungen mit dem standardisierten Verfahren des PMF im Jahr 2009 lassen sich mit Ergebnissen von Referenzmessungen (HOFMANN 2007, HOFMANN ET AL. 2009a und 2010) vergleichen. In den Referenzmessungen wurden Ergebnisse von 122 Messungen an verschiedenen Standorten in der BRD und der Schweiz aus den Jahren 2001 bis 2006 statistisch ausgewertet. Die Regressionsanalyse ergab einen statistisch hochsignifikanten Zusammenhang zwischen Maispollendeposition und Entfernung zum nächsten Maisfeld. Die Ergebnisse zur Maispollendeposition der Phase 1 in Angermünde (2009) sowie Daten aus weiteren Untersuchungen seit 2007 werden in Abb. 14 dargestellt. Aus der Darstellung geht hervor, dass sich die Ergebnisse zur Maispollendeposition (2009) in den Regressionszusammenhang einfügen. Die Maispollendepositionsdaten aus Angermünde zeigen einen Abstandstrend auf mittlerem bis leicht erhöhtem Niveau, die Werte für die in 620 m vom nächsten Maisfeld entfernten Standorte im NSG Blumenberger Teiche fallen höher als das Mittel aus. Die weiteren Standorte aus ande-

ren Regionen bis in 4 km Entfernung vom nächsten Feldrand bestätigen den Trend. Die Verteilung der Maispollendeposition innerhalb und am Rande des Maisfeldes war erwartungsgemäß. Von den Standorten am Feldrand zeigt der in östlicher Richtung die höchsten Werte. Der Standort auf der Kuppe wies höhere Werte auf als im Mittel im Feld, was auf Grund der begünstigten Anströmung zu erwarten war. Der Standort in der Senke mit dem Söll wies hingegen niedrigere Werte als das Feldmittel auf. Dies steht mit der in der geschützteren Lage geringeren Windgeschwindigkeit und den damit zu erwartenden Pollenfluss in Einklang.

Damit liegen keine außergewöhnlichen Verhältnisse in Bezug auf die Maispollendepositionen vor, so dass sowohl das Untersuchungsgebiet ebenso wie das ausgewählte Maisfeld für die weitergehenden Untersuchungen in Phase II geeignet erscheinen.

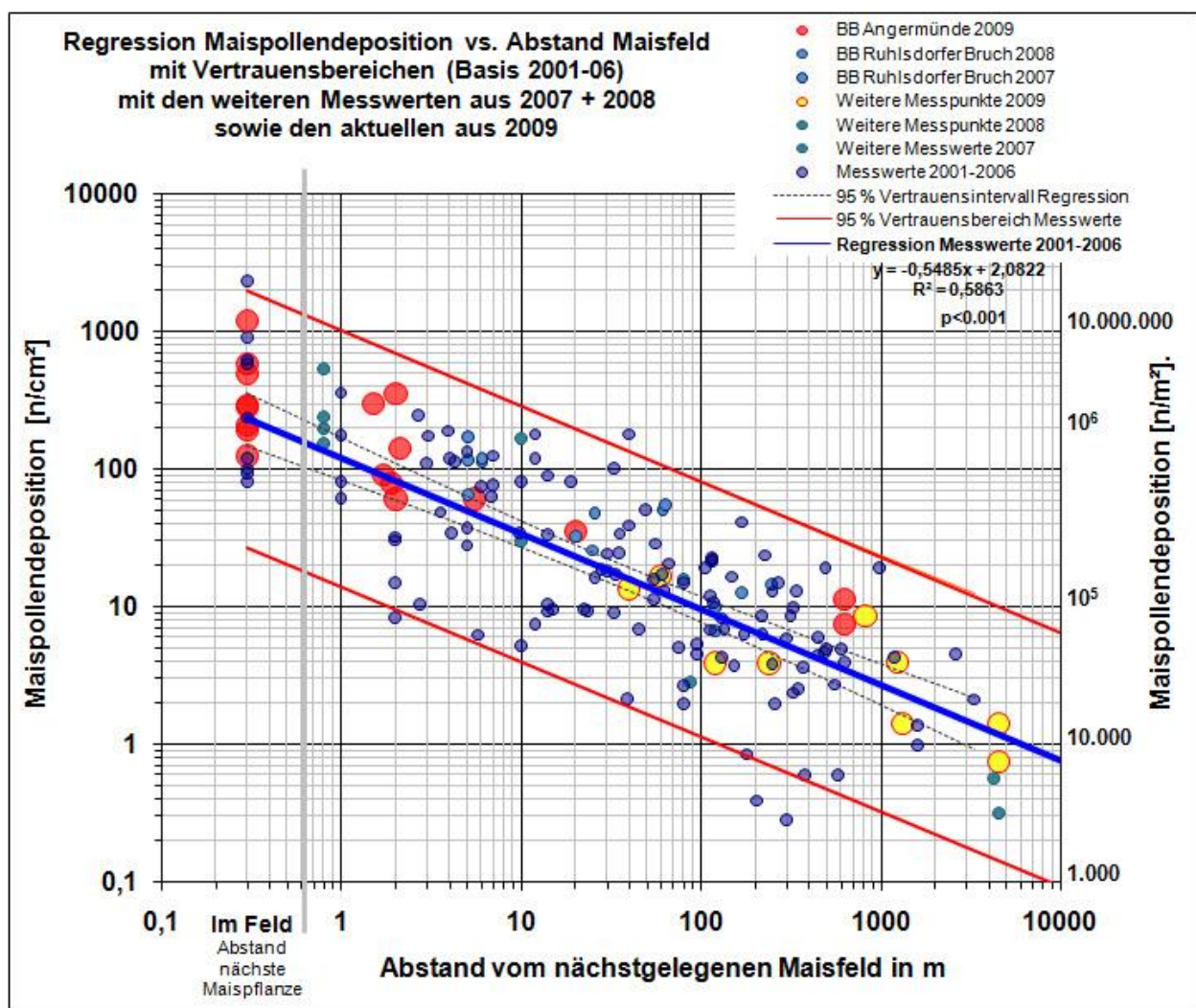


Abb. 14: Ergebnisse der Maispollendepositionsmessungen in Phase I in Relation zur Entfernung vom Maisfeld. Mit überregionalen Vergleichsdaten und Einordnung in den darüber definierten Regressionszusammenhang aus HOFMANN 2007. (Grafik: Hofmann).

In der folgenden Abb. 15 werden die Ergebnisse zur Maispollendeposition für die Standorte im Bereich des Maisfeldes B in ihrer räumlichen Variation gezeigt. Die Höhe der Pollendeposition wird durch die Größe der Kreisflächen symbolisiert.

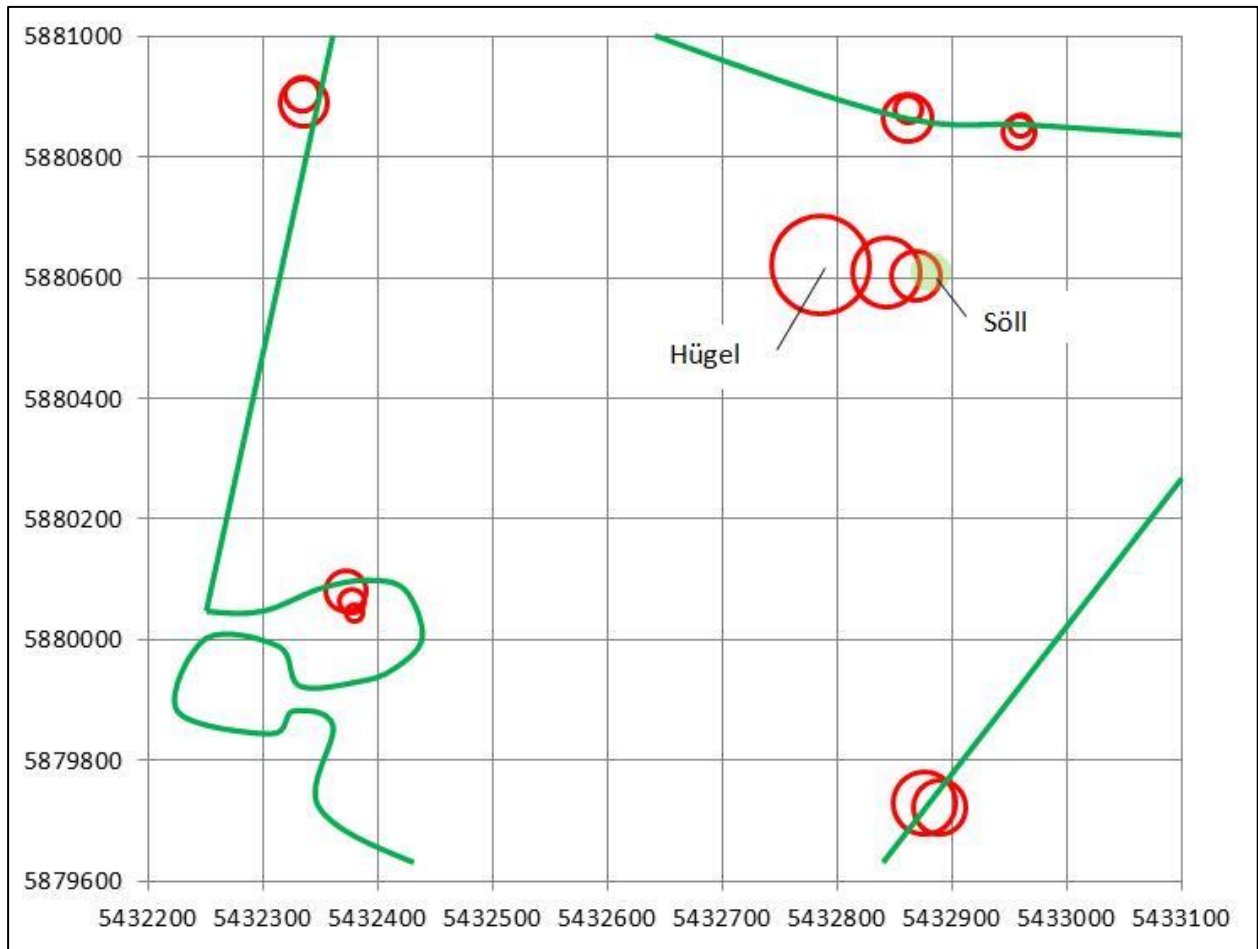


Abb. 15: Variation der Maispollendeposition im Bereich des Maisfeldes B. Erfassung mittels PMF über Blühzeitraum. Die Größe der Kreisflächen symbolisiert die Höhe der Pollendeposition. (Grafik: Hofmann).

Der höchste Wert der Maispollendeposition insgesamt wird innerhalb des Maisfeldes am Standort 7 auf der Kuppe („Hügel“) erreicht, die Werte nehmen auf dem Transsekt hangabwärts Richtung Söll ab. Die höchsten Werte am Feldrand werden auf der östlichen Seite gemessen, gefolgt von der Muldenlage nördlich (Standorte 5 und 6). Dies entspricht den Erwartungen aus der Ausbreitungsmodellierung in Kap. 3.2.4. Die westliche Hauptwindrichtung erklärt die höheren Werte am östlichen Feldrand und die Maxima am Kuppelstandort bestätigen ebenfalls die Annahme erhöhter Anströmung aufgrund topografischer und thermischer Einflüsse und bevorzugter Abrisszone an einer exponierten Kuppe. Die ebenfalls relativ hohen Werte an den entfernteren Standorten inmitten der Teiche weisen auf den typischen Absinkzonen-Charakter freier Wasserflächen hin.

3.2.4 Testrechnungen zur Festlegung des Probenahmedesigns für die Freilandmessungen in Angermünde

In Vorbereitung auf die Freilandmessungen der Untersuchungsphase II waren verschiedene Auswertungen und Testrechnungen durchgeführt worden. Für den Standort lagen ein digitales Geländemodell sowie meteorologische Jahreszeitreihen (AKTerm des DWD) für die Jahre 2002 bis 2005 vor.

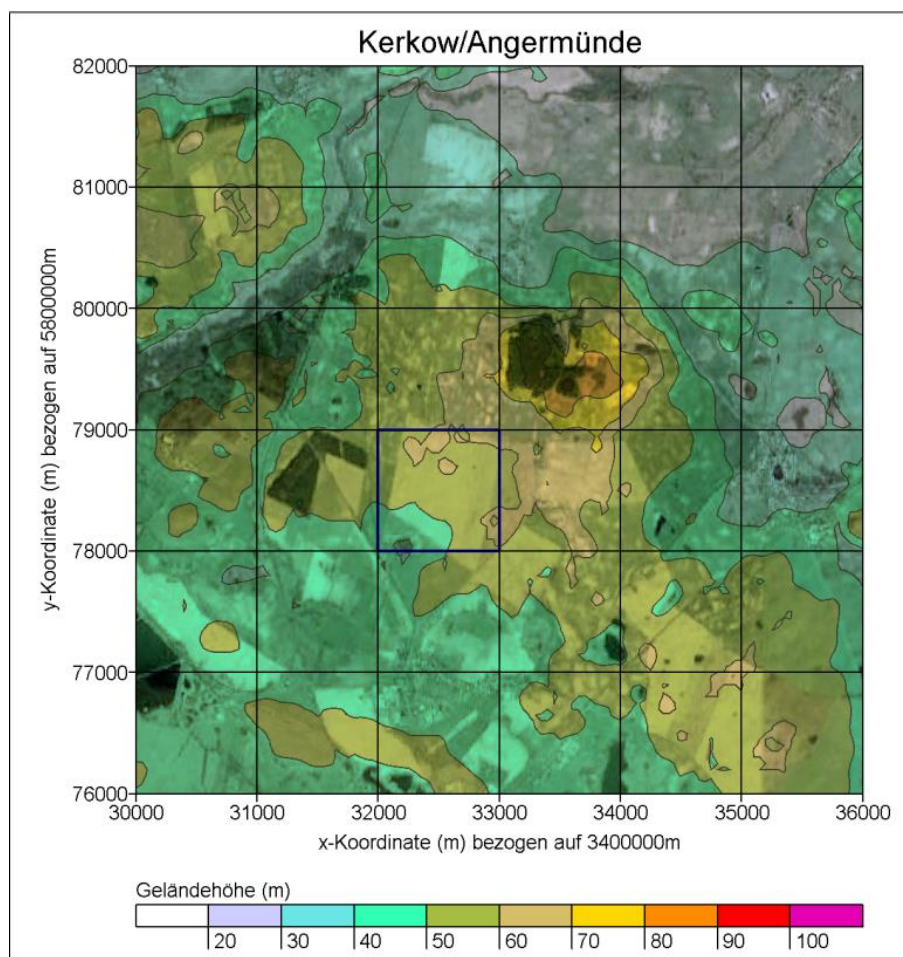


Abb. 16: Geländeprofil im Bereich des Dorfes Kerkow und seiner nördlichen Umgebung. Die blau umrandete Gitterzelle kennzeichnet den ungefähren Bereich des voraussichtlich bestellten Maisfeldes (Feld B). (Grafik: Janicke).

Zuerst wurde untersucht, ob ein Einfluss des relativ flachen Geländeprofiles auf die Ausbreitung der Maispollen in der Umgebung des Feldes zu erwarten ist. Abb. 16 zeigt das Geländeprofil. Im Norden des vorgesehenen Maisfeldes (Feld B) erstreckt sich eine leichte Erhebung mit Steigungen bis etwas über 10 %, im übrigen Gebiet liegen die Geländesteigungen meist deutlich unter 5 %.

Es wurde für eine isotrope Windrose (Mittel über alle Windrichtungen in 10-Grad-Schritten) und indifferente Schichtung eine Ausbreitungsrechnung für ein quadratisches Maisfeld durchgeführt (blaues Quadrat; die übrigen Parameter wie in den vorigen Ab-

schnitten diskutiert), einmal für ebenes Gelände und einmal für das vorgegebene Gelände-profil. Das Ergebnis ist in Abb. 17 dargestellt.

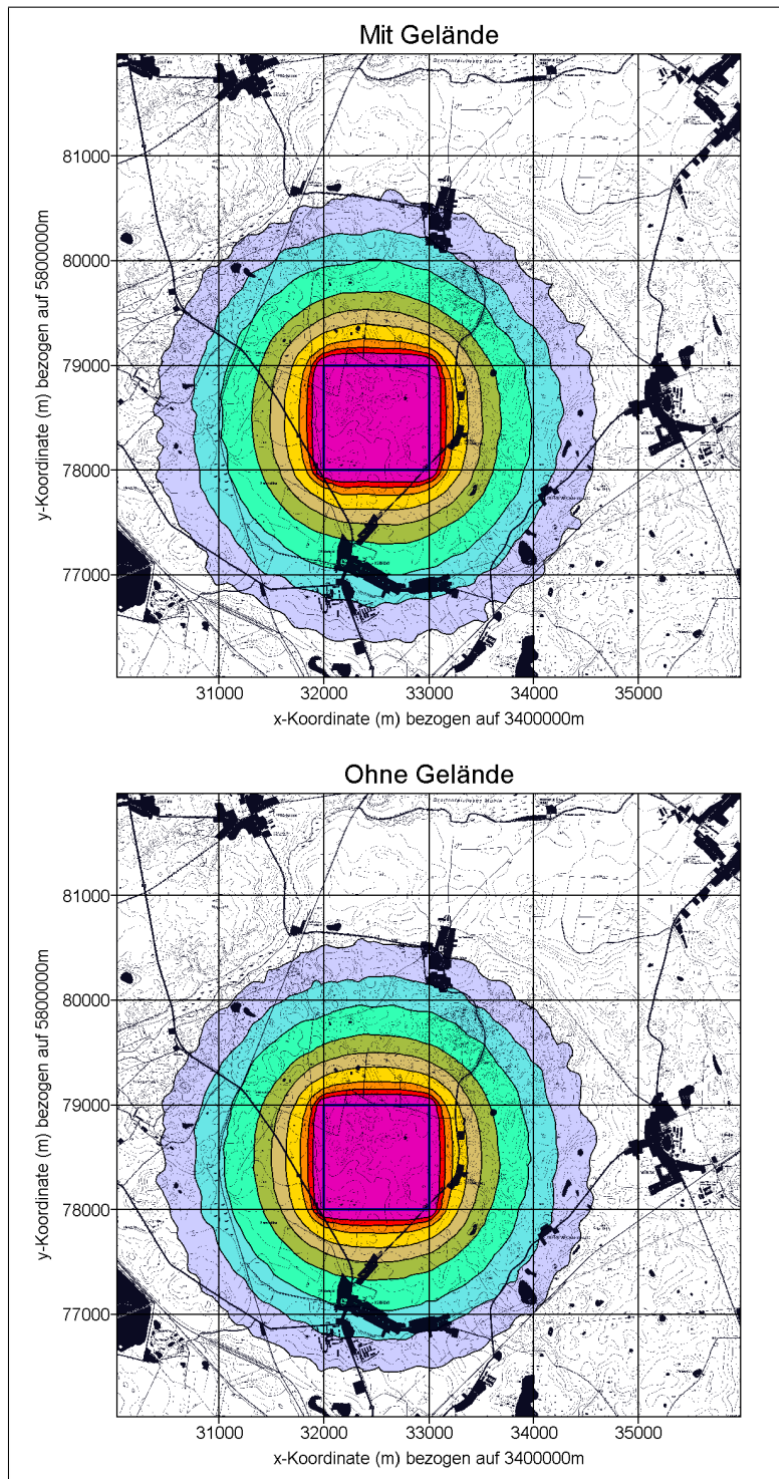


Abb. 17: Ausbreitungsrechnung für eine isotrope Windrose, indifferent Schichtung und ein quadratisches Maisfeld (blaues Quadrat): Pollenkonzentration mit Berücksichtigung des Geländeprofiles (oben) und für ebenes Gelände (unten). (Grafik: Janicke).

Mit Gelände ergibt sich praktisch dieselbe symmetrische Konzentrationsverteilung wie ohne Gelände, das Geländeprofil hat also keine nennenswerte Auswirkung auf die Ausbreitung und kann hier vernachlässigt werden. Dieselbe Situation ergibt sich für labile Schichtungen. Für stabile Schichtungen kann der Geländeeinfluss größer sein, jedoch findet bei stabiler Schichtung (nachts) keine Maispollenemission statt.

Um einen Eindruck zu bekommen, wie variabel die meteorologischen Randbedingungen während der Blütemonate Juli und August sein können, wurden die meteorologischen Zeitreihen 2002 bis 2005 für diese beiden Monate und die Tageszeit 9:00 bis 14:00 Uhr statistisch ausgewertet (siehe Abb. 18)²⁷. Die Hauptwindrichtung schwankte in diesem Zeitraum etwas, kommt aber mit Ausnahme des Jahres 2002 meist aus westlicher Richtung. Die Pollenkonzentration kann somit vorwiegend östlich des Feldes erwartet werden. Die meteorologischen Daten von 2002 bis 2005 zeigen, dass die Schichtung erwartungsgemäß in der überwiegenden Zeit labil war und die Windgeschwindigkeit im mittleren Bereich lag.

Für jeden dieser Zeiträume wurden Ausbreitungsrechnungen für ein etwa 50 ha großes Maisfeld durchgeführt (Juli und August, Emission zwischen 9:00 und 14:00 Uhr). Die Mittelwerte der Konzentration über den Zeitraum von jeweils zwei Monaten sind in Abb. 19 dargestellt. Für einen kürzeren Mittelungszeitraum sind die Schwankungen zwischen den Jahren größer. Abb. 20 zeigt die Ergebnisse für einen Mittelungszeitraum von einer Woche (jeweils 27. Juli bis 2. August). Abb. 21 zeigt die Ergebnisse für dieselbe Woche, jedoch wurde die Emission nur für Stunden mit labiler Schichtung (Klug/Manier-Klassen IV und V) angesetzt.

Diese Befunde mündeten in die im Folgenden aufgeführten Überlegungen für die Messplanungen der Untersuchungsphase II. Abschnitt 3.3 beschreibt die tatsächlich realisierte Ausführung.

- Ein Anemometer (A1) wird entweder in der Feldmitte (mindestens 80 m vom Feldrand entfernt) oder am westlichen oder östlichen Rand des betrachteten Maisfeldes in maximal 5 m Entfernung vom Feldrand positioniert, das andere (A2) südlich oder nördlich des Feldes in einer Entfernung von mindestens 20 m vom Feldrand (beide in gleicher Höhe über Grund).

Auch wenn die bisherigen Untersuchungen keine besonderen thermischen Effekte des Maisfeldes nahelegen und solche wohl auch nur bedingt in der niedrigen Messhöhe von 6 m beobachtbar wären, bietet diese Konfiguration die größte Chance, derartige Effekte messtechnisch zu belegen: Bei der erwarteten Windrichtungsverteilung sollte Anemometer A2 meist außerhalb des Einflusses,

²⁷ Es wurde als grobe Abschätzung angenommen, daß in diesem Zeitraum der Hauptteil der Pollenemission stattfindet (AYLOR ET AL. 2003).

Anemometer A1 immer bzw. im Fall einer vom Feld kommenden Strömung im Einflussbereich des Feldes liegen. Es ist darauf zu achten, dass Anemometer A2 nicht anderen lokalen Einflüssen (wie denen der Windkraftanlagen im Norden des Feldes oder dem Einfluss naheliegender Bäume oder Gebäude) unterliegt.

- Ein zeitauflösender Pollenmonitor (PM01) wird an der Position A1 aufgestellt, der andere (PM02) am entgegengesetzten Feldrand in etwa 10 m Entfernung vom Feldrand bzw. bei Position A2 .

Ziel ist es, durch Differenzbildung der Messungen auf die Hintergrundbelastung (Beitrag der Maisfelder in der Umgebung) zu schließen. 10 m vom Rand ist die kürzeste Entfernung, für die die Modellrechnungen Vorhersagen mit einer räumlich akzeptablen Auflösung machen. Die Korrelation der Ergebnisse von PM01 mit der genauen Meteorologie an diesem Ort ermöglicht Rückschlüsse auf das Emissionsverhalten der Maispflanzen.

- Von den anderen Pollensammlern (Passivsammler PMF, P1 bis P15 o.ä.) werden vier im Maisfeld (2 am gleichen Ort im Zentrum, 2 in der Nähe des westlichen oder östlichen Randes), jeweils einer an den Positionen A1 und A2 und die übrigen im Entfernungsbereich zwischen 10 m und 1.000 m vom Maisfeldrand positioniert.

Die Pollensammler im Maisfeld lassen Rückschlüsse auf die Gesamtemissionsmenge zu. Die zwei Pollenmonitore am gleichen Ort im Maisfeld dienen der Überprüfung der Reproduzierbarkeit des Mess-Ergebnisses. Der Pollenmonitor am Ort A1 dient der Überprüfung der Vergleichbarkeit der beiden Mess-Systeme. Mit den anderen Positionen wird der von den Modellrechnungen betrachtete Entfernungsbereich abgedeckt.

Bei der Aufstellung im Maisfeld ist darauf zu achten, dass der Bewuchs des Maisfeldes durch das Aufstellen nicht wesentlich gestört wird (beispielsweise durch Rodung eines größeren Bereiches). Ideal ist eine Positionierung im ungestörten Maisfeld in Höhe der Pollenfreisetzung.

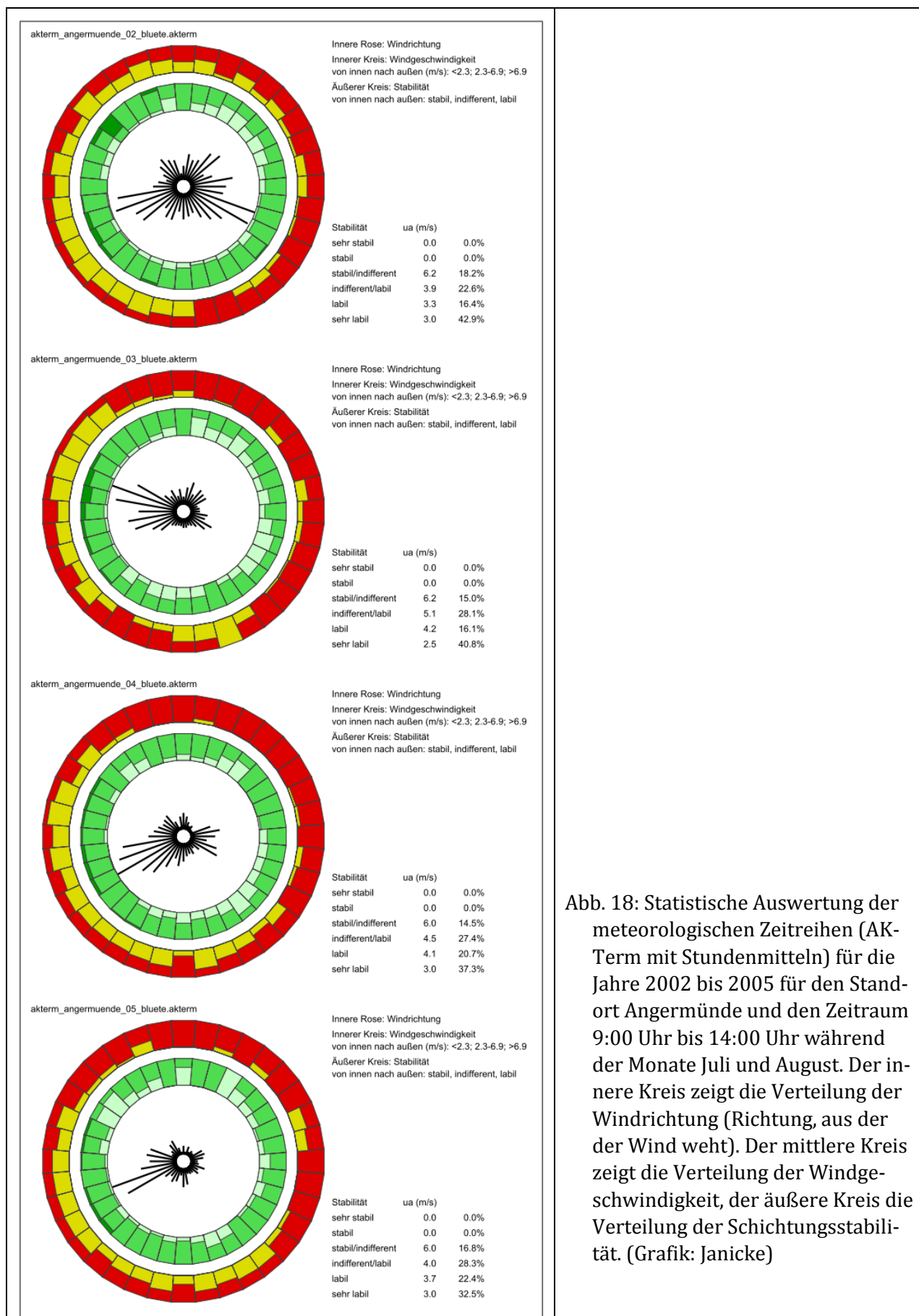


Abb. 18: Statistische Auswertung der meteorologischen Zeitreihen (AK-Term mit Stundenmitteln) für die Jahre 2002 bis 2005 für den Standort Angermünde und den Zeitraum 9:00 Uhr bis 14:00 Uhr während der Monate Juli und August. Der innere Kreis zeigt die Verteilung der Windrichtung (Richtung, aus der der Wind weht). Der mittlere Kreis zeigt die Verteilung der Windgeschwindigkeit, der äußere Kreis die Verteilung der Schichtungsstabilität. (Grafik: Janicke)

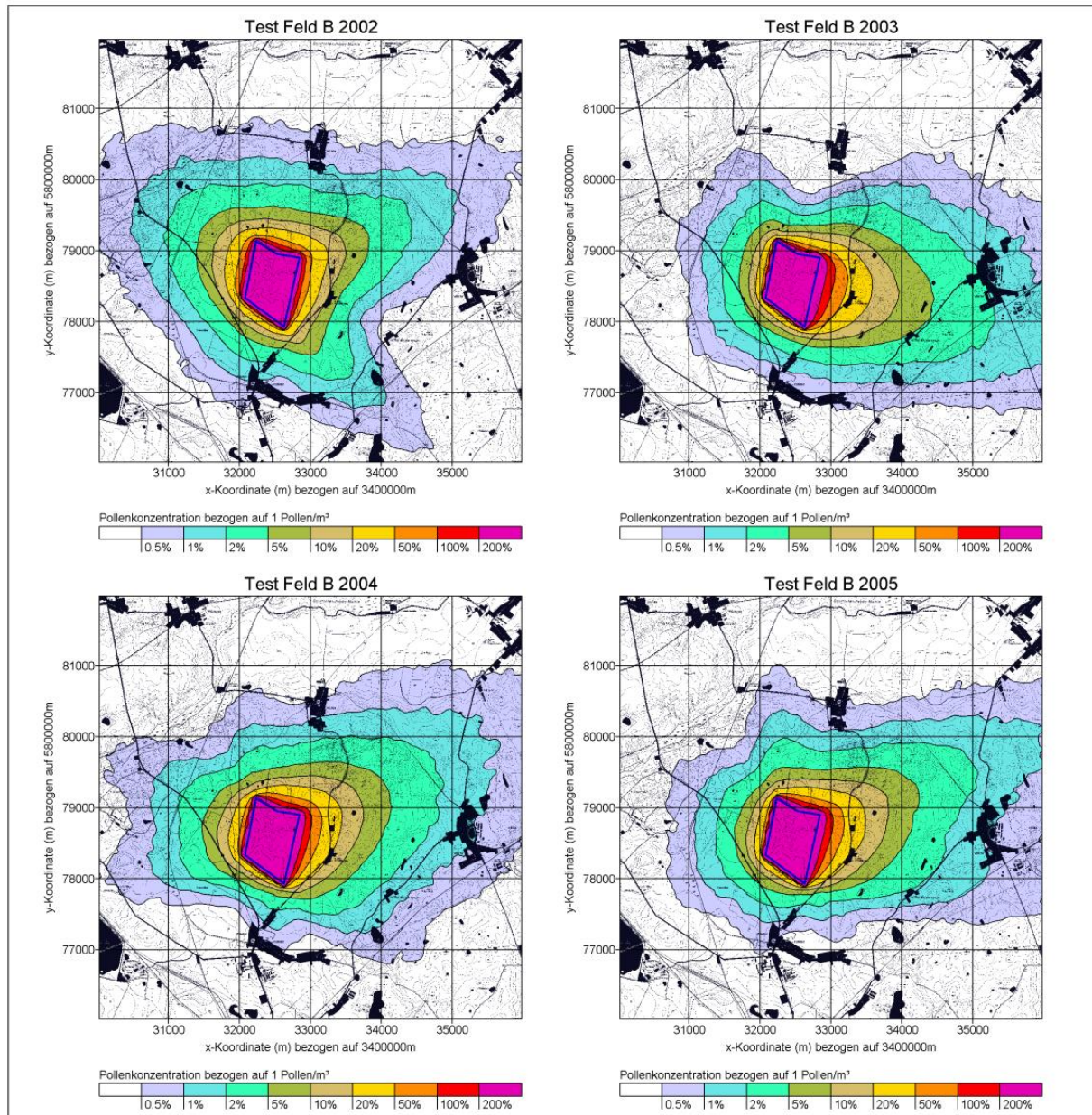


Abb. 19: Konzentrationsverteilung für ein etwa 50 ha großes Maisfeld für verschiedene Jahre. Dargestellt ist der Mittelwert über die Monate Juli und August, wobei eine Emission von 300 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde während der Zeit zwischen 9:00 und 14:00 Uhr angenommen wurde. (Grafik: Janicke).

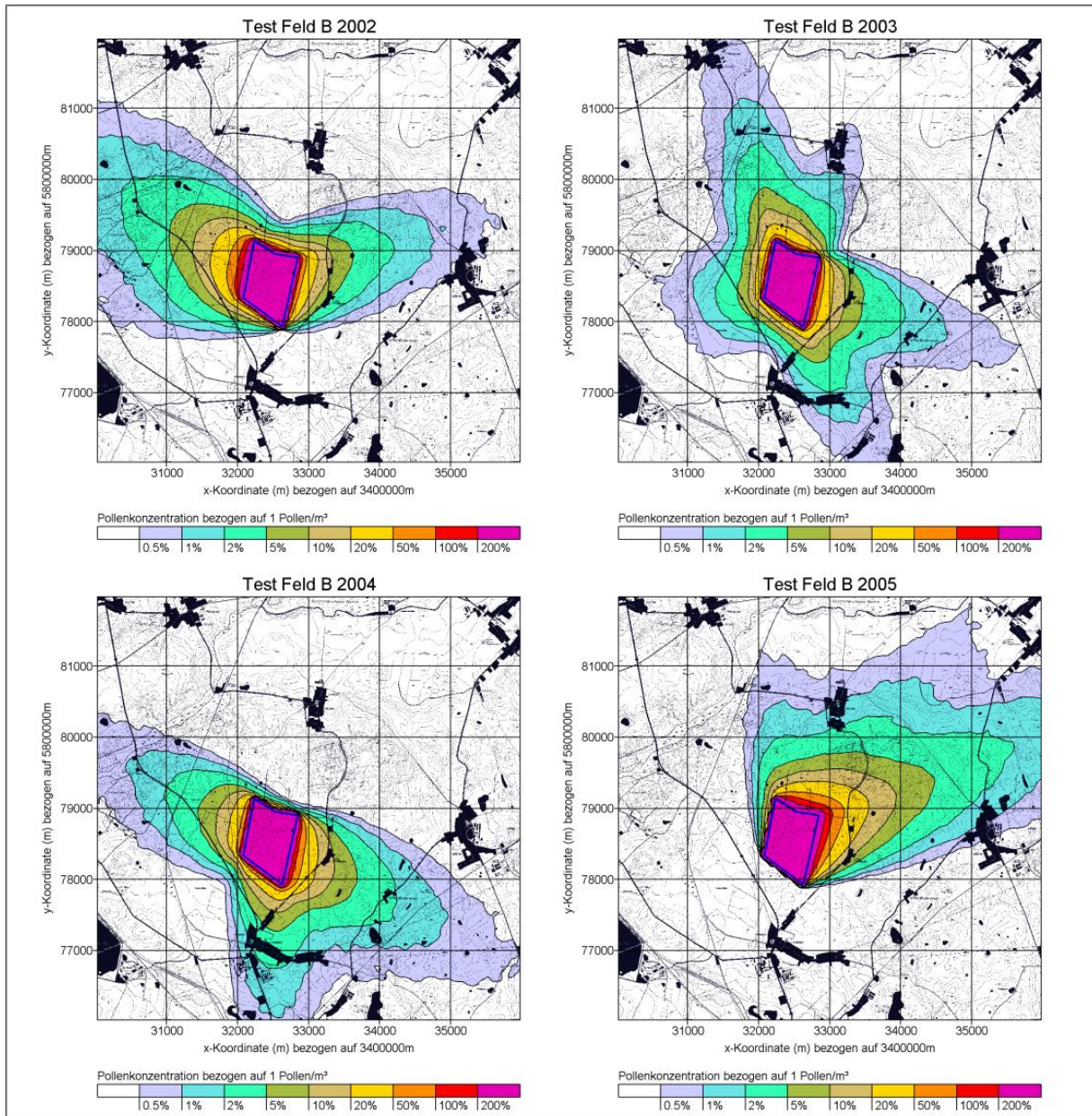


Abb. 20: Konzentrationsverteilung für ein etwa 50 ha großes Maisfeld für verschiedene Jahre. Dargestellt ist der Mittelwert über eine Woche im Sommer (27. Juli - 2. August), wobei eine Emission von 300 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde während der Zeit zwischen 9:00 und 14:00 Uhr angenommen wurde. (Grafik: Janicke).

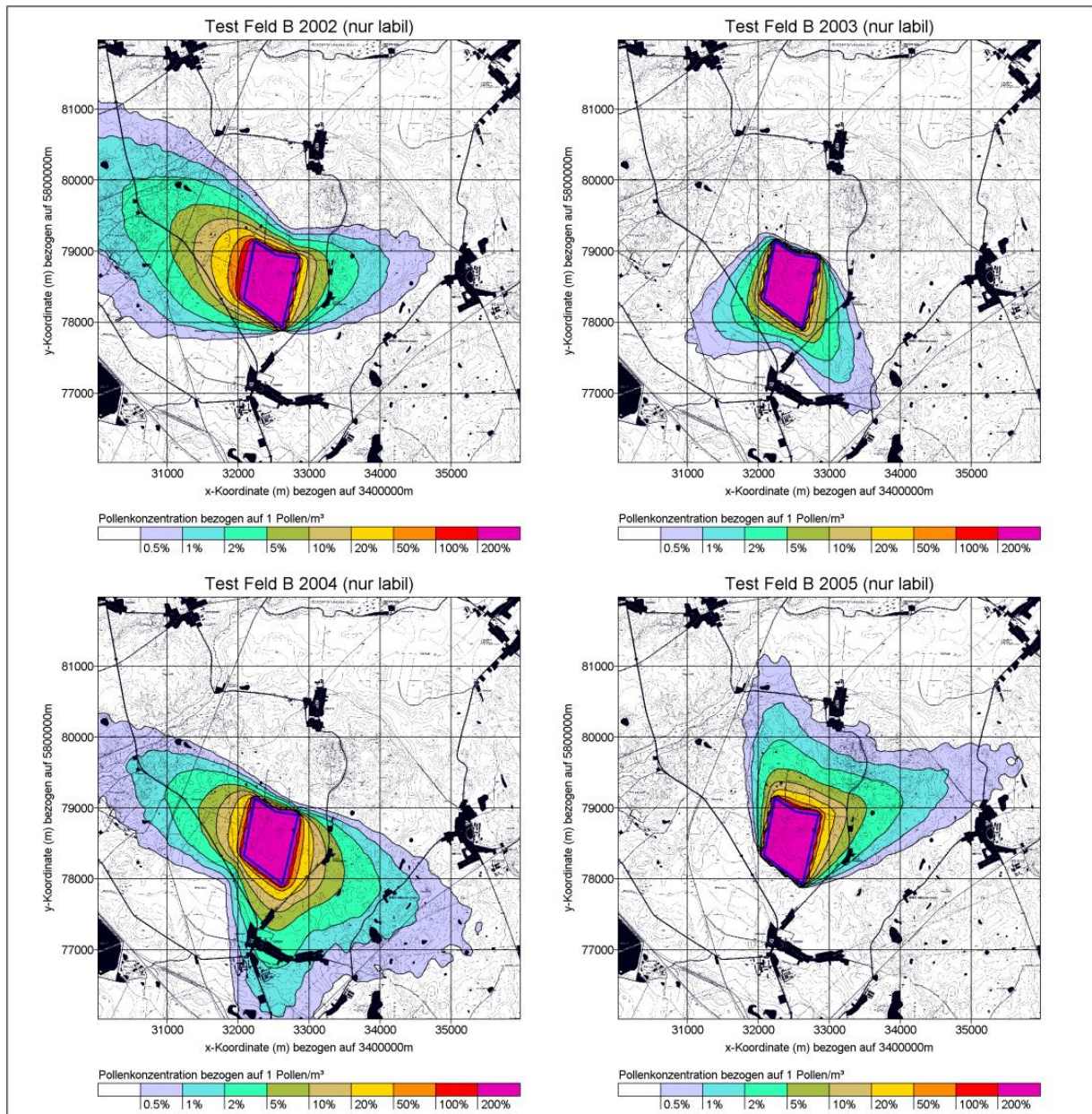


Abb. 21: Konzentrationsverteilung für ein etwa 50 ha großes Maisfeld für verschiedene Jahre. Dargestellt ist der Mittelwert über eine Woche im Sommer (27. Juli - 2. August), wobei eine Emission von 300 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde während der Stunden zwischen 9:00 und 14:00 Uhr mit labiler Schichtung (Klug/Manier-Klassen IV und V) angenommen wurde. (Grafik: Janicke).

3.3 Untersuchungsphase II: Freilandmessungen im Jahr 2010

3.3.1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

Als Ergebnis der Arbeiten in Phase I wurde für die Validierung der Maispollen-Ausbreitungs-Modellierung festgestellt, dass mit den Freilandmessungen in Phase II der Einfluss folgender Faktoren genauer herauszuarbeiten ist:

- Zeitliche und räumliche Variabilität des Maispollenfluges,
- Grenzschichteffekte wie Turbulenzen und thermische Effekte über dem Maisfeld,
- der Einfluss stärkerer Winde,
- Überlagerungseffekte durch benachbarte Felder sowie
- der Einfluss meteorologischer Bedingungen auf die Maispollen-Freisetzung.

Erforderlich waren eine zeitlich hochaufgelöste Erfassung der Meteorologie sowie eine zeitlich und räumlich differenzierte Erfassung von Maispollenemission und -immission. Hierzu wurden in Phase II folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Detaillierte Erfassung der Meteorologie innerhalb und außerhalb des Maisfeldes über Ultraschall-Anemometer;
- Erfassung der zeitlichen Variation des Maispollenfluges innerhalb und außerhalb der Felder über Aktivsammler mit zeitlicher Auflösung (Pollenmonitore);
- Erfassung der räumlichen Verteilung der Maispollendeposition über das standardisierte Verfahren des Passivsammlers PMF analog zu Phase I;
- Berücksichtigung des Maisanbaus im Umfeld von 30 km x 30 km mit phänologischen Beobachtungen zur Maispollenblüte.

Die Messdaten zum Pollenflug wurden zunächst auf den Zusammenhang mit meteorologischen Größen wie Temperatur, Feuchte, Windgeschwindigkeit sowie komplexeren Parametern wie Turbulenz analysiert.

Für die Validierung der Ausbreitungsmodellierung wurden zunächst die meteorologischen Daten einer Detailanalyse unterzogen, worauf sich die Ausbreitungsmodellierung und ein Vergleich mit den Freilandmessungen zum Pollenflug anschlossen.

Die Arbeiten mündeten in Schlussfolgerungen für ergänzende Freilandmessungen in Phase III.

3.3.2 Untersuchungsdesign

In den Modellierungen in Phase I ergab sich, dass der Maisanbau auf Grund von Überlagerungseffekten in einem weiteren Umfeld zu berücksichtigen ist. Deshalb wurden in Zusammenarbeit mit dem LUA die räumliche Lage sämtlicher Maisfelder in einem 30 km x 30 km Umfeld per GIS ermittelt und einbezogen. Abb. 22 zeigt die Verteilung des Maisanbaus in 2010 gemäß Anmeldedaten. Die Angaben wurden im engeren Umfeld (10 km x 10 km) per Kartierung überprüft.

Als zentrales Versuchsfeld wurde der Maisschlag nordwestlich von Kerkow ausgewählt, der bereits Bestandteil des Versuchsfeldes B im Jahr 2009 war und sich nach den Ergebnissen der Phase I als geeignet erwies. Im Versuchsjahr 2010 war das Maisfeld 30 ha groß und somit aus Anbaugründen kleiner als im Vorjahr (siehe Abb. 22 und Abb. 23).

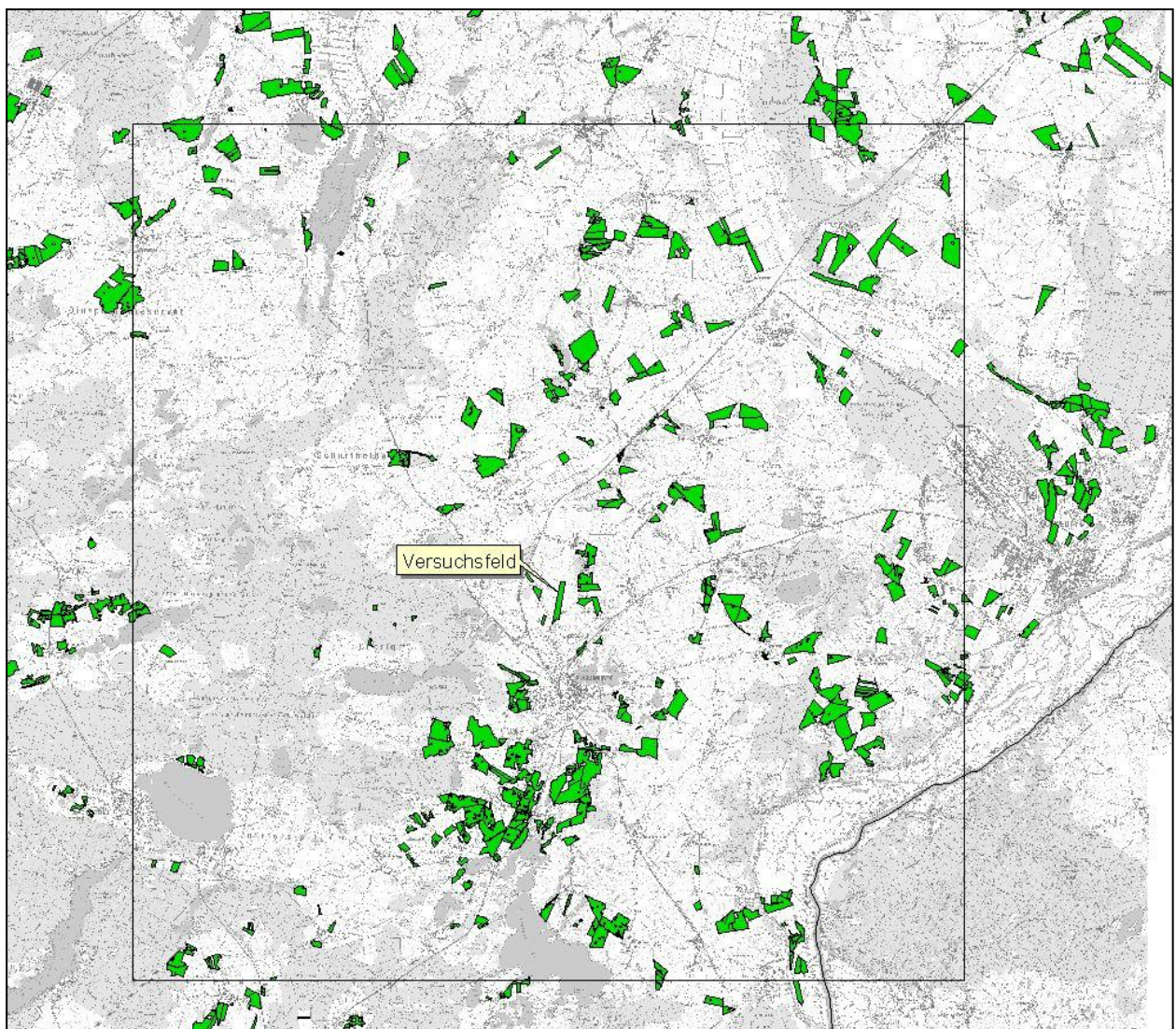


Abb. 22: Lage der Maisfelder im Untersuchungsraum mit Versuchsfeld bei Angermünde (Rahmen: 30 km x 30 km).

Die Variabilität der Maisfelder zu Blühbeginn wurde über phänologische Beobachtungen erfasst. Auf Grund der schlechten Witterungsbedingungen verzögerte sich die Maisentwicklung im Jahr 2010 erheblich. Für das Gros der Maisfelder erfolgte die Aussaat in der ersten Maihälfte. Danach setzte sehr ungünstige Witterung ein, die dazu führte dass sich die Entwicklung der Maispflanzen stark verzögerte und es partiell zu Ausfällen kam. Ein Teil der Felder, so auch unser Versuchsfeld, wurde auf Grund von Getreidevorfruchternte erst Anfang Juni ausgesät. Die Maisblüte in der Region setzte dann witterungsverlaufbedingt ungewöhnlich spät ab ca. 20. Juli ein. Sie begann zunächst sporadisch auf einigen Feldern, setzte verbreitet Ende Juli bei den meisten Feldern ein. Bei den spät gesäten Feldern, wie unserem zentralen Versuchsfeld, begann die Blüte erst Anfang August. Die Freilandarbeiten wurden rechtzeitig vor Einsetzen der ersten Blüte Mitte Juli 2010 eingeleitet und über die Blühperiode bis Ende August fortgesetzt.

In 2010 wurden über den Blühzeitraum folgende, im Überblick aufgelistete Freilandmessungen durchgeführt. Nähere Erläuterungen zu den Standorten und Verfahren werden in den jeweiligen, nachfolgenden Fachkapiteln gegeben:

- Kontinuierliche Erfassung der Pollenkonzentration: Den Blühzeitraum von Mais in 2010 umfassend, wurden zwischen dem 22. Juli und dem 23. August zeitaufgelöste Messungen der Pollenkonzentration an folgenden Positionen durchgeführt:
AN6: Im Versuchsfeld (2 Pollenmonitore (PMO, DWD),
AN2: In 10 m Entfernung vom Rand des Versuchsfeldes (PMO-Gerät),
AN1: In 50 m Entfernung vom Rand des Versuchsfeldes (DWD-Gerät),
AN5: In 180 m Entfernung vom Rand des Versuchsfeldes (Burkard-Gerät).
- Räumliche Verteilung der Pollendeposition: Die Erfassung der räumlichen Verteilung der Pollendeposition erfolgte über den Blühzeitraum mittels 23 PMF-Passivsammlern, die sowohl innerhalb des Versuchsfeldes als auch außerhalb bis in einen Entfernungsbereich von 1.600 m von seinem Rand positioniert wurden.
- Meteorologie: Die meteorologischen Messungen mit einem 3D-Ultraschall-Anemometer wurden im Versuchsfeld (Position AN6) und am Rand des Versuchsfeldes (Position AN1) durchgeführt (Zeitraum 21 Juli 7:30 bis 23 August 7:50 Lokalzeit) und die Messdaten mit einer Zeitauflösung von 10 Minuten gespeichert. Des Weiteren wurden Messdaten der Wetterwarte Angermünde verwendet.

Die Messpositionen sind im Überblick in Abb. 23 dargestellt.

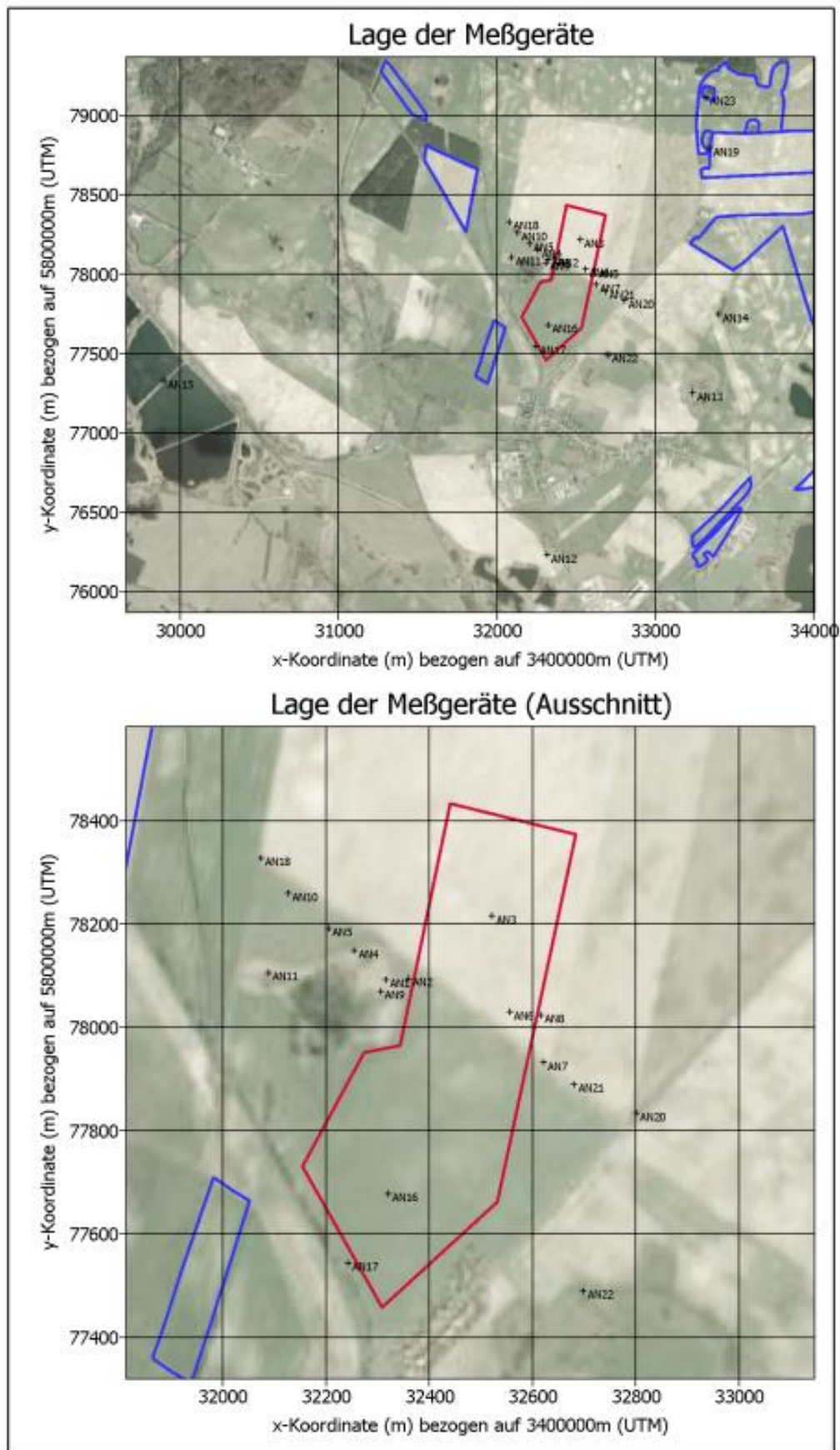


Abb. 23: Messpositionen (Hintergrundbild aus Google Earth, Grafik: Janicke).

3.3.3 Erfassung der zeitlichen Variation des Maispollenfluges

Es wurden fünf volumetrische Pollenfallen (Pollenmonitore) als Aktivsammler zur kontinuierlichen Erfassung der Maispollenkonzentration (Anzahl pro m³) eingesetzt. Diese setzten sich folgendermaßen zusammen:

- Zwei Geräte des Pollenmonitors PMO (Aktivsammler, High-Volume, TIEM technic GbR), der in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ITEM im Rahmen eines österreichischen Forschungsvorhabens speziell für die Erfassung von Pollen in Quellnähe entwickelt worden war und für die Erfassung von Maispollen sowohl außerhalb als auch innerhalb von Maisfeldern geeignet ist (Abb. 25).
- Zwei Geräte des vom DWD entwickelten Pollenmonitors (DWD-Falle, Low-Volume), die ebenfalls zur Erfassung von Maispollen in Quellnähe geeignet sind (Abb. 26).
- Ein Gerät des Pollenmonitors der Firma Burkard (7-Tage Sporen- & Pollenfalle nach HIRST 1952 dargestellt in Abb. 27), das als Standardgerät der Polleninformationsdienste in Deutschland²⁸ und Europa²⁹ für die Erfassung abseits der Felder Verwendung fand.

Bei allen fünf Pollenfallen werden die Aerosolpartikel wie bei dem Standardgerät Burkard-Falle per Impaktion auf einem mit Silikon beschichteten Klebefilm (Silkostrip, Lanzoni) abgeschieden, der sich auf einer drehenden Trommel befindet (2 mm pro Stunde), was eine zeitliche Zuordnung der Pollenkonzentration in der Luft erlaubt. Das Verfahren wurde erstmals von HIRST (1952) beschrieben, ausführliche Erläuterungen finden sich bei BRITISH AEROBIOLOGY FOUNDATION (1995) und WINKLER ET AL. (1992). Ansonsten weisen die Fallen unterschiedliche konstruktive Merkmale auf, die weiter unten beschrieben werden.

Die Lage der Mess-Standorte ist in Abb. 24 dargestellt. Am Standort der meteorologischen Messungen inmitten des Feldes AN6 wurden die beiden Pollenmonitore PMO und DWD in ca. 10 m Abstand voneinander aufgestellt und parallel betrieben. Westlich vom Maisfeld wurden Pollenmonitore in 10 m Entfernung vom Feldrand (AN2, PMO), in 50 m Entfernung an der zweiten meteorologischen Messstation (AN1, DWD) sowie in 180 m Entfernung (AN5, Burkard) installiert.

²⁸ siehe Stitung Deutscher Polleninformationsdienst (PID).

<http://www.pollenstiftung.de/pollenvorhersage/funktionsweise-der-pollenfalle/> (last access: 31.10.2012)

²⁹ siehe European Aerobiology Society. <http://eas.polleninfo.org/> (last access: 31.10.2012). Verschiedene Ausführungen und Hersteller, u.a. Burkard Manufacturing Ltd., Burkard Scientific Ltd., Lanzoni s.r.l..



Abb. 24: Standorte der Pollenmonitore in 2010;
AN6: Im Feld, Pollenmonitor PMO und DWD,
AN2: 10 m vom Feldrand, Pollenmonitor PMO,
AN1: 50 m vom Feldrand, Pollenmonitor DWD,
AN5: 180 m vom Feldrand, Pollenmonitor Burkard.

Die Geräte wurden ab dem 21. Juli installiert und, den Hauptblüh-Zeitraum des Mais umfassend, bis 24. August betrieben, dabei täglich mehrmals kontrolliert und regelmäßig gewartet. Die Erfassung erfolgte außerhalb des Maisfeldes standardisiert in 1,8 m Höhe und im Maisfeld in Bestandshöhe (Fahnenhöhe), wobei täglich nachgeführt wurde. Die Messungen konnten bis auf gewitterbedingte Ausfälle ohne besondere Vorkommnisse erfolgreich durchgeführt werden.

Die Proben aus der DWD-Falle wurden präpariert, indem die Folie in 48 mm lange Tagesabschnitte getrennt und auf Objektträger überführt, mittels Mowiol eingebettet und mit Fuchsin angefärbt wurde. Die mikroskopische Pollenanalyse zur quantitativen Bestimmung der relativ großen Maispollen mit einem Durchmesser von 80-125 μm wurde bei 100-facher Vergrößerung vorgenommen und die Maispollenanzahl abschnittsweise quantifiziert. Für die mikroskopische Pollenanalyse der Proben aus den PMOs und der Burkard-Falle wurden die Fangstreifen auf einen transparenten, 60 cm langen Wechselträger aufgebracht, der mit Stundenskalen versehen war. Die quantitative Analyse der Maispollen er-

folgte direkt, ohne Einbettung und Anfärbung, unter einem hochwertigen Binokular (Nikon SZ1000 Zoom) mit kombiniertem Auf- und Durchlicht bei 100-facher Vergrößerung.³⁰

Die quantitative mikroskopische Analyse der Pollenproben auf Mais erfolgte als Komplett-
auszählung der Präparate in Querbahnen. Gegenüber der Routine des Polleninformations-
dienstes PID (WINKLER ET AL. 1992), in der eine Teilfläche ausgezählt wird, die 1 m³ Tages-
volumen entspricht, wurde hier die gesamte zur Verfügung stehende Fangfläche ausgewer-
tet, um das Potential der Pollenfalle entsprechend einem Tagesvolumen von 14 m³ zu nut-
zen und damit eine Verbesserung der Nachweisgrenze (NWG) pro ausgezähltem Abschnitt
zu erzielen. Bei Tageswerten beträgt in der Standardroutine des PID die absolute NWG
(1 Pollen) 1 n/m³, bei Vollauszählung wie hier 0,07 n/m³.

Bei den Proben aus den DWD-Fallen erfolgte die Auszählung in 3-Stunden Intervallen
(6 mm-Abschnitte) und bei den Proben aus PMO und Burkard in Stundenwerten (2 mm-
Abschnitte). Die gemeinsame Auswertung erfolgte in 3-Stunden Intervallen (6 mm) über
den Gesamtzeitraum (NWG entsprechend 0,6 n/m³). Für ausgewählte Tage mit hohen Wer-
ten wurden auch die Stundenwerte aus den PMO-Fallen ausgewertet (NWG: 1,7 n/m³). Die
Tageswerte beziehen sich hierbei auf den jeweiligen Tag von 0-24 Uhr MEZ (Ortszeit ohne
Sommerzeit).

Für die Pollenmonitore PMO und Burkard lagen umfangreiche Vergleichsmessungen vor,
die am Referenzstandort Ganderkesee in Niedersachsen in Kooperation mit Pollenflug
Nord (R. Wachter) durchgeführt worden waren, so dass die Messwerte aus den beiden Fal-
lentypen über einen Äquivalenzfaktor für Maispollen (1,27) auf den PMO kalibriert wur-
den. Für die DWD-Pollenfalle wurden die Zeitreihen zunächst unabhängig dargestellt. Nach
Ermittlung einer statistisch signifikanten Äquivalenzbeziehung zum PMO (siehe Formel un-
ten: $R^2 = 0,902$, $p < 0,0001$) über die Parallelmessungen am Standort AN6 erfolgte dann
ebenfalls eine Kalibrierung auf den PMO für eine gemeinsame Darstellung und Auswertung
der Ergebnisse.

Äquivalenzbeziehung Pollenkonzentration DWD-Falle auf PMO:

$$\log_{10} C_{PMO} = 1,29 \cdot \log_{10} C_{DWD} - 0,362 \quad [n/m^3] \quad (19)$$

Hierbei weist die DWD-Falle im oberen Dosisbereich über 100 n/m³ eine etwas geringere
Sensitivität auf (niedrigere Werte) und im unteren Wertebereich zur Nachweisgrenze hin
höhere Werte als der PMO. Für die Auswertung und Darstellung der Pollenkonzentrations-
daten wurden die Werte im Hinblick auf Normalverteilung log-transformiert. Für Werte

³⁰ Auf Anfärbung und Einbettung wurde verzichtet, da die Fangstreifen nach der Zählung für weitergehende
molekularbiologische Analysen zur Verfügung stehen sollten und eine sichere Identifikation der Maispollen
auf Grund ihrer Größe, Form und sonstigen Merkmale eindeutig möglich war.

unter der NWG wurde nach Einsetzen des Pollenfluges ein $2/3$ -Wert der jeweiligen NWG angenommen. Die Auswertung und Darstellung der Zeitreihen erfolgte in Excel mit Verwendung des Statistiktools XLSTAT (Addinsoft).



Abb. 25: Pollenmonitor PMO von TIEM-technic GbR (hier am Standort AN2 in 190 m Abstand vom Maisfeldrand): High-Volume-Aktivgerät (1.000 l/min) mit Rundum-Einlass und elektronisch geregelter Impaktionseinheit (Sporewatch, Burkard Scientific Ltd). Das Gerät ist zur Erfassung von Maispollen auch im Nahbereich von Quellen geeignet. Abscheidung über Impaktor (14 mm x 2 mm) auf Trommel mit Klebefilm. Der entnommene Teilvolumenstrom beträgt 10 l/min, die Umdrehungszeit der Trommel ist einstellbar von 1 Minute bis 7 Tage (Einstellung 7 Tage, 2 mm/h). Die Falle benötigt 230 V-Anschluss, Leistung ca. 300 W. Einlasshöhe einstellbar: Außerhalb der Felder in 1,8 m Höhe wie Passivsammler Sigma-2/PMF (links, AN2), innerhalb des Maisfeldes erfolgte eine Nachführung in Höhe der Quelle der Pollenemission (Fahnen-/Bestandshöhe). (Bilder: Hofmann)



Abb. 26: Pollenmonitor des DWD. Aktivgerät mit Rundum-Einlass und Impaktion auf Trommel mit Klebefilm, ebenfalls für die Erfassung von Maispollen auch im Nahbereich ausgelegt. Der von einem Lüfter erzeugte Volumenstrom beträgt 10 l/min (Low-Volume) analog zur Hirst-Falle (Burkard, Lanzoni), die Umdrehungszeit der Trommel 7 Tage (2 mm/h), die Schlitzweite des Impaktors 4 x 16 mm. Stromanschluss: 230 V. Die handliche Falle kann vom Verbrauch her auch über 12 V-Batterie bzw. über Solarpanel mit Akku betrieben werden. (Bild: Hofmann)



Abb. 27: Die klassische Burkard-Falle (Burkard Manufacturing Ltd., Hirst-Prinzip) am Standort AN5 in 180 m Entfernung vom Feldrand. Der Volumenstrom beträgt 10 l/min, die Umdrehungszeit der Trommel ist mechanisch eingestellt auf 7 Tage (2 mm/h). Stromanschluss: 230 V (klassisch) oder 12 V (Typ II) über Batterie/Solarpanel/Netzteil. Der horizontal gerichtete Einlass (14 mm x 2 mm) wird über eine Windfahne in den Wind ausgerichtet, die Einlasshöhe beträgt hier 1,8 m. Der Einsatz des Gerätes zur Erfassung von Maispollen ist auf Grund der Gerätekonstruktion nur abseits der Felder sinnvoll. (Bild: Hofmann)

Ergebnisse:

In Abb. 28 sind die Ergebnisse zum Verlauf des Maispollenfluges als mittlere Tageswerte der Maispollenkonzentration (y-Achse) über den Hauptblüh-Zeitraum (x-Achse) für die Pollenmonitore dargestellt. Die Werte wurden für eine gemeinsame Auswertung auf den PMO kalibriert und für einen konsistenten Vergleich der Zeitreihen über den gesamten Wertebereich logarithmisch dargestellt.

Aus den Graphen geht hervor, dass die Maispollenblüte in der Region um den 23./24. Juli auf zunächst niedrigem Niveau begann, die Hauptblüte am Versuchsfeld dann Anfang August einsetzte, um den 10.-13. August ihren Höhepunkt erreichte und sich bis Ende August erstreckte.

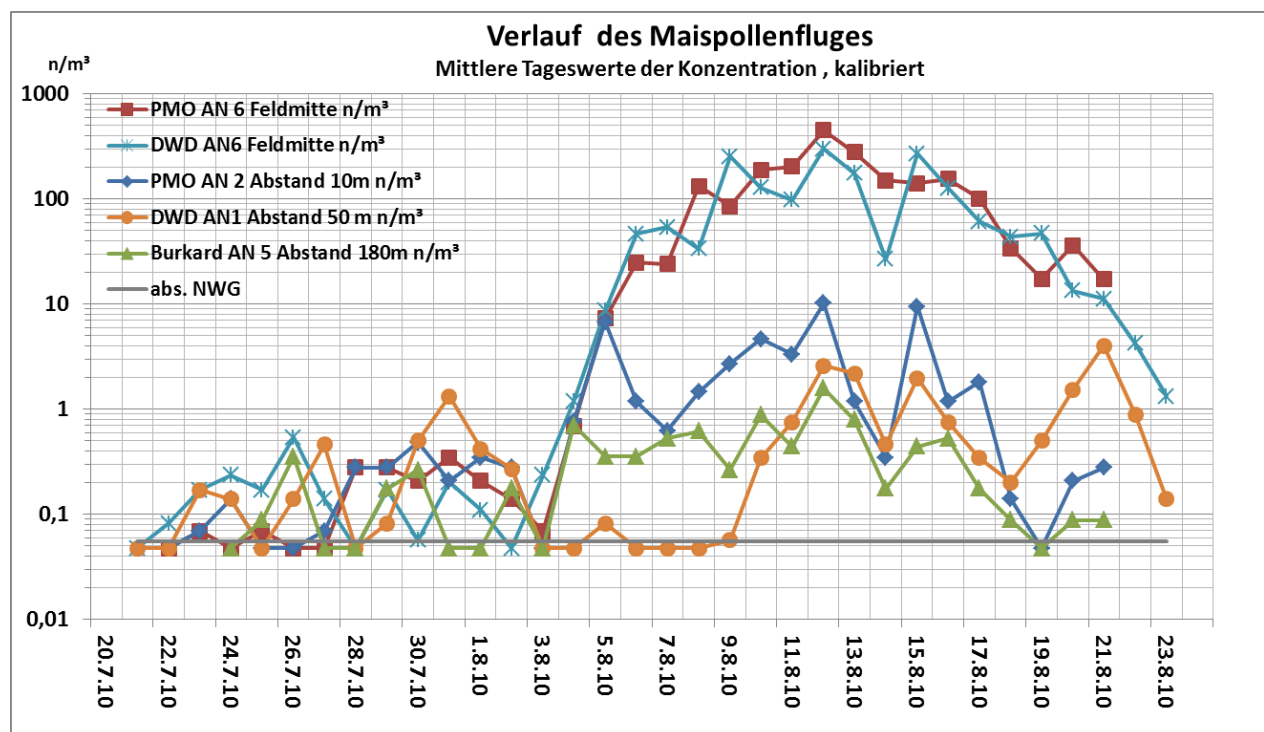


Abb. 28: Ergebnisse zum zeitlichen Verlauf des Maispollenfluges. Mittlere Tageswerte der Maispollenkonzentration. Pollenmonitore PMO, DWD, Burkard. Werte kalibriert auf PMO.
(Grafik: Hofmann)

Die beiden Pollenfallen inmitten des Feldes (rot, blau) zeigen den Verlauf der Pollenimmission im Versuchsfeld in Bestandshöhe an. Die Messungen der beiden Fallentypen PMO und DWD weisen gute Übereinstimmung auf. Da die Messpunkte von allen Seiten von Maispflanzen umgeben sind, geben die Messungen den relativen Verlauf der Pollenschütte (Emission) wieder. Beide Messinstrumente zeigen einen vergleichbaren Verlauf, wobei im Detail Unterschiede auftreten, die u.a. den Einfluss der unmittelbar benachbarten Pflanzen und deren individueller Streuung im Blühverlauf anzeigen.

Die Immissionsmessungen mit den drei Pollenfallen außerhalb des Feldes stellen Punktmessungen dar, die abhängig von der relativen Lage des Messortes zum Maisfeld und der jeweiligen Windrichtung sind. Alle drei liegen westlich vom Maisfeldrand, entgegen der Hauptwindrichtung, in unterschiedlicher Detaillage und Entfernung. Die Graphen dieser Fallen verlaufen auf unterschiedlichem Niveau, wobei mit zunehmender Entfernung die Maispollenkonzentrationen abnehmen. Entsprechend der Windrichtung treten Unterschiede im ansonsten synchronen Verlauf der Kurven auf. Bei AN1 in 50 m Entfernung befindet sich zwischen Feld und Messort eine Hecke, so dass mögliche Abschattungseffekte bei direkter Ostwindlage zu berücksichtigen sind, bei mehr Nordost und mehr Südost hingegen besteht freie Anströmung.

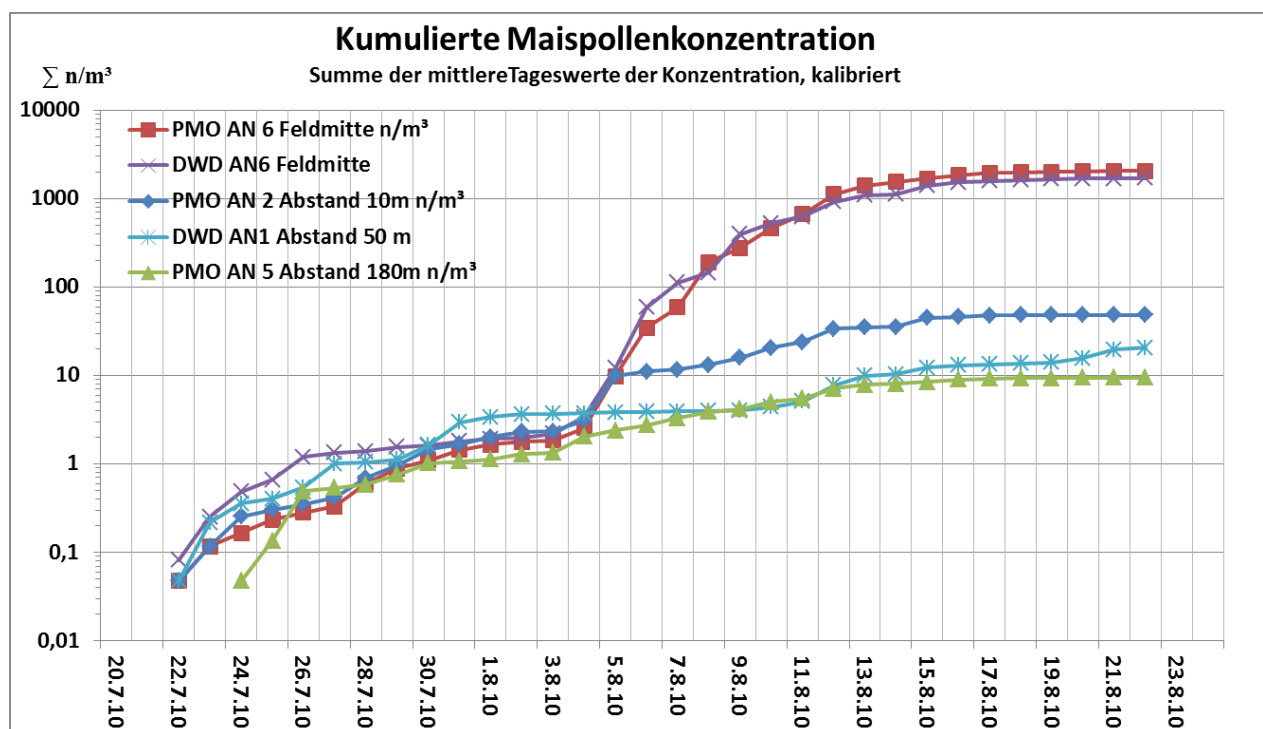


Abb. 29: Kumulierte Maispollenkonzentration. Basis: mittlere Tageswerte. Pollenmonitore PMO, DWD, Burkard. Werte kalibriert auf PMO. (Grafik: Hofmann)

Für den Vergleich der Trends sind in Abb. 29 die Verläufe der kumulierten Tageswerte dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass die Trends aller Fallen bis zum 4. August gleich verlaufen und damit einen regionalen Trend der Maisblüte anzeigen. Ab dem 5. August setzen sich die Graphen für die Maispollenimmission der beiden Stationen im Feld davon ab, sie steigen stärker an und markieren damit das Einsetzen der Hauptblüte auf dem Versuchsfeld. Am 5. August ist am 10 m westlich vom Feldrand gelegenen Standort AN2 der erste steile Anstieg zu beobachten, an den weiter westlich gelegenen Standorten AN1 (50 m) und AN5 (180 m) verläuft der Anstieg erwartungsgemäß auf Grund der Entfernung schwächer. Die Endpunkte der Graphen zeigen die kumulierte Maispollenkonzentration über den Blühzeitraum an (Jahreswert). In Feldmitte wurden kumulierte Jahreskonzentra-

tionen für die Pollen von 2.049 (PMO) und 1.699 (DWD) gemessen, in westlicher Richtung vom Feldrand (entgegen der Hauptwindrichtung) in 10 m Entfernung ein Wert von 48,6, in 50 m Abstand ein Wert von 20,6 und in 180 m Entfernung ein Wert von 9,5.

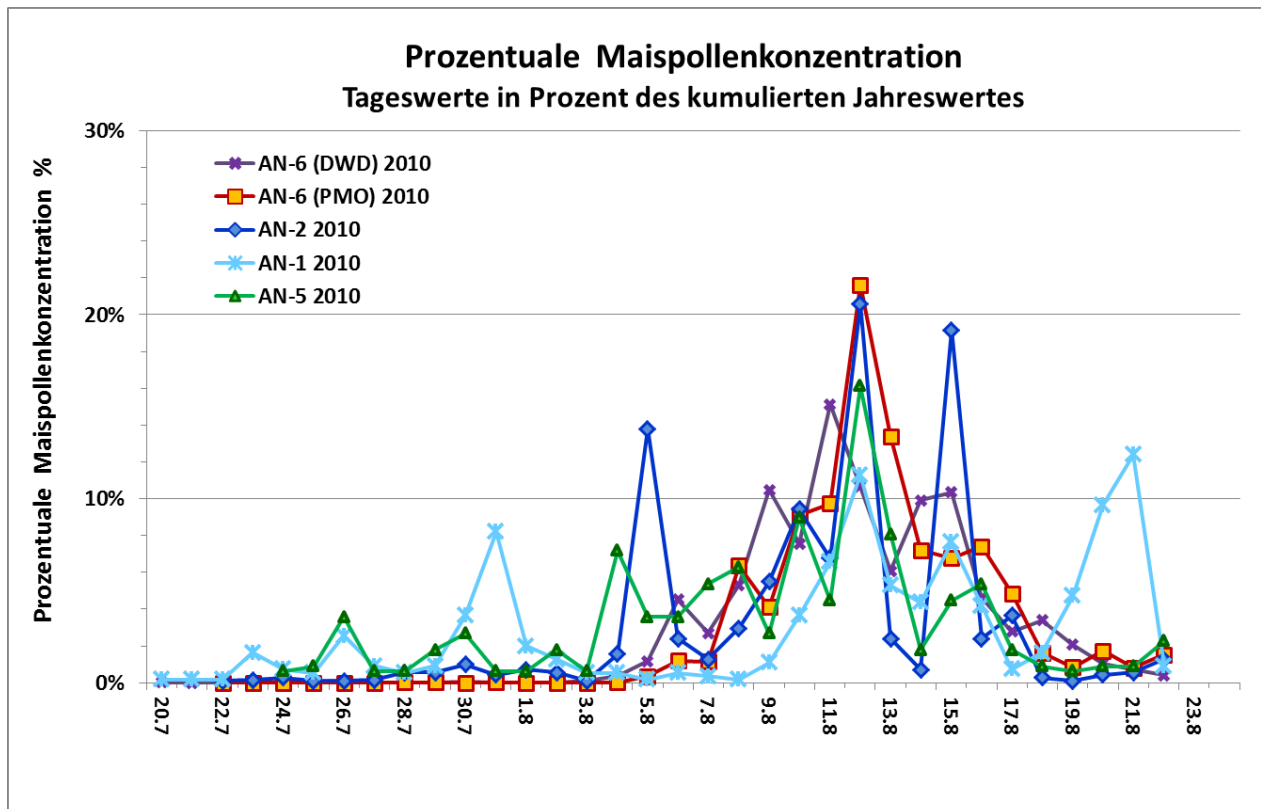


Abb. 30: Verlauf der prozentualen Maispollenkonzentration. Tageswerte in Prozent des kumulierten Jahreswertes. Pollenmonitore PMO, DWD, Burkard. (Grafik: Hofmann)

In Abb. 30 sind die Tageswerte der prozentualen Maispollenkonzentration, gemessen an dem über den Blühzeitraum insgesamt aufgelaufenen Anzahl-Konzentrationswert, dargestellt. Als Hauptblüh-Zeitraum von Mais mit Anteilen über 5 % der Jahressumme tritt der Zeitraum vom 4. bis 17. August hervor. Die Hauptblüte im Versuchsfeld konzentrierte sich in 2010 hierbei auf die Tage vom 8. bis 16. August mit Maximum am 12. August.

Der Vergleich mit dem langjährigen Mittel am Referenzstandort ländlicher Raum in Ganderkesee über 14 Jahre (1994-2007, aus HOFMANN ET AL. 2009a) in Abb. 31 zeigt die außergewöhnlich späte und kompakte Entwicklung der Maisblüte im Jahr 2010 an.

Bei den Messpunkten außerhalb und westlich des Feldes treten folgende Tageswerte im Zeitraum besonders hervor:

AN2 (10 m) 5.8., 15.8., 10.8., 12.8., etwas vermindert 9.8., 11.8.

AN5 (180 m) 4.8.-8.8., 10.8., 12.8., 13.8., 15.8., 16.8.

AN1 (50 m) 31.7./1.8., 12.8., 21.8., 22.8., vermindert 11.8., 13.8., 14.8., 15.8., 20.8.

An diesen Tagen strich die Windfahne vom östlich gelegenen Feld über die Mess-Standorte, so dass dort entsprechend hohe Maispollenkonzentrationen feststellbar waren.

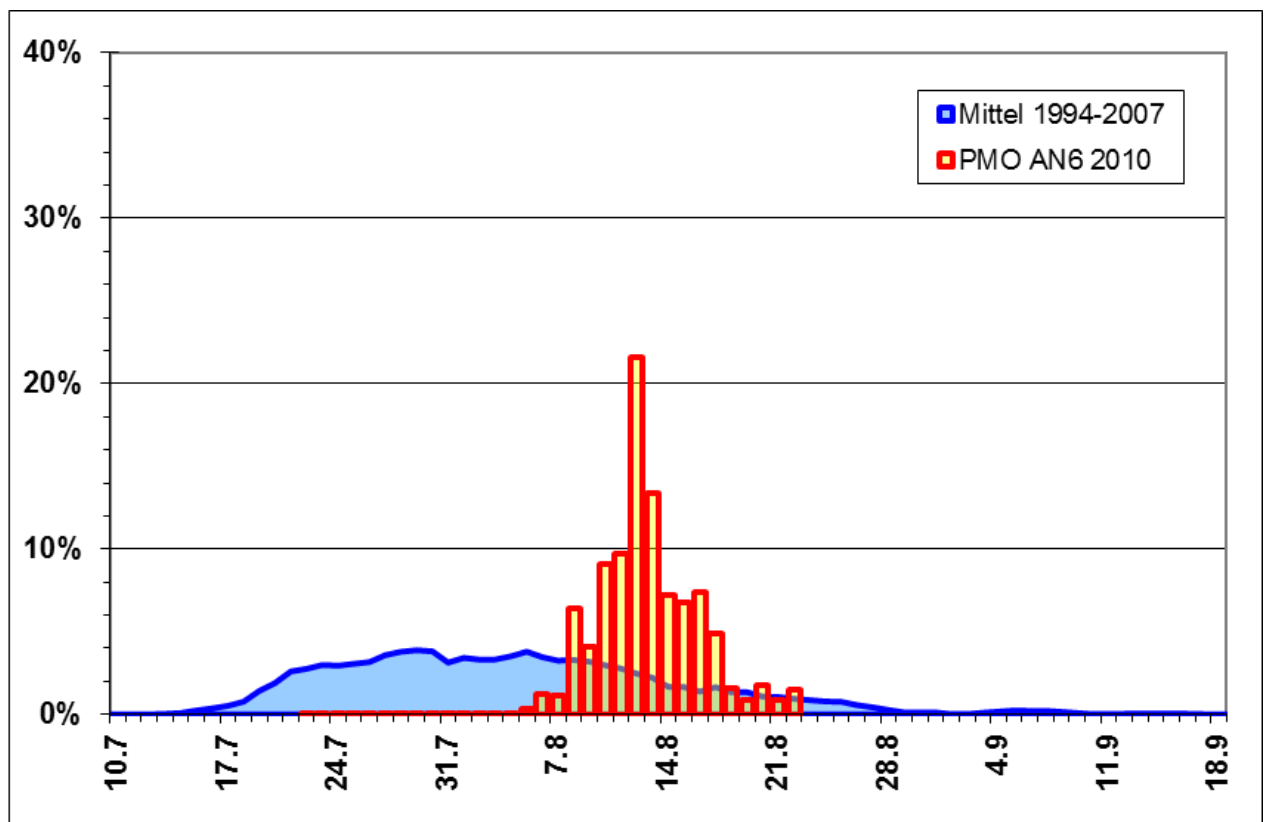


Abb. 31: Vergleich der Tageswerte der prozentualen Maispollenkonzentration am Standort AN6 (PMO, Feldmitte) in Angermünde mit dem langjährigem Mittel am Referenzstandort ländlicher Raum in Ganderkesee (1994-2007; Daten: Wachter aus HOFMANN ET AL. 2009a). (Grafik: Hofmann)

3.3.4 Erfassung der räumlichen Verteilung der Maispollendeposition

Die Erfassung der räumlichen Verteilung der Maispollendeposition in der Mess-Periode 2010 erfolgte wie in der vorangegangenen Phase in 2009 über das nach VDI-Richtlinie 4330-3 (2007) standardisierte Verfahren des Passivsammlers Pollenmassenfilter PMF (siehe Kap. 3.2.3). Für die Versuche in 2010 wurden 23 PMF vom 21. Juli beginnend bis 22. August, den Hauptblüh-Zeitraum von Mais umfassend, exponiert.

Die Lage der Standorte geht aus der Übersichtskarte in Abb. 32 sowie für das Versuchsfeld und dessen nähere Umgebung aus Abb. 33 hervor. Das Versuchsdesign war Folgendes:

- Innerhalb des Maisfeldes wurden drei Sammler installiert, einer am meteorologischen Messort AN6 inmitten des Feldes sowie jeweils einer im nördlichen und südlichen Teil.

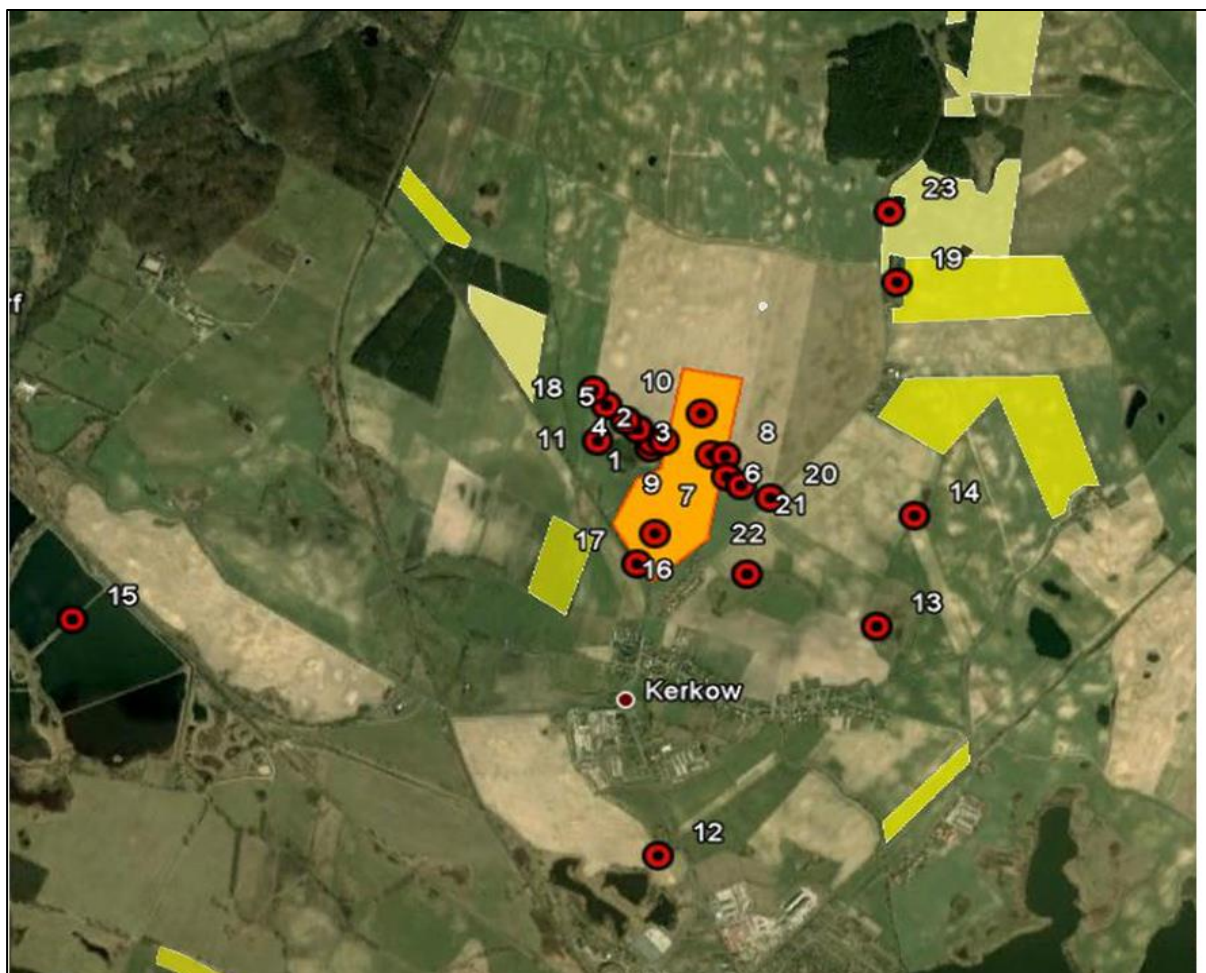


Abb. 32: Standortübersicht der 23 Pollen-Massenfilter PMF zur Messung der räumlichen Verteilung der Maispollendeposition in 2010; orange = Maisversuchsfeld, gelb = weitere Maisfelder. (Hintergrundbild aus Google-Earth)

- 20 Sammler wurden außerhalb des Feldes³¹ in verschiedenen Richtungen und Entfernungen (Feldrand bis zu 1.600 m) positioniert, so dass die Entfernungsabhängigkeit, der Einfluss anderer Maisfelder sowie der Eintrag in Gewässer und Feuchtgebiete geprüft werden konnten.
- Hierbei wurden die Standorte für die meteorologischen Messungen sowie für die kontinuierliche Erfassung der Maispollenkonzentration und gewässerbezogene Standorte in Feuchtgebieten, Gräben, Söllen und den Blumberger Teichen berücksichtigt.

Die Erfassung erfolgte ohne Zwischenfälle und konnte für alle Standorte erfolgreich abgeschlossen werden.

Das Verfahren der Pollensammlung mit dem PMF wurde bereits in Phase I eingesetzt und ist in Kap. 3.2.3 beschrieben.



Abb. 33: Ausschnittsdarstellung der Standorte der PMF-Pollensammler zur Messung der räumlichen Verteilung der Maispollendeposition 2010 für das Versuchsfeld mit näherer Umgebung; orange = Maisversuchsfeld, gelb = weitere Maisfelder.

³¹ Gemäß den Ergebnissen der Ausbreitungsmodellierung in Phase I.

Ergebnisse

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur räumlichen Verteilung der Maispollendeposition in Phase II mit dem Passivsammler PMF über die Maispollenblüte in 2010 an 23 Standorten finden sich in Tab. 2. Sie sind in Abb. 34 für den gesamten Untersuchungsbe- reich und in Abb. 35 für das Maisfeld und dessen nähere Umgebung dargestellt.

Die Maxima der Maispollendeposition wurden erwartungsgemäß an den drei Standorten im Maisfeld mit Werten von 1.990.000 n/m² bis 3.940.000 Maispollen/m² gemessen. Der höchste Wert außerhalb des Feldes wurde in 5 m Abstand vom östlichen Feldrand erfasst mit 1.920.000 n/m² (AN8). Den niedrigsten Wert wies mit 4.290 n/m² der am weitesten entfernte Standort AN15 inmitten der Blumberger Teiche auf.

Tab. 2: Ergebnisse der Maispollendepositionsmessungen mit dem PMF in Phase II (2010).

* Die Abstandsermittlung erfolgte über die per GPS eingemessenen Standorte, im Nahbereich bis 20 m wurde per Maßband gemessen. Die Werte wurden der Genauigkeit entsprechend gerundet.

Messort		Rechtswert	Hochwert	Beginn	Ende	Entfernung nächstes Maisfeld*	Maispollen- deposition
						[m]	[n/m ²]
AN	1	5432421	5879998	21.7.10	22.8.10	50	75.000
AN	2	5432468	5880000	21.7.10	22.8.10	10	221.000
AN	3	5432627	5880121	21.7.10	22.8.10	Feld Nord	1.990.000
AN	4	5432360	5880054	21.7.10	22.8.10	120	28.600
AN	5	5432310	5880097	22.7.10	22.8.10	180	42.900
AN	6	5432661	5879935	22.7.10	22.8.10	Feld Zentral	3.590.000
AN	7	5432727	5879837	22.7.10	22.8.10	20	236.000
AN	8	5432721	5879929	22.7.10	22.8.10	5	1.920.000
AN	9	5432411	5879975	22.7.10	22.8.10	60	179.000
AN	10	5432232	5880165	22.7.10	22.8.10	280	14.300
AN	11	5432194	5880011	22.7.10	22.8.10	240	21.400
AN	12	5432418	5878133	21.7.10	22.8.10	950	12.900
AN	13	5433339	5879154	22.7.10	22.8.10	650	10.000
AN	14	5433502	5879650	22.7.10	22.8.10	300	10.000
AN	15	5429998	5879232	22.7.10	22.8.10	1600	4.290
AN	16	5432426	5879583	22.7.10	22.8.10	Feld Süd	3.940.000
AN	17	5432348	5879449	22.7.10	22.8.10	10	186.000
AN	18	5432179	5880233	22.7.10	22.8.10	240	15.700
AN	19	5433445	5880697	22.7.10	22.8.10	12	147.000
AN	20	5432906	5879739	22.7.10	22.8.10	220	32.100
AN	21	5432786	5879795	22.7.10	22.8.10	90	131.000
AN	22	5432804	5879395	24.7.10	22.8.10	230	83.000
AN	23	5433420	5881018	24.7.10	22.8.10	2	514.000

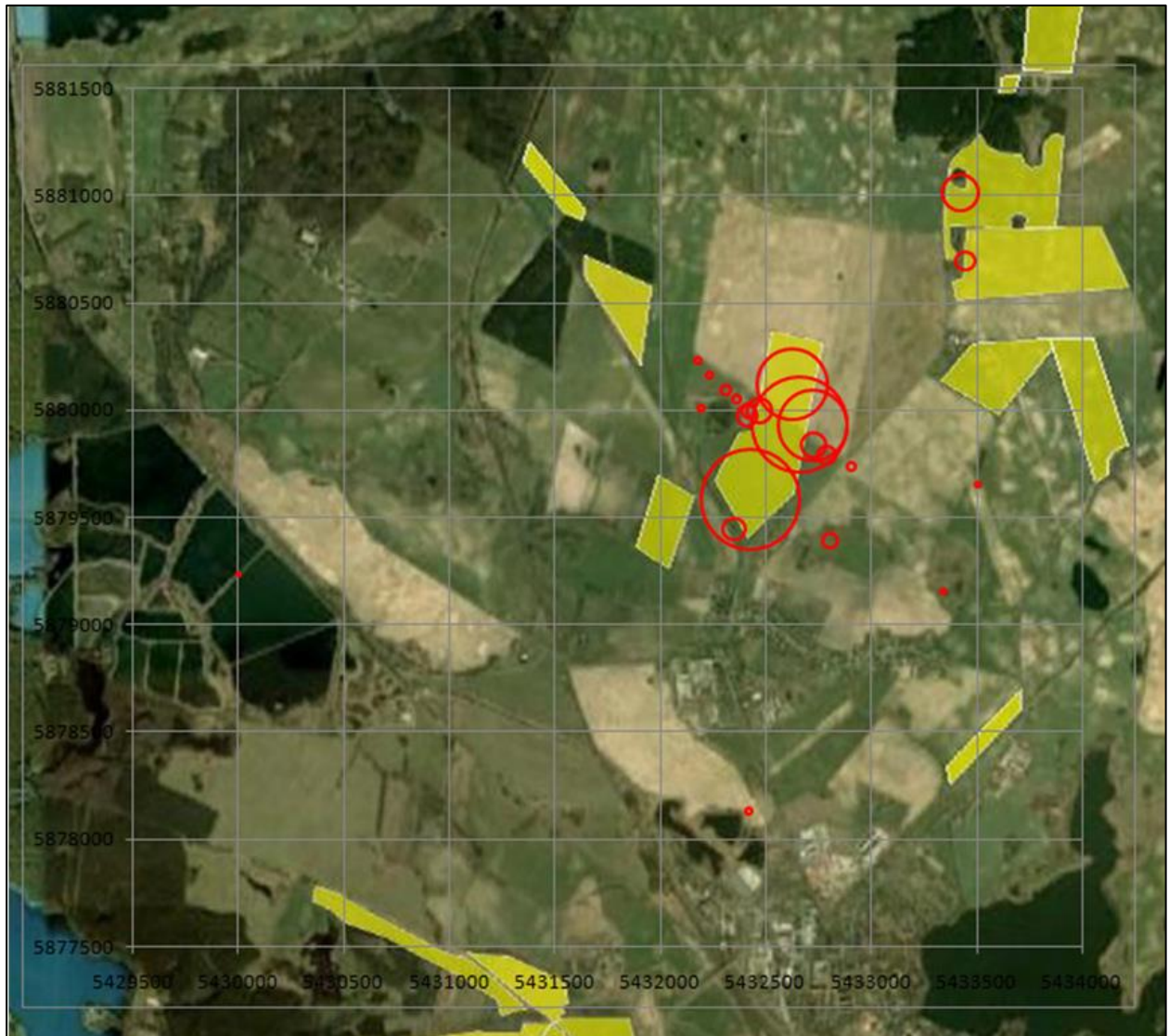


Abb. 34: Ergebnisse der PMF-Messungen zur räumlichen Verteilung der Maispollendeposition in 2010 über den Blühzeitraum. Die Größe der Kreisflächen symbolisiert die Höhe der Maispollendeposition. (Hintergrundbild aus Google-Earth)
Max: 3.940.000 Maispollen/m² (AN16, im Feld),
Min: 4.290 Maispollen/m² (AN15, Blumberger Teiche),
orange = Maisversuchsfeld,
gelb = weitere Maisfelder,
Raster: 500 m x 500 m.

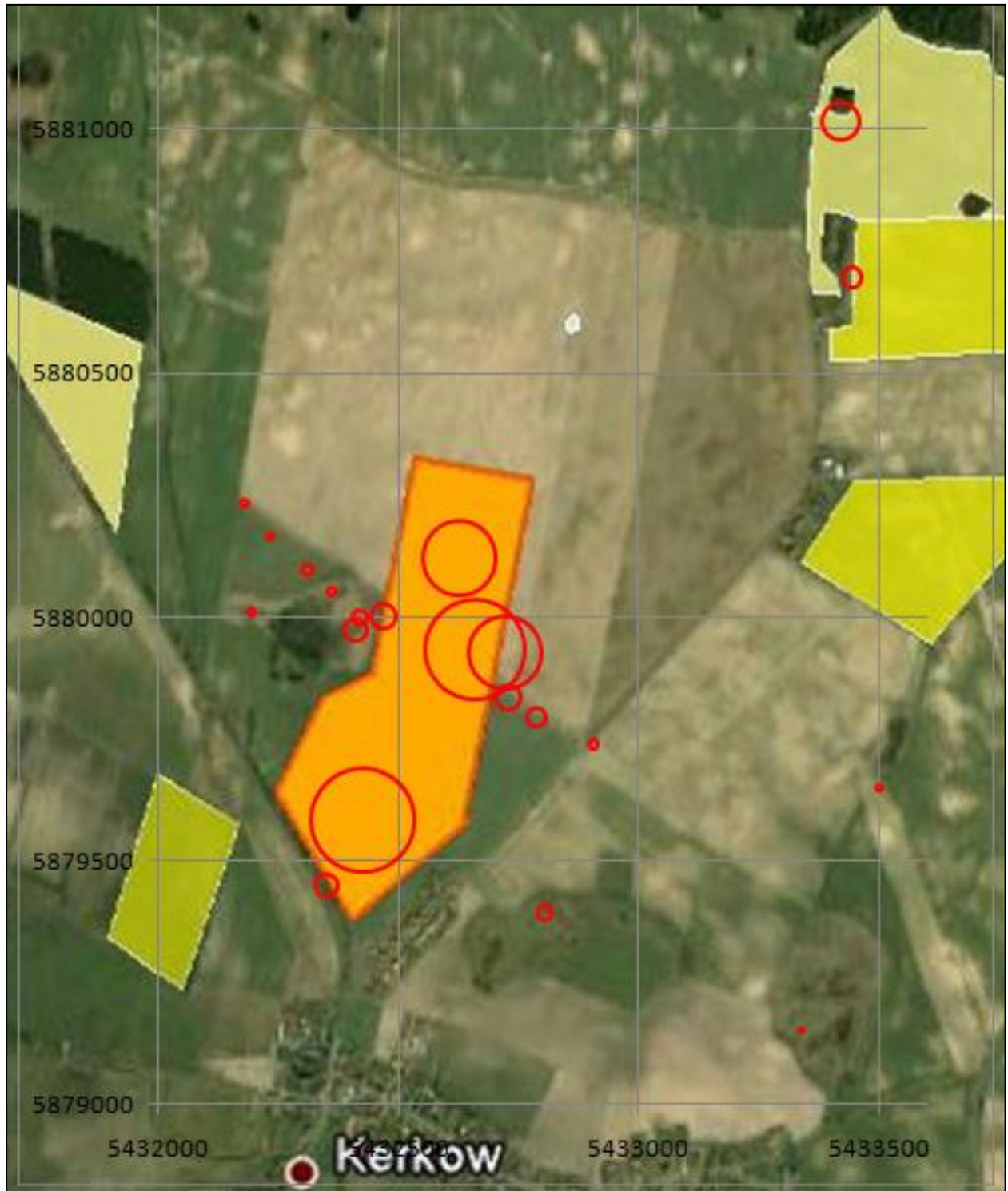


Abb. 35: Ergebnisse der PMF-Messungen zur räumlichen Verteilung der Maispollendeposition über den Blühzeitraum in 2010. Ausschnitt Maisversuchsfeld und nähere Umgebung.
(Hintergrundbild aus Google-Earth)

Raster: 500 m x 500 m

orange: Maisversuchsfeld, gelb: weitere Maisfelder

Die Größe der Kreisflächen symbolisiert die Höhe der Maispollendeposition

Max: 3.940.000 Maispollen/m² (AN16, im Feld)

Min: 10.000 Maispollen/m² (südöstliche Standorte AN12, AN13).

In Abb. 37 werden die Ergebnisse der PMF-Messungen zur Maispollendeposition aus 2010 und 2009 in Relation zur Entfernung vom nächsten Maisfeld dargestellt und den Referenzmessungen gegenübergestellt, die seit 2001 an verschiedenen Standorten über die BRD, die Schweiz und Belgien verteilt gewonnen wurden (siehe Abb. 36). Daraus geht hervor, dass sich die Messwerte aus der Erhebung 2010 in den 95 %-Vertrauensbereich des langjährig ermittelten Regressionszusammenhanges einfügen. Vergleicht man die Ergebnisse aus 2010 mit denen aus 2009, so fallen die Werte von 2010 sowohl innerhalb des Feldes als auch außerhalb etwas niedriger aus. Dies geht mit der phänotypischen Beobachtung einer witterungsbedingten, suboptimalen Maisentwicklung im Frühsommer 2010 einher.

Die Auswertung der Messergebnisse unter Berücksichtigung der Lage und der Orientierung des Messortes zum nächsten Maisfeld, des Windfeldes sowie von Überlagerungseffekten der umgebenden Maisfelder erfolgt im Abschnitt zur Ausbreitungsmodellierung in Kap. 3.3.7.

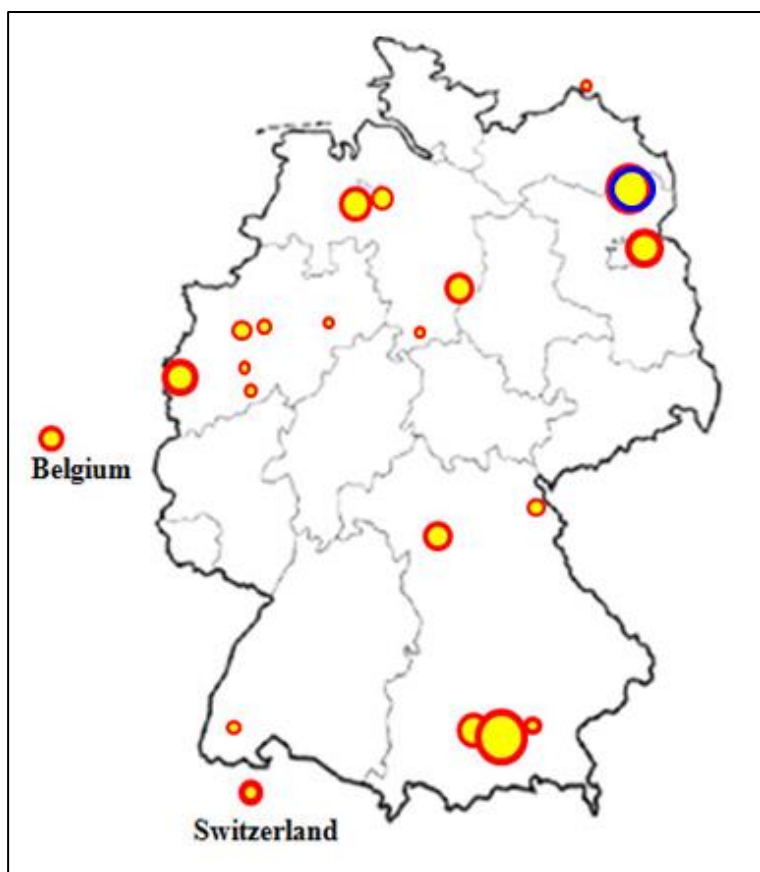


Abb. 36: Referenzstandorte der PMF-Messungen 2001-2010 zur Maispollendeposition in Relation zur Entfernung vom nächsten Maisfeld. Die Größe der Kreise entspricht der Anzahl an Messdaten. (Grafik: Hofmann)

Blauer Kreis: Messungen Angermünde 2009 und 2010.

Datenbasis 2001-2006 für statistische Auswertung: N = 122 (HOFMANN 2007);

Erweiterter Datenpool bis 2010: N = 228.

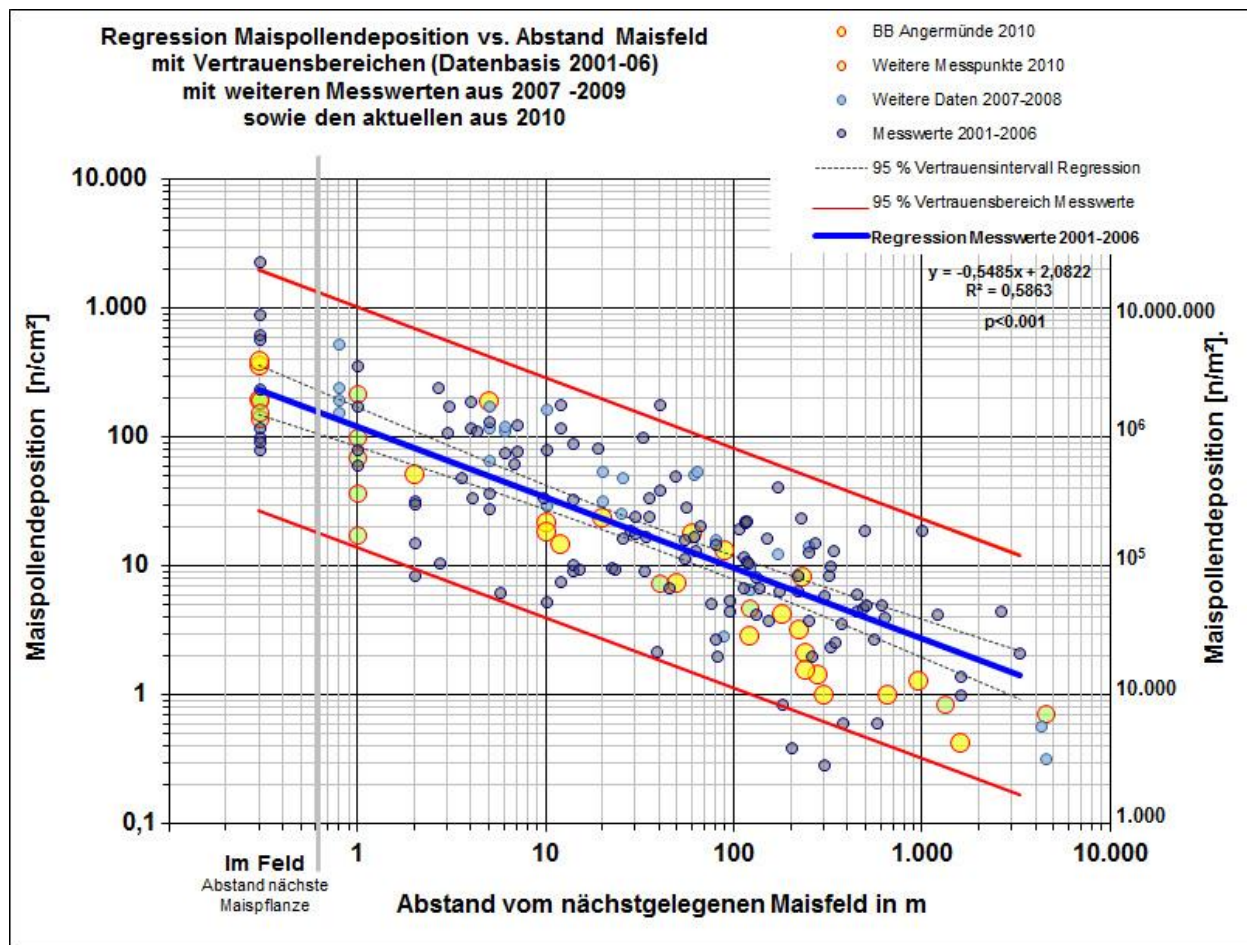


Abb. 37: Ergebnisse der PMF-Messungen zur Maispollendeposition in Relation zur Entfernung vom nächsten Maisfeld, Vergleich mit Regressionszusammenhang aus Referenzerhebungen 2001-2006 sowie weiteren Referenzmessungen bis 2010. (Grafik: Hofmann)
 Datenbasis 2001-2006 für statistische Auswertung: N = 122 (HOFMANN 2007);
 Erweiterter Datenpool bis 2010: N = 228.

3.3.5 Meteorologische Messungen

Die meteorologischen Messungen oblagen überwiegend dem Deutschen Wetterdienst (DWD). Eingebunden waren die am Ortsrand von Angermünde gelegene Wetterwarte des DWD sowie das Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung (ZAMF, DWD-Braunschweig). Seitens des ZAMF fanden begleitende Messungen des unmittelbaren meteorologischen Umfeldes statt, da dieses die Pollenemission und -immission direkt beeinflusst. Dafür wurden zwei mobile Messstationen installiert (siehe Abb. 38). Eine befand sich zentral auf dem Maisfeld (Quellen-Standort AN6 in Abb. 39) und eine zweite 50 m westlich des Feldes auf einer angrenzenden, feuchtgründigen Grasfläche (Senken-Standort AN1 in Abb. 40).

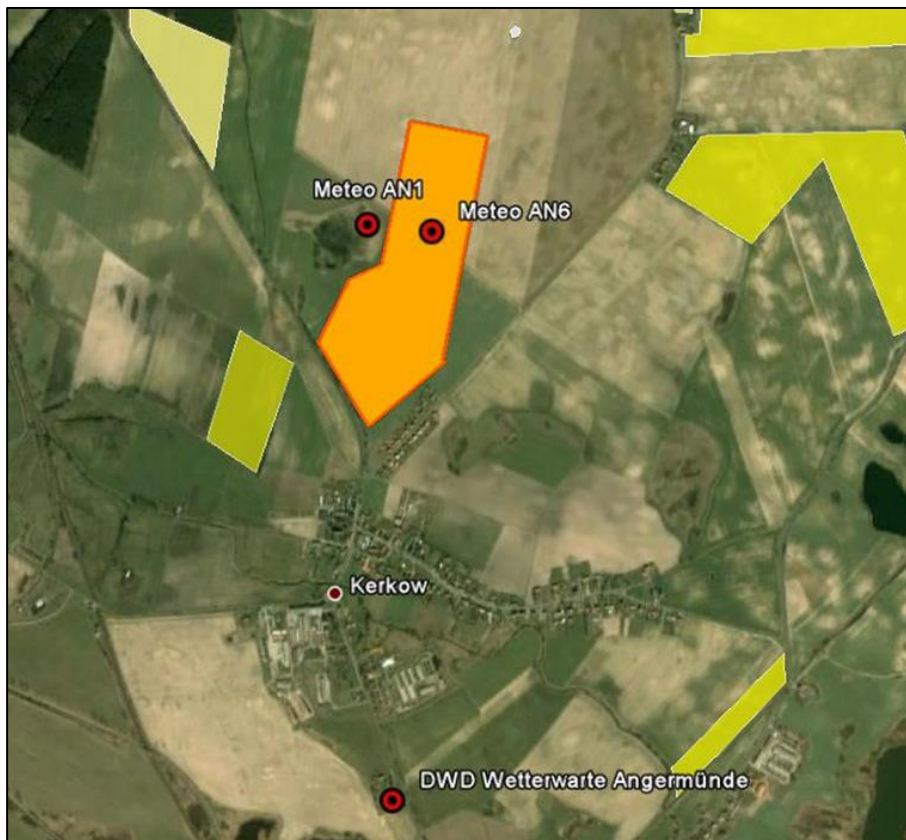


Abb. 38: Lage der Messstationen zur Meteorologie innerhalb und außerhalb des Maisversuchsfeldes sowie der DWD Wetterwarte Angermünde. (Hintergrundbild aus Google-Earth, Grafik: Wittich)
Orange = zentrales Maisversuchsfeld;
gelb = weitere Maisfelder;
AN6 = Mobile Messstation mit USA inmitten des Maisfeldes;
AN1 = Mobile Messstation mit USA in 50 m Entfernung vom Maisfeldrand;
DWD Wetterwarte Angermünde, ca. 2 km vom Maisfeld entfernt.



Abb. 39: Messplatz AN6 inmitten des Maisfeldes zum Zeitpunkt der Installation vor der Maisblüte Mitte Juli. Messstation mit 3D-Ultraschall-Anemometer (USA) an der Spitze (6,85 m), 2-D USA, Feuchte- und Temperaturmesseinheit, Datenlogger. (Grafik: Wittich)



Abb. 40: Messplatz AN1 außerhalb des Feldes 50 m westlich vom Maisfeldrand im Feuchtgebiet. Messstation mit 3D-Ultraschall-Anemometer (USA) an der Spitze (6,85 m), 2-D USA, Feuchte- und Temperaturmesseinheit, Datenlogger. (Grafik: Wittich)



Abb. 41: Messeinrichtungen zur Meteorologie am Mast. 3D-Ultraschall-Anemometer (USA) an der Spitze (6,85 m), 2-D USA, Feuchte- und Temperaturmesseinheit (5,65 m). (Grafik: Wittich)

Abb. 41 zeigt die Mastspitze mit der Anordnung der Messinstrumente. Zur Erfassung des zwei- und dreidimensionalen Strömungsfeldes und der Turbulenzstruktur dienten Ultraschall-Anemometer (USA). Diese Sensoren können den Wind trägheitsfrei und damit sehr genau mittels (nicht-hörbarer) Schallfrequenzen messen. Der dreidimensionale Windvektor und dessen turbulente Schwankungen wurde mit einem dreidimensionalen Ultraschall-Anemometer (sog. USA 1, Fa. Metek, Elmshorn, Deutschland) gemessen (Abb. 42). Die Abtastrate betrug 10 Hz, die Mittelungsdauer 10 min. Die Installationshöhe lag bei 6,85 m über Grund.

Um Informationsverluste bei einem möglichen Sensorausfall vorzubeugen, wurde ein zweites Ultraschall-Anemometer installiert (sog. Ultrasonic-Anemometer 2D, Fa. Thies, Göttingen, Deutschland, Abb. 43). Es war aus Kostengründen jedoch nur für die Erfassung des zweidimensionalen, horizontalen Windvektors ausgelegt und besaß zudem keine Option für Turbulenzmessungen. Die Mittelungszeit lag ebenfalls bei 10 min, die Montagehöhe bei 5,30 m über Grund.



Abb. 42: Dreidimensionales Ultraschall-Anemometer. (Grafik: Wittich)



Abb. 43: Zweidimensionales Ultraschall-Anemometer. (Grafik: Wittich)

Zusätzlich wurde die trockene Lufttemperatur mittels eines Platinwiderstands-Thermometers (PT 100) und die relative Luftfeuchte mittels eines kapazitiven Dünnschicht-Feuchtesensors (Polymersensor HUMICAP 180, Vaisala, Finnland) bestimmt. Um Strahlungsfehler in den Messwerten zu vermeiden, befanden sich beide Sensoren innerhalb einer ventilierten Lamellenschutzhütte (LAM 630, Fa. Eigenbrodt, Königsmoor, Deutschland, Abb. 44).



Abb. 44: Temperatur- und Feuchtesensor mit Strahlungsschutz. (Grafik: Wittich)

Die Mess-Stationen wurden täglich mehrmals seitens TIEM kontrolliert und die Daten vom DWD wöchentlich ausgelesen. Die Messungen konnten bis auf einen kurzzeitigen gewitterbedingten Ausfall ohne besondere Vorkommnisse über den Mess-Zeitraum vom 22. Juli. - 23. August 2010 erfolgreich durchgeführt werden.

An der benachbarten Wetterwarte Angermünde wurden nach WMO-Kriterien³² die für das Experiment benötigten meteorologischen Referenzdaten wie die Lufttemperatur und -feuchte, die Windgeschwindigkeit und -richtung, sowie die Globalstrahlung und Niederschlagsintensität ermittelt. Alle Parameter wurden stündlich in definierten Messhöhen über einer Grasfläche erfasst. Die Messreihen dienten der Berechnung von Ausbreitungsclassen seitens des DWD (Offenbach) und flossen in Form sogenannter AKTerm's in die Modellrechnungen des dreidimensionalen Pollentransportes ein.

Ergebnisse der meteorologischen Messungen

Die umfangreichen Messdaten wurden zunächst intern vom DWD geprüft. Anschließend erfolgte vom Ing.-Büro Janicke eine Auswertung im Hinblick auf die Ausbreitungsmodellierung, die in Kap. 3.3.7.1. dargelegt ist.

Eine Zusammenfassung der Daten der DWD-Wetterwarte Angermünde findet sich in Tab. 3 - Tab. 4. Während der Juli zunächst extrem heiß und trocken verlief mit Hitzerekorden und Temperaturen bis über 35°C, veränderte sich mit Einsetzen der Maisblüte und Beginn der Messungen Ende Juli das Wetter: Es kühlte etwas ab, dennoch blieb es relativ warm und zeitweise windig, Regenschauer mit z.T. heftigen Gewittern traten vor allem im August vermehrt auf.

Die DWD-interne Prüfung der Messdaten der beiden mobilen Stationen AN1 und AN6 ergab, dass diese in sich konsistent und auswertbar sind. Im Detail zeigte sich, dass einzelne messtechnisch bedingte Aspekte zu beachten sind.

Neben der Darstellung der meteorologischen Verhältnisse und ihres zeitlichen Verlaufs ging es in der ersten Auswertung um den Vergleich der Messdaten beider Stationen im Hinblick auf thermische Effekte und um eine Abschätzung, welche Zeitperioden und Mess-Standorte für zeitlich aufgelöste Pollenauswertungen und Vergleiche mit Modellrechnungen von besonderem Interesse sind. Die entsprechende Auswertung ist in Kap. 3.3.7.1 dargelegt.

³² World Meteorological Organisation.

Tab. 3: Klimadaten der DWD-Wetterwarte Angermünde für Juli 2010 (Quelle: DWD Wetterwarte Angermünde).

DWD-Station ANGERMÜNDE			Juli 2010																	
Datum	Tag	Wetter Piktogr. Nr.	Wetter Text	Mitteltem- peratur in °C	Maximum in °C	Minimum in °C	Minimum (Boden) in °C	Niederschlag von 6 bis Fol- getag 6 UTC in mm	Sonnen- schein in h	Global- strahlung in J/cm²	Höchste Wind- spitze in km/h	Mittlerer Luftdruck in hPa	Maximaler Luftdruck in hPa	Minimaler Luftdruck in hPa	Mittlere Luftfeuchte in %	Maximale Luftfeuchte in %	Minimale Luftfeuchte in %			
01.07.2010	Do	101	wolkig	19,8	26,9	13,2	11,9	0,0	12,7	2335	20,2	1017,7	1019,0	1016,2	65,6	96,8	40,6			
02.07.2010	Fr	101	wolkig	22,8	30,7	13,4	11,0	0,0	13,3	2439	20,2	1017,9	1018,6	1017,0	58,0	93,1	34,5			
03.07.2010	Sa	100	sonnig	24,1	31,4	15,8	13,5	0,0	14,3	2379	25,2	1018,3	1019,4	1016,7	58,3	92,0	30,5			
04.07.2010	So	101	wolkig	24,1	31,3	15,9	12,4	<0,1	12,4	2386	27,0	1017,0	1018,3	1015,2	49,8	82,5	25,1			
05.07.2010	Mo	612	leichter Regen, sonnige Abschnitte	22,7	29,8	18,1	17,5	20,2	6,2	1742	41,4	1015,8	1016,8	1014,3	72,0	94,5	35,4			
06.07.2010	Di	622	Regen, sonnige Abschnitte	17,4	22,0	13,0	11,5	0,0	5,5	1620	43,2	1018,2	1020,6	1015,7	73,6	98,7	48,1			
07.07.2010	Mi	101	wolkig	17,2	22,9	11,7	10,6	0,0	11,1	2082	29,9	1022,0	1023,0	1020,5	69,0	94,8	39,8			
08.07.2010	Do	100	sonnig	20,4	27,7	11,0	9,4	0,0	13,5	2454	19,8	1021,3	1022,7	1019,8	61,3	100,0	33,2			
09.07.2010	Fr	100	sonnig	24,8	31,6	16,0	13,5	0,0	14,9	2618	22,3	1020,0	1020,8	1018,9	51,1	78,3	29,3			
10.07.2010	Sa	100	sonnig	27,2	35,1	19,3	17,0	0,0	14,9	2535	25,9	1018,8	1019,9	1017,4	49,0	71,7	25,0			
11.07.2010	So	101	wolkig	28,1	35,6	21,3	19,5	0,0	12,8	2476	33,8	1016,3	1017,8	1014,4	47,2	78,6	25,5			
12.07.2010	Mo	100	sonnig	28,4	35,5	18,8	17,9	0,0	14,6	2498	37,1	1012,8	1016,2	1009,1	51,9	94,0	25,5			
13.07.2010	Di	102	stark bewölkt	23,8	28,2	18,2	16,6	<0,1	6,6	1490	55,1	1010,7	1012,3	1009,0	66,6	89,9	52,6			
14.07.2010	Mi	401	Frühnebel, später Sonne	24,8	32,2	16,0	15,3	0,0	12,8	2283	32,4	1011,1	1013,1	1008,0	63,7	98,8	29,0			
15.07.2010	Do	101	wolkig	24,9	28,9	19,7	17,6	0,0	8,3	1864	41,0	1012,3	1016,4	1007,2	53,1	66,0	37,7			
16.07.2010	Fr	100	sonnig	26,0	33,2	16,8	14,4	<0,1	14,3	2441	32,0	1015,9	1017,4	1013,8	53,1	84,2	29,2			
17.07.2010	Sa	962	Gewitter mit Regen, sonnige Abschnitte	23,1	26,9	19,3	18,4	9,0	5,5	1259	36,4	1016,3	1020,1	1013,6	76,3	100,0	59,2			
18.07.2010	So	102	stark bewölkt	18,6	23,4	13,1	11,1	0,0	4,8	1487	40,7	1024,6	1026,9	1020,6	64,2	87,1	44,7			
19.07.2010	Mo	100	sonnig	19,1	25,8	11,5	9,6	0,0	14,4	2454	22,7	1024,7	1026,7	1022,4	60,2	100,0	29,1			
20.07.2010	Di	100	sonnig	21,8	29,0	12,5	10,5	0,0	14,7	2414	31,3	1018,3	1022,3	1014,2	58,1	91,2	31,4			
21.07.2010	Mi	101	wolkig	24,7	31,5	17,6	16,8	0,0	11,8	2095	32,0	1009,9	1013,6	1007,7	63,0	88,1	33,0			
22.07.2010	Do	611	sonnig, leichter Regen	25,0	30,6	19,0	16,7	23,0	10,1	1933	28,8	1011,0	1014,4	1008,2	62,9	86,5	41,4			
23.07.2010	Fr	963	bewölkt, Gewitter mit Regen	17,4	20,4	14,7	14,9	5,7	0,0	574	33,8	1015,2	1016,4	1013,4	91,0	97,5	82,3			
24.07.2010	Sa	623	bewölkt, Regen	17,4	20,0	15,3	14,5	6,0	0,0	458	57,2	1011,2	1012,8	1010,6	89,7	95,7	80,3			
25.07.2010	So	101	wolkig	17,9	23,2	13,9	12,0	<0,1	8,0	1760	45,0	1010,9	1012,6	1010,3	73,0	93,7	49,0			
26.07.2010	Mo	101	wolkig	18,2	23,4	12,6	10,9	0,0	8,6	1940	25,9	1012,1	1013,2	1011,1	66,6	96,1	40,0			
27.07.2010	Di	101	wolkig	20,0	26,9	13,6	12,4	0,0	10,8	1910	29,2	1014,2	1014,9	1013,1	62,2	93,1	32,9			
28.07.2010	Mi	102	stark bewölkt	19,5	25,6	14,4	12,6	<0,1	7,7	1635	41,4	1010,8	1014,4	1007,7	71,4	91,9	45,7			
29.07.2010	Do	101	wolkig	18,1	22,9	13,3	12,5	0,0	9,0	1899	40,3	1006,7	1008,2	1005,6	67,2	89,7	47,7			
30.07.2010	Fr	102	stark bewölkt	17,6	22,1	12,9	11,6	0,0	7,6	1687	35,6	1012,5	1016,2	1008,5	69,0	88,2	49,3			
31.07.2010	Sa	101	wolkig	19,5	25,4	11,6	9,3	0,0	10,2	1760	31,0	1016,0	1017,3	1014,8	61,4	93,0	39,5			
Monatswerte				aktueller Monat	21,8	35,6	11,0	9,3	63,9	311,4	60907	57,2	1015,5	1026,9	1005,6	63,9	100,0	25,0		
				langjähriges Mittel (1961-1990)	17,5				53,6	234,5										
				Abweichung / Prozent vom Mittel	4,3 K				119,2 %	132,8 %										

Tab. 4: Klimadaten der DWD-Wetterwarte Angermünde für August 2010 (Quelle: DWD Wetterwarte Angermünde).

Station		ANGERMÜNDE		August		2010													
Datum	Tag	Wetter Piktogr. Nr.	Wetter Text	Mitteltem- peratur in °C	Maximum in °C	Minimum in °C	Minimum (Boden) in °C	Niederschlag von 6 bis Fol- getag 6 UTC in mm	Sonnen- schein in h	Global- strahlung in J/cm²	Höchste Wind- spitze in km/h	Mittlerer Luftdruck in hPa	Maximaler Luftdruck in hPa	Minimaler Luftdruck in hPa	Mittlere Luftfeuchte in %	Maximale Luftfeuchte in %	Minimale Luftfeuchte in %		
01.08.2010	So	612	leichter Regen, sonnige Abschnitte	21,9	27,8	15,7	13,3	<0,1	6,0	1571	29,9	1013,9	1014,9	1012,5	59,3	77,2	39,5		
02.08.2010	Mo	613	bewölkt, leichter Regen	20,2	24,2	16,4	15,0	5,2	2,1	825	26,6	1012,8	1014,0	1012,1	81,3	93,3	66,9		
03.08.2010	Di	623	bewölkt, Regen	17,2	19,3	14,7	14,0	7,6	0,0	445	37,1	1011,4	1012,6	1010,5	94,2	100,0	83,2		
04.08.2010	Mi	402	Nebel, zeitweise Sonne	17,6	22,4	12,4	10,7	0,0	8,6	1812	27,0	1010,6	1012,5	1008,3	78,4	100,0	55,9		
05.08.2010	Do	101	wolkig	20,1	26,1	13,8	12,2	0,0	8,4	1717	30,2	1008,4	1010,4	1007,7	67,1	91,9	39,9		
06.08.2010	Fr	962	Gewitter mit Regen, sonnige Abschnitte	20,3	26,4	14,3	12,6	3,2	4,5	1186	30,2	1012,8	1015,0	1010,8	78,6	96,8	54,4		
07.08.2010	Sa	613	bewölkt, leichter Regen	19,3	22,3	16,1	15,8	11,5	0,5	700	37,8	1014,3	1015,3	1013,6	83,2	96,2	53,7		
08.08.2010	So	623	bewölkt, Regen	18,0	21,7	16,0	15,3	1,0	1,7	857	23,0	1014,1	1014,5	1013,7	87,0	100,0	65,9		
09.08.2010	Mo	962	Gewitter mit Regen, sonnige Abschnitte	19,5	24,8	14,1	13,2	<0,1	6,2	1395	24,8	1014,9	1016,4	1013,8	80,3	100,0	59,8		
10.08.2010	Di	101	wolkig	20,2	25,0	15,7	14,8	0,0	10,5	1986	26,3	1015,7	1017,1	1014,1	71,9	96,9	47,1		
11.08.2010	Mi	613	bewölkt, leichter Regen	20,1	24,3	15,8	14,0	0,1	1,7	1070	24,8	1013,5	1014,6	1012,9	75,5	88,7	57,0		
12.08.2010	Do	962	Gewitter mit Regen, sonnige Abschnitte	20,7	28,3	15,4	13,6	18,3	6,3	1344	25,6	1012,6	1014,5	1010,3	80,4	100,0	47,1		
13.08.2010	Fr	623	bewölkt, Regen	19,4	23,2	16,0	15,9	19,3	0,3	834	23,8	1016,5	1017,9	1013,0	84,2	100,0	60,9		
14.08.2010	Sa	963	bewölkt, Gewitter mit Regen	17,9	21,5	15,6	15,7	27,6	1,2	460	28,8	1015,6	1017,1	1013,9	96,1	100,0	86,7		
15.08.2010	So	962	Gewitter mit Regen, sonnige Abschnitte	21,1	27,8	16,6	15,5	25,3	4,1	1288	40,3	1012,5	1016,7	1008,1	85,7	100,0	66,4		
16.08.2010	Mo	952	er mit Regen, Hagel oder Schnee, sonnige Abs	18,9	22,8	17,0	16,7	2,5	4,8	1425	32,0	1010,2	1011,2	1008,4	84,4	100,0	58,8		
17.08.2010	Di	611	sonnig, leichter Regen	17,6	20,7	15,2	14,7	0,5	9,0	1643	32,8	1004,9	1008,8	1002,5	83,9	100,0	68,7		
18.08.2010	Mi	613	bewölkt, leichter Regen	16,7	20,4	14,2	13,9	5,0	2,9	900	42,5	1004,4	1006,4	1003,3	87,1	94,9	70,7		
19.08.2010	Do	962	Gewitter mit Regen, sonnige Abschnitte	15,7	21,0	13,1	11,9	0,6	4,1	1172	48,2	1012,7	1019,2	1006,4	83,3	95,6	54,4		
20.08.2010	Fr	100	sonnig	18,0	23,7	11,3	8,3	0,0	12,5	1741	25,9	1021,5	1022,6	1019,8	72,7	100,0	44,9		
21.08.2010	Sa	861	sonnig, Regenschauer	21,7	28,2	14,1	12,3	0,6	11,7	1868	29,5	1020,8	1022,2	1019,1	70,2	95,2	47,1		
22.08.2010	So	101	wolkig	22,7	28,7	17,3	14,9	<0,1	9,6	1642	42,1	1014,3	1018,9	1010,5	75,4	97,5	52,3		
23.08.2010	Mo	612	leichter Regen, sonnige Abschnitte	20,6	23,7	17,1	14,9	<0,1	3,4	1025	44,3	1004,8	1009,9	999,7	86,5	97,5	74,9		
24.08.2010	Di	101	wolkig	18,9	22,2	15,0	13,3	0,0	8,7	1575	49,0	1004,4	1007,6	1001,0	65,3	91,0	45,2		
25.08.2010	Mi	102	stark bewölkt	16,0	19,9	12,7	10,8	0,4	4,4	1151	55,8	1011,2	1013,9	1007,5	70,6	88,3	57,4		
26.08.2010	Do	613	bewölkt, leichter Regen	15,0	17,2	12,7	10,8	16,5	0,0	568	20,5	1009,9	1013,6	1006,1	89,0	96,2	77,8		
27.08.2010	Fr	623	bewölkt, Regen	15,0	16,2	13,3	12,7	15,5	0,0	288	37,4	1001,0	1005,4	996,9	95,5	98,1	91,4		
28.08.2010	Sa	962	Gewitter mit Regen, sonnige Abschnitte	13,8	17,7	10,4	9,6	1,9	5,8	1274	45,0	1009,1	1011,9	1004,8	86,0	95,5	70,3		
29.08.2010	So	613	bewölkt, leichter Regen	12,2	15,4	9,8	9,1	6,1	2,0	805	33,5	1009,3	1011,7	1005,9	90,2	96,1	80,1		
30.08.2010	Mo	623	bewölkt, Regen	12,0	12,9	11,4	11,0	10,8	0,0	333	27,7	1007,5	1013,2	1003,9	95,3	100,0	90,0		
31.08.2010	Di	611	sonnig, leichter Regen	13,5	18,2	9,0	6,6	0,0	10,1	1519	45,7	1016,3	1017,8	1013,6	78,6	100,0	53,2		
Monatswerte				aktueller Monat	18,1	28,7	9,0	6,6	179,5	151,1	36419	55,8	1011,7	1022,6	996,9	81,2	100,0	39,5	
				langjähriges Mittel (1961-1990)	17,1					55,5	224,2								
				Abweichung / Prozent vom Mittel	1,0 K					323,4 %	67,4 %								

3.3.6 Pollenschüttung und Meteorologie

Um den meteorologischen Antrieb für die Pollenemissionen darzustellen, wurden exemplarisch die Jahrestage 221-224 (9. - 12. August 2010) analysiert, da in diesen die höchsten Freisetzen im Versuchsfeld erfolgten. Abb. 45 zeigt die dreistündige Verteilung der an diesen Tagen erfassten Pollenkonzentration in Verbindung mit den meteorologischen Messgrößen Temperatur, relative Feuchte, Wind und Niederschlag. Die Tagesgänge von Temperatur, Wind und relative Feuchte scheinen zunächst den Tagesgang der Pollenfreisetzung zu erklären, da die Maxima der Lufttemperatur und der Windgeschwindigkeit sowie das Minimum der relativen Luftfeuchte mit dem Maximum der Pollenkonzentration grob zusammenfallen. Allerdings bestehen im Detail Abweichungen, so dass keine sehr strenge Korrelation besteht.

Für Pollenemission und -transport sind die Turbulenz des Temperatur- und Strömungsfeldes als mitbestimmende Größe in Betracht zu ziehen. Als Verursacher der Turbulenz (Böigkeit) gelten:

- einerseits die solaren Strahlungsbedingungen, die tagsüber zu einer Überhitzung der Landoberfläche und damit zu einem durch Thermik bzw. Konvektion bedingten Wärmetransport in Richtung der angrenzenden, kühleren Atmosphäre führen,
- andererseits sogenannte Windscherungen (vertikale Windänderungen), die einen vertikalen Transport von Bewegungsenergie zwischen den bodennahen Luftschichten durch Impulsflüsse induzieren.

Die eingesetzten 3D-Ultraschallsensoren erlauben die Messung sowohl der Wärme- als auch der Impulstransporte. Beide charakterisieren die Turbulenz-Eigenschaften des Wind- und Temperaturfeldes. Der dreistündigen Pollenkonzentration ist deshalb in Abb. 46 die turbulente Wärmeflussdichte (als Energiemaß in Watt pro Quadratmeter angegeben) und die Schubspannungs-Geschwindigkeit (als Skalierungsgröße für den Impulsfluss in Meter pro Sekunde angegeben) gegenübergestellt. Der Tagesgang der Pollenkonzentration wird insgesamt besser durch den Tagesgang der aufwärtsgerichteten Komponente des Wärmefflusses (positive Ordinate) als durch den Tagesgang der Schubspannungs-Geschwindigkeit wiedergegeben.

In dem durch Abb. 45 und Abb. 46 dargestellten Beispielzeitraum (9.-12. August 2010) sind die meteorologischen Bedingungen tagsüber für hohe Pollenschüttungen nahezu ideal (hohe Temperatur, die das Heranreifen der Pollen begünstigt, hohe Turbulenz). Allerdings scheint es biologische Grenzen zu geben, nach erfolgten Schüttungen neue Pollen in ähnlich hoher Anzahl heranreifen zu lassen. Dies wird durch die Messungen am 10. August deut-

lich, denn an diesem Tag war mittags zwar das Temperatur- und Turbulenzniveau höher als am Vortag, dennoch war die Emission geringer. Dass am Folgetag (11. August) eine weitere Abnahme der Pollenkonzentration erfolgte, lässt sich mit der geringen Thermik (Wärmestrom) erklären, wohingegen die Temperatur, die Windgeschwindigkeit und der Impulsfluss (Schubspannungs-Geschwindigkeit) in der gleichen Größenordnung wie am 9./10. August lagen. Die Ursache für die geringere Thermik ist in der bewölkungsbedingten Reduktion der solaren Einstrahlung zu finden. Nach Messungen der Wetterwarte Angermünde betrug die maximale kurzwellige Einstrahlung lediglich 411 W m^{-2} (im Vergleich zu Werten von 586, 675 und 547 W m^{-2} am 9., 10. und 12. August). Am 12. August, dem Tag mit der höchsten Pollenkonzentration, unterdrückte der am späten Nachmittag einsetzende Niederschlag weitere Emissionen, obwohl mit der niederschlagsverursachenden Gewitterstörung eine hohe Böigkeit im Windfeld einherging (siehe Peak in der Windgeschwindigkeit und in der Schubspannungs-Geschwindigkeit gegen 19:20 MEZ). Die thermische Turbulenz war zu diesem Zeitpunkt wegen des niederschlagsbedingten Abkühlungseffektes zusammengebrochen.

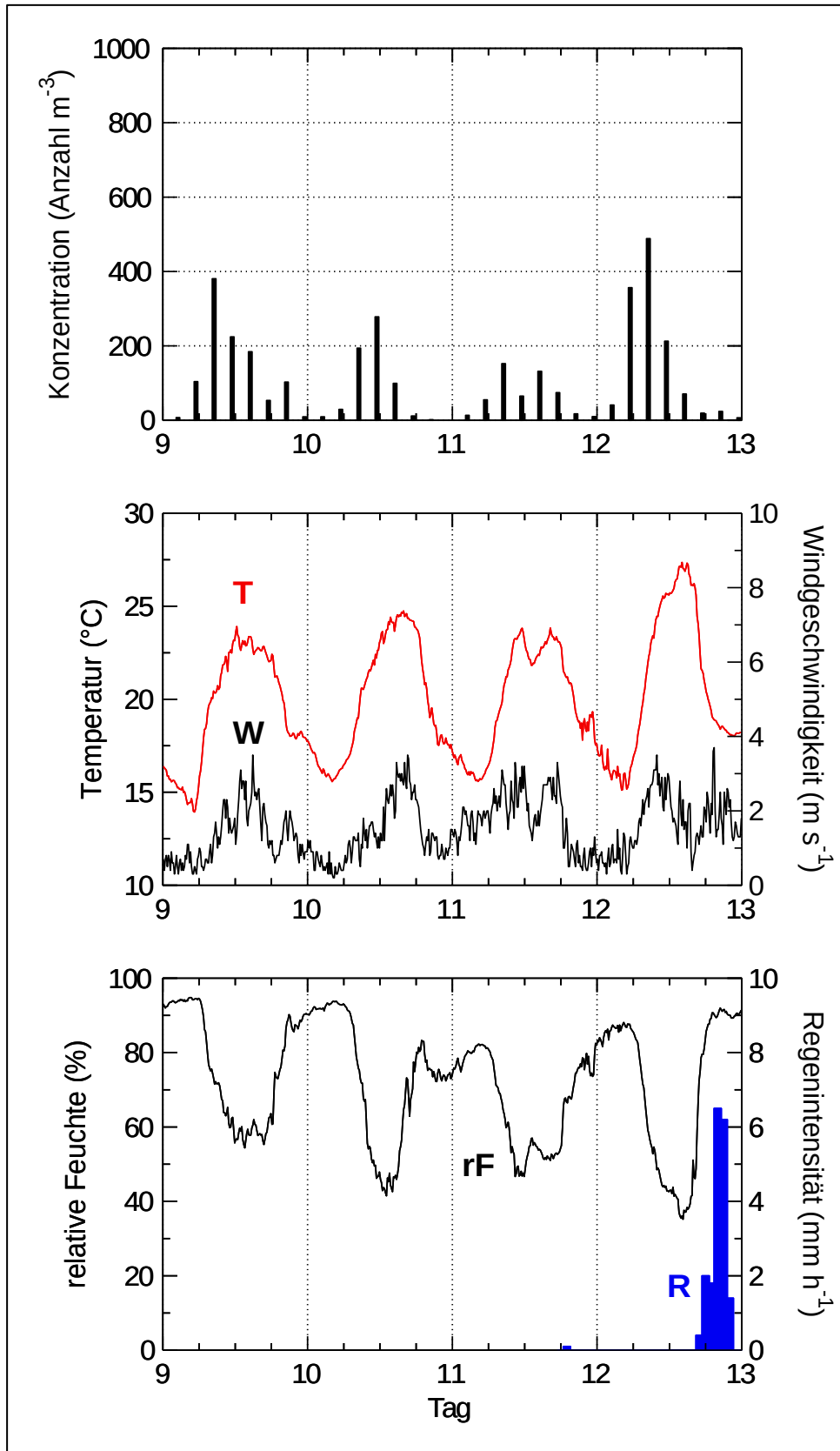


Abb. 45: Dreistündige Pollenkonzentration in Feldmitte (AN6, oben), Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit (Mitte) sowie relative Luftfeuchte und Niederschlagsintensität (unten). Die Niederschlagsangabe entstammt dem Datensatz der Wetterwarte Angermünde. (Grafik: Wittich)

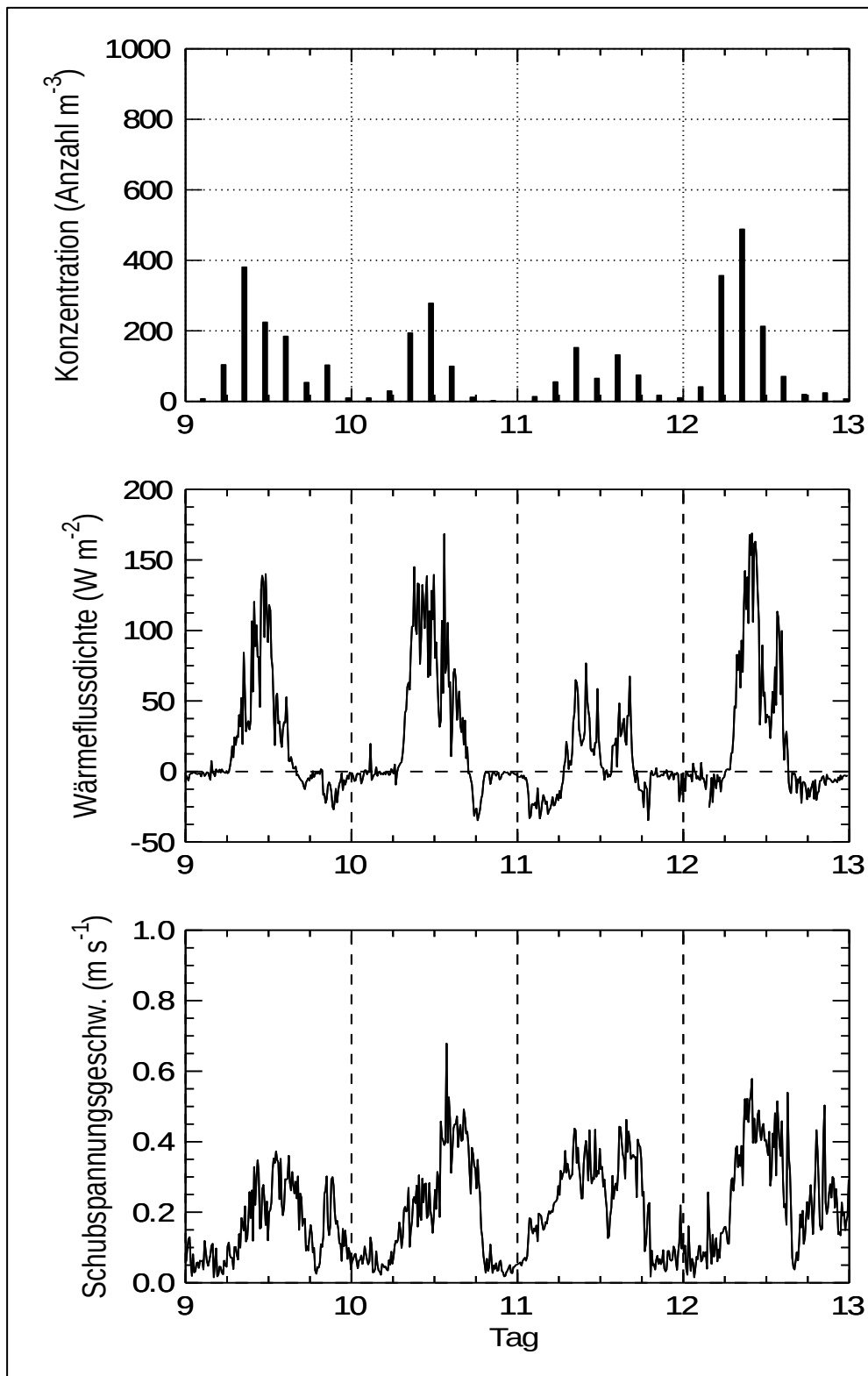


Abb. 46: Dreistündige Pollenkonzentration (oben) über dem Maisfeld an Tagen mit hohen Pollenschüttungen (9.-12. August 2010). Zeitgleich dargestellt ist die über dem Maisfeld gemessene Flussdichte des turbulenten Wärmestroms (Mitte; positives Vorzeichen: Flussrichtung von der Landoberfläche zur Atmosphäre, negatives Vorzeichen: Flussrichtung von der Atmosphäre zur Landoberfläche). Ferner ist die über dem Maisfeld gemessene Schubspannungs-Geschwindigkeit als Kenngröße für den Impulsfluss dargestellt (unten). (Grafik: Wittich)

Die Daten belegen die aus der Literatur bekannte Bedeutung der Turbulenzmessung für die Bewertung der Pollenemission und des Pollentransportes (AYLOR ET AL. 2003). Wärmestrom und Schubspannungs-Geschwindigkeit als Kenngrößen der Turbulenz bzw. des Energietransportes sind wesentliche Parameter für die Modellierung von Nah- und Ferntransporten von Luftbeimengungen (BOEHM ET AL. 2008, VAN HOUT ET AL. 2008, CHAMECKI ET AL. 2011). Zu differenzieren sind hierbei Pollenfreisetzung und Ferntransport. Für den Tagesgang der Pollenfreisetzung weisen unsere Messergebnisse der durch Thermik angeregten Turbulenz eine etwas höhere Bedeutung zu als der mit Impulstransporten (Windstöße) einhergehenden Turbulenz. In den klassischen Modellvorstellungen zur Maispollenfreisetzung werden eher die Windstöße betont (AYLOR ET AL. 2003). Die Gewichtung beider Faktoren ist nach aktuellen Erkenntnissen jedoch variabel (VYNER ET AL. 2010). Die Variabilität zeigen auch unsere Ergebnisse deutlich, so dass die Gewichtung im Kontext der Untersuchungstage in einer Saison zu werten ist. Insofern spiegeln unsere Ergebnisse die Verhältnisse in Angermünde in der Saison 2010 wider und bestätigen dabei die allgemeinen Vorstellungen zur Maispollenausschüttung.

Wenngleich die Pollenfreisetzung bei Mais im Allgemeinen recht gut verstanden wird, zeigen unsere Ergebnisse in Einklang mit anderen Studien, dass für eine Modellierung der Maispollenfreisetzung detaillierte meteorologische Daten von Temperatur, Feuchte, Wind, Strahlung und Turbulenz sowie entsprechend detaillierte Freilandmessungen zum Pollenflug erforderlich sind, die nicht überall verfügbar sind.

3.3.7 Ausbreitungsrechnungen für Maispollen – Nachrechnung der Freilandmessungen 2010

Die Ausbreitungsrechnungen wurden vom Ingenieurbüro Janicke vorgenommen. Wie in Phase I wurde für die Ausbreitungsrechnungen das dem TA-Luft Ausbreitungsmodell AUSTAL2000 zugrunde liegende Lagrangesche-Partikelmodell LASAT eingesetzt. Vor der eigentlichen Ausbreitungsrechnung erfolgte eine entsprechende Detailauswertung der meteorologischen Daten.

3.3.7.1 Auswertung der meteorologischen Messungen

Die vom DWD im Juli und August durchgeführten meteorologischen Messungen (s. Kap. 3.3.5) wurden mit Hilfe der LASAT-Werkzeuge überarbeitet und in meteorologische Zeitreihen für das Ausbreitungsmodell LASAT übertragen. Bei den Messungen handelt es sich um 10-Minuten-Mittelwerte von Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte, die an zwei konventionellen Stationen (K) in der Mitte des Versuchsfeldes (AN6) und am Feldrand (AN1) gemessen wurden, und um 10-Minuten-Mittelwerte von zwei an den gleichen Masten angebrachten Ultraschall-Anemometern (U). Zusätzlich zu einer aufbereiteten Liste von Ultraschall-Messergebnissen wurden die Original-Messprotokolle zur Verfügung gestellt, um eine weitergehende Analyse anhand der Original-Daten möglich zu machen.

Zunächst wurden Windgeschwindigkeit U_a und Windrichtung R_a , wie sie von den verschiedenen Messgeräten aufgezeichnet wurden, miteinander verglichen. Abb. 47 zeigt den Vergleich für die konventionellen Stationen (K-AN6, K-AN1) und für das Ultraschall-Anemometer in Feldmitte (U-AN6) für den 10. August 2010, der ein für die Messperiode typisches Verhalten zeigt.

Die Windgeschwindigkeiten unterscheiden sich nicht sonderlich. Tagsüber zeigen K-AN6 und K-AN1 nahezu dieselben Werte, U-AN6 liegt meist systematisch etwas darüber. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Messhöhe bei U-AN6 mit 6,85 m etwa 1,5 m oberhalb der Messhöhe von K-AN1 (etwa 5,3 m) lag. Nachts zeigt die in einer leichten Mulde gelegene Station K-AN1 eine deutlich geringere Windgeschwindigkeit.

Die Windrichtung zeigt nachts stärkere Schwankungen, die sich insbesondere zwischen den Stationen K-AN6 und K-AN1 stark unterscheiden. Auch U-AN6 misst nicht die gleichen Werte wie K-AN6, obwohl beide am selben Mast befestigt sind. Dies liegt möglicherweise in einem unterschiedlichen Verfahren der Mittelwertbildung, das bei so starken Variationen zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen führen kann. Tagsüber sind die von K-AN6 und U-AN6 gemessenen Windrichtungen streckenweise identisch, so dass im Folgenden nur noch auf die von U-AN6 gemessene Windrichtung Bezug genommen wird.

Die Graphen der Abb. 48 und Abb. 49 zeigen den Verlauf von Windgeschwindigkeit, Temperatur, relativer Feuchte (gemessen an K-AN6), Windrichtung und reziproker Monin-Obukhov-Länge (gemessen an U-AN6) für den gesamten Zeitraum von 22. Juli bis 22. August. Es ist der übliche Tagesgang zu erkennen mit niedrigen nächtlichen Windgeschwindigkeiten und Temperaturen und geringer Feuchte tagsüber. Die Feuchte steigt nachts nur selten über 95 Prozent an. Östlichen Wind bei geringer Feuchte gab es nur am 15. August.

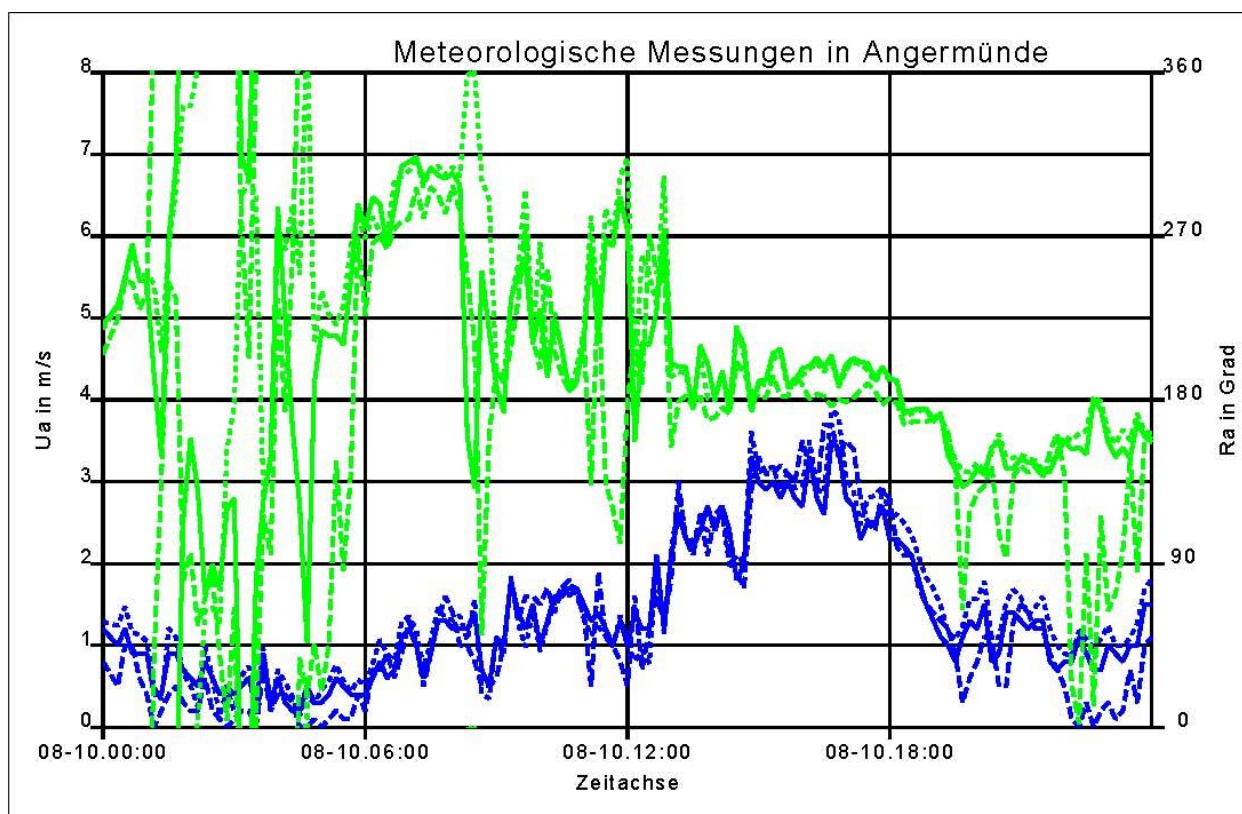


Abb. 47: Windgeschwindigkeit U_a (blau) und Windrichtung R_a (grün). K-AN6: durchgezogen, K-AN1: gestrichelt, U-AN6: gepunktet.

Eine Übersicht über die für jeden Tag ab 04.08.2010 zur Zeit geringer Feuchte R_h herrschende Windrichtung R_a , Windgeschwindigkeit U_a und Temperatur T_p zeigt die folgende Tab. 5:

Tab. 5: Übersicht über mittlere Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Temperatur und Feuchte vom 04.08. bis 22.08.

Tag	U_a	R_a	T_p	R_h
04.08.	3 - 4	180	21	50
05.08.	3 - 4	160	25	35
06.08.	3 - 4	360	24	55
07.08.	4 - 5	350	22	55
08.08.	1 - 3	360	20	~70
09.08.	2 - 3	270	23	60
10.08.	1 - 3	210	24	45
11.08.	2 - 3	210	23	50
12.08.	2 - 3	150	27	40
13.08.	2 - 3	360	21	75
14.08.	2 - 3	250	20	>80
15.08.	3 - 4	90	27	55
16.08.	3 - 4	190	22	55
17.08.	~4	180	20	65
18.08.	3 - 5	240	20	70
19.08.	3 - 5	270	19	55
20.08.	2 - 3	220	23	45
21.08.	~3	240	28	45
22.08.	~4	250	28	55

Mit Hilfe dieser Tabelle kann bei Kenntnis des Zeitraums mit Pollenflug abgeschätzt werden, welche Standorte mit Pollensammlern vorwiegend beaufschlagt wurden.

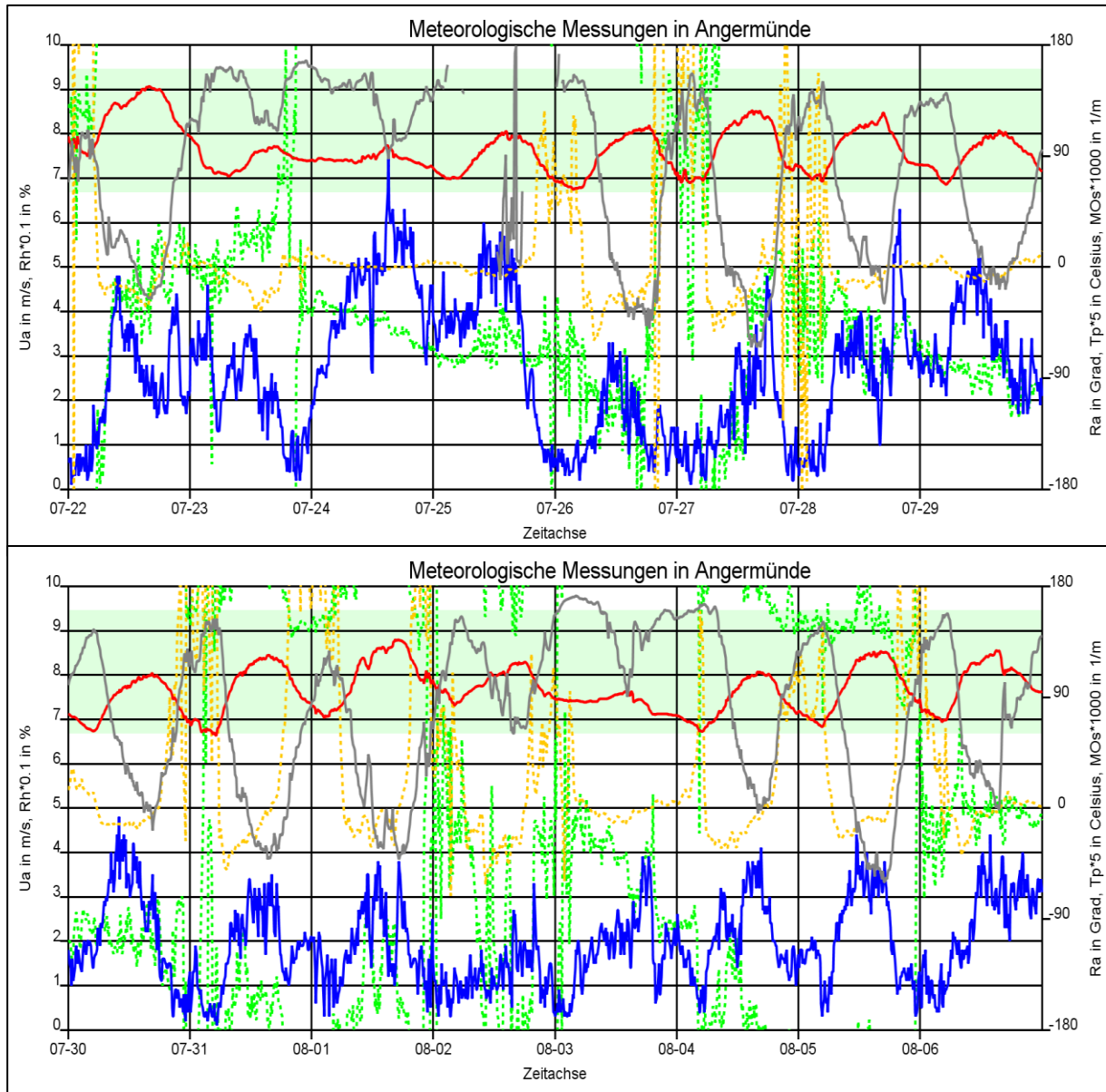


Abb. 48: Windgeschwindigkeit U_a (blau), Windrichtung R_a (grün), Temperatur T_p (rot), relative Luftfeuchte R_h (grau) und reziproke Monin-Obukhov-Länge MO_s (orange) für den Zeitraum 22.07.2010 bis 06.08.2010. Durchgezogen: konventionelle Station Feldmitte (AN6), gepunktet: USA in Feldmitte (AN6). Grünes Band im Hintergrund: Windrichtung zwischen 60 und 160 Grad (s. Text). (Grafik: Janicke)

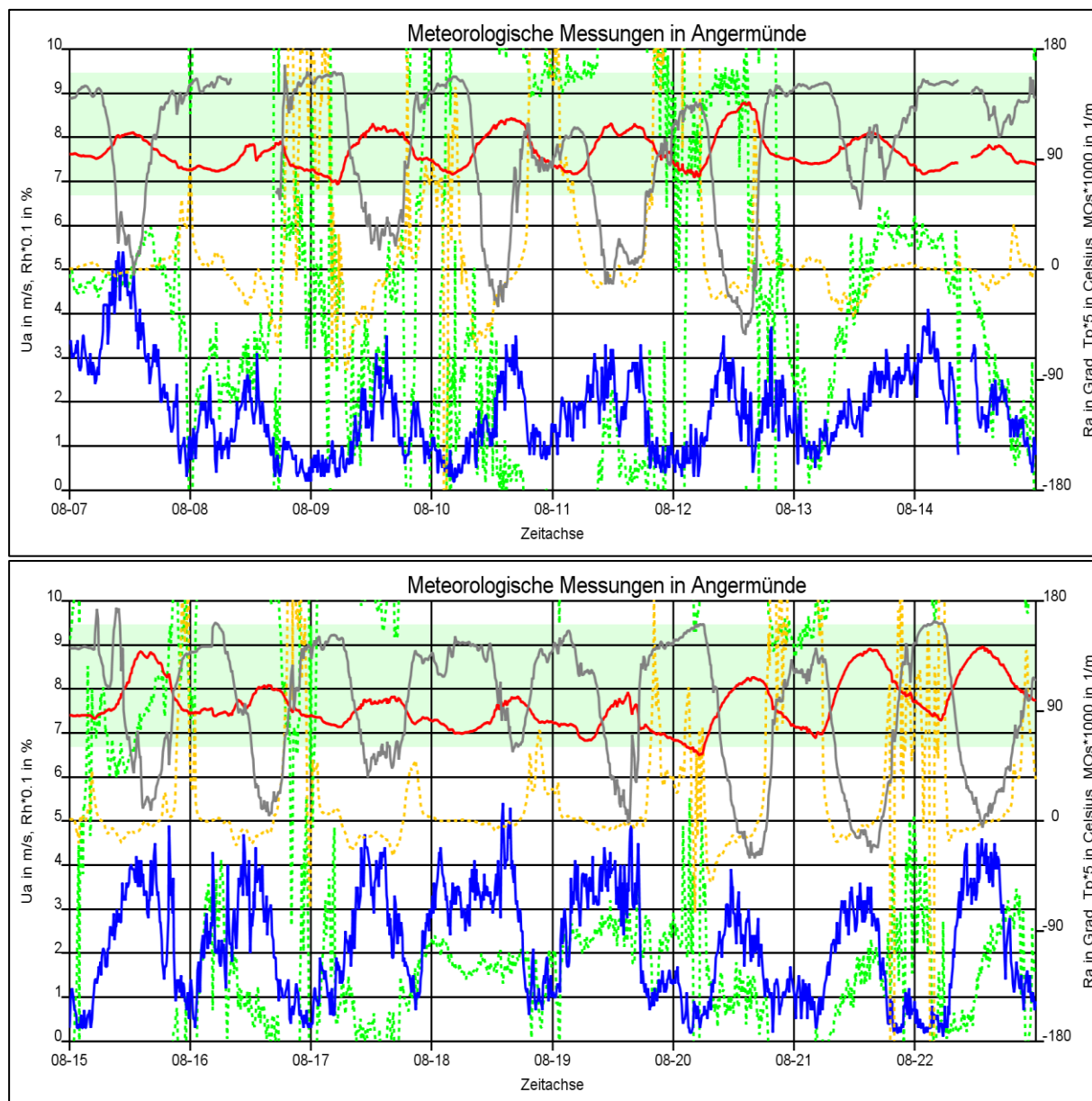


Abb. 49: Windgeschwindigkeit U_a (blau), Windrichtung R_a (grün), Temperatur T_p (rot), relative Luftfeuchte R_h (grau) und reziproke Monin-Obukhov-Länge MO_s (orange) für den Zeitraum 07.08.2010 bis 22.08.2010. Durchgezogen: konventionelle Station Feldmitte (AN6), gepunktet: USA in Feldmitte (AN6). Grünes Band im Hintergrund: Windrichtung zwischen 60 und 160 Grad (s. Text). (Grafik: Janicke)

Anhand der meteorologischen Daten lassen sich die Tage identifizieren, an denen man allein aufgrund der Windrichtung eine maßgebliche Beaufschlagung der westlich vom Versuchsfeld gelegenen (zeitaufgelösten) Pollensammler erwarten kann. Das ist für Windrichtungen etwa zwischen 60 und 160 Grad der Fall. Dieser Richtungsbereich ist in den Abb. 48 und Abb. 49 als hellgrünes Band im Hintergrund eingezeichnet. In diesen Bereich fällt die Windrichtung tagsüber am 5., 11., 12. und 15. August. Diese Prognose erhöhter Pollenkonzentrationen wurde von den ausgewerteten gemessenen Tagesmittel bestätigt, die für die

Positionen AN6, AN1, AN2 und AN5 insbesondere für den 12. und 15. August ausgeprägte Maxima aufweisen.

Abb. 50 und Abb. 51 zeigen einen Vergleich der gemessenen vertikalen Geschwindigkeitsfluktuationen σ_w in der Feldmitte (U-AN6) und am Feldrand (U-AN1) für den Zeitraum 11.08.-16.08.2010. Aus den geringen Unterschieden lassen sich keine ausgeprägten thermischen Effekte (Konvektionszellen) über dem Maisfeld ablesen. Dies entspricht dem Ergebnis der Voruntersuchungen. Allerdings ist die Erfassung von Konvektionszellen, die sich erst mit zunehmender Höhe voll entfalten, in einer Messhöhe von nur 4 m über dem Maisfeld grundsätzlich problematisch.

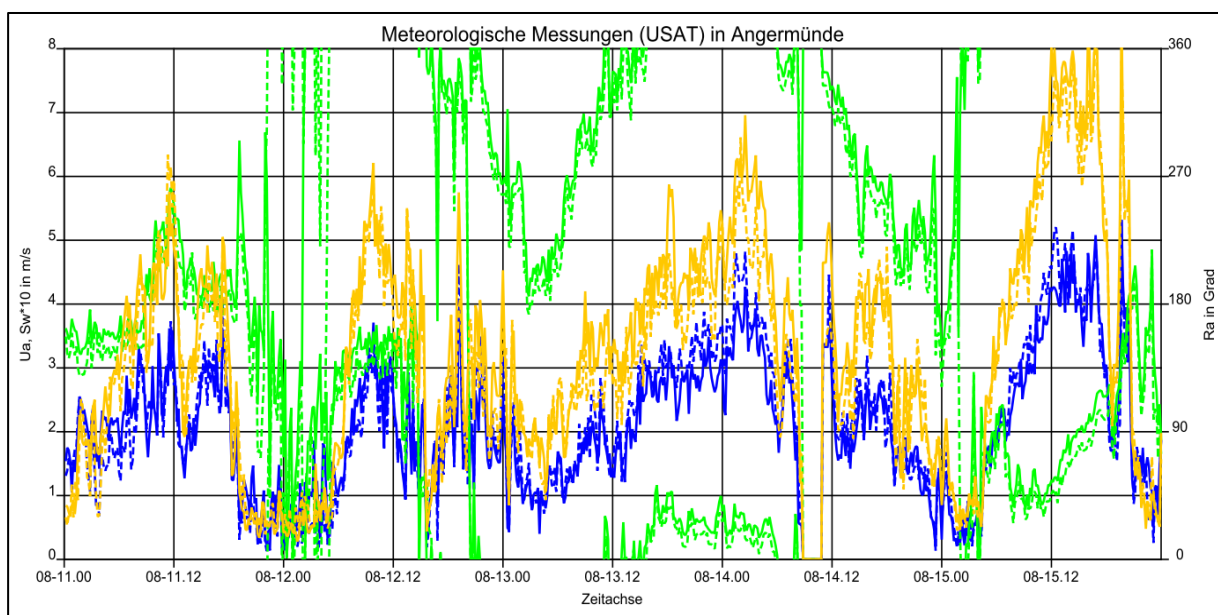


Abb. 50: Verlauf von Windgeschwindigkeit (blau), Windrichtung (grün) und vertikaler Geschwindigkeitsfluktuationen (orange), gemessen mit dem Ultraschall-Anemometer im Versuchsfeld (durchgezogene Linien, U-AN6) und am Rand des Versuchsfeldes (gestrichelte Linien, U-AN1). (Grafik: Janicke)

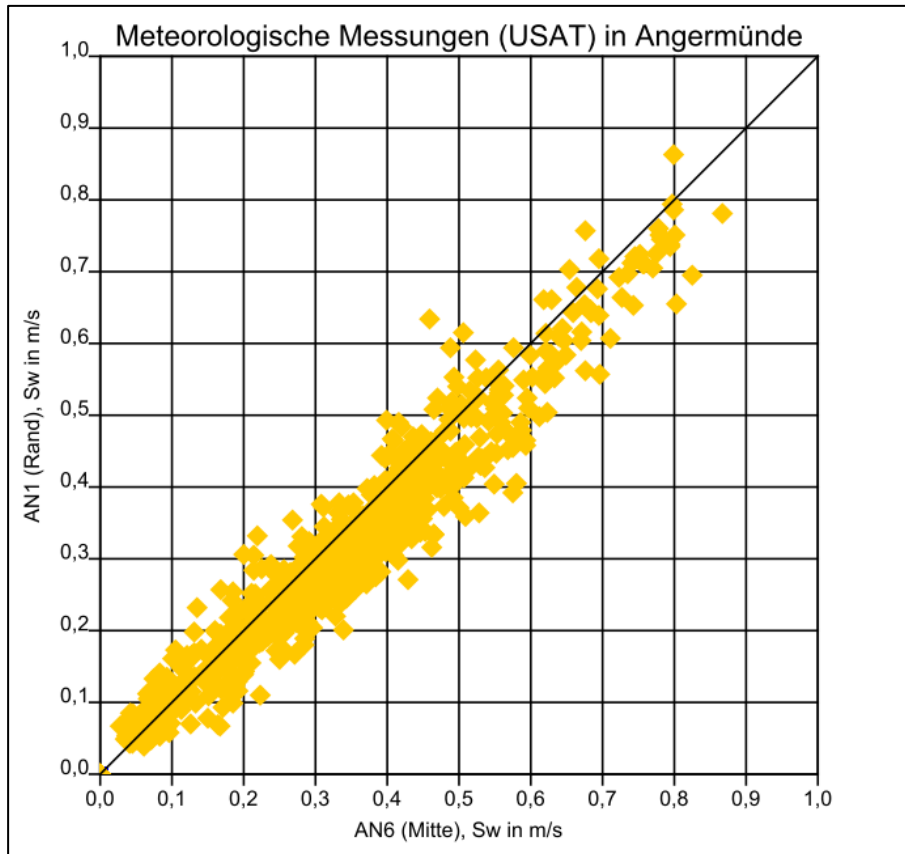


Abb. 51: Streudiagramm der vertikalen Geschwindigkeits-Fluktuationen. (Grafik: Janicke)

Abb. 52 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung, einmal über die gesamte Periode der Pollenmessungen (22.07. bis 22.08.2010) und einmal über den Zeitraum der höchsten Pollenausschüttung im Versuchsfeld (08.08. bis 17.08.2010). Im Mittel sind über die gesamte Periode westliche Windrichtungen vorherrschend, in der kürzeren Periode traten West- und Ostströmungen dagegen etwa gleich häufig auf.

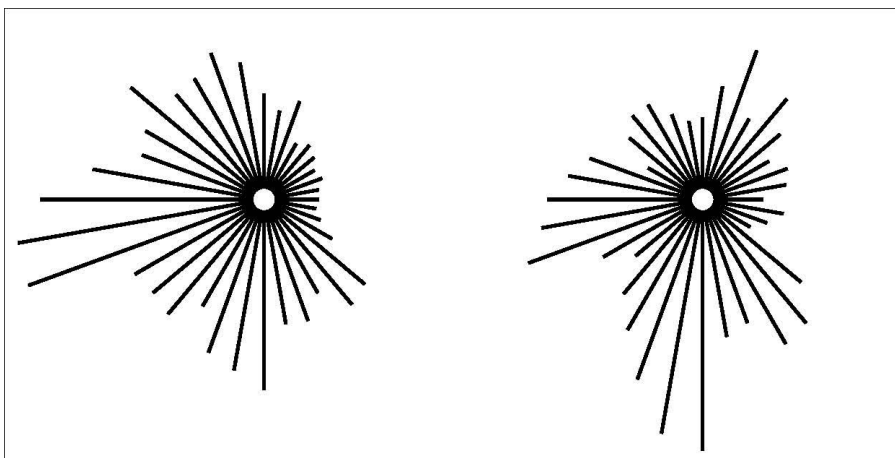


Abb. 52: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung (Norden: oben, Westen: links). Links: Über den Zeitraum der Pollenmessungen (22.7. bis 22.8.2010). Rechts: Über den Zeitraum der höchsten Pollenausschüttung im Versuchsfeld (8.8. bis 17.8.2010). (Grafik: Janicke)

3.3.7.2 Ausbreitungsrechnungen

Die Pollenmessungen wurden mit dem Ausbreitungsmodell LASAT Version 3.2 nachgerechnet.

3.3.7.2.1 Konfiguration der Eingabedaten

Es wurden die in den Untersuchungen der Phase I ermittelten Standardsetzungen übernommen:

- Modellierung der Maispollen-Freisetzung als Flächenquelle mit einer effektiven Höhe von 0,5 m bis 1 m über Grund (vereinfachte Berücksichtigung der Überströmung des Maisfeldes).
- Ansatz einer Sedimentationsgeschwindigkeit von 21 cm/s und einer Depositionswahrscheinlichkeit (siehe Richtlinie VDI 3945 Blatt 3) von 1.³³
- Standard-Grenzschichtmodells von LASAT (Version 2.1, Janicke & Janicke 2000) mit $\beta = 2$,³⁴ Rauigkeitslänge $z_0 = 0,2$ m und Verdrängungshöhe $d_0 = 0$ m.

Die meteorologische Zeitreihe wurde wie folgt festgelegt:

- Verwendung der Messreihen des Ultraschall-Anemometers im Feld (AN6, effektive Anemometerhöhe 5,85 m).
- Neubestimmung der Schubspannungs-Geschwindigkeit aus den vertikalen Geschwindigkeitsfluktuationen und entsprechende Neuberechnung der Monin-Obukhov-Länge.³⁵
- Vorgabe von gemessener Windgeschwindigkeit U_a , Windrichtung R_a und Geschwindigkeits-Fluktuationen S_u , S_v , S_w in Anemometerhöhe sowie der Schubspannungs-Geschwindigkeit U_s und der Monin-Obukhov-Länge L_M (L_M als gleitendes Mittel über 30 Minuten) als Zeitreihen von 10-Minuten-Mitteln für den gesamten Untersuchungszeitraum; Extrapolation der Werte vertikal mit dem internen Grenzschichtmodell.

³³ Mit einer Depositionswahrscheinlichkeit von 1 lagert ein Simulationspartikel, wenn es den Boden berührt, unmittelbar seine gesamte Masse dort ab. Mit der gewählten Sedimentationsgeschwindigkeit von 21 cm/s entspricht dies der Verwendung einer Depositionsgeschwindigkeit von etwa 25 cm/s, ist jedoch in der numerischen Ausführung effektiver.

³⁴ Minimale Lagrange-Korrelationszeit $\beta z_0 / u_*$ (Schubspannungs-Geschwindigkeit u_*).

³⁵ Dies ist ein in der Praxis mit LASAT gebräuchliches Verfahren, das im allgemeinen zu robusteren Wertereihen führt.

Rechentechnisch und für die anschließenden Auswertungen war es sinnvoll, die Ausbreitungsrechnung getrennt für das Versuchsfeld und für die umliegenden Felder durchzuführen. Es wurden folgende Festlegungen getroffen:

- Der Umriss eines Feldes wurde als Polygonzug gemäß Vorgaben definiert. Umland-Felder mit einer Fläche von weniger als 900 m² oder einer Entfernung von mehr als 10 km vom Versuchsfeld wurden vernachlässigt.
- Die räumliche Auflösung (Maschenweite) für die Rechnung zum Versuchsfeld wurde auf 10 m gesetzt, die vertikale Auflösung in Bodennähe auf 0,5 m. Die Umland-Felder wurden in einer getrennten Rechnung mit geschachtelten Netzen um das Versuchsfeld herum behandelt (Maschenweiten zwischen 50 m und 400 m, vertikales Mittelungsintervall in Bodennähe von 0 m bis 3 m über Grund).
- Für die kleinräumigen Ausbreitungsrechnungen für das Versuchsfeld wurden die Werte von U_a unverändert übernommen. Für die großräumigen Ausbreitungsrechnungen für die Umland-Felder wurde das Minimum der TA Luft von 0,7 m/s angewendet, da kleinere Werte wohl nicht repräsentativ für das betrachtete Gesamtgebiet von 20 km mal 20 km sind.
- Die Messpositionen wurden als Monitorpunkte in 1,8 m Höhe über Grund definiert. Das Programm LASAT weist als Ergebnis für jeden Monitorpunkt die Zeitreihe der Konzentrationswerte (hier 3-Stunden-Mittel oder Tages-Mittel) aus.

3.3.7.2.2 *Auswerteverfahren zu den zeitaufgelösten Messungen*

Die berechnete Pollen-Anzahlkonzentration hängt von der Emissionsrate der Pollen ab, für die Monitorpunkte in der Umgebung des Versuchsfeldes also in erster Linie von der Emission des Versuchsfeldes selbst. Da die tatsächliche Emissionsrate und ihr Zeitgang nicht unmittelbar bestimmt worden waren, wurden sie anhand der Pollenmessung im Feld (Position AN6) abgeschätzt. Das Verfahren war folgendes:

1. Die Ausbreitungsrechnung für das Versuchsfeld wurde mit einer zeitlich konstanten Emissionsrate von einem Pollen pro Quadratmeter und Sekunde durchgeführt. Das Ergebnis ist die Pollen-Anzahlkonzentration $\tilde{c}_{f,i}^{(m)}$ am Monitorpunkt ANm aufgrund der Emission des Versuchsfeldes für jedes Mittelungsintervall i .
2. Für jedes Mittelungsintervall i wurde die berechnete Konzentration $\tilde{c}_{f,i}^{(m)}$ mit dem Verhältnis von gemessener Konzentration $c_{m,i}^{(6)}$ und berechneter Konzentration $\tilde{c}_{f,i}^{(6)}$ am Monitorpunkt AN6 im Versuchsfeld skaliert (als Meßgröße wurde der Mittelwert aus PMO- und DWD-Messung gewählt):

$$c_{f,i}^{(m)} = s_{f,i} \tilde{c}_{f,i}^{(m)} \text{ mit } s_{f,i} = \frac{c_{m,i}^{(6)}}{\tilde{c}_{f,i}^{(6)}} \quad (20)$$

Dieser prognostizierte Wert kann mit der gemessenen (Gesamt-)Konzentration verglichen werden.³⁶

Soweit im modellierten Wert an Position AN6 systematische Effekte ausgeschlossen werden können, entspricht der Faktor $s_{f,i}$ einer Schätzung der im Bereich von Position AN6 pro Quadratmeter und Sekunde freigesetzten Anzahl von Pollen.

3. Für die Umland-Felder wurde die Ausbreitungsrechnung ebenfalls mit einer Einheits-Emissionsrate durchgeführt mit dem Ergebnis $\tilde{c}_{u,i}^{(m)}$.

Eine Skalierung mit $s_{f,i}$ ist für diesen Immissions-Beitrag nicht sinnvoll, da nicht zu erwarten ist, dass das Zeitverhalten aller Felder immer genau gleich dem des Versuchsfeldes ist. Stattdessen wurde vereinfacht ein über den Tag konstanter Skalierungsfaktor angesetzt. Es wurde jedoch berücksichtigt, daß nachts grundsätzlich weniger Pollen als am Tag freigesetzt werden.

Die Auswertung der gemessenen 3-Stunden-Mittel an Position AN6 im Versuchsfeld zeigt, dass die Konzentration zwischen 4:00 und 16:00 (GMT+1) im Mittel etwa 5 mal so hoch ist wie zwischen 16:00 und 4:00, während die mit konstanter Emissionsrate berechnete Konzentration keinen ausgeprägten Tagesgang aufweist (vgl. Abb. 52).

Will man also das experimentelle Verhältnis von 5 bei Verwendung eines über den Tag konstanten Skalierungsfaktors reproduzieren, muss die Emissionsstärke zwischen 4:00 und 16:00 Uhr etwa 5 mal so hoch gewählt werden wie zwischen 16:00 und 4:00 Uhr. Entsprechend wurde in den Ausbreitungsrechnungen für die Umlandfelder und für den Vergleich von Tages-Mitteln eine Emissionsrate von 1 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde für die Zeit von 4:00 bis 16:00 Uhr und eine von 0,2 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde für die Zeit von 16:00 bis 4:00 angesetzt.

Die so berechneten Konzentrationswerte wurden mit einem über den Tag konstanten Skalierungsfaktor multipliziert, für die Umlandfelder mangels genauerer Daten mit einem über alle Tage konstanten Faktor:

$$c_{u,i}^{(m)} = s_u \tilde{c}_{u,i}^{(m)} \quad (21)$$

4. Die mit der Ausbreitungsrechnung prognostizierte Gesamt-Pollenkonzentration ergibt sich aus der Summe der Beiträge aus Versuchsfeld und Umland:

³⁶ Der Wert an Position AN6 darf als Skalierungsgröße nicht in den Vergleich einbezogen werden.

$$c_i^{(m)} = c_{f,i}^{(m)} + c_{u,i}^{(m)} \quad (22)$$

Auch diese Größe kann mit der gemessenen Konzentration verglichen werden. Für Positionen m nahe dem Versuchsfeld ist $c_i^{(m)} \approx c_{f,i}^{(m)}$, da hier das Versuchsfeld den Hauptbeitrag liefert.

5. Aus den ermittelten Größen können weitere Vergleichsgrößen berechnet werden, beispielsweise die kumulierte Pollen-Anzahlkonzentration:³⁷

$$c_i^{(m)} = \sum_{j=1}^i c_j^{(m)} \quad (23)$$

3.3.7.2.3 Vergleich der 3-Stunden-Mittel

Abb. 53 zeigt die gemessenen 3-Stunden-Mittel $c_{m,i}^{(m)}$ und die modellierten, unskalierten 3-Stunden-Mittel (nur Versuchsfeld) $c_{m,i}^{(m)}$ für den Zeitraum 11.08. bis 16.08.2010.

Durchgezogene Linien zeigen den Verlauf der Messwerte, gestrichelte Linien den Verlauf der modellierten Werte. Bei Messausfällen und Werten gleich 0 sind die Linien unterbrochen. Die Farbgebung ist wie folgt:

AN6: Meßgerät (PM0) im Versuchsfeld.

AN6: Meßgerät des DWD (kalibrierte Werte) im Versuchsfeld.

AN2: Meßgerät (PM0) in etwa 10m Abstand vom Versuchsfeldrand.

AN1: Meßgerät des DWD in etwa 50m Abstand vom Versuchsfeldrand.

AN5: Meßgerät (PM0) in etwa 180m Abstand vom Versuchsfeldrand.

³⁷ Der kumulierte Wert existiert nur für diskrete Größen. In der kontinuierlichen Darstellung muss stattdessen das Zeitintegral herangezogen werden.

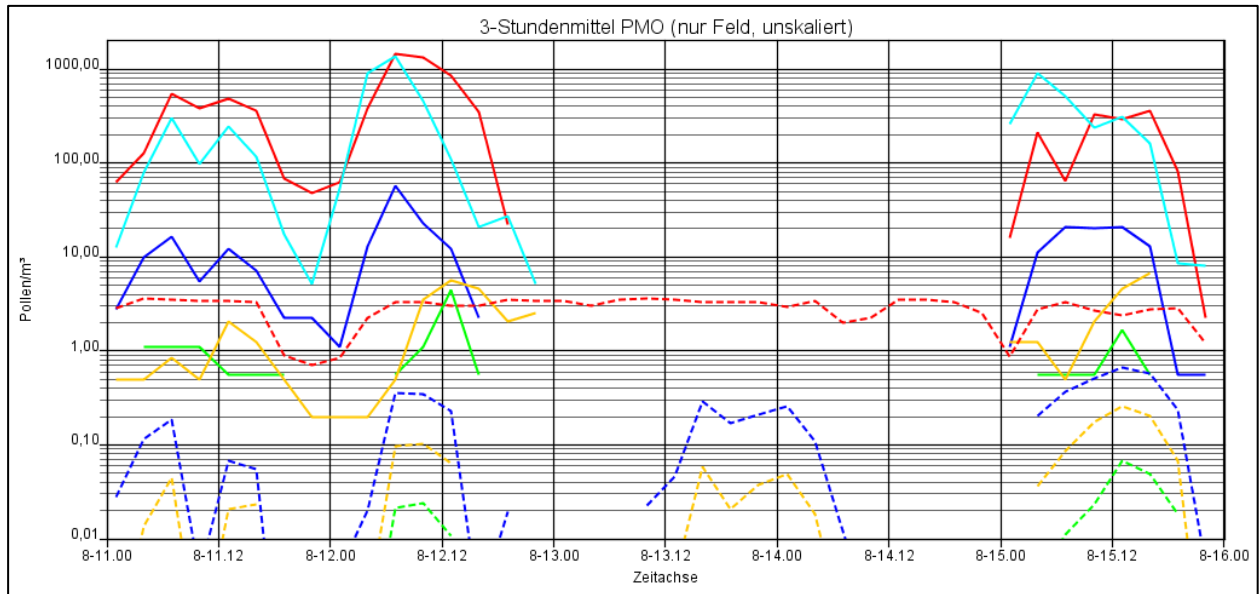


Abb. 53: Verlauf der 3-Stunden-Mittel. Durchgezogene Linien: gemessen. Gestrichelte Linien: modelliert, unskaliert, nur Versuchsfeld. AN6 (PMO) im Versuchsfeld. AN6 (DWD) im Versuchsfeld. AN2 (PMO) im Abstand 10 m. AN1 (DWD) im Abstand 50 m. AN5 (PMO) im Abstand 180 m. (Grafik: Janicke)

Der Verlauf der mit konstanter Emissionsrate berechneten, unskalierten Konzentration ist an Position AN6 im Feld in etwa konstant, meteorologische Einflüsse sind hier also gering. Das bedeutet, dass die starken Variationen der gemessenen Konzentration an dieser Position im Wesentlichen auf Änderungen der Emissionsrate zurückzuführen sind.

Die beiden unabhängigen Messungen PMO und DWD am Standort AN6 weisen für einzelne 3-Stunden-Mittel Unterschiede von bis zu einer Größenordnung auf. Systematische Unterschiede sind jedoch nicht zu erkennen.

Führt man nun die Skalierung der Modellergebnisse wie oben beschrieben durch, ergibt sich im Vergleich von $c_{m,i}^{(m)}$ und $c_{f,i}^{(m)}$ der in Abb. 54 dargestellte Verlauf.

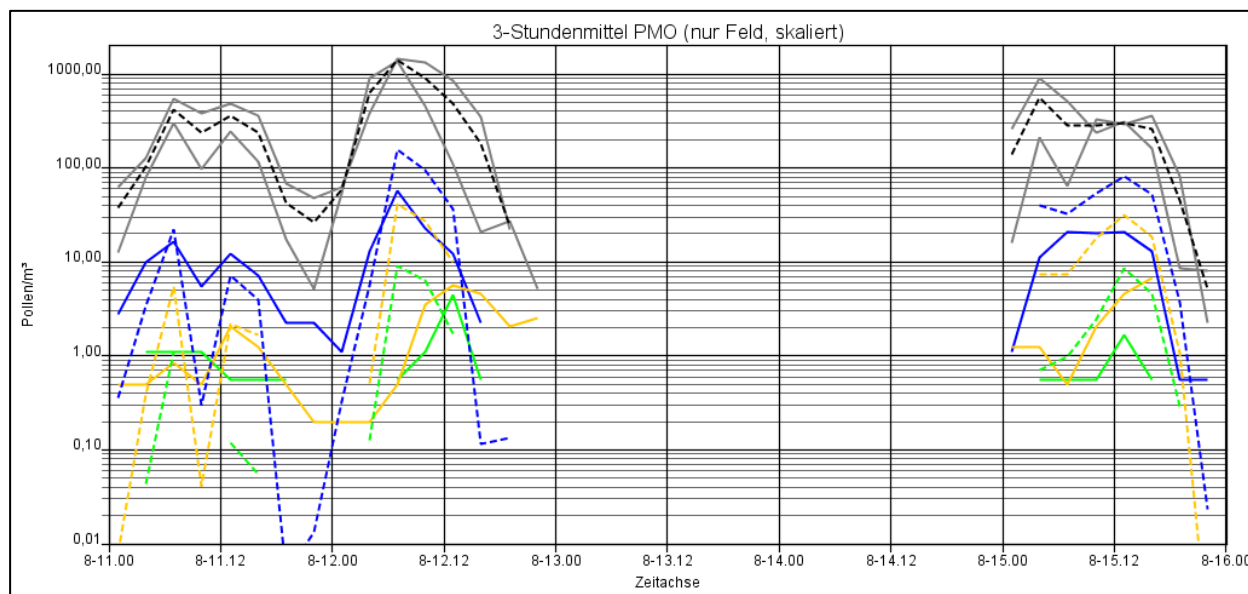


Abb. 54: Verlauf der 3-Stunden-Mittel. Durchgezogene Linien: gemessen. Gestrichelte Linien: modelliert und skaliert, nur Versuchsfeld. AN2 (PMO) im Abstand 10 m, AN1 (DWD) im Abstand 50 m, AN5 (PMO) im Abstand 180 m. (Grafik: Janicke)

Die Messungen und Modellrechnungen für Position AN6 sind zur Information in grau bzw. schwarz aufgeführt. Definitionsgemäß liegt die schwarze, gestrichelte Linie (modellierte, skalierte Konzentration an AN6) genau zwischen den beiden grauen Linien (gemessene Konzentration, PMO und DWD).

Die Übereinstimmung zwischen Modellrechnung und Messung an den 3 Positionen außerhalb des Versuchsfeldes erscheint insgesamt zufriedenstellend, auch wenn es für manche Zeitpunkte erhebliche Abweichungen gibt. Am 15. August weist die Modellrechnung systematisch höhere Werte als die Messung auf. Abb. 55 zeigt das Streudiagramm von gemessenen und modellierten skalierten Werten. Die grauen Quadrate geben zum Vergleich die Abweichungen der beiden Messreihen PMO (horizontale Achse) und DWD (vertikale Achse) an Position AN6 an. Die modellierte Konzentration nimmt kleinere Werte an als die gemessene, die bis auf eine Ausnahme immer größer als etwa $0,4 \text{ n/m}^3$ ist. Von diesem Unterschied abgesehen sind die Abweichungen zwischen Modellrechnung und Messung vergleichbar mit denen der beiden Messreihen PMO und DWD an Position AN6.

Der Skalierungsfaktor $s_{f,i}$, der wie weiter oben ausgeführt als Pollen-Emissionsrate pro Quadratmeter und Sekunde interpretiert werden kann, erreicht für die 3-Stunden-Mittel Spitzenwerte zwischen etwa 100 und 400. Der Mittelwert über die Zeiten mit Messsignal für den Zeitraum 11. bis 16. August liegt bei knapp 150. Das sind für Maisfelder durchaus typische Werte.

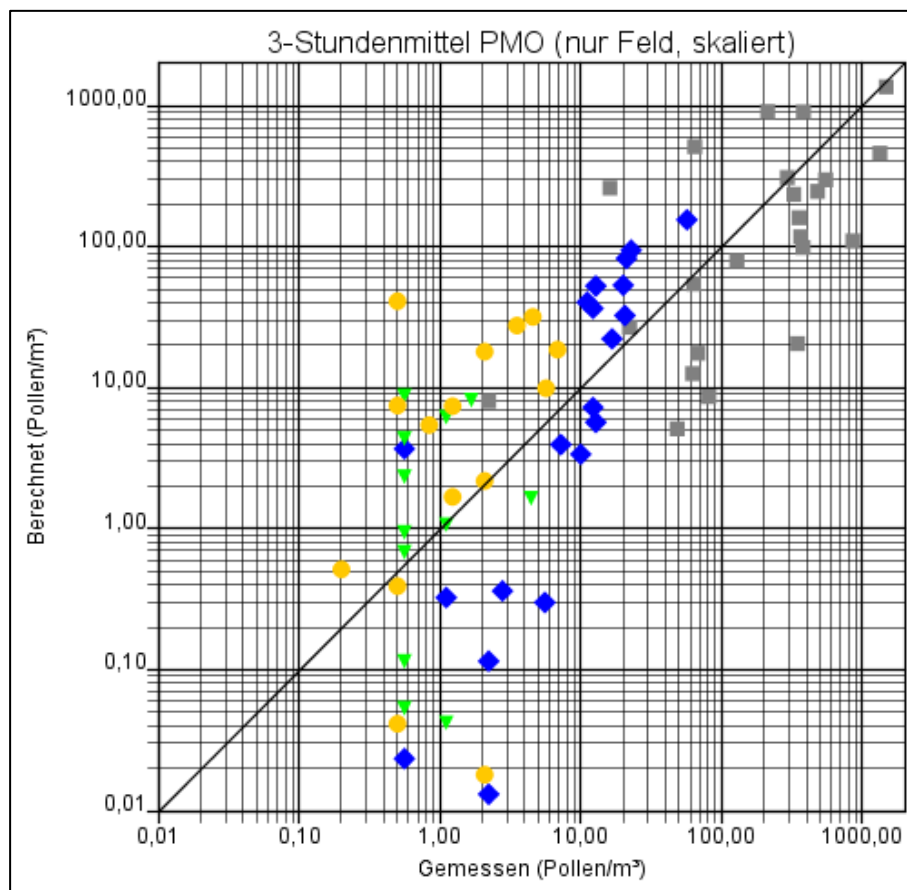


Abb. 55: Streudiagramm von gemessenen und modellierten, skalierten Werten. AN2 im Abstand 10 m, AN1 im Abstand 50 m, AN5 im Abstand 180 m, PMO-Messung (horizontale Achse) versus DWD-Messung (vertikale Achse) bei AN6. (Grafik: Janicke)

Im nächsten Schritt wurden die Umlandfelder in die berechnete Konzentration einbezogen ($s_u = 150$, was bei den zuvor angesetzten Zeitgängen einer Emissionsrate von $150/(\text{m}^2\text{s})$ am Tag und $30/(\text{m}^2\text{s})$ bei Nacht entspricht). Die Ergebnisse sind in Abb. 56 und Abb. 57 dargestellt.³⁸

Im Vergleich zum Versuchsfeld allein ergeben sich nur geringe Änderungen. Das war nach den Vorstudien zu erwarten, die gezeigt hatten, dass sich Beiträge von weiter entfernten Umlandfeldern typischerweise erst ab Abständen von etwa 200 m deutlich bemerkbar machen.

Zum Abschluss zeigt Abb. 58 die aus den 3-Stunden-Mitteln kumulierte Anzahlkonzentration. Nach den effektiv drei Messtagen ist der modellierte Wert für alle Abstände um einen Faktor 3 bis 4 höher als der gemessene. Hauptgrund ist eine Überschätzung der gemessenen Konzentration am Vormittag des 12. August.

³⁸ Die Nachweisgrenze der PMO-Messauswertungen lag bei etwa $0,05/\text{m}^3$.

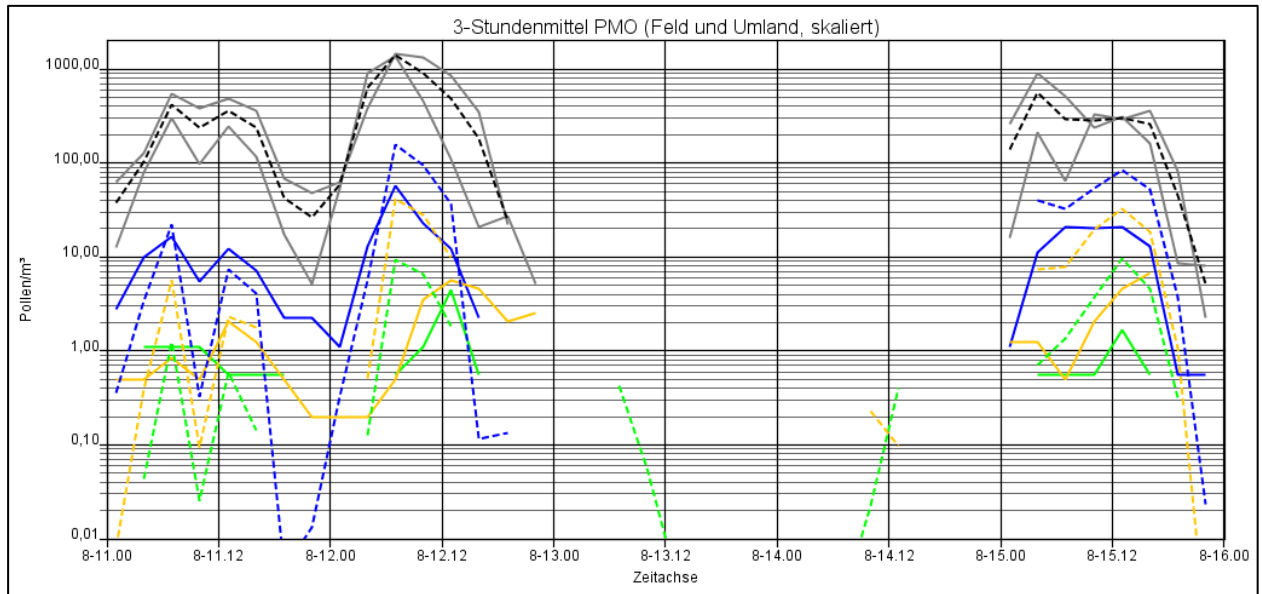


Abb. 56: Verlauf der 3-Stunden-Mittel. Durchgezogene Linien: gemessen. Gestrichelte Linien: modelliert und skaliert, Versuchsfeld und Umland-Felder. AN2 (PMO) im Abstand 10m, AN1 (DWD) im Abstand 50m, AN5 (PMO) im Abstand 180m. (Grafik: Janicke)

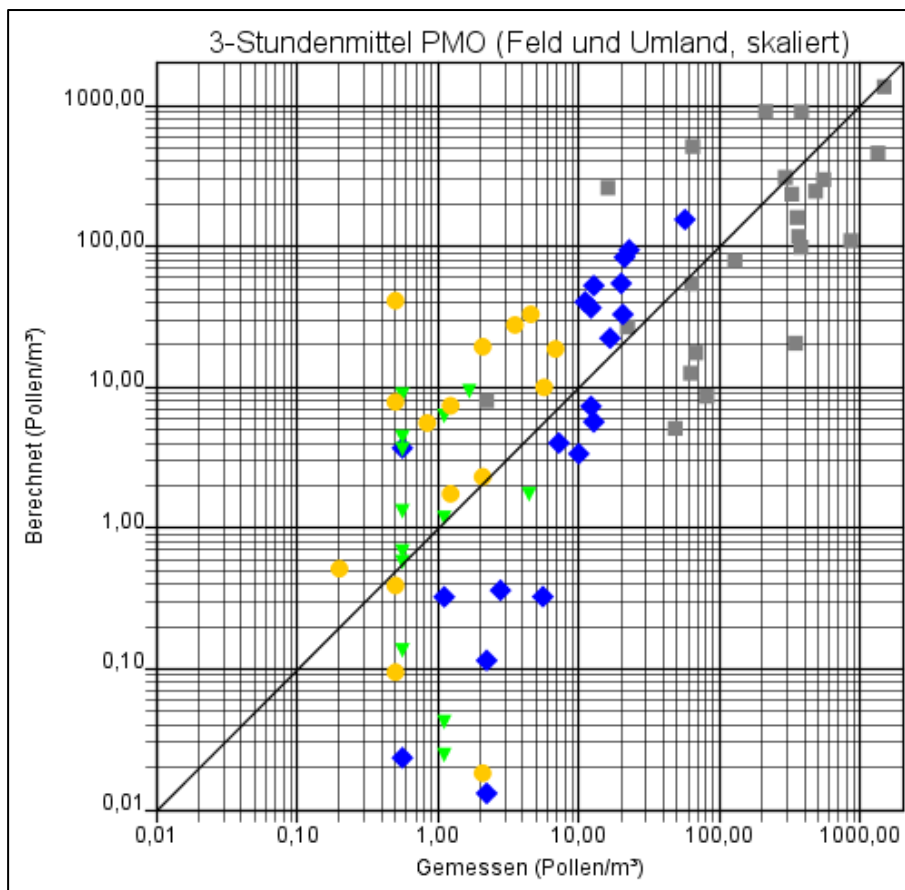


Abb. 57: Streudiagramm von gemessenen und modellierten, skalierten Werten. AN2 im Abstand 10 m, AN1 im Abstand 50 m, AN5 im Abstand 180 m, PMO-Messung (horizontale Achse) versus DWD-Messung (vertikale Achse) bei AN6. (Grafik: Janicke)

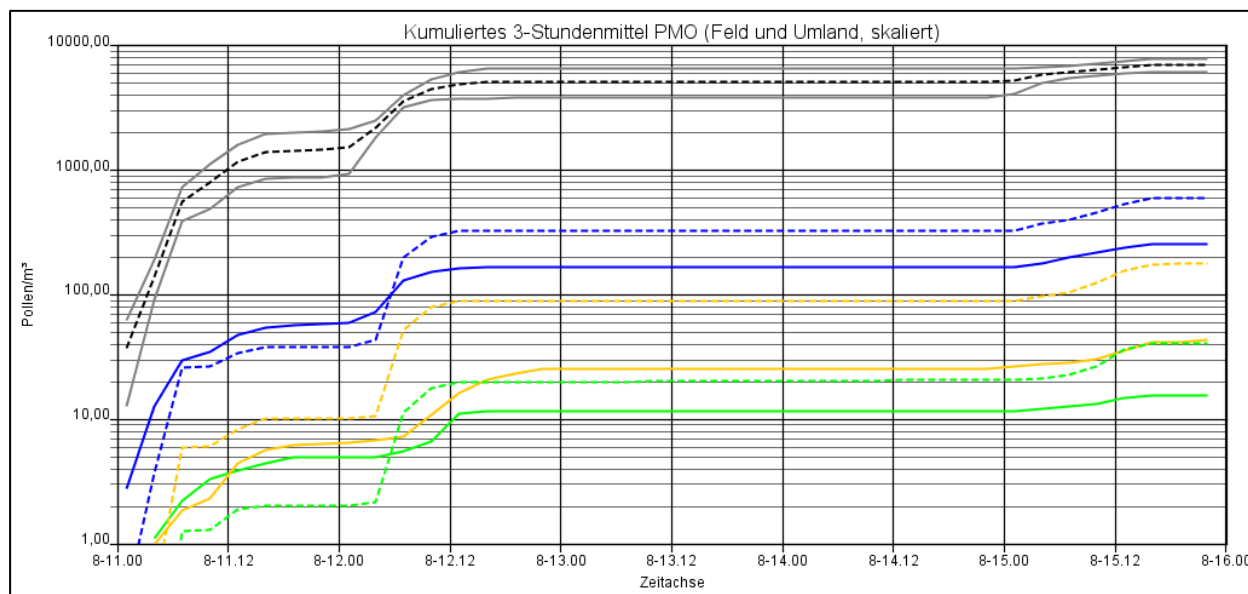


Abb. 58: Verlauf des kumulierten 3-Stundenmittels. Durchgezogene Linien: gemessen. Gestrichelte Linien: modelliert und skaliert, Versuchsfeld und Umland-Felder. AN2 (PMO) im Abstand 10 m, AN1 (DWD) im Abstand 50 m, AN5 (PMO) im Abstand 180 m. (Grafik: Janicke)

3.3.7.2.4 Vergleich der Tages-Mittel

Dieselbe Auswertung und Darstellung wie für die 3-Stunden-Mittel wurde für die Tages-Mittel durchgeführt. Abb. 59 bis Abb. 61 zeigen die Ergebnisse (Versuchsfeld und Umlandfelder). Für die Umlandfelder wurde der Skalierungsfaktor wie zuvor verwendet.

Die Übereinstimmung zwischen modellierten und gemessenen Tages-Mitteln ist besser als die für die 3-Stunden-Mittel. Allerdings ist die Streuung größer als die zwischen den beiden Messreihen PMO und DWD an der Position AN6 (vgl. Abb. 57 und Abb. 60). Das über den Gesamtzeitraum gemessene, kumulierte Tages-Mittel wird von der Modellrechnung für alle 3 Abstände mit einer relativen Abweichung von unter 50 % erstaunlich gut reproduziert.

Setzt man für die Umlandfelder statt $s_u = 150$ (Mittelwert der über die 3-Stunden-Mittel bestimmten Werte von $s_{f,i}$ über den Zeitraum 11. bis 16. August) den Mittelwert der über die Tages-Mittel bestimmten Werte von $s_{f,i}$ über den Zeitraum 22.07. bis 22.08.2010 an ($s_u = 35$), ergeben sich insgesamt nur geringe Unterschiede, da für die betrachteten Positionen der relative Beitrag der Umlandfelder klein ist. Erwartungsgemäß nimmt das kumulierte Tages-Mittel am stärksten an der vom Versuchsfeld entferntesten Position AN5 ab (von etwa 10 Pollen/m³ auf etwa 6 Pollen/m³).

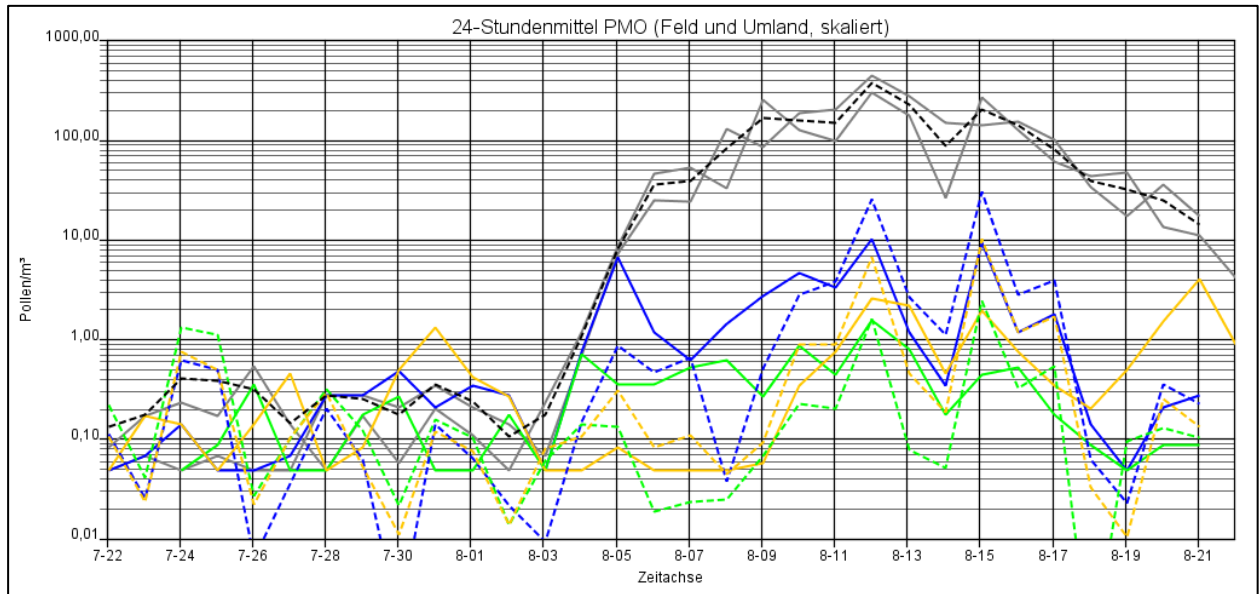


Abb. 59: Verlauf der Tages-Mittel. Durchgezogene Linien: gemessen. Gestrichelte Linien: modelliert und skaliert, Versuchsfeld und Umland-Felder. AN2 (PMO) im Abstand 10 m, AN1 (DWD) im Abstand 50 m, AN5 (PMO) im Abstand 180 m. (Grafik: Janicke)

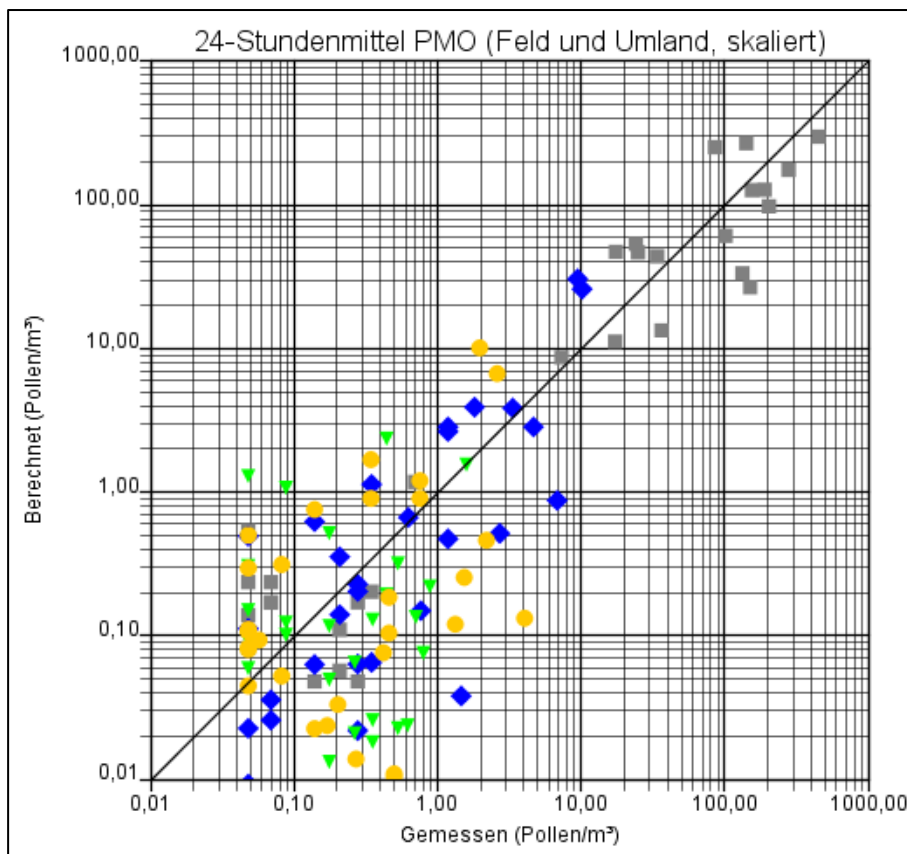


Abb. 60: Streudiagramm von gemessenen und modellierten, skalierten Werten. AN2 im Abstand 10 m, AN1 im Abstand 50 m, AN5 im Abstand 180 m, PMO-Messung (horizontale Achse) versus DWD-Messung (vertikale Achse) bei AN6. (Grafik: Janicke)

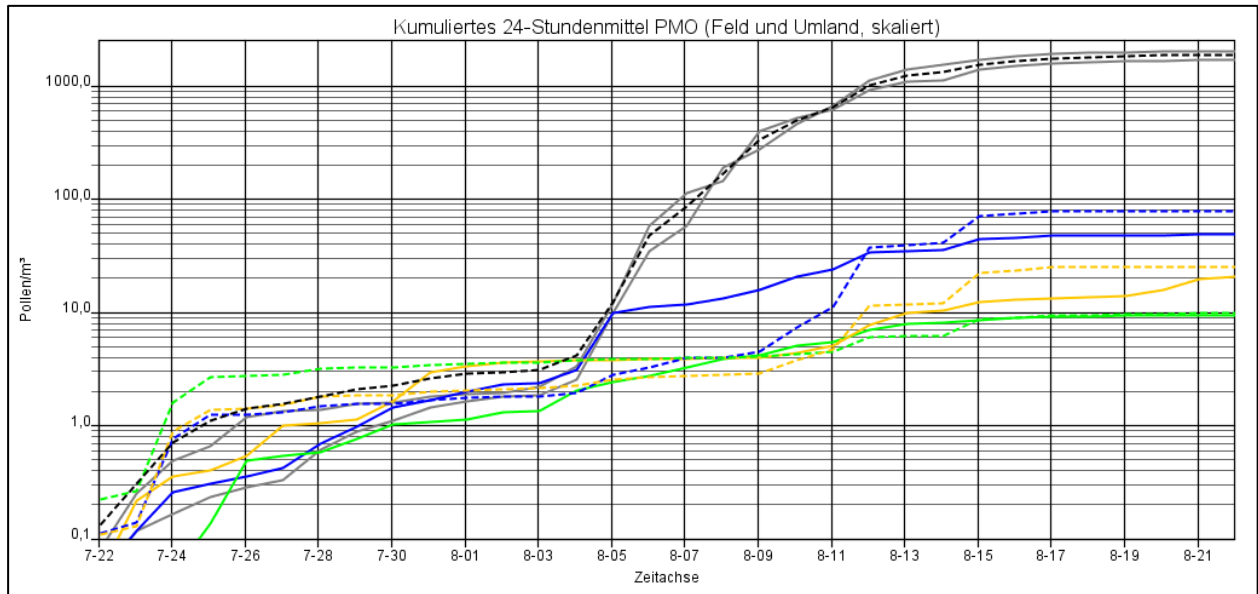


Abb. 61: Verlauf des kumulierten Tages-Mittels. Durchgezogene Linien: gemessen. Gestrichelte Linien: modelliert und skaliert, Versuchsfeld und Umland-Felder. AN2 (PMO) im Abstand 10 m, AN1 (DWD) im Abstand 50 m, AN5 (PMO) im Abstand 180 m. (Grafik: Janicke)

3.3.7.2.5 Vergleich mit den PMF-Langzeitmessungen

Neben den zeitaufauflösenden PMO-Messgeräten wurden an 23 Positionen PMF-Messgeräte (Pollenmassenfilter PMF) aufgestellt. Mit ihnen wurde das Zeitintegral der horizontalen Pollenflussdichte (Anzahl der Pollen pro Fläche) in etwa 1,8 m Höhe über Grund vom 22. Juli bis 22. August bestimmt, den Blühzeitraum der Maisfelder umfassend.

Die horizontale Pollenflussdichte ist das Produkt aus Anzahl-Konzentration und horizontaler Windgeschwindigkeits-Komponente.

$$\Phi = cu \quad (24)$$

Das Zeitintegral über diskrete Messintervalle $i = 1 \dots N$ der Zeitlänge Δt mit der Gesamtlänge $T = N \Delta t$ ist:

$$F = \int_0^T \Phi(t) dt = \Delta t \sum_{i=1}^N c_i u_i \quad (25)$$

Hierbei ist c_i die gemessene (oder modellierte) mittlere Konzentration für das i -te Messintervall und u_i entsprechend die mittlere Windgeschwindigkeit in Messhöhe.³⁹

³⁹Eine Richtungsabhängigkeit geht nicht ein, da die verwendeten PMF-Messgeräte für alle Anströmrichtungen denselben Einfangquerschnitt zeigen.

Diese mit dem PMF-Messgerät bestimmte Größe kann zu der mit dem PMO-Messgerät bestimmten Konzentration in eine einfache Beziehung gesetzt werden, wenn man annimmt, dass die Geschwindigkeit nicht mit der Konzentration korreliert ist, man also

$$F \approx \Delta t \bar{u} \sum_{i=1}^N c_i \quad (26)$$

mit dem Mittelwert $\bar{u}$ über die gesamte Messdauer T annehmen kann. In dieser Näherung ist F direkt proportional zur kumulierten Konzentration C_N :

$$F \approx \Delta t \bar{u} C_N = T \bar{u} \bar{c} \quad (27)$$

Diese Näherung erlaubt es, die beiden unabhängig voneinander bestimmten Messgrößen F (PMF-Wert) und C_N (kumulierter PMO-Wert) zu vergleichen, soweit sie sich auf denselben Standort und dieselbe Messperiode T beziehen.

Tab. 6 zeigt den Vergleich der Messwerte für die Positionen AN1, AN2, AN5 und AN6:⁴⁰

Tab. 6: Vergleich der Messwerte für die Positionen AN1, AN2, AN5 und AN6.

Position	F (1/m ²)	C_N (1/m ³)	$\Delta t \bar{u} C_N$ (1/m ²)	$(\Delta t \bar{u} C_N)/F$
AN1	750 000 (PMF)	21 (DWD)	2 903 040	3.9
AN2	2 214 286 (PMF)	49 (PMO)	6 773 760	3.1
AN5	428 571 (PMF)	10 (PMO)	1 382 400	3.2
AN6	35 857 143 (PMF)	2 049 (PMO)	194 736 960	5.4

Nach diesem Vergleich liefern die Auswertungen der PMF-Messgeräte eine um einen Faktor 3 bis 5 niedrigere Pollenzahl als die Auswertungen der PMO-Messgeräte.

Entsprechend der Gleichung (25) können auch aus den Ergebnissen der Modellrechnungen integrierte Pollenflussdichten bestimmt werden. Grundlage hierfür sind die Zeitreihe der 10-Minuten-Mittel der Windgeschwindigkeit, die berechneten 3-Stunden-Mittel für Versuchsfeld und Umlandfelder, die Skalierungsfaktoren abgeleitet aus den gemessenen Tages-Mitteln an Position AN6 (für die Beiträge des Versuchsfeldes) und ihr Mittelwert über den Zeitraum 22. Juli bis 22. August (für die Beiträge der Umlandfelder, $s_u = 35$). Die so für die Positionen außerhalb des Versuchsfeldes bestimmten Werte von F sind als Funktion des Abstandes vom nächsten Feld zusammen mit den gemessenen Werten in Abb. 62 grafisch dargestellt.

⁴⁰ $\Delta t = 24 \cdot 3600$ s, Mittelwert $\bar{u} \cong 1,6$ m/s für AN1, AN2 und AN5 außerhalb des Versuchsfeldes und $\bar{u} \cong 1,1$ m/s für AN6 im Versuchsfeld. Die Windgeschwindigkeit in Messhöhe wurde aus der Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe mit Ansatz eines logarithmischen Windprofils abgeleitet. Kleine Unterschiede in den Messperioden wurden vernachlässigt.

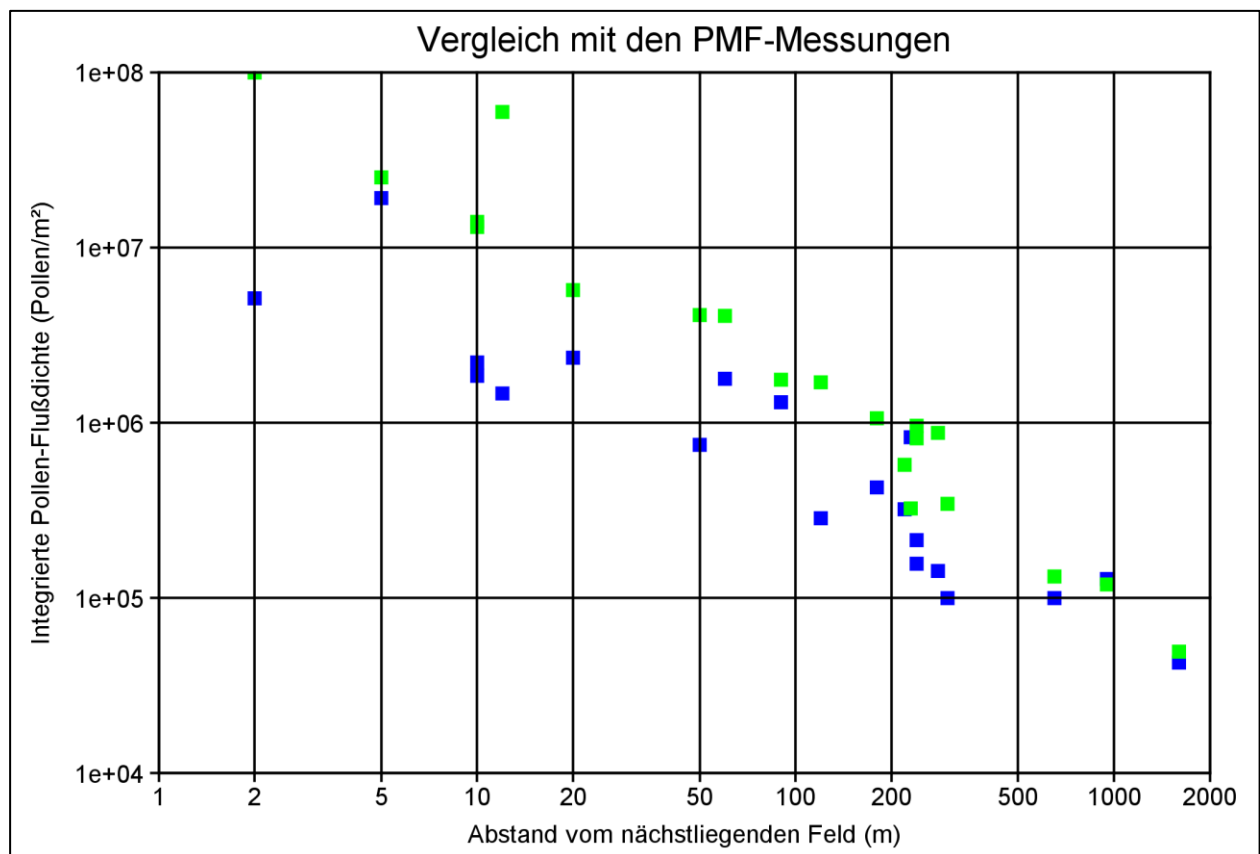


Abb. 62: Über den Zeitraum 22.07.2010 bis 22.08.2010 integrierte Pollenflussdichte als Funktion des Abstandes zum nächsten Maisfeld. **Blau: PMF-Messungen**, **Grün: Modellrechnungen**. (Grafik: Janicke)

An zwei Positionen (AN19 mit Abstand 12 m und AN23 mit Abstand 2 m) gibt es erhebliche Unterschiede. Das erscheint erklärbar, denn diese Positionen liegen direkt in einem Maisfeld nordöstlich des Versuchsfeldes, für das Größe und Zeitgang der Emission nicht bekannt waren.

An den anderen Positionen, wo entweder das ausgemessene Versuchsfeld oder eine Mischung weiter entfernt liegender Felder den Hauptbeitrag liefern, liegt das Verhältnis zwischen modelliertem und berechnetem Wert zwischen 0,3 und 5, wobei die Modellrechnungen eher zu einer Überschätzung der PMF-Messwerte neigen. Nach dem oben aufgeführten Vergleich zwischen PMO- und PMF-Messwerten könnte die Ursache hierfür in den aus den PMO-Messungen abgeleiteten Skalierungsfaktoren liegen.

Abb. 62 zeigt, dass, im Rahmen der beobachteten Streuungen, die aus den Messdaten abgeleitete Abstands-Abhängigkeit des Pollenflusses von der Modellrechnung gut wiedergegeben wird.

Anhand der modellierten Werte kann abgeschätzt werden, wie gut die Näherung in der Gleichung (27) ist. Das ist für die Praxis von Bedeutung, wenn aus dem PMF-Messwert F die mittlere Konzentration als $\bar{c} \approx F / (T\bar{u})$ abgeschätzt wird. Abb. 63 zeigt das Streudiagramm

von berechneter mittlerer Konzentration $\bar{c}$ versus der über den berechneten Wert von F abgeschätzten mittleren Konzentration $F/(T\bar{u})$. Es treten Abweichungen von bis zu einem Faktor 2 auf, wobei der geschätzte Mittelwert fast immer größer ist als der berechnete Mittelwert.

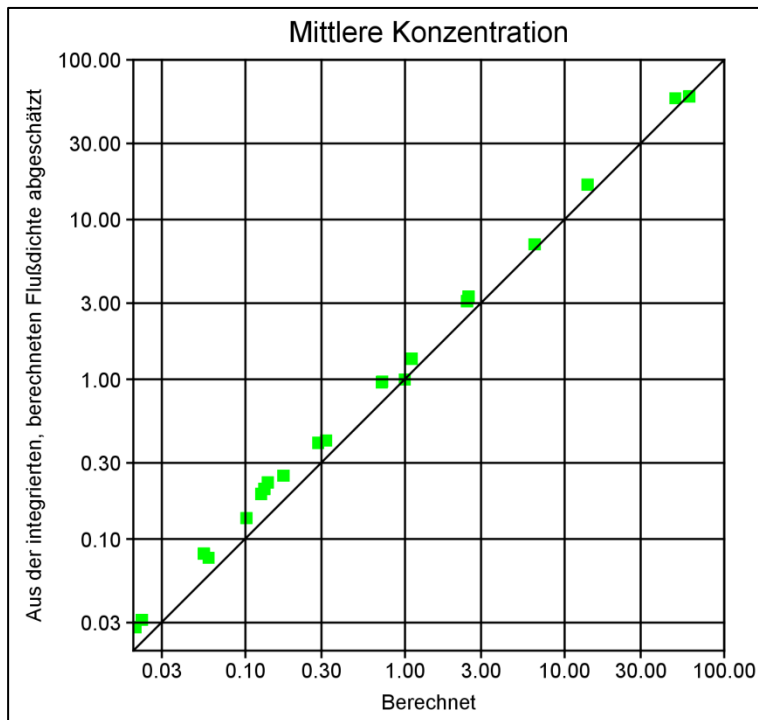


Abb. 63: Streudiagramm von berechnetem Konzentrationsmittel und dem aus der integrierten, berechneten Flußdichte abgeschätzten Konzentrationsmittel. (Grafik: Janicke)

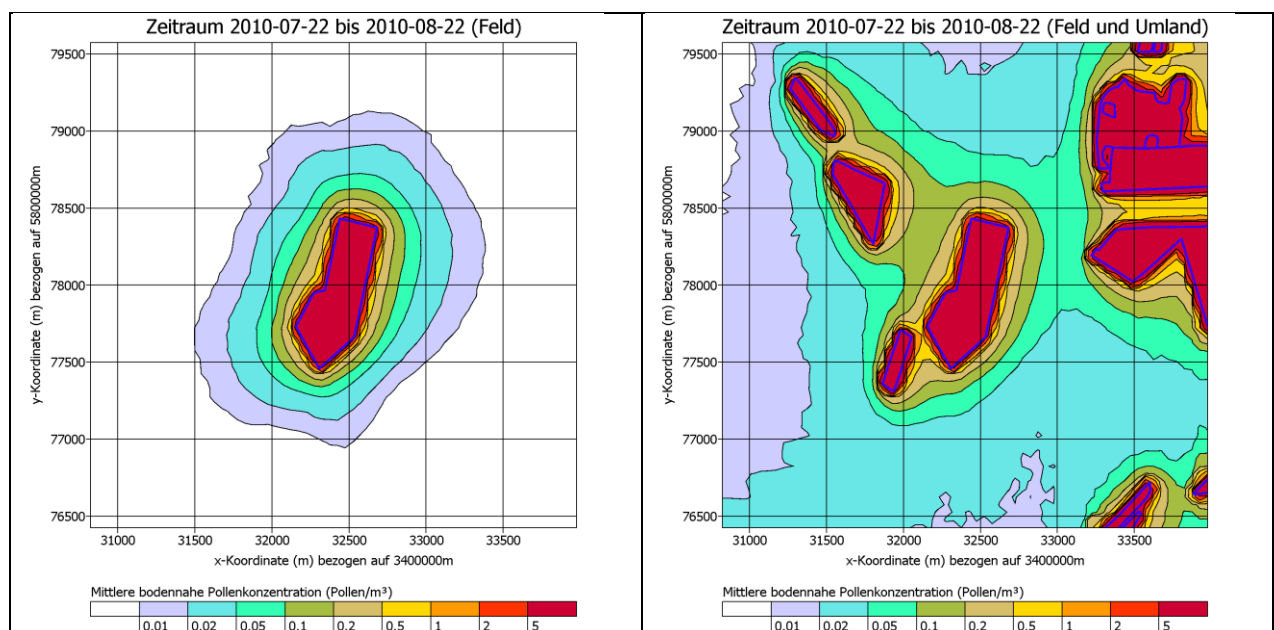


Abb. 64: Modellerte bodennahe Konzentrationsverteilung der Pollen (Mittelwert über den Zeitraum 22.07.2010 bis 22.08.2010). Links: Nur Beiträge vom Versuchsfeld. Rechts: Beiträge von Versuchsfeld und Umlandfeldern. (Grafiken: Janicke)

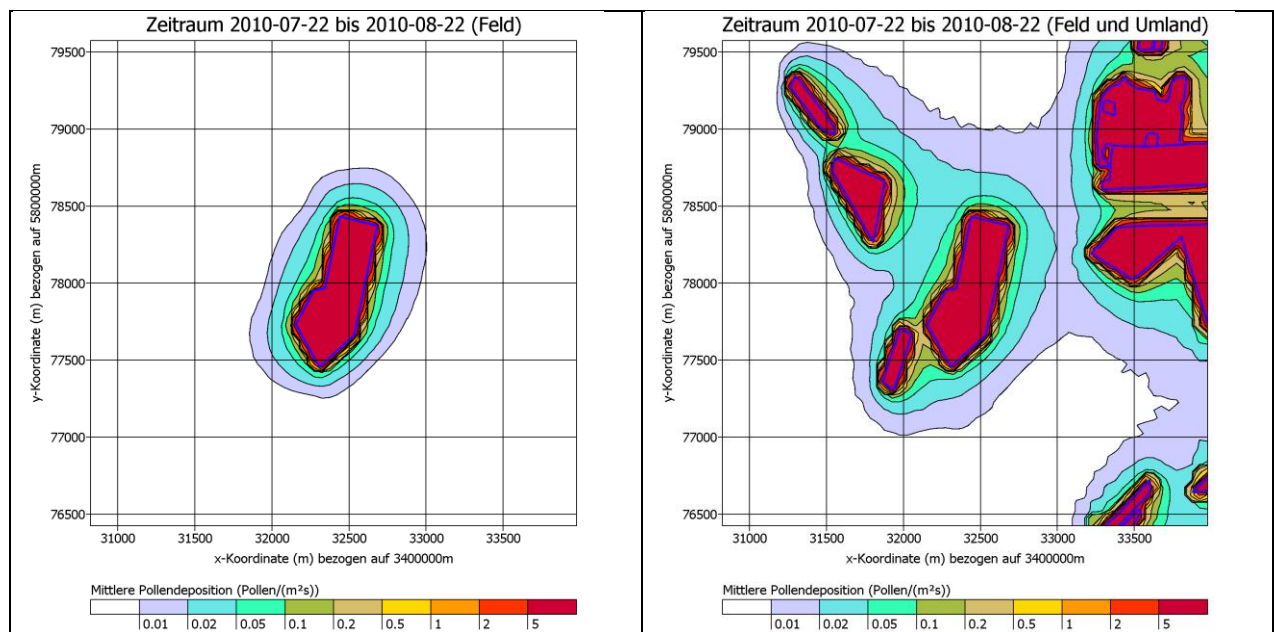


Abb. 65: Modellerte Deposition (Depositionsflussdichte aufgrund trockener Deposition) der Pollen (Mittelwert über den Zeitraum 22.07.2010 bis 22.08.2010). Links: Nur Beiträge vom Versuchsfeld. Rechts: Beiträge von Versuchsfeld und Umlandfeldern. (Grafiken: Janicke)

3.3.7.2.6 Zweidimensionale Pollenverteilung

Mit dem zuvor beschriebenen Verfahren kann aus den Ergebnissen der Ausbreitungsrechnung die gesamte bodennahe Immissionsverteilung der Pollen konstruiert werden (Skalierungsfaktor für das Versuchsfeld aus den Tages-Mitteln, Skalierungsfaktor für die Umlandfelder $s_u = 35$). In Abb. 64 und Abb. 65 ist der Mittelwert über den Zeitraum 22. Juli bis 22. August der bodennahen Konzentration bzw. der trockenen Deposition dargestellt, jeweils ohne und mit Berücksichtigung der Umlandfelder. Da für die Umlandfelder zwar ein Tagesgang, aber keine tagesabhängige Emissionsrate angenommen wurde, ist die Konzentrationsverteilung um jedes Feld aufgrund der Windrichtungsverteilung (siehe linker Teil von Abb. 52) etwas nach Osten verlagert. Für das Versuchsfeld wurde dagegen gemäß den lokalen Messungen eine tagesabhängige Emissionsrate mit einem Emissionsmaximum im Zeitraum 08.08.2010 bis 17.08.2010 berücksichtigt. Aufgrund der Windrichtungsverteilung für diesen Zeitraum (siehe rechter Teil von Abb. 52) ist die Konzentrationsverteilung um das Versuchsfeld in etwa symmetrisch bezüglich der Ostwest-Richtung.

3.3.7.2.7 Zeitreihen der Pollenimmission

Über die Ausbreitungsrechnung lassen sich auch für Standorte, an denen keine Mess-Instrumente positioniert waren, Zeitreihen der Pollenimmission entwickeln. Hier können die Immissionsraten als Konzentration, Fluss und auch (trockene) Deposition berechnet werden.

In Abb. 66 sind drei Zeitreihen mit Tageswerten zur Maispollenkonzentration dargestellt. Zwei stammen aus den Freilandmessungen mit dem Pollenmonitor PMO, die rote vom Standort AN6 in Feldmitte und die blaue vom Standort AN2 in 10 m Entfernung westlich vom Feldrand. Die dritte (magenta) wurde per Ausbreitungsrechnung für den Standort AN8 in 5 m Entfernung östlich vom Feldrand ermittelt, an dem keine Messinstrumente standen.

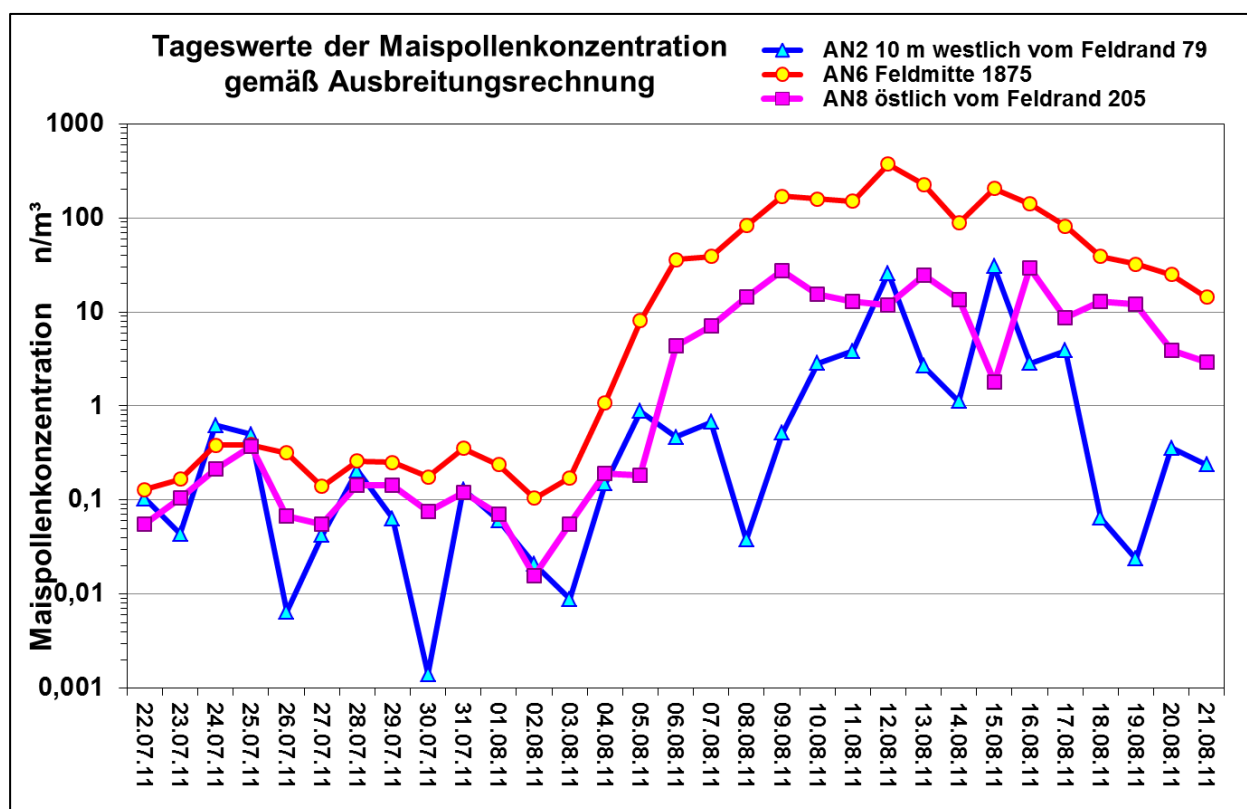


Abb. 66: Zeitreihen der Maispollenkonzentration. AN2 und AN6: Freilandmessungen über Pollenmonitor PMO in Feldmitte und 10 m westlich vom Feldrand; AN8: berechnet per Ausbreitungsmodell für Standort AN8 in 5 m Entfernung östlich vom Feldrand. (Grafik: Hofmann)

3.3.8 Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus der Untersuchungsphase II

Die Befunde der Messkampagne 2010 in Angermünde zur luftseitigen Konzentration von Maispollen wurden mit dem Ausbreitungsmodell LASAT Version 3.2 nachgerechnet.

Der modellierte räumliche und zeitliche Verlauf der bodennahen Anzahl-Konzentration in der Umgebung eines Versuchsfeldes wurde mit den zeitaufgelösten Auswertungen von 3 PMO-Messgeräten (3-Stunden-Mittel und Tages-Mittel) verglichen. Zusätzlich wurde das Zeitintegral der Pollenflussdichte über die gesamte Messdauer mit der Auswertung von 23 PMF-Messgeräten verglichen. Die Messpositionen befanden sich im Feld sowie bis zu einem Abstand von 1600 m vom nächsten Feldrand.

Für die Modellrechnungen wurden detaillierte meteorologische Messungen vor Ort verwendet. Die Emissionsrate des Versuchsfeldes und ihr Zeitgang wurde aus den Konzentrations-Messungen im Feld abgeleitet, die der Umlandfelder grob abgeschätzt. Alle anderen Eingangsparameter wurden auf übliche Standardwerte oder auf Werte gesetzt, die in einer unabhängigen Voruntersuchung abgeleitet worden waren.

Die Nachrechnungen stellen eine Validierung des Ausbreitungsmodells in Hinblick auf die Ausbreitung von Maispollen im Entfernungsbereich zwischen etwa 10 m und 1000 m vom Rand eines emittierenden Maisfeldes dar. Die Übereinstimmung zwischen Modellergebnissen und Messungen liegt typischerweise innerhalb eines Faktors 2 bis 4. Wesentliche systematische Unterschiede sind nicht zu erkennen. Die Übereinstimmung ist in der gleichen Größenordnung wie die, die für unabhängige Messreihen zur Pollenkonzentration an demselben Messort beobachtet wurde.

Die Ergebnisse belegen, dass der räumliche Verlauf der Pollen-Anzahlkonzentration mit einem Lagrangeschen Partikelmodell nach Richtlinie VDI 3945-3 und einfachen Standardsetzungen realitätsnah beschrieben werden kann. Das Modell kann damit für Fragestellungen eingesetzt werden, für deren Beantwortung keine ausreichenden Messdaten vorliegen, beispielsweise für flächendeckende Immissionsbestimmungen, Berechnung von Zeitreihen der Immissionsbelastung für Standorte, wo keine Messdaten vorliegen, Prognoserechnungen und Festlegung von Sicherheitsabständen.

In der Untersuchungsphase II wurden die zeitlich differenzierten Freilandmessungen anhand eines zentralen Maisversuchsfeldes vorgenommen. Die phänologischen Beobachtungen zeigten deutliche Unterschiede im Einsetzen der Maisblüte von Feld zu Feld in der Region. In der folgenden Untersuchungsphase III gilt es den Einfluss der Variabilität des Blühverhaltens näher zu untersuchen im Hinblick darauf, wie dieser Aspekt in der Ausbreitungsmodellierung angemessen zu berücksichtigen ist.

3.4 Untersuchungsphase III: Ergänzende Freilandmessungen im Jahre 2011

3.4.1 Aufgabenstellung

Die Zielsetzung in Phase III baute auf den Ergebnissen aus Phase II (2010) auf. In dieser Phase wurden Unterschiede im zeitlichen Verlauf der Maispollenschüttung zwischen den Maisfeldern von bis zu 3 Wochen im Blühbeginn festgestellt, deren Einfluss auf die Validierung der Ausbreitungsrechnungen nicht abschließend geklärt werden konnte. Im Jahr 2011 sollten daher in Phase III gezielt Maisfelder mit unterschiedlichen Blühzeitpunkten untersucht werden, um dies bei den Ausbreitungsrechnungen angemessen zu berücksichtigen.

Hierzu wurde der Maisanbau im Untersuchungsraum aus den Anmeldedaten (INVEKOS) per GIS in 2011 aufgenommen. Der Blühverlauf der Maisfelder in der näheren Umgebung der Versuchsfelder wurde klassifiziert. Ferner wurden drei benachbarte exemplarische Maisfelder mit unterschiedlichem Blühverhalten ausgewählt, an denen zeitlich hochaufgelöste Messungen mit dem Pollenmonitor PMO zum Verlauf der Maispollenschütte durchgeführt wurden. Zudem wurde ein vierter Pollenmonitor in einem Sojafeld zwischen zwei Maisfeldern positioniert, in 80 m bzw. 100 m Abstand von den Maisfeldern.

Die räumliche Variation der Maispollenimmission wurde wie in den vorigen Phasen mit dem standardisierten Verfahren des Pollen-Massenfilters PMF erfasst. Die Auswahl der 22 Standorte dafür erfolgte auf Grundlage der Ausbreitungsmodellierung aus Phase II. Die Ergebnisse zur räumlichen und zeitlichen Variation der Maispollenimmission bildeten die Grundlage für die Validierung der Ausbreitungsmodellierung.

3.4.2 Untersuchungsdesign

Um die Überlagerungseffekte zu berücksichtigen, wurde für die Ausbreitungsmodellierung ein Untersuchungsgebiet von 30 x 30 km gewählt, in dem sämtliche Maisfelder in die Ausbreitungsrechnung einbezogen wurden. Ziel war es, die räumliche Verteilung der Maispollendeposition für das innere 20 x 20 km große Gebiet zu ermitteln. Der äußere Randstreifen diente dazu, Polleneinträge im Randbereich zu berücksichtigen. In Abb. 67 ist der Untersuchungsraum bei Angermünde mit Lage der Maisfelder dargestellt. Die Versuchsfelder bei Kerkow liegen im Zentrum. Für das engere Umfeld von ca. 10 x 10 km als Kerngebiet wurde die genaue Lage der einzelnen Maisfelder kartiert, mit den Angaben im GIS abgeglichen und falls notwendig korrigiert.

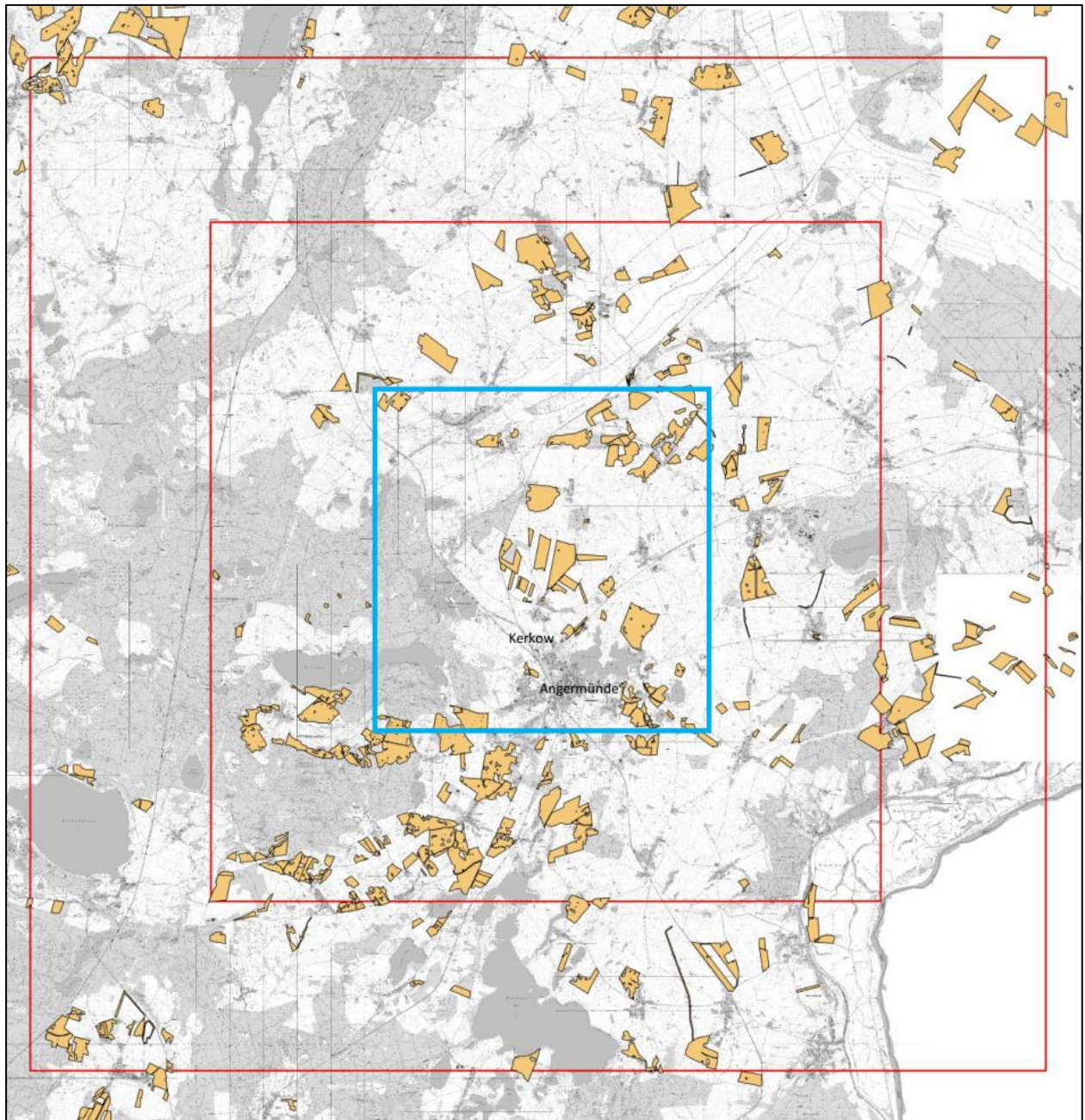


Abb. 67: Lage der Maisfelder im Untersuchungsraum bei Angermünde, Versuchsfelder im Zentrum (Rahmen: 30 x 30 km, 20 x 20 km und 10 x 10 km). (Grafik: Peil)

Um die Versuchsfelder auszuwählen, führten wir ab Anfang Juni eine phänologische Bonitur der Maisfelder durch, um den Blühbeginn abzuschätzen.⁴¹ Dabei wurden benachbarte Maisfelder im gleichen phänologischen Entwicklungsstadium (Meier 2001) zusammengefasst.

⁴¹ Die Arbeiten hierzu wurden wesentlich unter Mitwirkung des LUGV (R. Vögel, J. Peil) mit Unterstützung durch die Naturwacht (A. Schrade) und B. Boessenkool (Univ. Potsdam, GIS) vorgenommen.

Zur Feststellung der Entwicklungsstadien der Maisfelder sowie zur Bestimmung von Beginn und Verlauf der Pollenschüttung wurde der sog. BBCH-Code genutzt ⁴². Ab Beginn der kritischen Blühphase wurden die Entwicklungscode täglich erfasst. Dazu wurden 3 x 50 Pflanzen bonitiert und der Mittelwert gebildet. Da die BBCH-Skala keine Aussage zum Verlauf der Pollenschüttung zulässt, wurde diese prozentual mittels Einschätzung pollenschüttender Infloreszenzen visuell erfasst. In Tab.7 sind die ausgewerteten Maisfelder mit den Ergebnissen zur phänologischen Ansprache bis zum Blüheintritt gelistet. In der dritten Spalte findet sich die Klassifikation in früh-, mittelfrüh und spätblühend. Die Ergebnisse aus der phänologischen Ansprache sind in Abb. 68 graphisch dargestellt, wobei die Felder entsprechend der Klassifikation zum Blüheintritt farblich markiert sind.

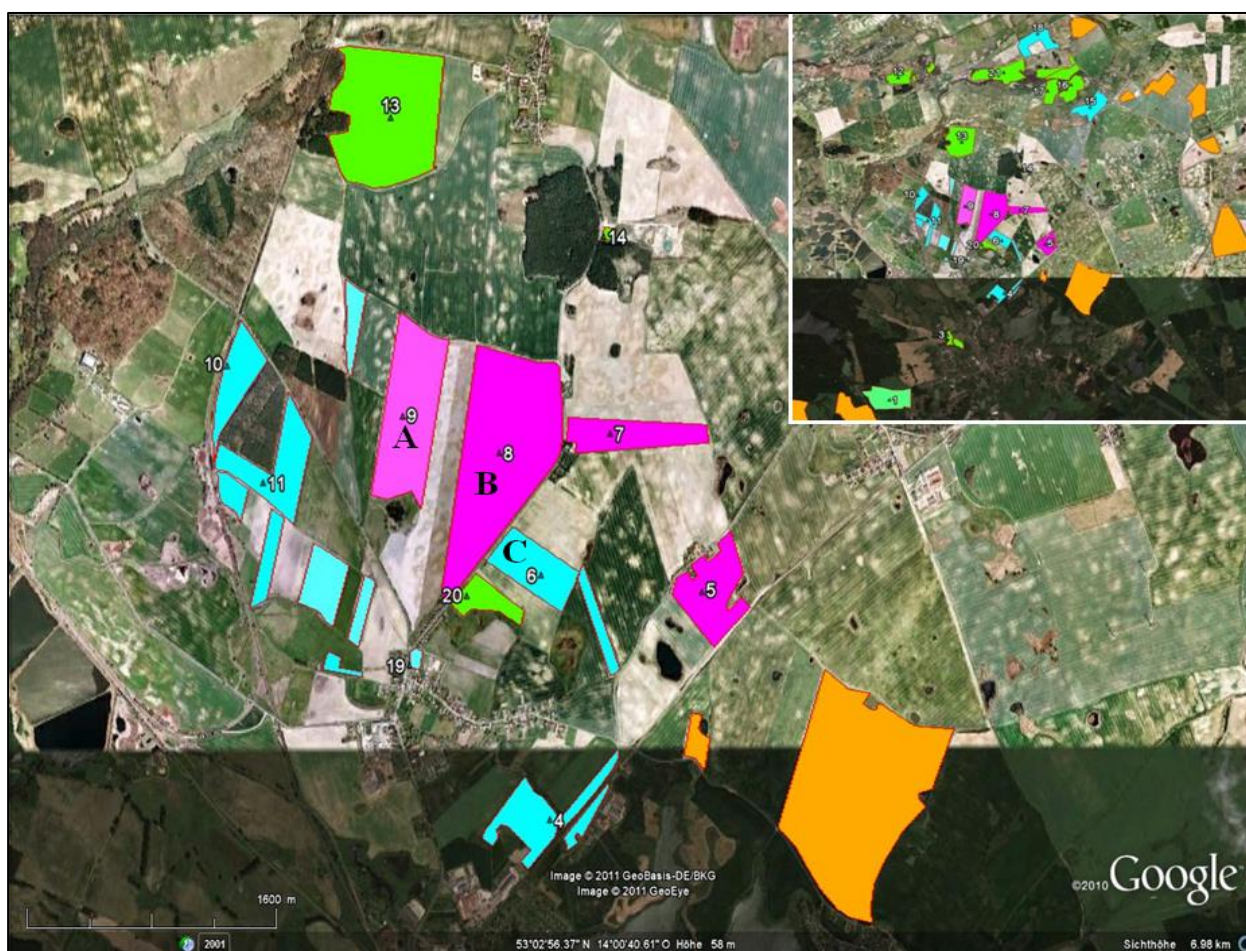


Abb. 68: Klassifizierung der Maisfelder im Umfeld der Versuchsfelder (A, B, C) nach Blühverhalten
Nummerierung und Klassifikation gemäß BBCH-Code
grün = früh-blühend; cyan = mittelfrüh-blühend
magenta = spät-blühend; orange = nicht klassifiziert.
(Hintergrundbild aus Google-Earth)

⁴² Quelle: Entwicklungsstadien mono- u. dikotyler Pflanzen, BBA 2002:
pub.jki.bund.de/index.php/BBCH/article/view/290/246

Als zentrale Untersuchungsfelder in 2011 wurden die Felder Nr. 9 (A) und Nr. 8 (B) gewählt, die durch ein Sojafeld getrennt waren. Beide Felder gehören zur spätblühenden Kategorie. Sie wurden jeweils mit einer Messstation ausgestattet, um die Variation im Blühverlauf zu ermitteln. Im Zwischenstreifen wurde eine zusätzliche Messstation platziert, um den Verlauf von Maispollen-Emission und Immission für beide Hauptwindrichtungen und über einen längeren Auswertungszeitraum abzuklären. Im näheren Umfeld befanden sich Maisfelder aller Blühkategorien von früh- bis spätblühend:

- Von den frühblühenden Maisfeldern war nur ein kleineres Feld (Nr. 20) benachbart, das deshalb nicht geeignet war.
- Das ebenfalls frühblühende Feld Nr. 13 lag für den Versuchsaufbau in ungünstiger Windrichtung und zu weit entfernt.
- In unmittelbarer Nachbarschaft fand sich jedoch ein geeignetes, mittelfrühblühendes Maisfeld (Nr. 6) mittlerer Größe, das als drittes Versuchsfeld (C) für die Positionierung einer weiteren Messstation gewählt wurde.

Tab. 7: Auflistung der Maisfelder im Umfeld von Kerkow mit Ergebnissen der phänologischen Beobachtungen und Klassifizierung der Versuchsfelder

Feld Nr.	Ortsbezeichnung	Klassifizierung Blühstatus	25.5.	9.6.	13.7.	%	21.7.		24.7.		27.7.			2.8.		
			BBCH	BBCH	BBCH	Infl.%	BBCH	Infl.%	BBCH	Infl.%	BBCH	Infl.%	Wuchshöhe	BBCH	Infl.%	Wuchshöhe
1	Sternfelde west	früh	1	16	51	5	64	100	64	20	66	20	2,7m	Vollblüte		
3	Angermünde Kläranlage	mittelspät	1	15	60	55	64	90	64	50	66	50	2,7m	Vollblüte		
4	Angermünde, Metzen	mittelfrüh	1	16	37		62	90	59-63	5	65	60	3,0m	Vollblüte		
5	Mürow Ausbau	mittelfrüh	1	16	34				59-63	10	64	60	2,1m	Vollblüte		
6	Kerkow süd	mittelfrüh	1	16	47		63	90	61-65	30	65	100	2,4m	61-65 h	100	2,3 m
7	Kerkow Ausbau Welsow	mittelfrüh	1	15	46		54	20	46-63	5	51-65	20	2,0m	61-65 h	80	2,1m
8	Kerkow, Gut Ost	spät	1	13	35		4-5er	0	51-61	0	53-61	1	1,9m	56-61	5	1,9 m
9	Kerkow Gut West	spät	1	12	35		4-5er	0	51-61	0	51-63	2	2,1m	59-62	10	2,1 m
10	Kerkow, Bahn ost		1	12												
11	Kerkow Bahn West	spät	1	12	34		62	0	51	0	51	0	1,6m	61-65	20	2,0 m
12	Bruchhagen	mittelfrüh	1	17	63	90	65	90	61-65	30	65	50	2,5m	Vollblüte		
13	Welsow	mittelfrüh	1	16	57	30	65	90	65	70	65	90	2,7m	Vollblüte		
14	Welsow Kippe	mittelfrüh	1	17	57	30	65	90	65	70	65	90	2,6m	Vollblüte		
15	Frauenhagen	mittelfrüh	1	15	47		63	90	63-65	50	65	80	2,8m	Vollblüte		
16	Frauenhagen Nord	mittelfrüh	1	16	58	50	63	90	61-65	40	65	90	2,8m	Vollblüte		
17	Frauenhagen Nord 2	mittelfrüh	1	17	58	20	63	90	65	70	65	80	2,4m	Vollblüte		
18	Wilhelmshof	mittelspät	1	14	35		59	5	46-63	2	51-63	20	2,0m			
19	Kerkow, Kleinfeld	spät		14	43		62	1	63	20	64	10	2,3m		60	
20	Kerkow, Ausgang Ost	früh		17	56	15	64	100	65	70	65	100	2,8m	Vollblüte		
21	Breitenteichsche Mühle	früh		16	51	25	,---		61-65	30	65	100	3,0m	Vollblüte		

3.4.3 Messung der zeitlichen Variation des Maispollenfluges

Für die zeitliche Variation des Maispollenfluges wurde die Maispollenkonzentration in drei exemplarischen Maisfeldern mit unterschiedlichem Blühverhalten (Abb. 69: A, B und C) sowie in dem zwischen den Maisfeldern A und B gelegenen Sojafeld gemessen.

Die Messstandorte mit den Maisfeldern der näheren Umgebung zeigen die folgenden Abbildungen:



Abb. 69: Standorte der Pollenmonitore in 2011 zur Erfassung der Variation der Maispollenemission und -immission in den Maisfeldern A, B und C; Messplatz 7 zwischen den Feldern A und B. (Hintergrundbild aus Google-Earth)



Abb. 70: Detailskizze der Pollenmonitor-Messstandorte in und zwischen den Maisfeldern A und B

- (Hintergrundbild aus Google-Earth)
-  Pollenmonitor
 -  PMF
 -  PMF/Sigma-2



Abb. 71: Detailskizze zur Lage der Pollenmonitor-Messstandorte in Maisfeld C

- (Hintergrundbild aus Google-Earth)
-  Pollenmonitor
 -  PMF
 -  PMF/Sigma-2



Abb. 72: Pollenmonitor PMO-LV_{Solar} mit Passivsammler PMF (AN1) und PMF/Sigma-2 (AN2) am Standort AN1 im Maisfeld A (Zeitpunkt der Installation 7.7.2011 vor Blühbeginn). (Bild: Hofmann)



Abb. 73: Pollenmonitor PMO-LV_{Solar} mit Passivsammler PMF (AN5) und PMF/Sigma-2 (AN6) am Standort AN5 im Maisfeld B kurz vor Blühbeginn am 19.7.2011. (Bild: Hofmann)



Abb. 74: Pollenmonitor PMO-LVSolar mit Passivsampler PMF (AN3), dahinter PMF/Sigma-2 (AN4) an der Messstation AN3 im Maisfeld C während der Maisblüte (2.8.2011). (Bild: Hofmann)

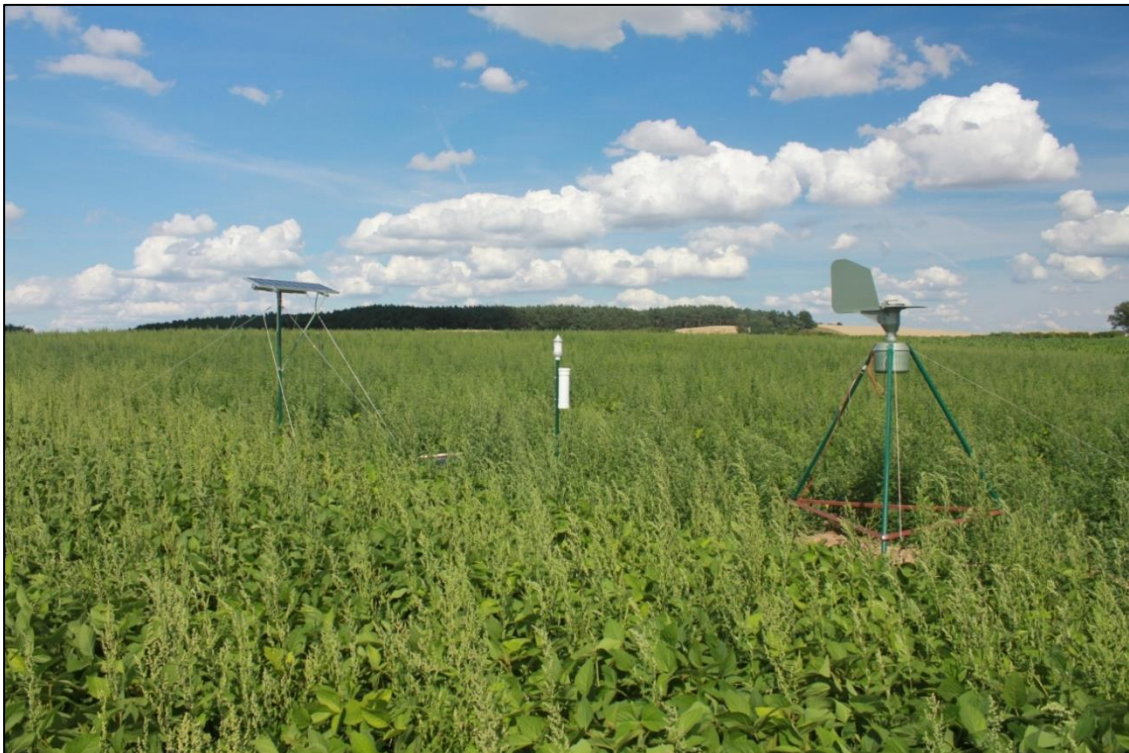


Abb. 75: Messstandort AN7 mit Pollenmonitor Burkard im Solarbetrieb und Passivsampler PMF im Sojafeld zwischen den Maisfeldern A und B (19.7.2011). (Bild: Hofmann)

Die Maispollenkonzentration in der Luft wurde innerhalb des Maisfeldes mittels Pollenmonitor PMO (PMO-LV_{Solar}, TIEM technic GbR, siehe Abb. 72 - Abb. 74) und Burkard-Falle (Burkard Manufacturing Ltd., siehe Abb. 75) erfasst. Beide Aktivsammler sind volumetrische Low-Volume-Sammler, die als netzunabhängige Version mit 12 V und mit solarer Stromversorgung betrieben wurden (Solarstation von TIEM technic GbR, siehe Abb. 76).

Der PMO-LV_{Solar} besitzt einen Rundum-Einlass und eine Abscheide-Einheit nach Hirst (Sporewatch), womit er eine Abwandlung des in Phase II eingesetzten Pollenmonitors PMO-HV (High Volume) ist. Der Rundum-Einlass gestattet die Erfassung von Maispollen in Quellnähe (auch innerhalb der Bestände). Das Gerät hat einen geringen Stromverbrauch, so dass ein netzunabhängiger Betrieb möglich ist. Die Sammlung erfolgt mit 10 l/min über die Impaktoreinheit.

Außerhalb der Maisfelder wurde wie in Phase II die Burkard-Falle verwendet.⁴³ Die Burkard- und die Hirst-Falle ist das Standardgerät der Pollen-Informationsdienste in Europa.⁴⁴ Die Hirst-Falle ist aufgrund des geringen Luftvolumens und der Sensitivität des über eine Windfahne ausgerichteten Einlasses bei turbulenten Windverhältnissen nicht für die Erfassung von schweren und großen Partikeln wie Maispollen in Quellnähe geeignet, so dass dieser Fallentyp nur außerhalb der Maisbestände verwendet wurde.



Abb. 76: Solarstation der 12V-Pollenmonitor-Messstationen (TIEM technic GbR) mit Solarmodul 12 V 80 W in 3 m Höhe auf Gestell mit verstellbarem Neigungswinkel (hier ca. 20°), rechts Solarakku-Zwischenspeicher mit 200 Ah Kapazität für mindestens 5 Tage Pufferlaufzeit (2 Solarbatterien 12 V à 100 Ah parallel geschaltet) und Solarregler. (Bilder: Hofmann)

⁴³ Im Gegensatz zum PMO sind beide Burkard-Versionen netzabhängige Low-Volume-Sammler mit einem Einsaug-Volumen von 10 l/min und gerichtetem Einlass

⁴⁴ Die Sporen- und Pollenfalle nach Hirst (1951) wird derzeit in diversen Ausführungen von drei Herstellern vertrieben: Burkard Manufacturing Ltd., Burkard Scientific Ltd. und Lanzoni s.r.l. Verwendet wurde die „7-Day Spore and Pollen Trap“ von Burkard Manufacturing Ltd.

Tab. 8: Vergleich der Sammeleffizienz Pollenmonitore PMO-High Volume, PMO-LV_{Solar} (Low Volume) und Burkard-Falle (Low Volume) in Vergleichsmessungen mit dem nach VDI 4330 Bl. 3 (2007) standardisierten Verfahren Pollen-Massenfilter PMF mit Ableitung von Kalibrierfaktoren (Bezugssystem PMO High Volume)

	Pollenmassenfilter PMF		Pollenmonitor PMO-HV High Volume		Ratio	Bezugsfaktor
	n/PMF		n/PMO		PMO/PMF	PMO-HV
2010	AN6	100.400	AN6	29.506	0,29	
2010	AN2	6.200	AN2	700	0,11	
2010	WES	2.080	WES	634	0,30	
					0,24	100 %
	Pollen-Massenfilter PMF		Pollenmonitor PMO-LV_{Solar} Low Volume		Ratio	Bezugsfaktor
	n/PMF		n/PMO		PMO/PMF	f_{PMO-LV}
2011	AN2	140.995	AN1	9.770	0,07	3,42
2011	AN4	94.052	AN3	7.665	0,08	2,91
2011	AN6	124.252	AN5	9.219	0,07	3,20
					0,07	3,16
	Pollen-Massenfilter PMF		Pollenmonitor Burkard-Falle, Low Volume		Ratio	Bezugsfaktor
	n/PMF		n/Burkard		Burkard/PMF	f_{Burkard}
2009	WES	3.800	WES	675	0,18	1,33
2010	WES	2.080	WES	397	0,19	1,24
2011	WES	4.188	WES	508	0,12	1,95
2010	AN5	1.200	AN5	137	0,11	2,08
2011	AN7	5.027	AN7	488	0,10	2,44
					0,14	1,69

Die Sammeleffizienz der drei Pollenmonitore, PMO-HV (High-Volume Sammler), PMO-LV_{Solar} (Low-Volume Sammler) und Burkard-Falle (Low-Volume Sammler) für Maispollen wurde anhand von Vergleichsmessungen mit dem standardisierten Verfahren des Pollen-Massenfilters PMF verglichen und entsprechende Kalibrierfaktoren (Faktor f) mit dem High-Volume Pollenmonitor PMO-HV als Bezugssystem PMO abgeleitet. Tab. 8 belegt, dass mit dem Low-Volume Aktivsammler PMO-LV_{Solar} bei Positionierung im Maisfeld Anzahlen von 7.665 - 9.770 Maispollen über den Blühzeitraum erfasst wurden. Mit dem nach VDI 4330 Bl. 4 (2007) standardisierten passiven Pollen-Massenfilter PMF wurden an den gleichen Standorten Anzahlen von 94.052 - 140.995 Maispollen gesammelt. Im Mittel beträgt die Ratio PMO-LV_{Solar} zu PMF für Maispollen 7,5 %. Für das Low-Volume Aktivgerät Burkard-Falle weisen die Ergebnisse aus 6 Messjahren eine Sammeleffizienz für Maispollen

von 14 % gegenüber dem PMF aus. Mit dem High-Volume Aktivsammler PMO-HV, der mit einer Ansaugleistung von 1.000 l/min am Einlass und im Bypass für die Impaktor-Einheit von 10 l/min, beträgt die Sammeleffizienz gegenüber dem PMF 24 %. Für den Low-Volume Pollenmonitor PMO-LV_{Solar} ist somit von einer auf ca. ein Drittel reduzierten Sammeleffizienz gegenüber dem High-Volume Pollenmonitor PMO-HV mit Netzversorgung auszugehen, so dass für die Messwerte des PMO-LV_{Solar} 2011 ein entsprechender Kalibrierfaktor $f_{LV_Solar} = 3,16$ (vgl. Tab. 8) berücksichtigt wurde. Der Kalibrierfaktor für den Low-Volume Pollensammler Burkard-Falle betrug $f_{Burkard} = 1,69$.

Eine unabhängige Abschätzung der Sammeleffizienz erfolgte in den Ausbreitungsrechnungen der Jahre 2009-2011. Daraus wurde für den 2011 eingesetzten Pollenmonitor PMO-LV_{Solar} ein vergleichbarer Bezugsfaktor von 3,2 ermittelt.

Ergebnisse:

Die Ergebnisse zum Verlauf der Maispollenkonzentration an den vier Messstandorten im Jahr 2011 sind als mittlere Tageswerte in Abb. 77 und als 3h-Werte in Abb. 78 angegeben. Abgebildet ist die mittlere Maispollenkonzentration in logarithmischem Maßstab. Auf der waagerechten Zeitachse sind Tage aufgetragen, in Abb. 78 mit Bezeichnung des jeweils ersten 3h-Intervalls (Mittelpunkt des Intervalls, 1:30 bedeutet Intervall von 0:00 bis 3:00 MEZ [ohne Sommerzeit]).

Die Messungen wurden zu Blühbeginn am 14. Juli in Feld C (Standort AN3, rote Kurve) aufgenommen. Aus den Abbildungen geht der Blühbeginn des als mittelfrüh klassifizierten Maisfeldes hervor. In der Region setzte die Blüte der ersten frühblühenden Maisfelder um den 10./11. Juli ein. Der Kurvenverlauf belegt drei Hauptblühphasen in dem Feld:

- erste Blühphase vom 14. bis 21. Juli gefolgt von einer Unterbrechung aufgrund einsetzender kühler und nasser Witterung,
- zweite Blühphase vom 23. bis 28. Juli, gefolgt von einer weiteren Unterbrechung,
- dritte Blühphase vom 30. Juli bis zum 5. August, gefolgt von einer Nachblüte bis zum 12. August.

Die Blüte in den spätblühenden Maisfeldern A (AN1, blaue Kurve) und B (AN5, grüne Kurve) begann ca. 2 Wochen später, setzte zunächst zögerlich am 27. Juli, dann aber voll um den 1. August ein. Die Blüte verlief relativ kompakt bis zum 12. August. Die Blüte in Feld B ging dabei etwas schneller vonstatten und zeigte bereits am 1. und 2. August die höchsten Werte. Die Maxima in Feld A wurden hingegen zwischen dem 4. und 6. August erreicht. Die Hauptblüte erstreckte sich bis zum 12. August, mit Nachblüte bis über das Messende am 16. August hinaus.

Die lila Kurve gibt die Maispollenkonzentration für den Standort AN7 an, der im 180 m breiten Sojafeld zwischen den beiden Maisfeldern A und B positioniert war, mit einem Abstand von 100 m zu Feld A und 80 m zu Feld B. An diesem entfernten Standort wurden Maispollenkonzentrationen über $>1 \text{ n/m}^3$ während des Blühzeitraums der beiden Felder A und B gemessen, wobei hier windrichtungsabhängig 3h-Werte bis 46 n/m^3 und mittlere Tageswerte bis $8,1 \text{ n/m}^3$ erreicht wurden.

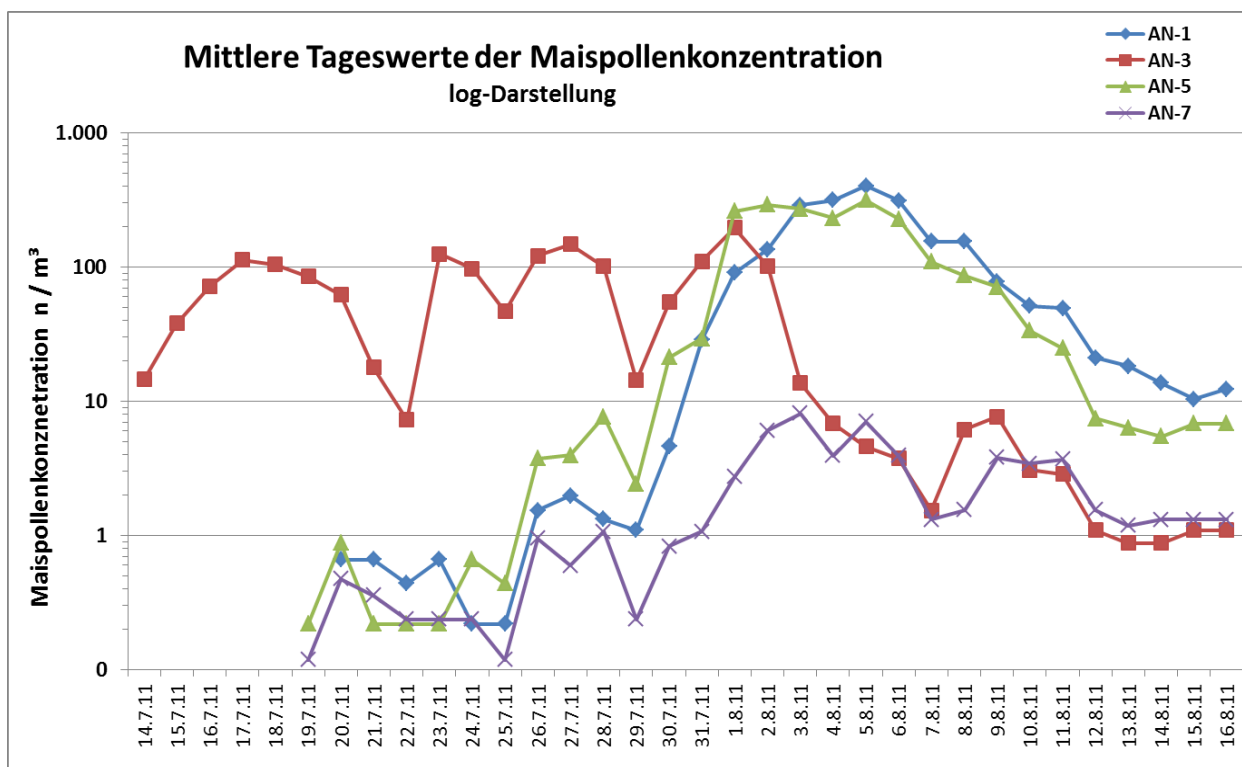


Abb. 77: Mittlere Tageswerte der Maispollenkonzentration im logarithmischen Maßstab.

AN1 (Maisfeld A), AN5 (Maisfeld B), AN3 (Maisfeld C) und AN7 (Sojafeld zwischen A und B).

(Grafik: Hofmann)

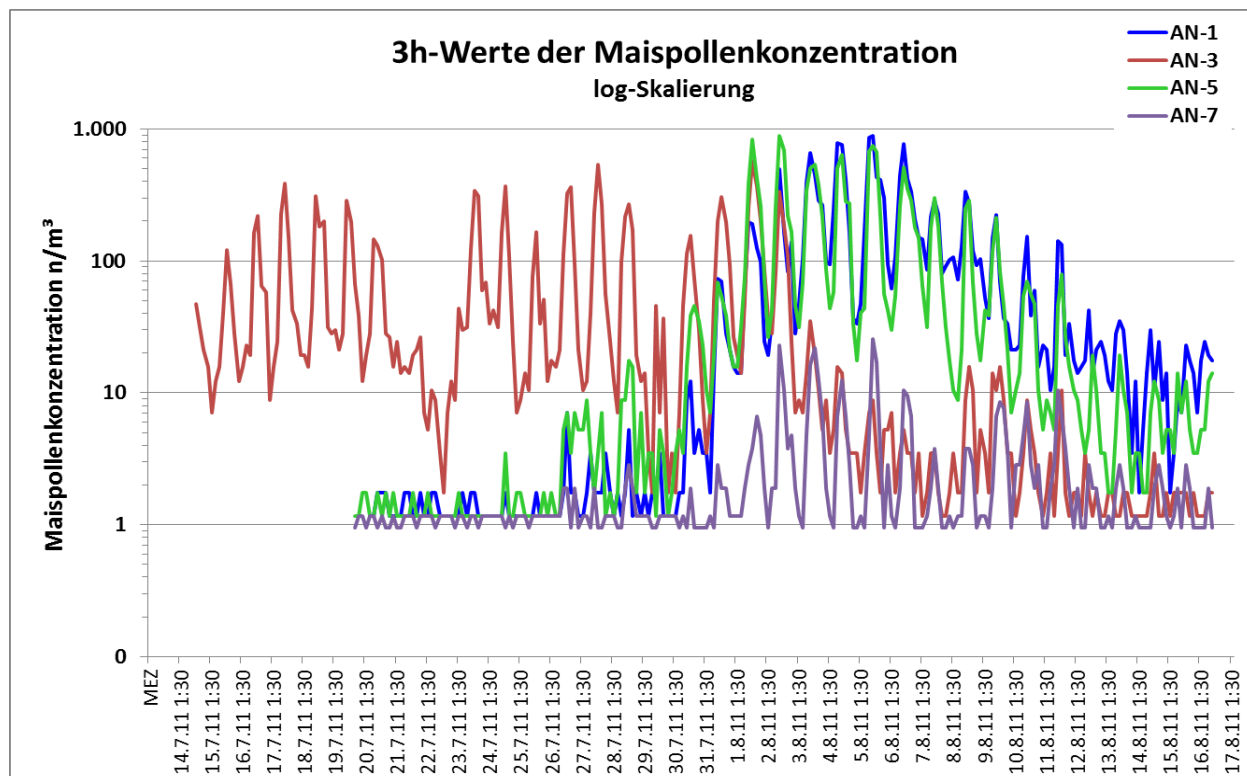


Abb. 78: Verlauf der 3h-Werte zur Maispollenkonzentration in logarithmischem Maßstab
AN1 (Maisfeld A), AN5 (Maisfeld B), AN3 (Maisfeld C) und AN7 (Sojafeld zwischen A und B).
(Grafik: Hofmann)

Die 3h-Werte der Maispollenkonzentration an den vier Standorten lassen deutlich einen regelmäßigen Tagesgang der Maispollenschüttung sowie Unterschiede im Blühverlauf erkennen.

In Abb. 79 ist der mittlere Tagesgang dargestellt, gebildet aus den 3h-Werten der drei Feldstandorte über den Blühzeitraum. Die Pollenfreisetzung findet weitgehend tagsüber statt, nachts geht sie zurück. Sie erreicht ihr Maximum in den späten Morgenstunden bis etwa mittags. Dies entspricht den Kenntnissen aus der Literatur (AYLOR ET AL. 2003, VINER ET AL. 2010). Der über den gesamten Blühzeitraum gemittelte 3h-Wert lag im mittäglichen Peak bei 133 n/m³.

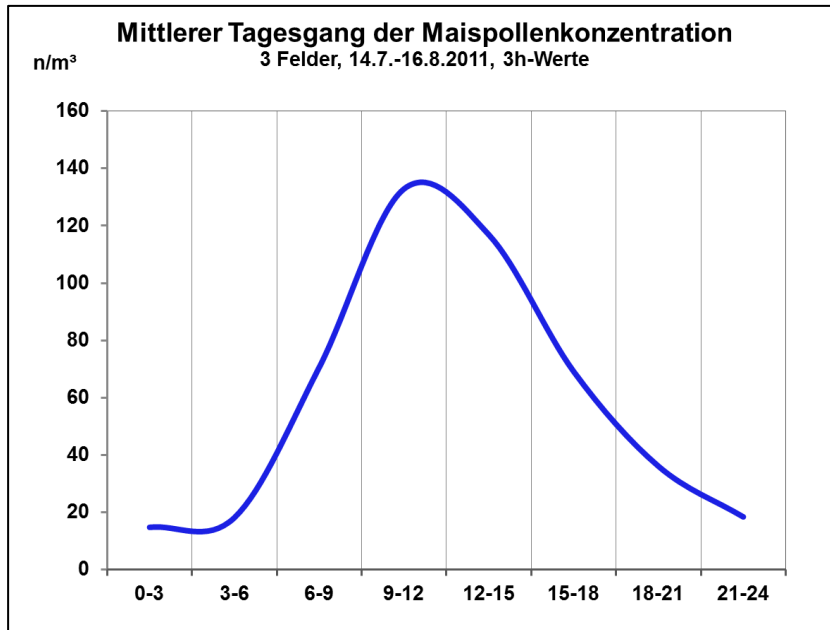


Abb. 79: Mittlerer Tagesgang der Maispollenkonzentration. (Grafik: Hofmann)

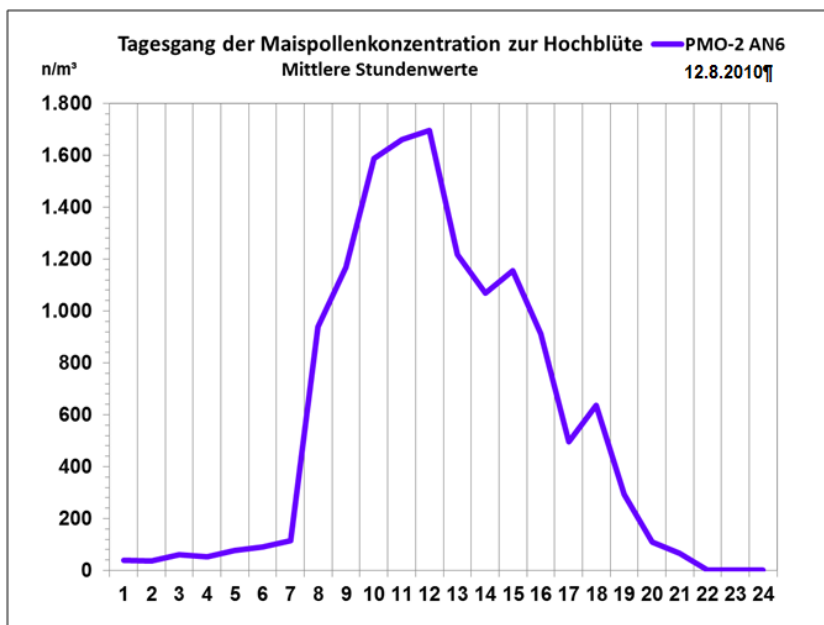


Abb. 80: Tagesgang der Maispollenkonzentration zur Hochblüte. (Grafik: Hofmann)

Abb. 80 zeigt exemplarisch einen Tagesgang der Stundenwerte zur Hochblüte aus dem Versuchsjahr 2010 (AN6, Feldmitte, 12.8.2010). Die Maispollenkonzentration erreichte hier einen mittäglichen Stundenwert (12 h) von 1.697 n/m^3 und einen gemittelten 3h-Wert von 1.647 n/m^3 (10-12 h). Im Versuchsjahr 2011 erreichten die 3h-Werte ihre Maxima ebenfalls im August mit Werten von bis zu $886 \text{ Maispollen/m}^3$ (Abb. 78). Der entsprechende mittlere Tageswert lag bei $401 \text{ Maispollen/m}^3$.

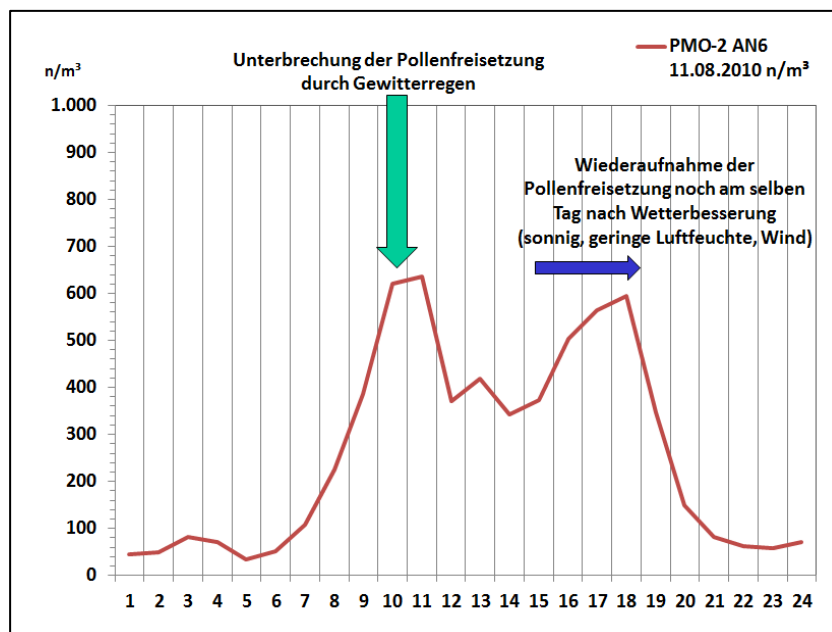


Abb. 81: Unterbrechung der Maispollenkonzentration aufgrund ungünstiger Witterung, Wiederaufnahme der Schütte noch am selben Tag nach eintretender Wetterbesserung. (Grafik: Hofmann)

In Abb. 81 wird ein typischer Tagesgang mit Unterbrechung der Pollenschüttung dargestellt (AN6, 11.8.2010). Von derartigen Tagesgängen mit Doppelpeaks bei der Maispollenfreisetzung berichtete auch VYNER ET AL. (2010), sie waren in all ihren Versuchen in den USA zu beobachten, desgleichen bei den Versuchen von VAN HOUT ET AL. (2008) in Frankreich. Wenngleich einheitlich meteorologische Faktoren als ursächlich vermutet wurden, gelang es keinem der beiden Autorentteams, die Pollenfreisetzung nach der Blühunterbrechung per Modellierung adäquat zu reproduzieren, was nach VYNER ET AL. (210) vor allem auf eine unzureichende Datenlage bzw. ungenügend berücksichtigte Faktoren zurückzuführen war. Erforderlich wären detaillierte Messdaten mit hoher zeitlicher Auflösung der Pollenfreisetzung in Kombination mit meteorologischen Messungen, die aufgrund messtechnischer Limitationen nicht erhoben werden konnten. Über die kombinierte Auswertung unserer Detailmessungen zu Meteorologie und Pollenflug in Kap. 3.3.6 zeigten sich Zusammenhänge, die möglicherweise Ansätze für weiterführende Modellierungen bieten könnten. Die in Abb. 81 gezeigte abrupte Blühunterbrechung lässt sich durch einsetzenden Gewitterregen am Vormittag, einhergehend mit deutlicher Abkühlung, erklären. Nach Wetterbesserung mit Aufklaren des Himmels und mäßig starken, relativ trockenen Winden, erfolgte eine Wiederaufnahme der Pollenfreisetzung noch am selben Tage in fast gleicher Höhe wie am Vormittag. Trotz Gewittersturm mit sehr heftigen Niederschlägen wurde an dem Tage sowohl eine hohe Pollenschüttung als auch eine hohe Pollendeposition auf den Pflanzenblättern von Mais und Futterpflanzen von Schmetterlingen wie Brennnessel und Gänsefuß festgestellt (siehe Kap. 4).

Die Darstellung der kumulierten Maispollenkonzentration in Abb. 82 lässt die Trends im Blühverlauf der unterschiedlichen Blühphasen deutlich erkennen sowie die unterschiedliche Stärke der Maispollenschütte. Während die blaue und grüne Kurve eine einphasige Blüte für die spätblühenden Felder A und B ausweist, erfolgt der Anstieg der roten Kurve (AN3) in drei Stufen und kennzeichnet eine dreiphasige Hauptblüte in Feld C im Zeitraum 14. Juli bis 3. August 2011. Die Maispollenkonzentration erreichte einen kumulierten Wert von 1.686 Pollen/m³ in Feld C (rot, AN3), in den Feldern A und B (blaue und grüne Kurven) Werte von 2.030 Pollen/m³ und 2.151 Pollen/m³.

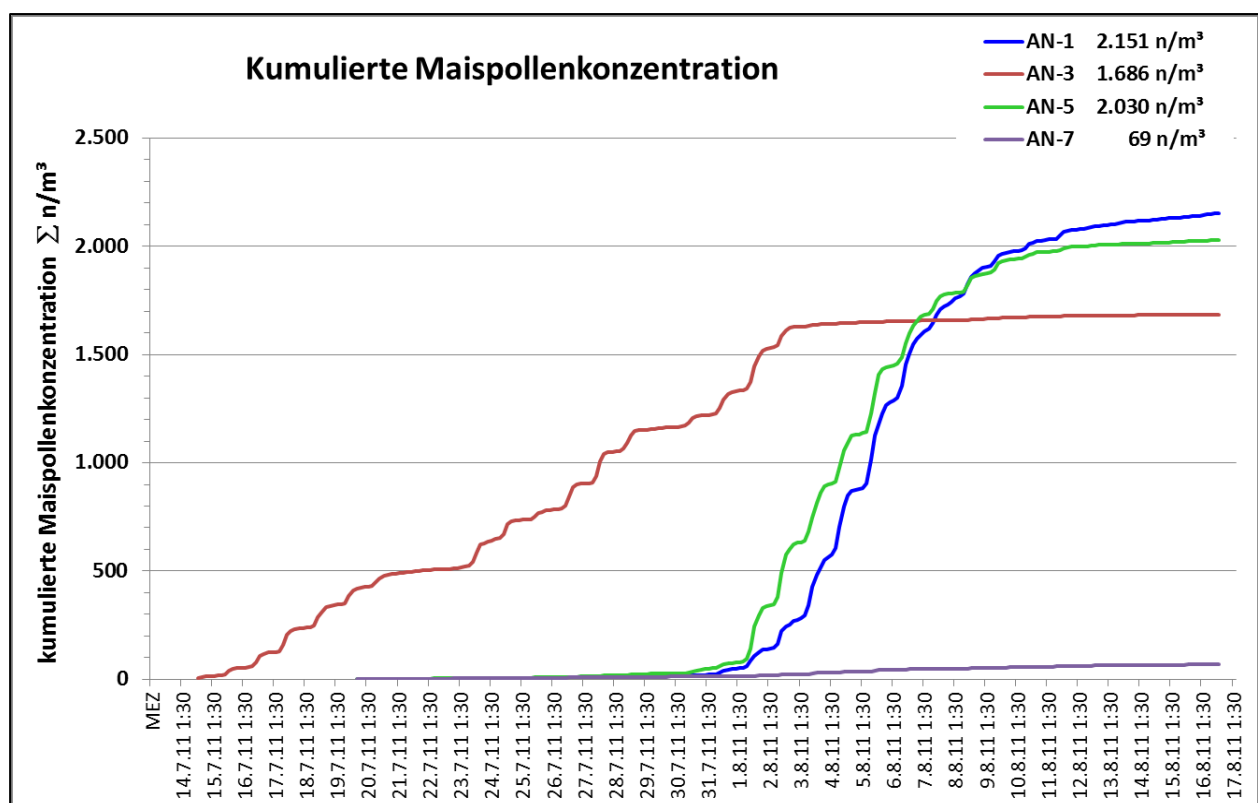


Abb. 82: Kumulierte Maispollenkonzentration. AN1 (Maisfeld A), AN5 (Maisfeld B), AN3 (Maisfeld C) und AN7 (Sojafeld zwischen A und B). (Grafik: Hofmann)

Die Darstellung der kumulierten Maispollenkonzentration als prozentuale Werte in Abb. 83 verdeutlicht die relativen Verläufe mit Beginn und Ende der Hauptblüte deutlicher. Die prozentuale Darstellung der kumulierten Maispollenkonzentration zeigt, dass für das mittelfrüh-blühende Feld C (AN3, rote Kurve) der Anstieg um den 2./3. August nach Erreichen von ca. 95 % der kumulierten Maispollenkonzentration abflacht und damit den Übergang von der Hauptblüte in die Nachblüte kennzeichnet. Die Hauptblüte erstreckte sich damit in Feld C vom 14. Juli bis 3. August, die Nachblüte bis 12. August. Aus dem blauen und grünen Kurvenverlauf geht der später einsetzende Verlauf der Hauptblüte von Feld B (AN5, grün) und Feld A (AN1, blau) hervor. Während die Blüte in Feld B am 1. August voll ausgeprägt

ist, zeigt diese sich bei Feld A um 2 Tage verzögert bei sonst parallelem Verlauf. Die Kurve flacht hier um den 11. August bzw. 12. August ab, den Übergang zur Nachblüte anzeigend.

Die lila Kurve für den Standort AN7 zwischen den Maisfeldern A und B in 80 bzw. 100 m Entfernung zeigt den Ferntransport von Maispollen aus den umliegenden, früher blühenden Feldern mit geradem Anstieg bis zum Einsetzen der Hauptblüte in den Feldern A und B. Die Kurve steigt stark an, die windrichtungsabhängigen Maispollenimmissionen aus den benachbarten Feldern A und B widergebend. Aus der Darstellung der kumulierten prozentualen Maispollenkonzentration lässt sich gut erkennen, dass die Blüte mit Maispollenfreisetzung und entsprechenden Immissionen sich auch an fernen Standorten bis zum Mes- sende in der zweiten Augushälfte auswirkte.

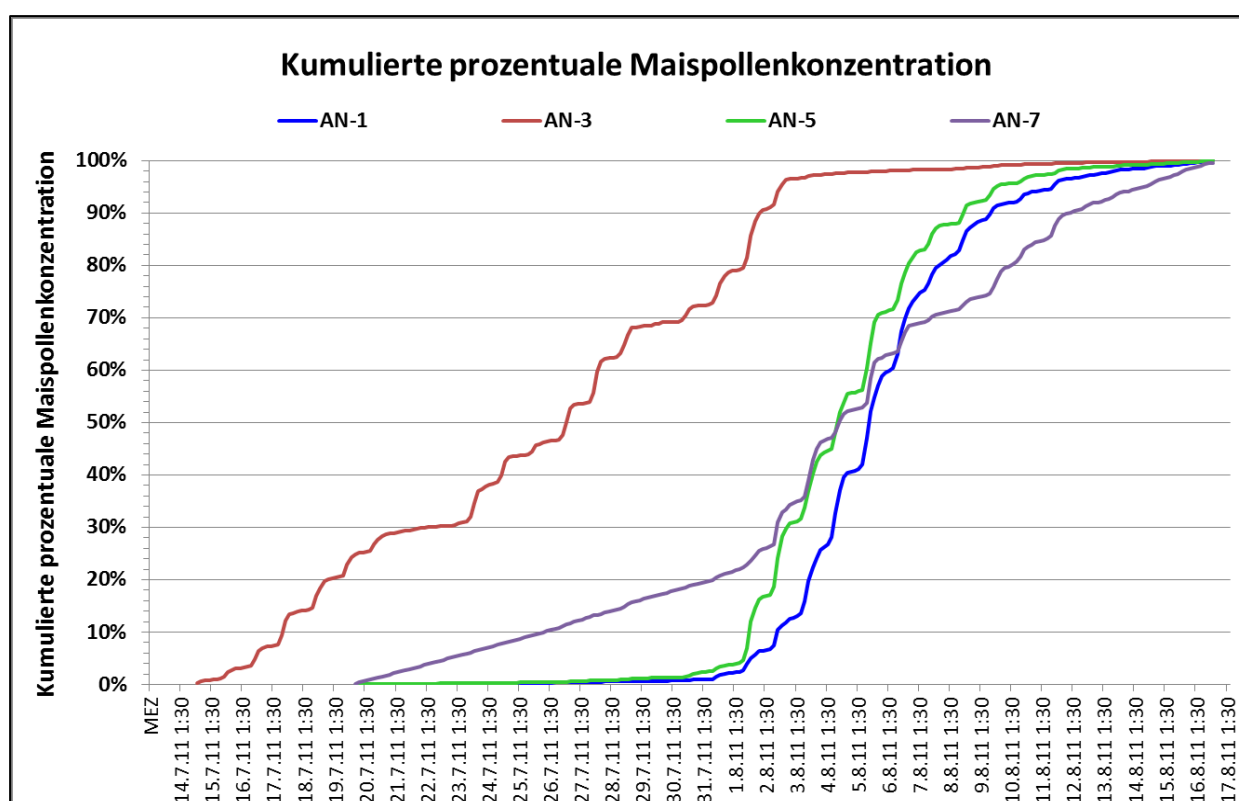


Abb. 83: Kumulierte prozentuale Maispollenkonzentration Maßstab. AN1 (Maisfeld A), AN5 (Maisfeld B), AN3 (Maisfeld C) und AN7 (Sojafeld zwischen A und B). (Grafik: Hofmann)

Die Darstellung der prozentualen Maispollenkonzentration in Abb. 84 für die mittleren Tageswerte lässt für die Pollenschütte im frühblühenden Feld C vier Phasen vom 14. Juli bis etwa 7. August erkennen, über die sich die Pollenfreisetzung nahezu gleichmäßig verteilte, der maximale Tageswert betrug 11,7 %. Die später blühenden Maisfelder A (blau) und B (grün) blühten kompakter und erreichten hierbei mittlere Tageswerte bis zu 15 % respektive 19 %.

Die lila Kurve für den Immissionsmesspunkt AN7 in 80 bzw. 100 m Entfernung zu den Maisfeldern A und B weist in der Koinzidenz den dominanten Einfluss der beiden nächst-

liegenden Felder aus, der maximale Tageswert betrug am 3. August 14 %. Aber auch der Einfluss des dritten, mittel-frühblühenden Maisfeldes C, das 920 m entfernt ist, lässt sich über leicht erhöhte Messwerte vom 26.-28.7. noch feststellen.

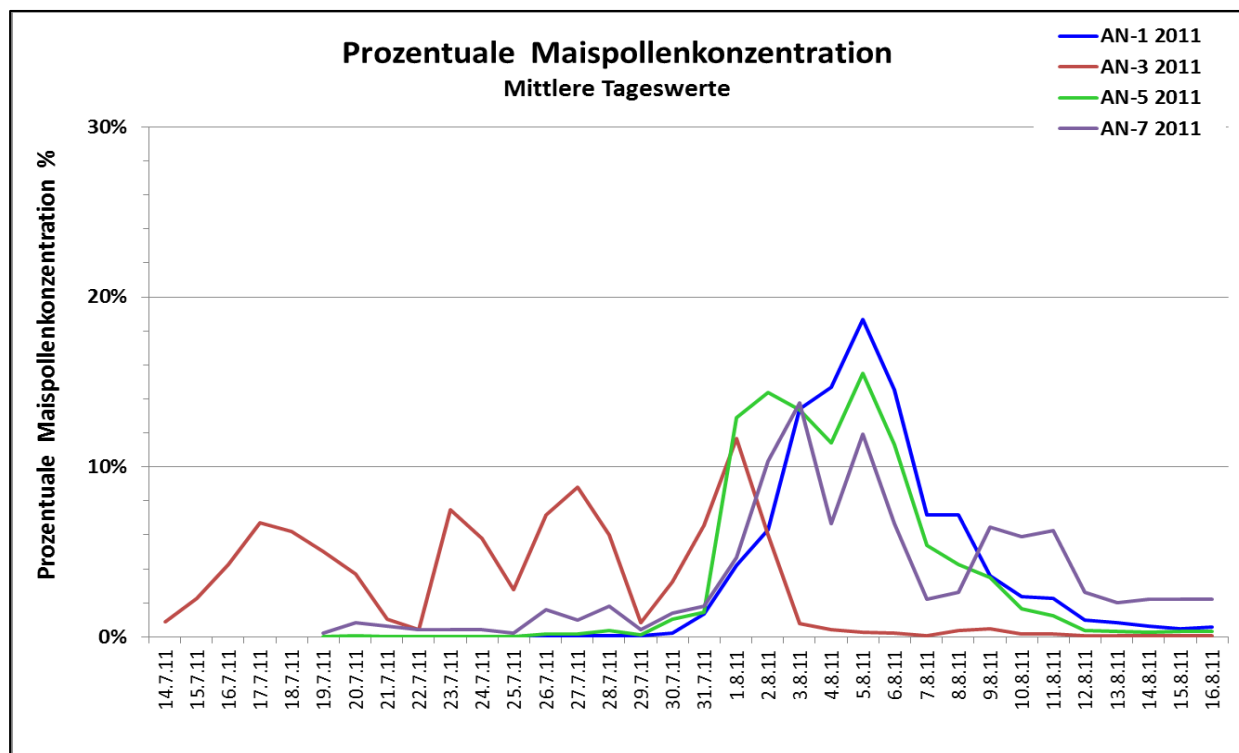


Abb. 84: Mittlere Tageswerte der prozentualen Maispollenkonzentration. AN1 (Maisfeld A), AN5 (Maisfeld B), AN3 (Maisfeld C) und AN7 (Sojafeld zwischen A und B). (Grafik: Hofmann)

In Abb. 85 ist die Variation der prozentualen Maispollenkonzentration aus den Versuchen im Raum Angermünde über beide Versuchsjahre 2010 und 2011 dargestellt. Hier sieht man, dass sich die Maisblüte 2010 noch mindestens bis zum Abschluss der Messungen am 22. August hinzog. Die Untersuchungsergebnisse zur Variation der Maispollenblüte in drei benachbarten Feldern im Raum Angermünde 2011 belegen, dass sich die Hauptblüte des Mais über mehrere Wochen vom 14. Juli bis 12. August erstreckte und die Nachblüte bis mindestens 22. August hinausreichte. Somit kann sich also die Maisblüte unter gegebenen Anbaubedingungen über mehr als 5 Wochen erstrecken. Es ist an allen Immissions-Messpunkten über den gesamten Zeitraum mit einer Deposition von Maispollen zu rechnen. Selbst innerhalb eines Feldes kann sich die Hauptblüte aufgrund von witterungsbedingten Blühunterbrechungen über mehr als 3 Wochen erstrecken.

Der Vergleich der Ergebnisse aus Angermünde mit den Ergebnissen aus der langjährigen Messreihe von 1994 bis 2007 am Referenzstandort Ganderkesee in Niedersachsen in Abb. 86 belegt, dass unter norddeutschen Klimabedingungen mit einer Variation der Maispollenblüte von Anfang Juli bis Ende August zu rechnen ist.

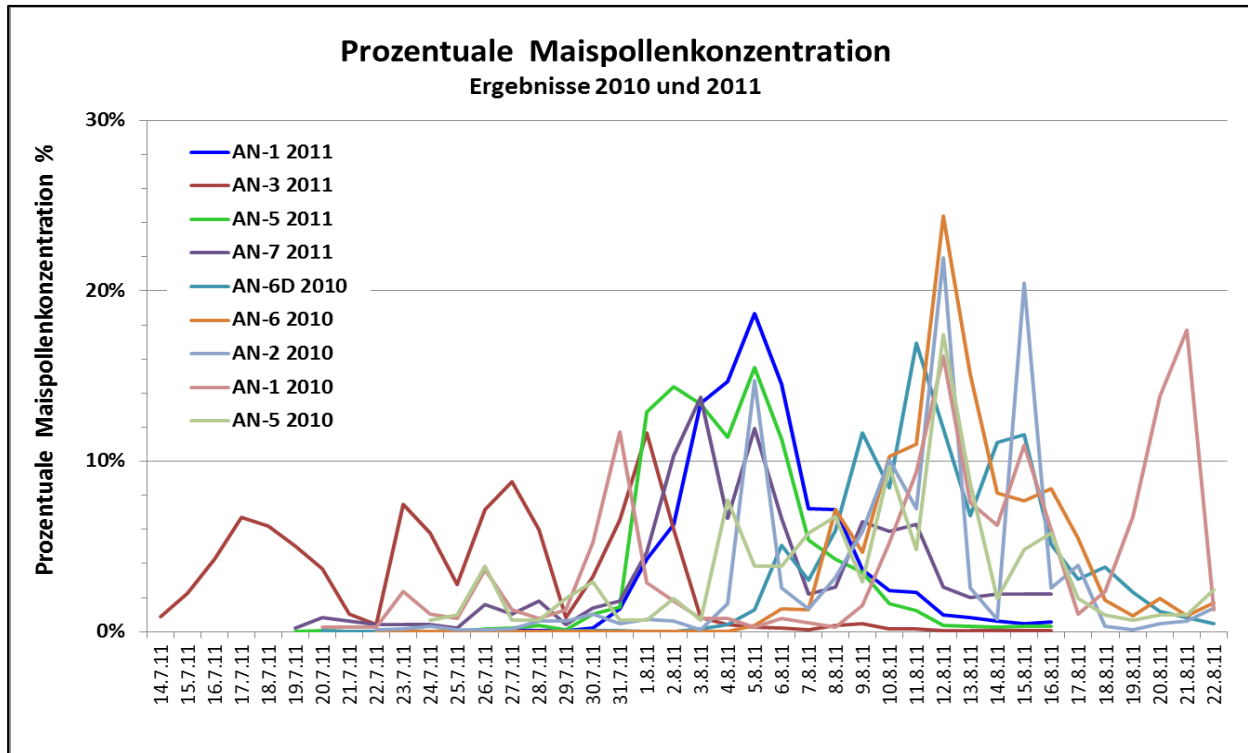


Abb. 85: Variation der Tageswerte der prozentualen Maispollenkonzentration für die Untersuchungen im Raum Angermünde während der Versuchsjahre 2010 und 2011. (Grafik: Hofmann)

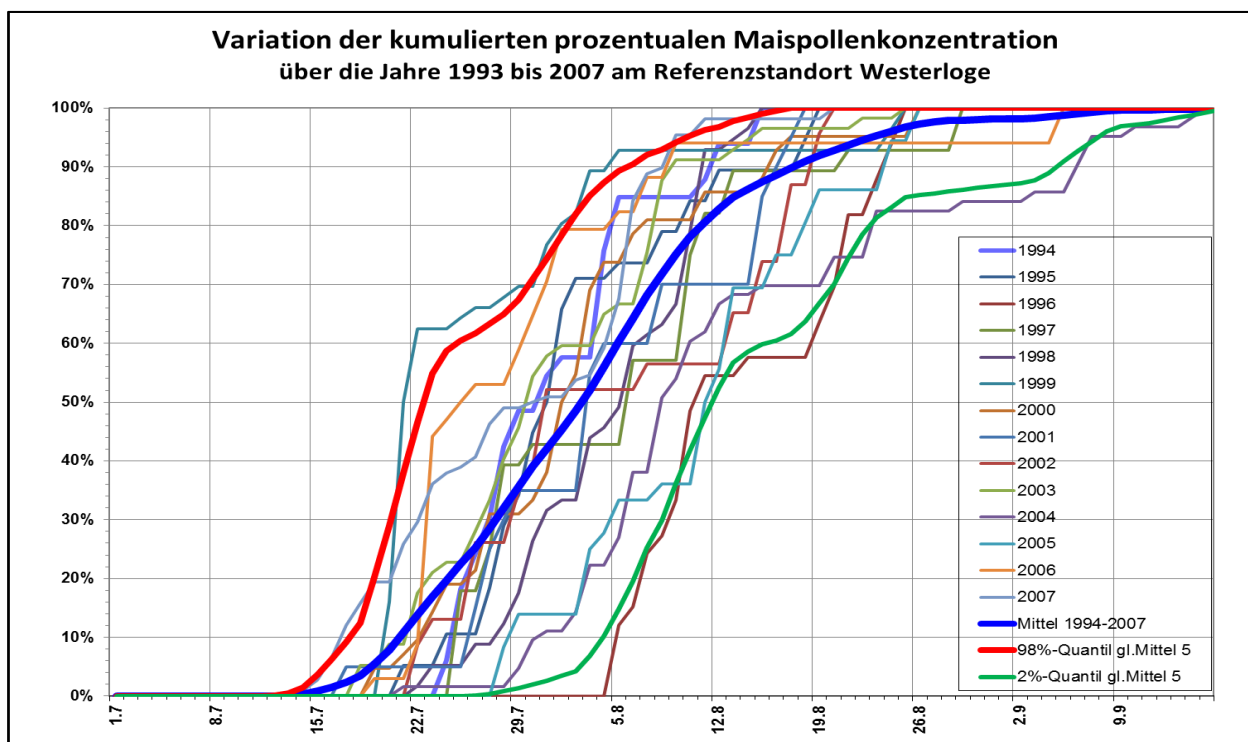


Abb. 86: Variation der prozentualen Maispollenkonzentration am Referenzstandort Westerloge über die Jahre 1993 bis 2007 mit langjährigem Mittel (Daten aus HOFMANN ET AL. 2009a). (Grafik: Hofmann)

3.4.4 Messung der räumlichen Variation der Maispollendeposition

Für die räumliche Verteilung der Maispollenimmission zur Validierung der Ausbreitungsrechnung wurden im Jahr 2011 nach Vorgaben aus der Modellierung 22 technische Pollensammler in der Umgebung der drei Versuchsfelder A-C am 7. Juli vor Blühbeginn installiert. Die Messungen erfolgten - den Hauptblühzeitraum umfassend - bis einschließlich 15. August.

Für die Erfassung der Maispollendeposition wurde wie in den vorangegangenen Phasen der nach VDI 4330-3 (2007) standardisierte Pollensammler PMF verwendet. Zum Einsatz kamen die Versionen PMF/Sigma-2 und PMF-mono, da für die Erfassung von Maispollen der Sigma-2 nicht benötigt wird.

Die Lage der Standorte geht aus der Übersichtskarte Abb. 87 hervor. Abb. 88 zeigt die Anordnung der Standorte für die Versuchsfelder und deren näherer Umgebung. Die genaue Lage der Sammler ist den Detailskizzen in Abb. 89 zu entnehmen. Die Messstandorte mit den Pollensammlern werden in den folgenden Bildern in Abb. 90 illustriert.

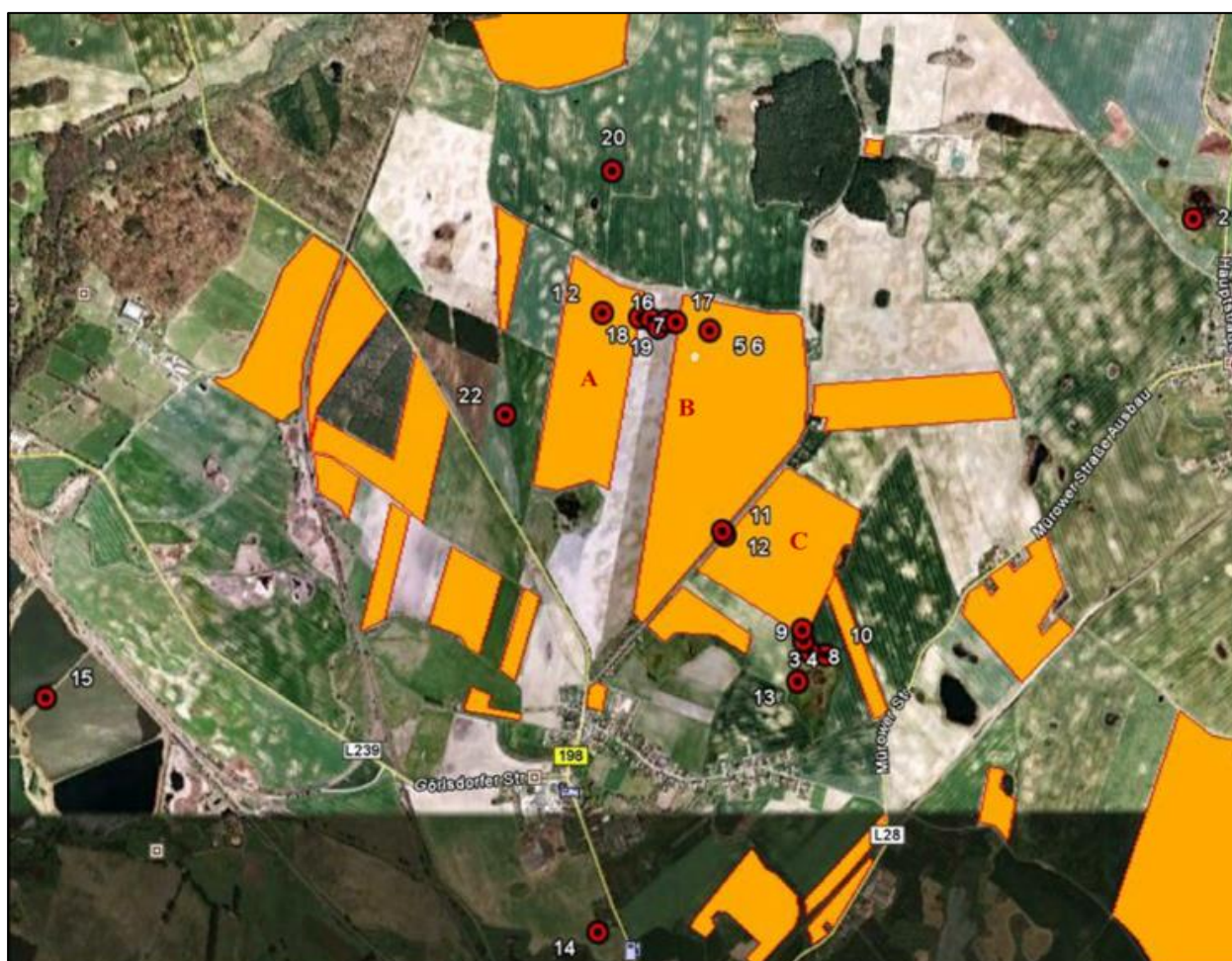
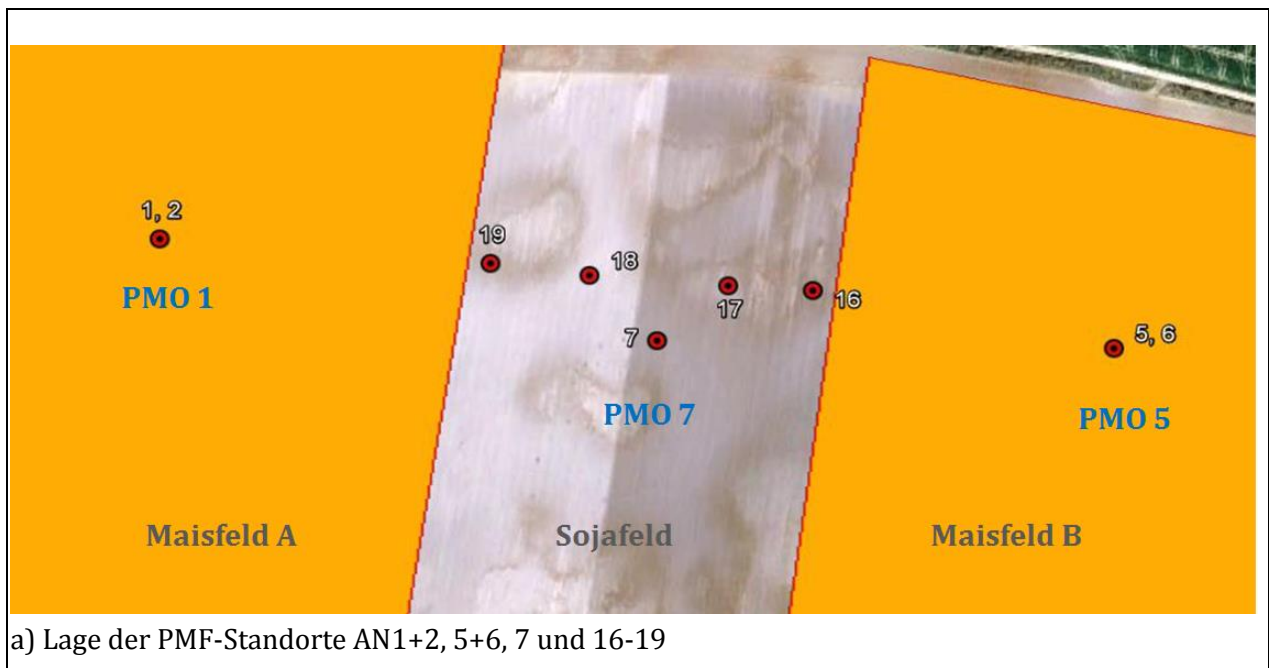
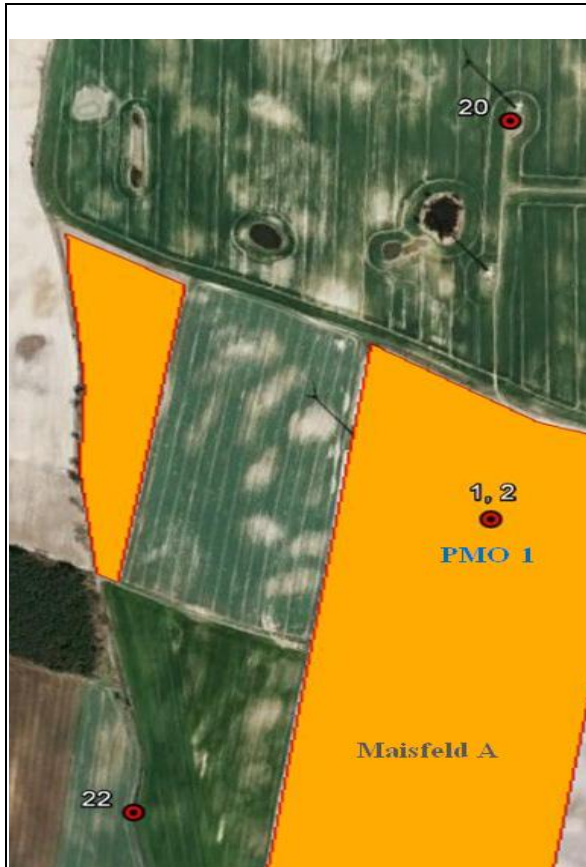


Abb. 87: Standortübersicht der PMF-Messungen zur räumlichen Verteilung der Maispollendeposition 2011(n = 22) - Lage der Maisfelder im näheren Umfeld der Versuchsfelder (A, B, C). (Hintergrundbild aus Google Earth)

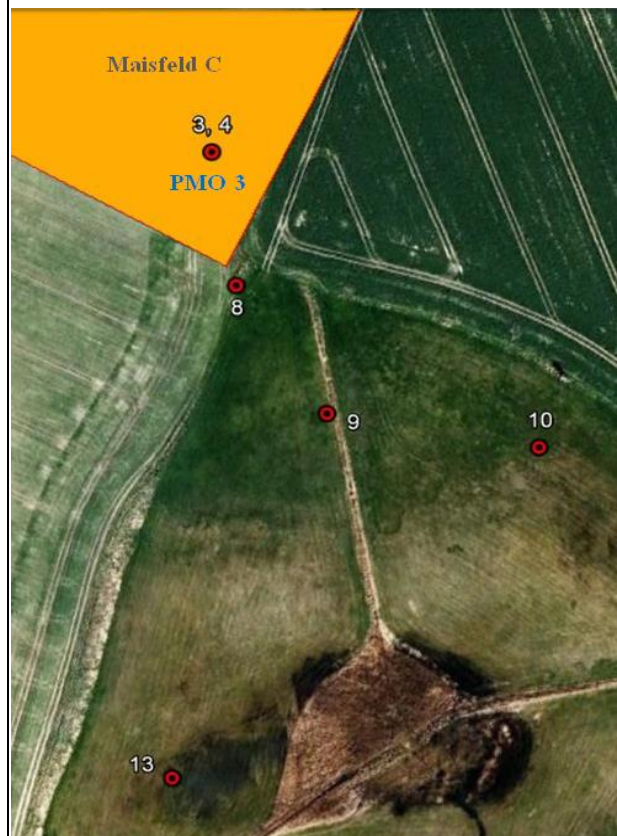


Abb. 88: Standorte der PMF-Messungen zur räumlichen Verteilung der Maispollendeposition 2011 im Bereich der Versuchsfelder A-C. (Hintergrundbild aus Google Earth)

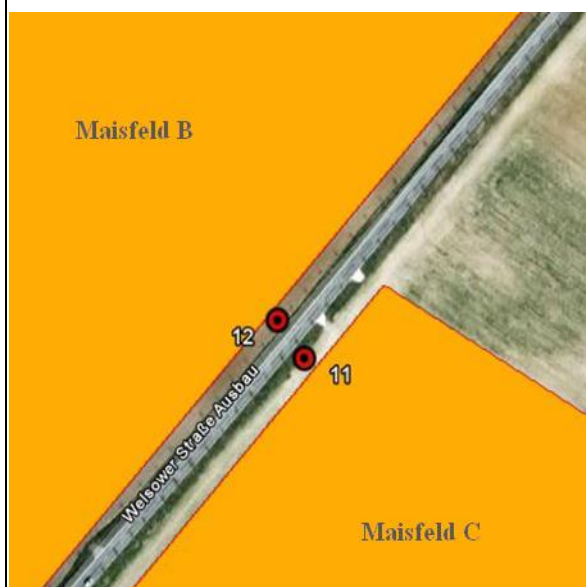




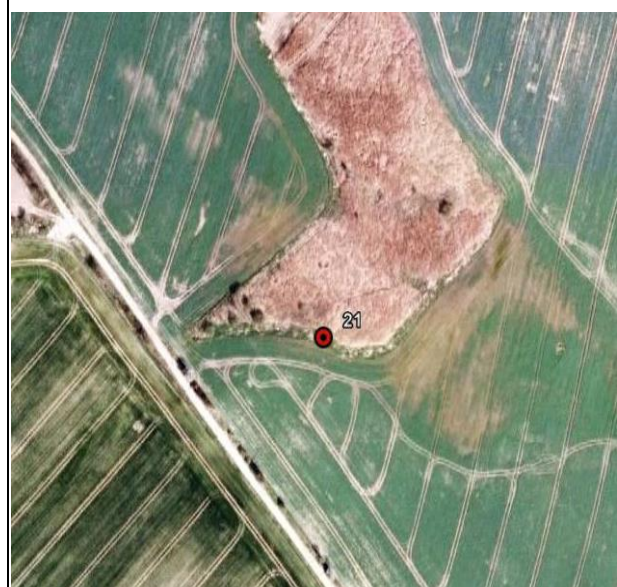
b) PMF-Standorte 20 und 22



c) PMF-Standorte AN3+4, 8-10 und 13



8) PMF-Standorte 11 und 12



e) PMF-Standort 21

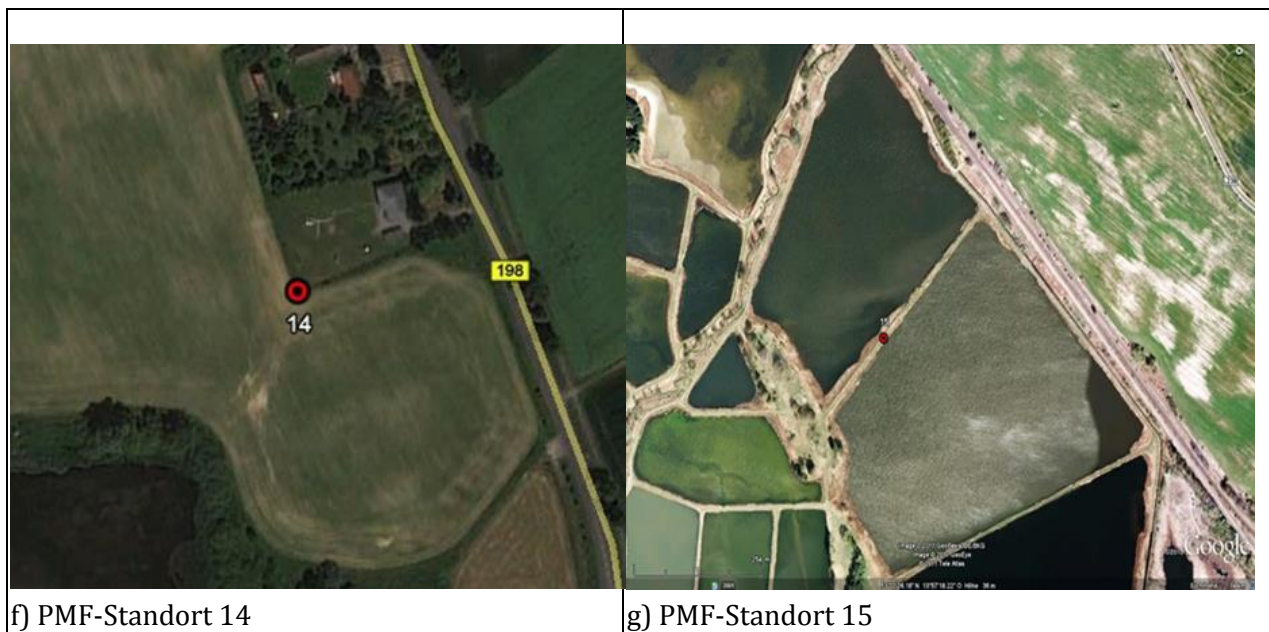


Abb. 89a-g: Ausschnitts-Darstellungen zur Lage der PMF-Standorte für die räumliche Erfassung der Maispollendeposition im Raum Angermünde 2011 (n=22). (Hintergrundbild aus Google Earth)

In den drei Versuchsfeldern mit unterschiedlichem Blühverhalten (A, B und C) wurden jeweils 2 PMF aufgestellt zur zeitlich aufgelösten Messung des Verlaufs der Maispollenschüttung. Ein PMF/Sigma-2 wurde in Standardhöhe von 1,8 m exponiert, ein PMF-mono wurde mit dem PMO montiert und in Emissionshöhe (Fahnenhöhe) dem Bestandswachstum entsprechend mitgeführt. Die Sammler außerhalb der Felder wurden in der PMF-mono-Version in Standardhöhe 1,8 m exponiert und nach den Vorgaben des Ausbreitungsmodells in unterschiedlichen Entfernungen und Windrichtungen zu den Maisfeldern installiert. Hierbei wurde der mit Soja bepflanzte Zwischenraum der Felder A und B mit 5 Messpunkten genutzt, so dass zwei Windrichtungen abgedeckt wurden. Zwei Sammler konnten an der Welsower Straße zwischen den Feldern B und C positioniert werden. Vier Sammler wurden südöstlich von Feld C in zunehmender Entfernung montiert. Fünf Sammler wurden im weiteren Umfeld der drei Felder positioniert und hierbei verschiedene Richtungen abgedeckt. Aufgrund topografischer Gegebenheiten konnte eine Hauptwindrichtung nach Osten für den weiteren Entfernungsbereich nicht optimal belegt werden. Dies ist jedoch für die Validierung der Ausbreitungsrechnung ohne Belang, da die Immissionsbelastung orts-genau unter Berücksichtigung der Windverhältnisse ermittelt wird.

Die Erfassung erfolgte ohne Zwischenfälle und wurde für alle Standorte erfolgreich abgeschlossen. Die Proben wurden im Labor gemäß VDI 4330-3 (2007) und HOFMANN (2007) aufbereitet, eine mikroskopische Pollenanalyse zur Bestimmung von Maispollenfluss und -deposition wurde durchgeführt. Die Methodik der Pollensammlung, Probenbearbeitung, quantitativen Pollenanalyse und Berechnung der Zielgrößen ist für Phase I ausführlich dargelegt (siehe Kap. 3.2.3).



a) PMF mit Pollenmonitor PMO (AN1) und PMF/Singa-2 (AN2) im westlichen Versuchsfeld A.



b) PMF mit Pollenmonitor PMO (AN3) und PMF/Singa-2 (AN4) im südöstlichen Versuchsfeld C.



c) PMF mit Pollenmonitor PMO (AN5) und PMF/Singa-2 (AN6) im Versuchsfeld B.



d) AN7, PMF mit Pollenmonitor Burkard-Falle im Sojafeld zwischen den beiden Versuchsfeldern A (80 m Abstand) und B (100 m Abstand) gelegen.



e) AN8 am Versuchsfeld C.



f) AN9 und AN10 in Feuchtwiese bei Feld C.



90g) AN11 Welsowerstrasse am Feld C.



90h) AN12 Welsowerstrasse am Feld B.



i) AN13 in Feuchtwiese bei Feld C.



j) AN14 DWD-Wetterwarte.



k) AN15 Blumberger Teiche.



l) AN16 im Sojafeld 10 m von Feld B.

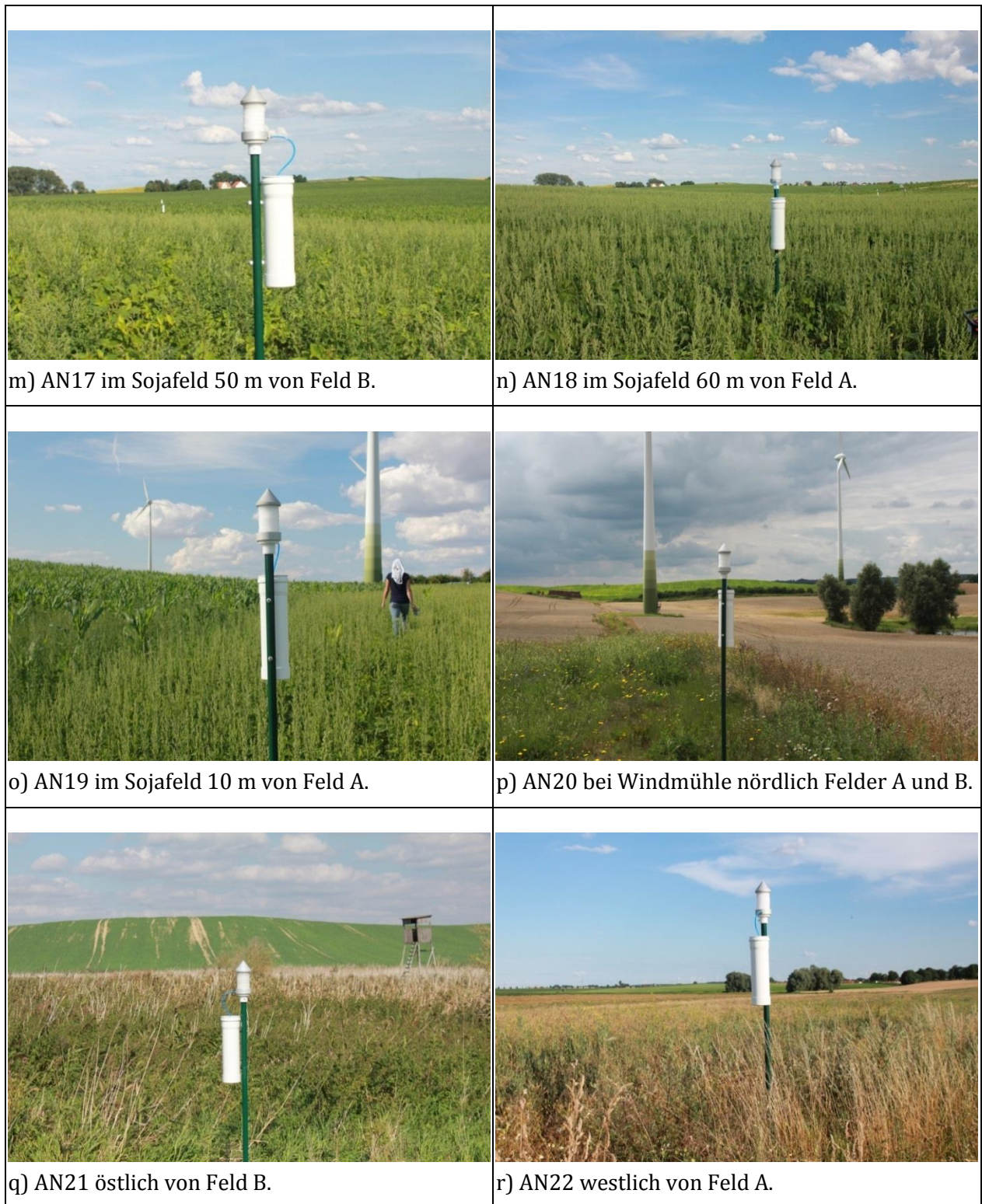


Abb. 90a-r: Standorte der PMF-Pollensammler AN 1-22 in 2011. (Bilder: Hofmann)

Ergebnisse:

Die Ergebnisse aus den PMF-Messungen zur Maispollendeposition sind in Tab. 9 zusammengefasst. Die Maispollendeposition an den Untersuchungsstandorten erreichte in den Maisfeldern Werte von 4.438.000 bis zu 8.477.000 Maispollen/m². Außerhalb der Maisfelder im Nahbereich bis in 10 m Abstand vom Feldrand wurden Depositionen von 466.000 bis 1.352.000 Maispollen/m² gemessen. An dem am weitesten entfernt gelegenen Standort „Blumberger Teiche“ in 1.440 m Entfernung wurden noch 5.100 Maispollen/m² ermittelt.

Tab. 9: Ergebnisse der Maispollendepositions-Messungen mit dem PMF aus den Versuchen im Raum Angermünde in 2011.

Standort		Abstand nächstes Maisfeld	Maispollendeposition	
		in m	n/m ²	n/cm ²
AN1	Im Feld A, PMO	0,3	8.477.000	848
AN2	Im Feld A, PMO	0,3	5.036.000	504
AN3	Im Feld C, PMO	0,3	5.874.000	587
AN4	Im Feld C, PMO	0,3	3.359.000	336
AN5	Im Feld B, PMO	0,3	6.620.000	662
AN6	Im Feld B, PMO	0,3	4.438.000	444
AN7	Sojafeld zw. A u. B, PMO	80 / 100	180.000	18
AN8	Grünland SO	8	1.352.000	135
AN9	Grünland SO	65	133.000	13
AN10	Grünland SO	90	85.000	8
AN11	Welsower Str.	5	1.245.000	125
AN12	Welsower Str.	5	1.283.000	128
AN13	Grünland SO	180	110.000	11
AN14	DWD	380	13.000	1,3
AN15	Blumberger Teiche	1.440	5.100	0,5
AN16	Sojafeld zw. A u. B	10	466.000	47
AN17	Sojafeld zw. A u. B	50	212.000	21
AN18	Sojafeld zw. A u. B	60	367.000	37
AN19	Sojafeld zw. A u. B	10	1.290.000	129
AN20	Windrad	405	30.000	3,0
AN21	Soll	1.050	18.000	1,8
AN22	Feldweg	170	36.000	3,6

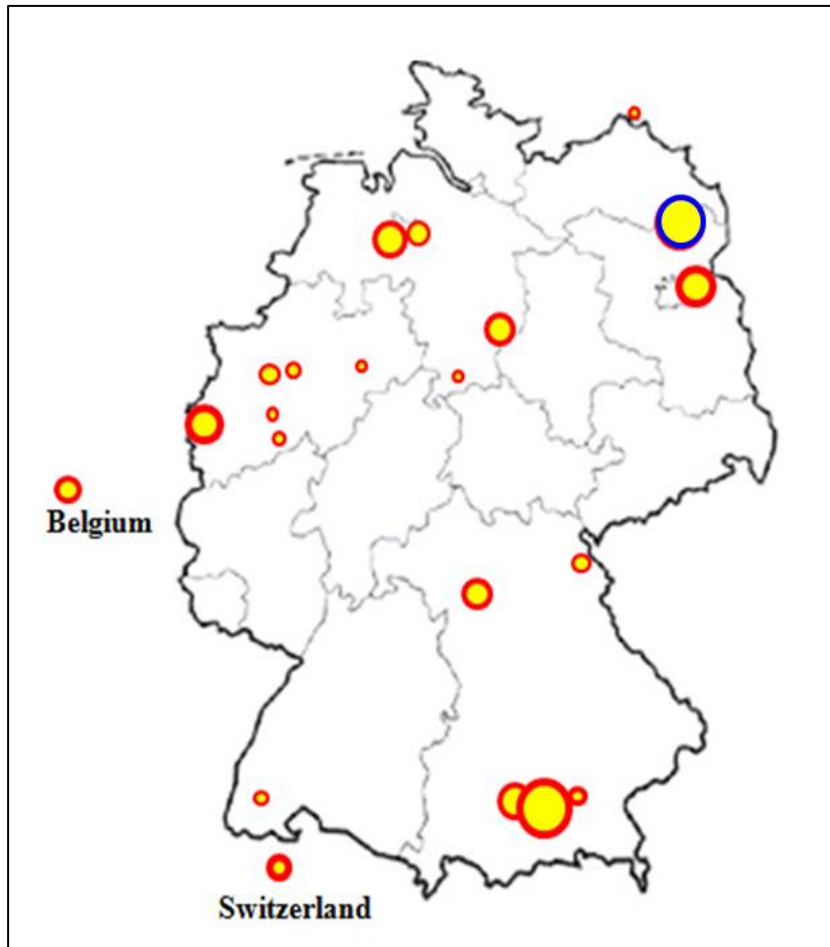


Abb. 91: Referenzstandorte der PMF-Messungen 2001-2011 in Deutschland, Schweiz und Belgien zur Maispollendeposition in Relation zur Entfernung vom nächsten Maisfeld. Die Größe der Kreise entspricht der Anzahl an Messdaten. (Grafik: Hofmann)
Blauer Kreis = Messungen Angermünde 2009–2011,
Datenbasis 2001-2006 für statistische Auswertung: N = 122 (HOFMANN 2007),
Gesamter Datensatz: N = 253.

Für das standardisierte Verfahren des PMF liegen umfangreiche Referenzmessungen zur Maispollendeposition vor, die seit dem Jahr 2001 an verschiedenen Standorten über die BRD, die Schweiz und Belgien verteilt gewonnen wurden (siehe Abb. 91), anhand derer sich die Ergebnisse aus den Versuchen in den Jahren 2009 bis 2011 im Raum Angermünde einordnen lassen. Abb. 92 stellt sämtliche Ergebnisse der PMF-Messungen mit den Referenzwerten und deren statistischer Auswertung (HOFMANN 2007) zur Maispollendeposition in Angermünde in den Jahren 2009 bis 2011 in Relation zur Entfernung vom nächsten Maisfeld dar. Daraus geht hervor, dass sich die Messwerte aus allen drei Erhebungsjahren in den 95 %-Vertrauensbereich des über den Referenzdatensatz ermittelten Regressionszusammenhangs einfügen.

Vergleicht man die Ergebnisse aus 2011, 2010 und 2009 im Detail, so lässt sich Folgendes erkennen:

- Die Werte für die Maispollendeposition im Jahr 2009 fielen für das Untersuchungsgebiet im Schnitt leicht überdurchschnittlich aus.
- Die Werte für 2010 waren hingegen zum Teil unterdurchschnittlich. Dies geht mit der phänotypischen Beobachtung einer witterungsbedingten, suboptimalen Entwicklung der Maisblüte im Jahr 2010 einher.
- Für 2011 zeigen sich durchschnittliche Werte. Die unterdurchschnittlichen Werte im oberen Entfernungsbereich aus dem Raum Angermünde erklären sich aus der Lage der Standorte abseits der Hauptwindrichtung während der Blüte.

Die Ergebnisse aus den Versuchsjahren 2009-2011 in Brandenburg bestätigen somit die Gradienten der Maispollendeposition aus der statistischen Auswertung der Ergebnisse 2001-2006 mit den daraus abgeleiteten Abstandsfunktionen.

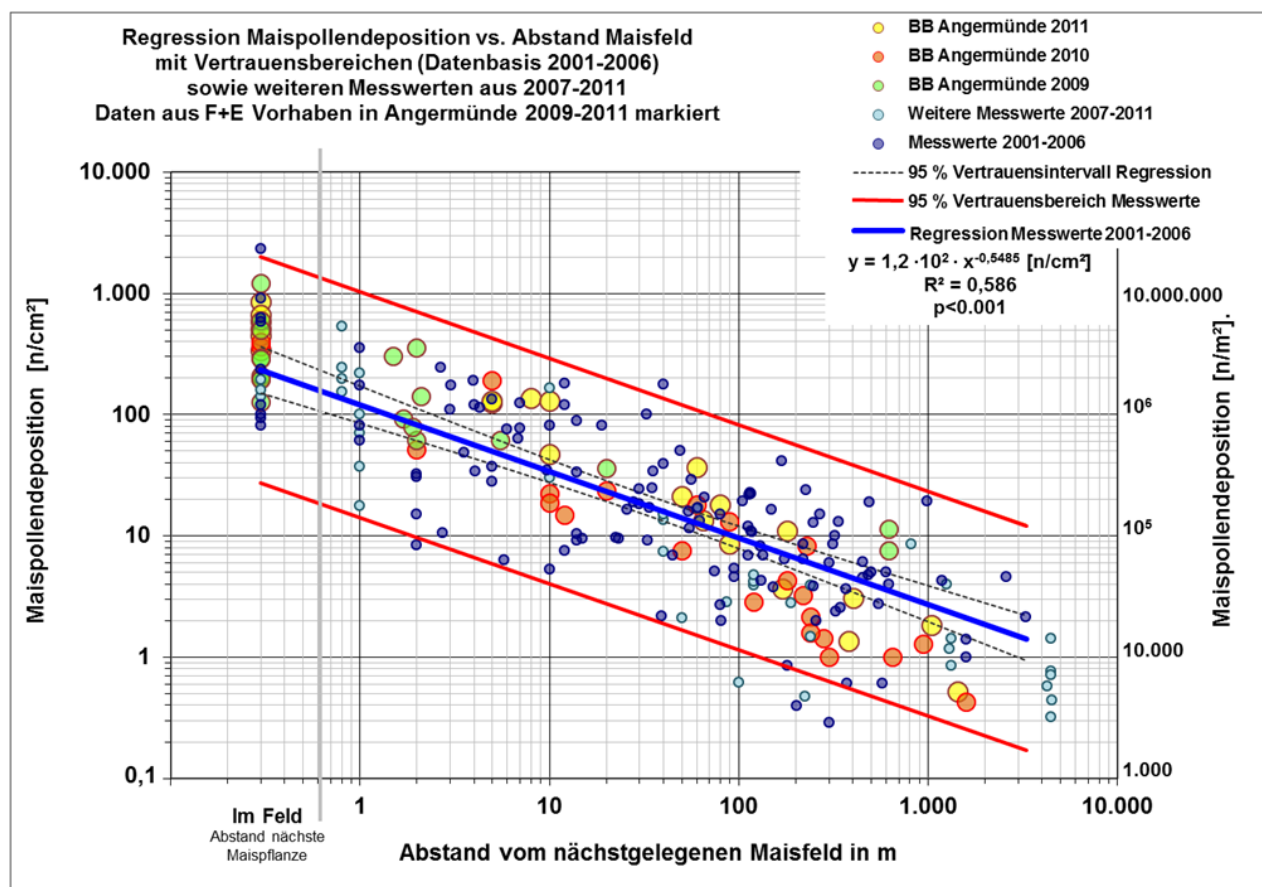


Abb. 92: Ergebnisse der PMF-Messungen zur Maispollendeposition in Relation zur Entfernung vom nächsten Maisfeld, Vergleich der Ergebnisse aus Angermünde 2009 bis 2011 mit Ergebnissen aus den Regressionsanalysen der Erhebungen 2001-2006 sowie weiterer Erhebungen bis 2011. Datenbasis 2001-2006 für statistische Auswertung: N = 122 (HOFMANN 2007)
 Erweiterter Datenpool bis 2011: N = 253.
 (Grafik: Hofmann)

3.4.5 Ausbreitungsrechnung

Mit den im Rahmen der vorigen Untersuchungen festgelegten und validierten Standardverfahren wurden die an den PMF-Positionen bestimmten Pollenflüsse (siehe Kap. 3.4.4) über Ausbreitungsrechnungen nachgerechnet. Die Emissionsraten der drei Versuchsfelder wurden direkt aus den PMO-Messungen im Feld abgeleitet (siehe Kap. 3.4.3). Zur Abschätzung der Emissionsraten der Umlandfelder wurden verschiedene Methoden geprüft. Die modellierten zeitintegrierten Pollenflussdichten wurden mit den PMF-Messwerten verglichen.

3.4.5.1 Standardfestlegungen

Für die Ausbreitungsrechnungen wurden folgende Standardannahmen getroffen:

- Modellierung der Maisfelder als flächige Emittenten mit zeitabhängiger Emission.
- Effektive Vertikalausdehnung der Emittenten von 0,5 m bis 1 m über Grund (zur Berücksichtigung der Überströmung des Maisfeldes).
- Mittlere Rauigkeitslänge 0,2 m.
- Verdrängungshöhe 0 m.
- Meteorologischen Daten im Format AKTerm (Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Stabilitätsklasse nach Klug/Manier als Stundenmittel).
- Effektive Anemometerhöhe gemäß AKTerm-Vorgabe.
- Standardgrenzschichtmodell 2.1 von LASAT mit $\beta = 2$ (erhöhte Turbulenz im unteren Höhenbereich)
- Sedimentationsgeschwindigkeit der Pollen 21 cm/s.
- Depositionswahrscheinlichkeit (trockene Deposition) der Pollen 100 % (wenn ein Partikel den Grund berührt, wird seine Masse dort vollständig abgelagert).

Das Rechengitter, auf dem die Konzentrationen als räumliche Mittelwerte für jede Gitterzelle bestimmt wurden, hatte eine horizontale Maschenweite von 10 m und eine vertikale Maschenweite in Bodennähe von 0,5 m für die Rechnungen zu den Versuchsfeldern. Für die Rechnung im Vergleich zu den Umlandfeldern betrug die horizontale Maschenweite zwischen 10 und 80 m und die vertikale Maschenweite in Bodennähe 3 m.

Die Ausbreitungsrechnungen wurden für den Zeitraum Anfang 14.07.2011 bis Ende 15.08.2011 (33 Tage) durchgeführt.

Der DWD stellte eine AKTerm für den Messort und den betrachteten Zeitraum zur Verfügung (effektive Messhöhe 17,6 m) für die Erhebung der meteorologischen Daten. Abb. 93 zeigt eine statistische Auswertung für gesamten Zeitraum der Ausbreitungsrechnungen, für die Blühperiode *früh/mittel* sowie für die Blühperiode *spät*.

3.4.5.2 *Abschätzung der Emissionsraten*

Die Gesamtkonzentration an einem Messpunkt ergibt sich aus den Teilbeiträgen der drei Versuchsfelder und der Umlandfelder. Diese wurden in der Modellierung durch getrennte Ausbreitungsrechnungen ermittelt. Dabei wurde der Umstand genutzt, dass die Konzentration exakt proportional zur Emission ist. Eine Ausbreitungsrechnung kann also mit einer Einheitsemission durchgeführt und die berechneten Konzentrationen anschließend mit einem geeigneten zeitabhängigen Skalierungsfaktor zur Berücksichtigung der tatsächlichen Emission multipliziert werden.⁴⁵

Die Emissionen der drei Versuchsfelder wurden analog zur Untersuchung Angermünde 2010 abgeleitet: Für jedes Versuchsfeld wird eine separate Ausbreitungsrechnung mit der Emissionsrate 1 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde durchgeführt und die Konzentrationswerte werden für jeden Messpunkt in Form aufeinanderfolgender 3-Stunden-Mittel abgespeichert. Diese Werte werden mit dem Verhältnis von gemessener und berechneter Konzentration im Feld skaliert. Für das Versuchsfeld F1 beispielsweise werden die berechneten Konzentrationswerte für jedes 3-Stunden-Intervall mit dem Skalierungsfaktor multipliziert, der sich aus dem Verhältnis von am PMO-Messort AN1 gemessener Konzentration zu der an diesem Ort berechneten Konzentration ergibt.⁴⁶

⁴⁵ Streng genommen ist eine zeitabhängige, nachträgliche Skalierung nicht identisch mit einer entsprechenden zeitabhängigen Emission, da der Skalierungsfaktor unmittelbar auf die gesamte Konzentrationsfahne wirkt, während eine zeitliche Änderung der Emission sich erst verzögert auf entfernte Aufpunkte auswirkt. Für die betrachteten 3-Stunden-Mittel und die hier relevanten Entfernungen kann der Unterschied vernachlässigt werden.

⁴⁶ Beiträge anderer Felder zur gemessenen Gesamtkonzentration im Feld sind wesentlich kleiner und können vernachlässigt werden.

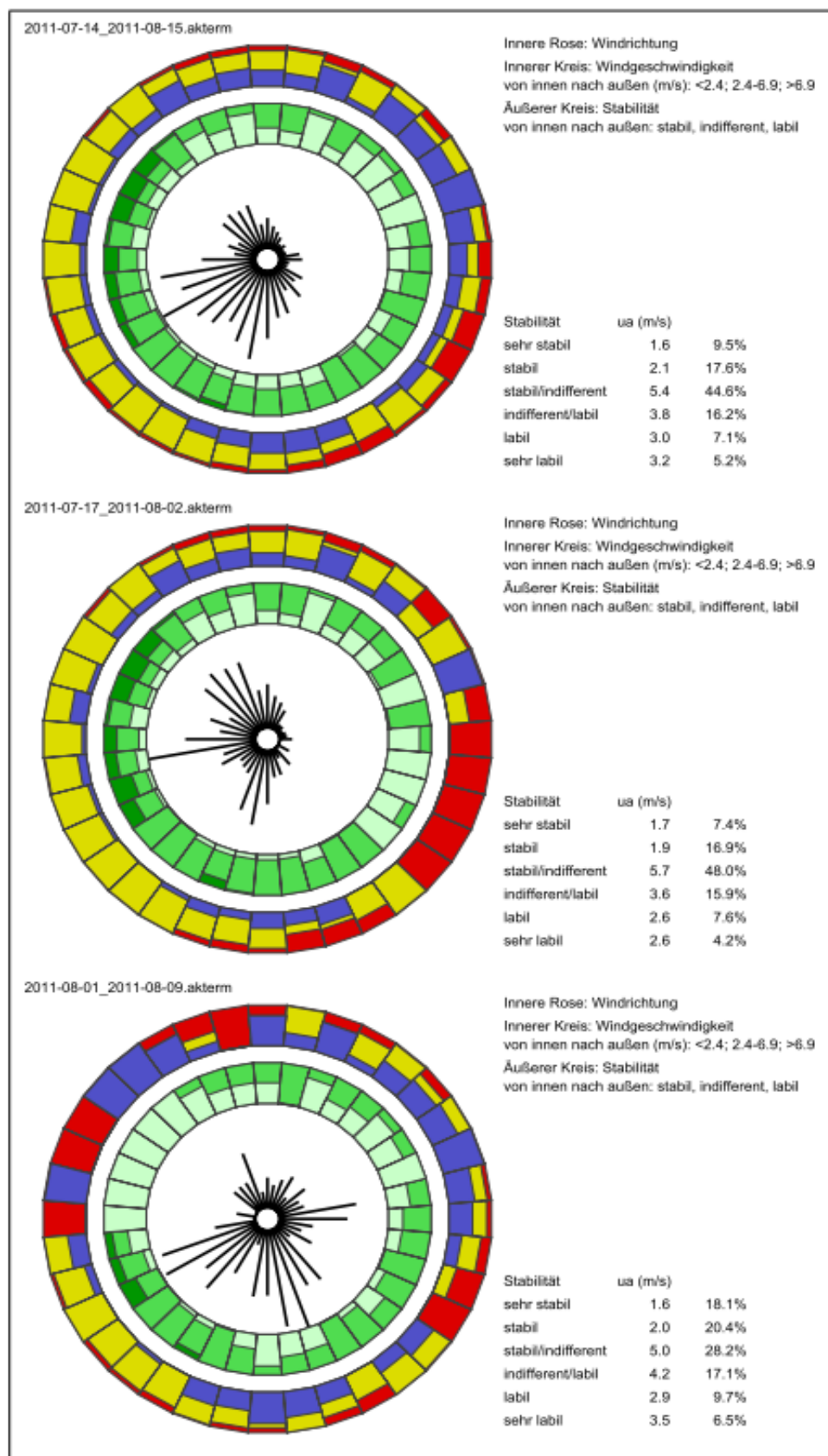


Abb. 93: Statistische Auswertung der meteorologischen Zeitreihe. (Grafik: Jänicke)
 Oben: Gesamter Zeitraum der Ausbreitungsrechnungen. Mitte: Blühperiode *früh/mittel*.
 Unten: Blühperiode *spät*.

Für die Umlandfelder standen keine Messungen im jeweiligen Feld zur Verfügung, ihre Emissionsstärke musste also auf andere Art abgeschätzt werden. Folgende Ansätze wurden getestet:

Ansatz 1: Die Umlandfelder werden entsprechend der Blütekategorien *früh/mittel*, *spät* und *unbestimmt* in drei Gruppen aufgeteilt. Für jede Gruppe wird eine getrennte Ausbreitungsrechnung mit der Einheits-Emissionsrate 1 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde durchgeführt. Die Konzentrationswerte werden als aufeinanderfolgende 3-Stunden-Mittel abgespeichert. Die Werte für die Gruppe *früh/mittel* werden mit den Skalierungsfaktoren des Versuchsfeldes F3, das zu derselben Blütekategorie gehört, multipliziert. Die Werte für die Gruppe *spät* werden mit dem Mittelwert der beiden Skalierungsfaktoren für die Felder F1 und F5, die zu dieser Blütekategorie gehören, multipliziert. Schließlich werden die Werte für die Gruppe *unbestimmt* mit dem Mittelwert der drei Skalierungsfaktoren für die Felder F3, F1 und F5 multipliziert.

Ansatz 2: Wie in der Untersuchung Angermünde 2010 wird für die Umlandfelder eine Ausbreitungsrechnung mit der Einheits-Emissionsrate 1 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde zwischen 4:00 und 16:00 Uhr (GMT+1) und 0,2 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde zwischen 16:00 und 4:00 Uhr durchgeführt. Die über den Tag gemittelte Einheits-Emissionsrate beträgt 0,6 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde. Die Ergebnisse werden mit einem zeitunabhängigen Skalierungsfaktor multipliziert.

Ansatz 3: In Erweiterung von Ansatz 2 werden die drei Versuchsfelder wie die Umlandfelder modelliert, d.h. es wird eine Freisetzung von 0,2 bzw. 1 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde für sämtliche Felder verwendet. Die so in einer einzigen Ausbreitungsrechnung bestimmte Gesamtkonzentration wird mit einem einzigen, zeitunabhängigen Skalierungsfaktor ohne direkte Berücksichtigung der Messwerte im Feld skaliert.

Aus den Zeitreihen der so bestimmten Gesamtkonzentration und der Zeitreihe der Windgeschwindigkeit kann für jede PMF-Messposition die über die gesamte Blütedauer integrierte Pollenflussdichte bestimmt und mit dem PMF-Messwert verglichen werden. Dieser Vergleich wurde für jeden der drei Ansätze durchgeführt.

3.4.5.3 Mathematische Formulierung

Die im vorigen Abschnitt beschriebenen Ansätze zur Berechnung der Gesamtkonzentration können etwas präziser in mathematischer Form dargestellt werden.

Es sei $\varphi_{k,i}^{(m)}$ die mit der Einheits-Emissionsrate berechnete Teilkonzentration des Versuchsfeldes Fk an der Meßposition ANm für das i -te 3-Stunden-Intervall. Entsprechend liefere ein Umlandfeld mit dem Index l die Teilkonzentration $\mu_{l,i}^{(m)}$. Die im Feld Fk , also am Ort ANk gemessene PMO-Konzentration sei $m_i^{(k)}$.

Die modellierte Gesamtkonzentration $c_i^{(m)}$ an der Meßposition AN*m* für das *i*-te 3-Stunden-Intervall ergibt sich zu

$$c_i^{(m)} = \sum_{k=1,3,5} s_{f,k,i} \varphi_{k,i}^{(m)} + s_{uf,i} \sum_{\alpha} \mu_{\alpha,i}^{(m)} + s_{us,i} \sum_{\beta} \mu_{\beta,i}^{(m)} + s_{uu,i} \sum_{\gamma} \mu_{\gamma,i}^{(m)} \quad (28)$$

Mit den Skalierungsfaktoren für die Beiträge der Versuchsfelder $s_{f,k,i}$ und den Skalierungsfaktoren für die Beiträge der Umlandfelder $s_{uf,i}$, $s_{us,i}$, $s_{uu,i}$. Die bedingte Summation über α beinhaltet nur die Umlandfelder der Kategorie *früh/mittel*, die über β die Umlandfelder der Kategorie *spät* und die über γ die Umlandfelder der Kategorie *unbestimmt*.

Es ist

$$s_{f,k,i} = \frac{f m_i^{(k)}}{\varphi_{k,i}^{(k)}} \quad (29)$$

Wobei der Faktor f berücksichtigt, daß die PMO-Messungen 2011 aufgrund eines verkleinerten Luftdurchsatzes systematisch zu niedrig ausgefallen sind.

Die Skalierungsfaktoren der Umlandfelder hängen vom gewählten Ansatz ab:

Ansatz 1:

$$s_{uf,i} = s_{f,3,i}, \quad s_{us,i} = \frac{s_{f,1,i} + s_{f,5,i}}{2}, \quad s_{uu,i} = \frac{s_{f,1,i} + s_{f,3,i} + s_{f,5,i}}{3} \quad (30)$$

Ansatz 2:

$$s_{uf,i} = s_{us,i} = s_{uu,i} = s_u \quad (31)$$

Ansatz 3:

$$s_{uf,i} = s_{us,i} = s_{uu,i} = s_{f,k,i} = s \quad (32)$$

Die über die gesamte Blütendauer kumulierte Pollen-Anzahlkonzentration ist

$$C^{(m)} = \sum_i c_i^{(m)} \quad (33)$$

Hieraus kann die zeitlich integrierte Pollenflußdichte abgeschätzt werden:

$$F^{(m)} = \Delta t \sum_i c_i^{(m)} u_i \quad (34)$$

$$\approx \Delta t \bar{u} C^{(m)} \quad (35)$$

3.4.5.4 Ergebnisse

3.4.5.4.1 PMO-Messung versus PMF-Messung

Vor der Diskussion der Modellergebnisse ist ein Vergleich von PMO- und PMF-Messung sinnvoll, da die Emissionsraten für die Modellrechnungen anhand der PMO-Messungen festgelegt werden, die Ergebnisse der Modellierung dagegen mit den PMF-Messungen verglichen werden.

Die folgende Tabelle listet für die drei Messpositionen AN1, AN3 und AN5 die mit den PMF-Geräten bestimmte zeitintegrierte Pollenflussdichte, die mit den PMO-Geräten bestimmte kumulierte Konzentration⁴⁷, die hieraus über die Gleichung (35) abgeschätzte zeitintegrierte Pollenflussdichte sowie das Verhältnis der Flussdichten auf⁴⁸. Der Subskript m kennzeichnet, dass es sich um gemessene Werte handelt.

Tab. 10: Verhältnis PMO zu PMF anhand der ermittelten Pollenflussdichten

Meß- Position	PMF F_m (1/m ²)	PMO			PMO/PMF
		C_m (1/m ³) ($\Delta t = 3$ h)	C_m (1/m ³) ($\Delta t = 24$ h)	$\Delta t \bar{u} C_m$ (1/m ²)	
AN1	84 800 000	5 400	675	81 880 000	1,0
AN3	58 700 000	4 260	533	64 600 000	1,1
AN5	66 200 000	5 110	639	77 480 000	1,2

In der Messkampagne 2010 wurde ebenfalls die Pollenkonzentration in einem Feld mit einem für die Bestandshöhe nachjustierten PMO-Gerät bestimmt. Das kumulierte Tagesmittel über die Blüteperiode war 2.049 Pollen/m³, also im Mittel um einen Faktor 3,3 größer als in den Messungen 2011. Das stützt die Vermutung, dass der niedrigere Luftdurchsatz in den PMO-Messungen 2011 das Signal reduziert hat.

Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn man das Verhältnis der Pollenflüsse vergleicht, in das die zusätzliche Größe $\bar{u}$ eingeht:⁴⁹ Während das Verhältnis 2011 im Mittel bei 1,1 liegt, betrug es in der Messkampagne 2010 im Mittel 3,9.

Nimmt man die PMO-Messungen als Bezugsgröße, dann legt dieser Vergleich den Korrekturfaktor $f = 3,3$ in Gleichung (29) nahe.

⁴⁷ Die kumulierten Tagesmittel werden für einen Vergleich mit der Messkampagne 2010 aufgeführt. Sie ergeben sich rechnerisch aus den kumulierten 3-Stunden-Mitteln durch Division mit 24/3.

⁴⁸ Der Unterschied in den Anfangszeiten der Messperioden (8. Juli bei den PMF-Messgeräten, 14. Juli in der Modellrechnung) wird vernachlässigt.

⁴⁹ Die mittlere Windgeschwindigkeit $\bar{u}$ in Pollen-Meereshöhe ist keine reine Messgröße, da der gemessene Wert der Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe anhand eines theoretischen Profilansatzes auf die Pollenmesshöhe herunterskaliert werden musste.

Nimmt man dagegen die PMF-Messungen als Bezugsgröße, die nach den Befunden 2010 im Mittel um den Faktor 3,9 kleiner waren als die abgeleiteten PMO-Pollenflüsse am gleichen Standort, dann ist $f = 3,3/3,9 = 0,85$ zu verwenden.

3.4.5.4.2 Modellrechnung versus PMF-Messung

Mit dem alleine aus den Messwerten abgeleiteten Korrekturfaktor $f = 3,3$ und den Modellrechnungen für die drei Versuchsfelder ergibt sich ein zeitlich gemittelter Skalierungsfaktor von $\bar{s}_f = 24$. Dieser Wert ist kleiner als der 2010 aus den PMO-Messungen bestimmte Wert (35). Das Mittel der beiden Werte kann als Schätzung für den Skalierungsfaktor der Umlandfelder in Ansatz 2 bzw. den Skalierungsfaktor sämtlicher Felder in Ansatz 3 angesetzt werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass für diese Felder in den Ausbreitungsrechnungen eine mittlere Einheits-Emissionsrate von 0,6 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde verwendet wurde, während für die Versuchsfelder mit 1 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde gerechnet wurde.

Für die PMF-Messungen als Bezugsgröße ($f = 0,85$) wurde daher der Skalierungsfaktor s_u in Ansatz 2 und der Skalierungsfaktor s in Ansatz 3 auf den Wert $30/(3,9 \cdot 0,6) = 13$ gesetzt. Im Ansatz 3 wurde also für alle Maisfelder eine Emissionsrate von knapp 3 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde bei Nacht und 13 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde bei Tag während der gesamten Messperiode von 33 Tagen angenommen.

Für jeden der drei Ansätze wurde so nach der Gleichung (34) für jede Messposition aus den modellierten, skalierten Konzentrationswerten die zeitintegrierte Pollenflussdichte berechnet. Die Abb. 94 bis Abb. 96 zeigen den Vergleich von gemessenen und berechneten Werten. Die Werte sind in den Tab. 12 bis Tab. 14 aufgeführt.

Wie schon in den Vergleichen zur Messkampagne 2010 wird der gemessene Abfall der zeitintegrierten Pollenflussdichte mit der Entfernung recht gut von der Modellrechnung reproduziert. Auch die Absolutwerte werden, von ein paar Ausreißern abgesehen, gut getroffen.

Insgesamt liefern alle drei Ansätze ein ähnliches Ergebnis. Im Mittel ist eine detaillierte Berücksichtigung des Zeitverlaufes über die gesamte Blütendauer von 33 Tagen offenbar nicht entscheidend. Dieser Befund ist nur bedingt verallgemeinerbar, da er auch von der Variabilität der Meteorologie innerhalb der Blüteperiode abhängt.

Abb. 97 zeigt schließlich das Ergebnis nach Ansatz 2 für $s_u = 0$, also ohne Berücksichtigung der Umlandfelder. Der Vergleich mit Abb. 95 zeigt, dass der Einfluss der Umlandfelder erwartungsgemäß mit größerem Feldabstand zunimmt.

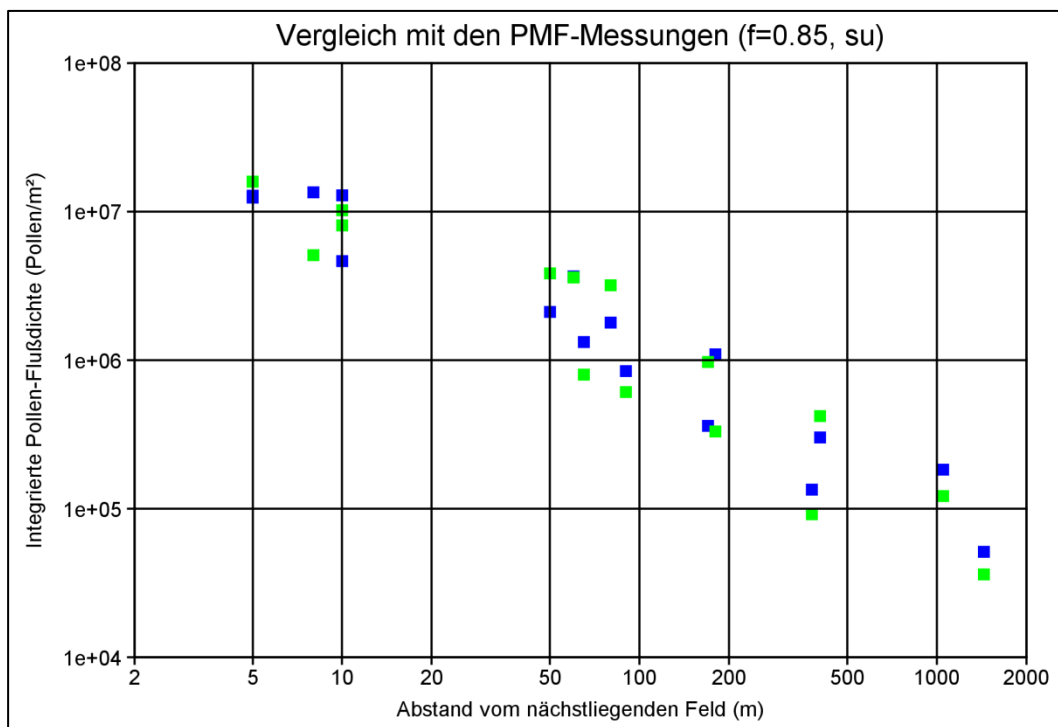


Abb. 94: Über die Messperiode (33 Tage) integrierte Pollenflussdichte als Funktion des Abstandes zum nächsten Maisfeld nach Ansatz 1 (Ableitung der Emission der Umlandfelder aus den Emissions-Zeitreihen der Versuchsfelder). Blau: PMF-Messungen, Grün: Modellrechnung. (Grafik: Jänicke)

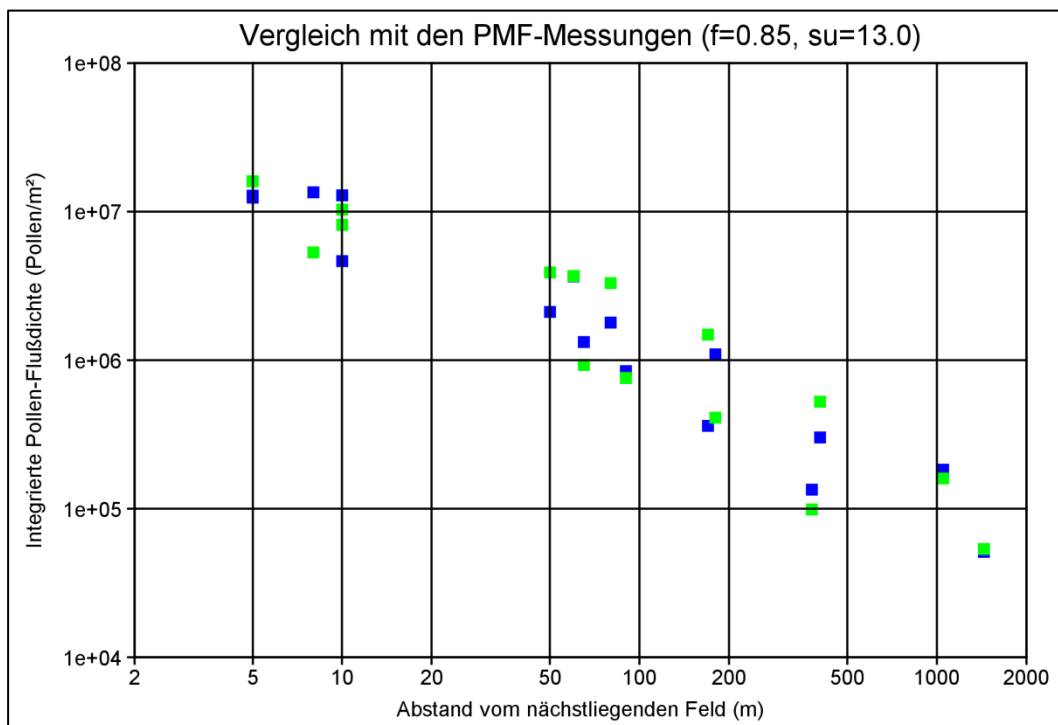


Abb. 95: Über die Messperiode (33 Tage) integrierte Pollenflussdichte als Funktion des Abstandes zum nächsten Maisfeld nach Ansatz 2 (einheitlicher, konstanter Skalierungsfaktor für die Umlandfelder). Blau: PMF-Messungen, Grün: Modellrechnung. (Grafik: Jänicke)

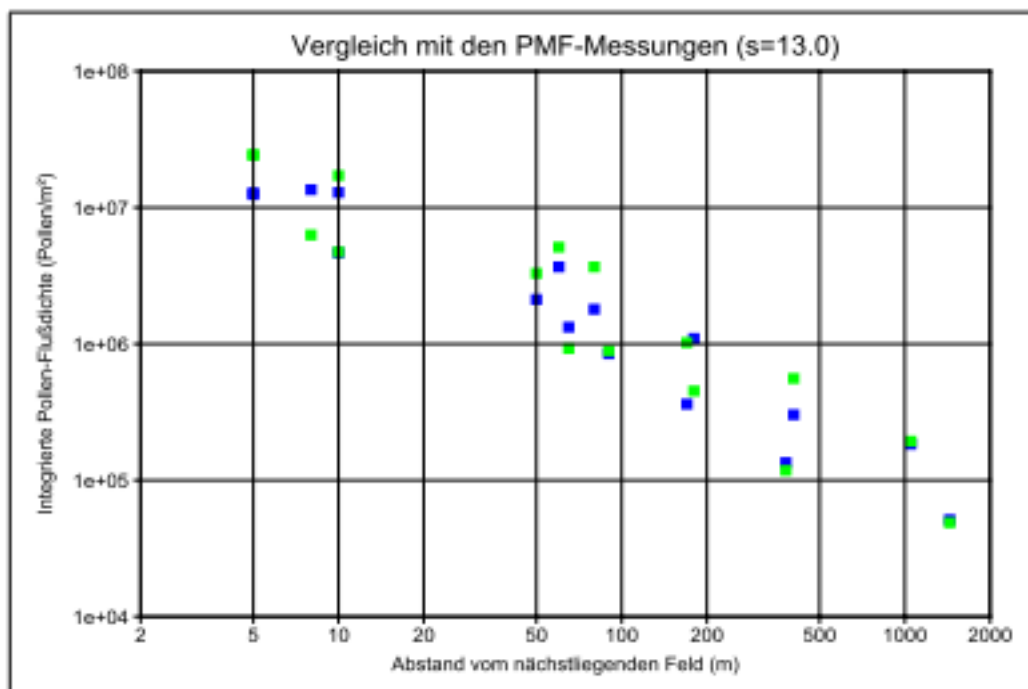


Abb. 96: Über die Messperiode (33 Tage) integrierte Pollenflussdichte als Funktion des Abstandes zum nächsten Maisfeld nach Ansatz 3 (Emissionsrate von knapp 3 bzw. 13 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde bei Nacht bzw. bei Tag für alle Felder). **Blau:** PMF-Messungen, **Grün:** Modellrechnung. (Grafik: Jänicke)

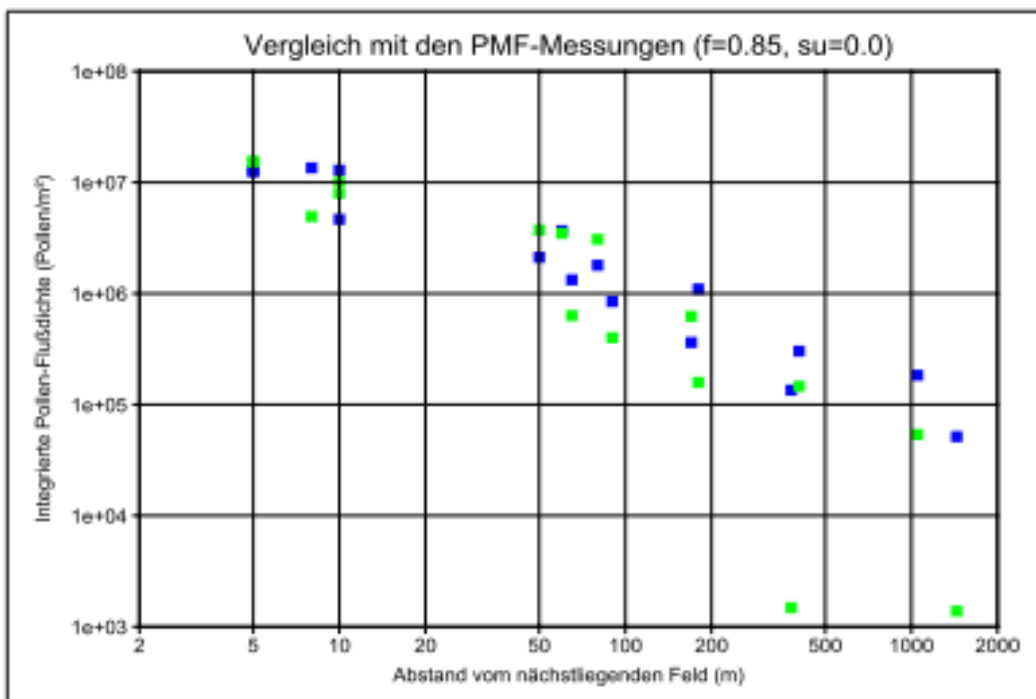


Abb. 97: Über die Messperiode (33 Tage) integrierte Pollenflussdichte als Funktion des Abstandes zum nächsten Maisfeld nach Ansatz 1/2 ohne Berücksichtigung der Umlandfelder. **Blau:** PMF-Messungen, **Grün:** Modellrechnung. (Grafik: Jänicke)

Tab. 11: PMF-Positionen, Abstand zum nächsten Maisfeld (m), PMF-Meßwert (Pollen/m²), modellierter Wert (Pollen/m²) und Verhältnis von modelliertem zu gemessenem Wert nach Ansatz 1 ($f = 0,85$).

Position	Abstand	PMF	MOD	MOD/PMF
" AN1"	0	8.48e+07	6.64e+07	0.783
" AN3"	0	5.87e+07	5.46e+07	0.930
" AN5"	0	6.62e+07	6.29e+07	0.951
" AN7"	80	1.80e+06	3.20e+06	1.783
" AN8"	8	1.35e+07	5.10e+06	0.378
" AN9"	65	1.33e+06	8.01e+05	0.603
" AN10"	90	8.47e+05	6.12e+05	0.723
" AN11"	5	1.25e+07	1.60e+07	1.282
" AN12"	5	1.28e+07	1.60e+07	1.244
" AN13"	180	1.10e+06	3.32e+05	0.303
" AN14"	380	1.35e+05	9.20e+04	0.683
" AN15"	1440	5.14e+04	3.62e+04	0.705
" AN16"	10	4.66e+06	8.10e+06	1.739
" AN17"	50	2.12e+06	3.85e+06	1.818
" AN18"	60	3.67e+06	3.61e+06	0.983
" AN19"	10	1.29e+07	1.02e+07	0.794
" AN20"	405	3.03e+05	4.22e+05	1.393
" AN21"	1050	1.84e+05	1.22e+05	0.664
" AN22"	170	3.62e+05	9.75e+05	2.691

Tab. 12: PMF-Positionen, Abstand zum nächsten Maisfeld (m), PMF-Meßwert (Pollen/m²), modellierter Wert (Pollen/m²) und Verhältnis von modelliertem zu gemessenem Wert nach Ansatz 2 ($f = 0,85, s_u = 13$)

Position	Abstand	PMF	MOD	MOD/PMF
" AN1"	0	8.48e+07	6.65e+07	0.785
" AN3"	0	5.87e+07	5.48e+07	0.933
" AN5"	0	6.62e+07	6.30e+07	0.951
" AN7"	80	1.80e+06	3.31e+06	1.843
" AN8"	8	1.35e+07	5.33e+06	0.394
" AN9"	65	1.33e+06	9.31e+05	0.701
" AN10"	90	8.47e+05	7.60e+05	0.898
" AN11"	5	1.25e+07	1.60e+07	1.288
" AN12"	5	1.28e+07	1.60e+07	1.250
" AN13"	180	1.10e+06	4.11e+05	0.375
" AN14"	380	1.35e+05	9.92e+04	0.736
" AN15"	1440	5.14e+04	5.37e+04	1.045
" AN16"	10	4.66e+06	8.16e+06	1.752
" AN17"	50	2.12e+06	3.90e+06	1.843
" AN18"	60	3.67e+06	3.70e+06	1.007
" AN19"	10	1.29e+07	1.03e+07	0.801
" AN20"	405	3.03e+05	5.27e+05	1.740
" AN21"	1050	1.84e+05	1.60e+05	0.872
" AN22"	170	3.62e+05	1.49e+06	4.112

Tab. 13: PMF-Positionen, Abstand zum nächsten Maisfeld (m), PMF-Meßwert (Pollen/m²), modellierter Wert (Pollen/m²) und Verhältnis von modelliertem zu gemessenem Wert nach Ansatz 3 ($s = 13$)

Position	Abstand	PMF	MOD	MOD/PMF
" AN1"	0	8.48e+07	4.97e+07	0.586
" AN3"	0	5.87e+07	4.36e+07	0.742
" AN5"	0	6.62e+07	4.95e+07	0.748
" AN7"	80	1.80e+06	3.67e+06	2.046
" AN8"	8	1.35e+07	6.29e+06	0.465
" AN9"	65	1.33e+06	9.25e+05	0.697
" AN10"	90	8.47e+05	8.91e+05	1.053
" AN11"	5	1.25e+07	2.43e+07	1.952
" AN12"	5	1.28e+07	2.43e+07	1.895
" AN13"	180	1.10e+06	4.52e+05	0.412
" AN14"	380	1.35e+05	1.18e+05	0.876
" AN15"	1440	5.14e+04	4.88e+04	0.950
" AN16"	10	4.66e+06	4.73e+06	1.016
" AN17"	50	2.12e+06	3.29e+06	1.554
" AN18"	60	3.67e+06	5.13e+06	1.396
" AN19"	10	1.29e+07	1.72e+07	1.332
" AN20"	405	3.03e+05	5.58e+05	1.844
" AN21"	1050	1.84e+05	1.94e+05	1.053
" AN22"	170	3.62e+05	1.02e+06	2.823

Tab. 14: PMF-Positionen, Abstand zum nächsten Maisfeld (m), PMF-Meßwert (Pollen/m²), modellierter Wert (Pollen/m²) und Verhältnis von modelliertem zu gemessenem Wert nach Ansatz 1/2 ohne Berücksichtigung der Umlandfelder ($f = 0,85, s_u = 0$)

Position	Abstand	PMF	MOD	MOD/PMF
" AN1"	0	8.48e+07	6.63e+07	0.782
" AN3"	0	5.87e+07	5.45e+07	0.927
" AN5"	0	6.62e+07	6.28e+07	0.949
" AN7"	80	1.80e+06	3.07e+06	1.711
" AN8"	8	1.35e+07	4.93e+06	0.365
" AN9"	65	1.33e+06	6.33e+05	0.477
" AN10"	90	8.47e+05	4.00e+05	0.473
" AN11"	5	1.25e+07	1.54e+07	1.235
" AN12"	5	1.28e+07	1.54e+07	1.199
" AN13"	180	1.10e+06	1.58e+05	0.144
" AN14"	380	1.35e+05	1.48e+03	0.011
" AN15"	1440	5.14e+04	1.38e+03	0.027
" AN16"	10	4.66e+06	7.97e+06	1.712
" AN17"	50	2.12e+06	3.72e+06	1.757
" AN18"	60	3.67e+06	3.48e+06	0.947
" AN19"	10	1.29e+07	1.01e+07	0.784
" AN20"	405	3.03e+05	1.46e+05	0.483
" AN21"	1050	1.84e+05	5.38e+04	0.293
" AN22"	170	3.62e+05	6.22e+05	1.717

3.4.5.5 *Schlussfolgerungen*

Die in der Messkampagne Angermünde 2011 mit PMF-Geräten gemessene, über die gesamte Blüteperiode (33 Tage) integrierte Flussdichte von Maispollen in Abständen zwischen 5 und 1440 m vom nächstgelegenen Maisfeld konnte mit Ausbreitungsrechnungen unter Verwendung von Standardannahmen gut reproduziert werden.

Für Abstände von mehr als ca. 200 m vom betrachteten Feld gewinnt der Beitrag weiter entfernt liegender Felder an Bedeutung und muss berücksichtigt werden.

Der Vergleich unterschiedlicher Ansätze zur Abschätzung der zeitabhängigen Emissionsraten der Felder zeigt, dass für den betrachteten Standort und Zeitraum ein detaillierter, mit Hilfe von PMO-Messgeräten bestimmter Zeitgang keine wesentliche Verbesserung zwischen Messung und Rechnung bringt. Die Ursachen hierfür sind unter anderem die relativ geringen Schwankungen der meteorologischen Bedingungen über den betrachteten Zeitraum.

Mit der Annahme einer mittleren Emissionsrate von 13 bzw. knapp 3 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde bei Tag bzw. bei Nacht für alle Felder (Ansatz 3) ergibt sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Modellrechnung und Messung (Abb. 96).

Auch wenn dieses Ergebnis nicht ohne weiteres verallgemeinert werden kann, deutet die gute Übereinstimmung darauf hin, dass dieses relativ einfache Verfahren, das keine Skalierung anhand von zeitaufgelösten Messungen vor Ort erfordert, zumindest eine erste vernünftige Abschätzung auch im allgemeinen Fall ermöglicht.

Der Ansatz einer mittleren Emissionsrate erlaubt die Abschätzung der Maispollenverteilung in einem größeren Gebiet, indem die Ausbreitungsrechnung für ein kleines Testfeld (z.B. der Größe 10 m mal 10 m) für die gesamte Blühperiode unter Berücksichtigung der aktuellen Wetterbedingungen durchgeführt wird und dann die aktuelle räumliche Verteilung der Felder (entsprechend gerastert) mit der berechneten Konzentrationsverteilung des Testfeldes gefaltet wird. Hierbei sollten Entfernungen bis mindestens 10 km vom Feld berücksichtigt werden.

4. Variation der Maispollendeposition auf Blattoberflächen

4.1 Einleitung und Aufgabenstellung

Maispollen aus *Bt*-Maisfeldern gelangen mit dem Wind in benachbarte Schutzgebiete und werden dort auf Futterpflanzen von Nichtzielorganismen (NZO) wie z.B. Schmetterlingsraupen deponiert. *Bt*-Maissorten exprimieren ein oder mehrere sogenannte *Bt*-Toxine und dies meist in allen Pflanzenorganen, so dass mit dem Pollen das Toxin in der Umwelt verbreitet wird (NGUYEN & JEHL 2007). Um das Risiko für Nichtzielorganismen abzuschätzen, muss die Exposition bestimmt werden (SEARS ET AL. 2001). Nach MUSCHE ET AL. (2009) liegen hierzu jedoch keine ausreichenden Kenntnisse vor.

In mehreren Studien wurde gezeigt, dass bei einem Anbau von *Bt*-Mais NZO gegenüber dem Toxin exponiert sind. Toxische Wirkungen auf sensitive Organismen, wie z.B. Schmetterlinge, kommen sowohl innerhalb als auch außerhalb von GV-Maisfeldern vor (LOSEY ET AL. 1999, HANSEN-JESSE & OBRYCKI 2000, SEARS ET AL. 2001, PLEASANTS ET AL. 2001, FEHLKE & LANGENBRUCH 2004 UND 2008, LANG ET AL. 2004, DARVAS & SCEKAS 2011, ROSI-MARSHALL ET AL. 2007 UND 2008, SCHMIDT ET AL. 2008, PERRY ET AL. 2010, 2011 UND 2012). Allerdings werden die Risiken im Hinblick auf einen allgemeinen Anbau von *Bt*-Mais in den Studien unterschiedlich und kontrovers bewertet (vgl. MUSCHE ET AL. 2009).

Mais blüht in Deutschland in den Sommermonaten Juli und August, wobei sowohl Zeitraum als auch Dauer der Maisblüte erheblich variieren können (ZSCHEISCHLER ET AL. 1999). In Deutschland ist vorwiegend mit Einträgen von Anfang Juli bis in die dritte Augustwoche zu rechnen (LANG ET AL. 2004, HOFMANN ET AL. 2009a UND 2013).

Um die Risiken ausreichend zu erfassen, müssen ungünstige Verhältnisse, sogenannte Worst-Case-Annahmen berücksichtigt werden, wie z.B. Abwindposition (Lee) (PETERSON ET AL. 2006). Auf Grund wechselnder meteorologischer Verhältnisse über den Blühzeitraum sind Worst-Case-Bedingungen wie permanente Abwindrichtung allerdings in Freilandmessungen bei festen Messorten nicht zu gewährleisten, so dass es keine Messdaten zu Worst-Case gibt. KAWASHIMA ET AL. (2004 und 2007) wies auf diesen Mangel hin und zeigte, wie aus empirischen Freilandmessungen eine potentielle Gesamtdosition unter Annahme stetiger Abwindposition als Grundlage für eine Risikoabschätzung rechnerisch ermittelt werden kann. Obwohl international publiziert, wurden weder die Messdaten noch der Aspekt in nachfolgenden Risikostudien angemessen berücksichtigt (PERRY ET AL. 2010 UND 2012, EFSA 2009 UND 2011a-c). In unseren Untersuchungen haben wir Kawashimas Forschungen aufgegriffen und seinen Ansatz so erweitert, dass für verschiedene Messorte in der Umgebung des Maisfeldes bestimmte Szenarien unter Berücksichtigung von Freilandmessdaten durchgerechnet werden können. So lassen sich ungünstige Witterungsverhältnisse aus me-

teorologischen Langzeitmessungen ableiten, sowie allgemein Worst-Case-Annahmen berücksichtigen.

Auf Blättern abgelagerte Pollen verteilen sich nicht gleichmäßig auf der Blattoberfläche und unterliegen Verlagerungsprozessen. Pollen können durch Wind, Blattbewegung und Regen verlagert und auch abgetragen werden (AYLOR ET AL. 2003, PLEASANTS ET AL. 2001, LANG ET AL. 2004), selbst eine Resuspendierung in den Luftstrom ist möglich (AYLOR ET AL. 2003). Maispollen neigen als Partikel allgemein zur Aggregation und lagern sich an bestimmten Blattstrukturen wie Blattrippen, Blattachsen, Mulden und Härchen an, so dass dort höhere Pollendichten auftreten als im Mittel über das Blatt verteilt (PLEASANTS ET AL. 2001, HOFMANN ET AL. 2011). Die Pollendeposition auf den Blättern besitzt daher eine inhomogene Verteilung mit hoher Variabilität über Raum und Zeit (HOFMANN ET AL. 2011). Die üblicherweise benutzten Mittelwerte der Pollendeposition auf einem Blatt geben die tatsächliche Situation nicht angemessen wieder. Die Individuen einer Populationen von Nichtzielorganismen sind einer wesentlich höheren Bandbreite an Maispollendosen ausgesetzt als mit dem Mittelwert allein ausgedrückt werden kann und daher ist anzunehmen, dass Teile der Population weitaus stärker belastet und gefährdet als bisher angenommen sind.

Nach (MUSCHE ET AL. 2009) trifft der Wunsch nach einer adäquaten Risikobewertung auf die Problematik von ungenügend detaillierten Messdaten in der Literatur. Bislang beruhen die für die Expositionsabschätzung herangezogenen Daten auf unterschiedlichen Verfahren und Messmethoden; die Erfassungszeiten variierten von wenigen Stunden, einzelnen Tagen bis zum gesamten Blühzeitraum, unterschiedliche Windrichtungen und Messhöhen von Bodenhöhe bis zur Fahnenhöhe wurden angesetzt. Wenngleich dies jeweils bestimmten Untersuchungszielen geschuldet war, ist das Resultat, dass die vorliegenden Daten nur eingeschränkt oder gar nicht verglichen werden können und die Ergebnisse über den Einzelfall hinaus nicht übertragbar sind. Hinzu kommt, dass die Intensität der Maispollenschüttung einer hohen Variabilität unterliegt, die abhängig von Maissorte, Witterung und Standortbedingungen ist (FONSECA ET AL. 2002, 2003 UND 2004, HOFMANN ET AL. 2009a). Die Pollendeposition hängt zudem entscheidend von den Eigenschaften des Akzeptors ab, hier den morphologischen Eigenschaften der Blätter und den Wuchsbedingungen der Pflanzen, die standortspezifisch unterschiedlich ausfallen. Für eine Übertragbarkeit der Ergebnisse sind daher standardisierte technischen Verfahren unerlässlich (VDI 4330-1 2006).

Um genauere Daten über die tatsächliche Deposition von Maispollen auf Futterpflanzen zu erlangen, wurde in den Jahren 2008 und 2009 eine neue Methode zur Erfassung von Pollen auf Blättern entwickelt (HOFMANN ET AL. 2011). Diese Methode ermöglichte erstmals, die Maispollendeposition und deren Variabilität auf Blättern im Freiland über den Blühzeitraum hinweg direkt zu beobachten.

4.2 Vorgehensweise

4.2.1 Erfassung der Blattdeposition *in situ* mit mobilem USB-Mikroskop

Das in den Jahren 2008/2009 entwickelte Verfahren besteht aus einem portablen USB-Mikroskop (DinoLite Pro AM 413 MT) mit einer Auflösung von 1,3 Megapixel, welches einen Vergrößerungsbereich von ca. 50fach bis 200fach erlaubt (Abb. 98). Für die Bilderfassung und Auszählung der Pollen wurde die mitgelieferte Software DinoCapture 2.0 eingesetzt. Das Verfahren erlaubt die Größenvermessung der Pollen, wofür eine Kalibrierung über eine Referenzskala erfolgte. Das DinoLite verfügt über eine transparente Frontkappe als Distanzhalterung sowie ringförmig angeordnete 8 LEDs, die eine gleichmäßige und gute Ausleuchtung gewährleisten. Bei 50facher Vergrößerung beträgt die Größe des Bildes geräteabhängig ca. 20 mm², bei 200facher Vergrößerung ca. 5 mm². Mit dem Mikroskop lassen sich Maispollen, die einen Größenbereich von 80-125 µm aufweisen, sicher auf der Blattoberseite erkennen und quantifizieren (s. Abb. 99 und HOFMANN ET AL. 2011).

Die Erfassung der Maispollendeposition auf Blättern von Mais und ausgewählten weiteren Futterpflanzen von Schmetterlingen begann mit Einsetzen der Maispollenblüte in der 2. Julihälfte und endete zum Abschluss der Hauptblüte im zentralen Versuchsfeld Mitte August.



Abb. 98: Portables Digitalmikroskop Dino-Lite Pro 1.3 MP betrieben am USP-Port des Notebooks mit 8 LED-Ringbeleuchtung an einem *Rumex*-Blatt auf dem Labortisch und rechts im Geländeeinsatz. (Bild: Hofmann)

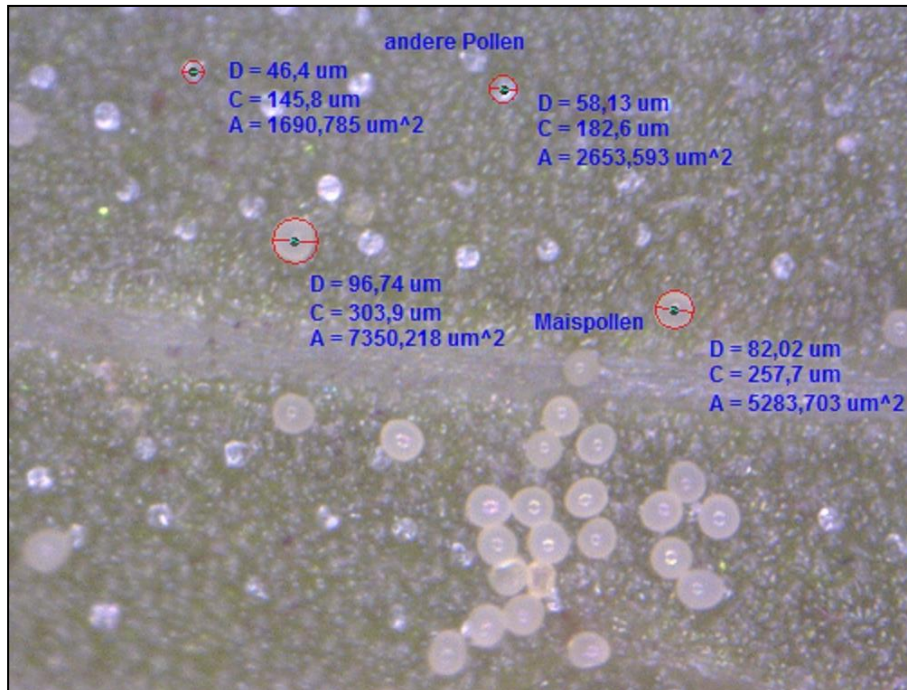


Abb. 99: Ausschnitt der Blattoberseite von *Centaurea scabiosa*, aufgenommen mit dem DinoLite Pro 1.3 bei 200-facher Vergrößerung im Freiland in 5 m Abstand zu einem Maisfeld (5 m), Ausschnitt hier ca. 2,5 mm². Maispollen lassen sich von anderen Pollenarten und Partikeln durch ihre relative Größe (80-125 µm), Färbung, Form und Oberflächenstruktur der Exine sicher identifizieren. (Bild: Hofmann)

4.2.2 Entwicklung eines strukturierten Probenahme-Designs

Die erste Aufgabe bestand darin, ein Probenahme-Design zu entwickeln, mit dem die inhomogene und stark variierende Pollendichte auf den Blättern effizient aufgenommen werden kann. Für die Risikobewertung ist es essentiell neben den Mittelwerten die Dichteverteilung der Pollendeposition auf den Blättern zu erfassen. Die Fläche einer Mikroskopaufnahme als ein Messpunkt betrug ca. 5 mm² (200x-Vergrößerung), der exakte Wert fällt gerätespezifisch aus und wurde über eine Eichskala kalibriert. Folgende Messansätze wurden evaluiert, wobei als praktikable Zielgröße für eine effiziente Erfassung nicht mehr als 25-30 Aufnahmepunkte pro Blatt zu Grunde gelegt wurden:

- Zufallsbeprobung im Raster;
- Transsekte;
- Cluster;
- Strukturiertes Design aus einer Kombination von Transsekten und Clustern.

Das Verfahren wird im Folgenden beschrieben, die Ergebnisse finden sich in Tab. 15.⁵⁰

Tab. 15: Ergebnisse aus den Untersuchungen zum Probenahmedesign der Blattdepositions-Messungen, um die Variation der Maispollendeposition auf Pflanzenblättern, hier an einem Maisblatt ausgeführt, adäquat zu erfassen.

*Strukturiertes Design: Kombination von 3 Transekten à 5 Messpunkten und 4 Cluster à 3 Messpunkten

	Zufalls- beprobung im Raster	Transekt vollständig, lateral, Blattmitte	5 laterale Transekte à 5 Mess- punkten	6 Cluster à 5 Mess- punkten	Gesamt	Struktur- iertes Design*
	[n/cm ²]	[n/cm ²]	[n/cm ²]	[n/cm ²]	[n/cm ²]	[n/cm ²]
N	35	37	25	30	127	27
Maximum	2787	2302	2745	5448	5448	5448
95 %- Quantil	1907	1486	2112	2058	2152	2289
Mittelwert	64	175	72	222	118	130
5 %-Quantil	14	14	14	17	14	14
Minimum	14	14	14	14	14	14

4.2.2.1 Zufallsbeprobung im Raster

Für eine Zufallsbeprobung im Raster wurden 35 Messpunkte (Bildflächen) mittels Koordinatenzuordnung und Zufallsziehung (per Statistikprogramm R) über das Blatt verteilt. Die Ergebnisse in Tab. 15 zeigen, dass auch bei 35 Aufnahmepunkten pro Blatt die hohen Belastungsbereiche und Maxima und damit die Variation der Pollendeposition nicht angemessen zu ermitteln waren. Die Aussagekraft von Zufallserhebungen mit weniger Probenahmepunkten pro Blatt - wie in der Literatur vielfach beschrieben (z.B. 3 Messpunkte pro Blatt wie bei PLEASANTS ET AL. 2001) - ist angesichts der beobachteten hohen Variation zu gering, um partiell auftretende hohe Belastungen, die auf der Blattoberfläche auf Grund der inhomogenen Verteilung auftreten können, erfassen zu können.

4.2.2.2 Cluster

Für die Cluster-Beprobung wurden visuell sechs Areale des Blattes mit unterschiedlicher Pollendichte ausgewählt und dort jeweils fünf Aufnahmen pro Cluster gemacht. Aus Tab. 15

⁵⁰ Die Arbeiten wurden v. TIEM (F. Hofmann, U. Schlechtriemen, U. Kuhn) mit Unterstützung der Projektgruppe des Instituts für Erd- und Umweltwissenschaften der Universität Potsdam (B. Boessenkool, S. Haase, E. Niemann, L. Schiebel, R. Schütz, Betreuer: Prof. Dr. B. Schröder) durchgeführt.

geht hervor, dass hier die Maximal- und Minimalwerte gut erfasst werden, nicht jedoch die Verteilung insgesamt. Damit ist auch diese Vorgehensweise, bei der die sichtbare Verteilung grundlegend für die Anordnung der Messpunkte ist, alleine nicht zielführend.

4.2.2.3 Transsekte

Ein gängiges Verfahren für repräsentative Erhebungen stellen Transsekte dar. Für die Evaluation der Transsektmethode wurden 5 laterale Transsekte über das Maisblatt mit je 5 Aufnahmen gelegt. Der mittlere Transsekt wurde hierbei zusätzlich vollständig erfasst. Die Ergebnisse in Tab. 15 zeigen, dass selbst die vollständige Erfassung eines Transsektes nicht geeignet ist, Mittelwert und Verteilung angemessen abzuschätzen. Bei 5 Quertranssekten à 5 Messpunkten verbessern sich Mittelwert und 95 %-Quantil, jedoch auch hier werden die Maximalwerte nur ungenügend erfasst.

4.2.2.4 Strukturiertes Design

Die beiden Verfahren „Transsekte“ und „Cluster“ wurden schließlich in einem strukturierten Probenahme-Design mit insgesamt 27 Messpunkten, bestehend aus 3 Transsekten à 5 Messpunkten und 4 Clustern à 3 Messpunkten kombiniert, wobei 2 Cluster aus hoch und 2 Cluster aus gering belegten Bereichen stammen. Aus den Ergebnissen in Tab. 15 geht hervor, dass sich über diesen Ansatz die Variation der Pollendichten auf dem Blatt mit Mittelwert, 95 %-Quantilen und Maxima am Besten erfassen liessen. Das Verfahren wurde auf einer internationalen Tagung vorgeschaltet und erfolgreich publiziert (HOFMANN ET AL. 2011).

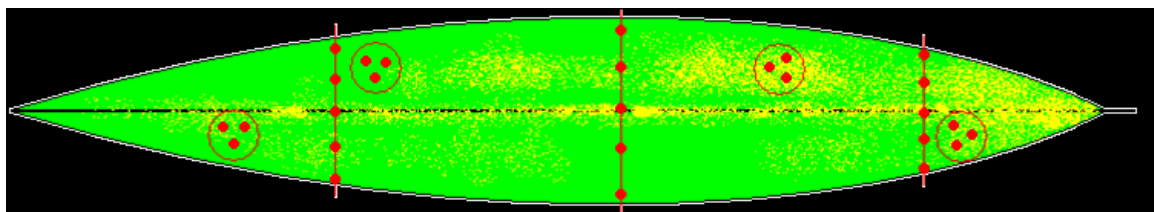


Abb. 100: Strukturiertes Probenahme-Design mit insgesamt 27 Probenahmepunkten (Bildflächen) pro Blatt, gebildet aus 3 Transsekten à 5 und 4 Clustern à 3 Probenahmepunkten aus hoch und niedrig belegten Bereichen. (Grafik: Boessenkool/Haase/Niemann/Schiebel/Schütz)

4.2.3 Auswahl geeigneter Pflanzenarten und Standorte

In den Randbereichen der Maisanbauflächen wurden die Pflanzen für die Blattdepositions-messungen nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- Häufigkeit des Auftretens im Saumbereich;
- Relevanz als Nahrungsquelle für Tag- und Nachtfalter;
- relevante Blattmerkmale wie Akzeptor-Eigenschaften;

- Handhabbarkeit für die in-situ-Mikroskopie.

Ausgewählt wurden zusätzlich zu Mais folgende Pflanzenarten an drei Standorten (s. Abb. 101):

1. Standort an einem nordöstlich gelegenen, frühblühenden Maisfeld im Bereich eines Solls mit Vorkommen von Brennnessel und Sauerampfer (s. Abb. 102).
2. Standort am selben Maisfeld, dort im Bereich eines Hügels mit Vorkommen von Brombeere (s. Abb. 103).
3. Standort am zentralen, spätblühenden Mais-Versuchsfeld mit Vorkommen von Brennnessel und Gänsefuß (s. Abb. 104).

An den untersuchten Beständen wurden im Verlauf der Untersuchungen diverse Populationen von Schmetterlingslarven beobachtet, wie z.B. Raupen des Kleinen Fuchses an Brennnessel-Blättern (s. Abb. 105).

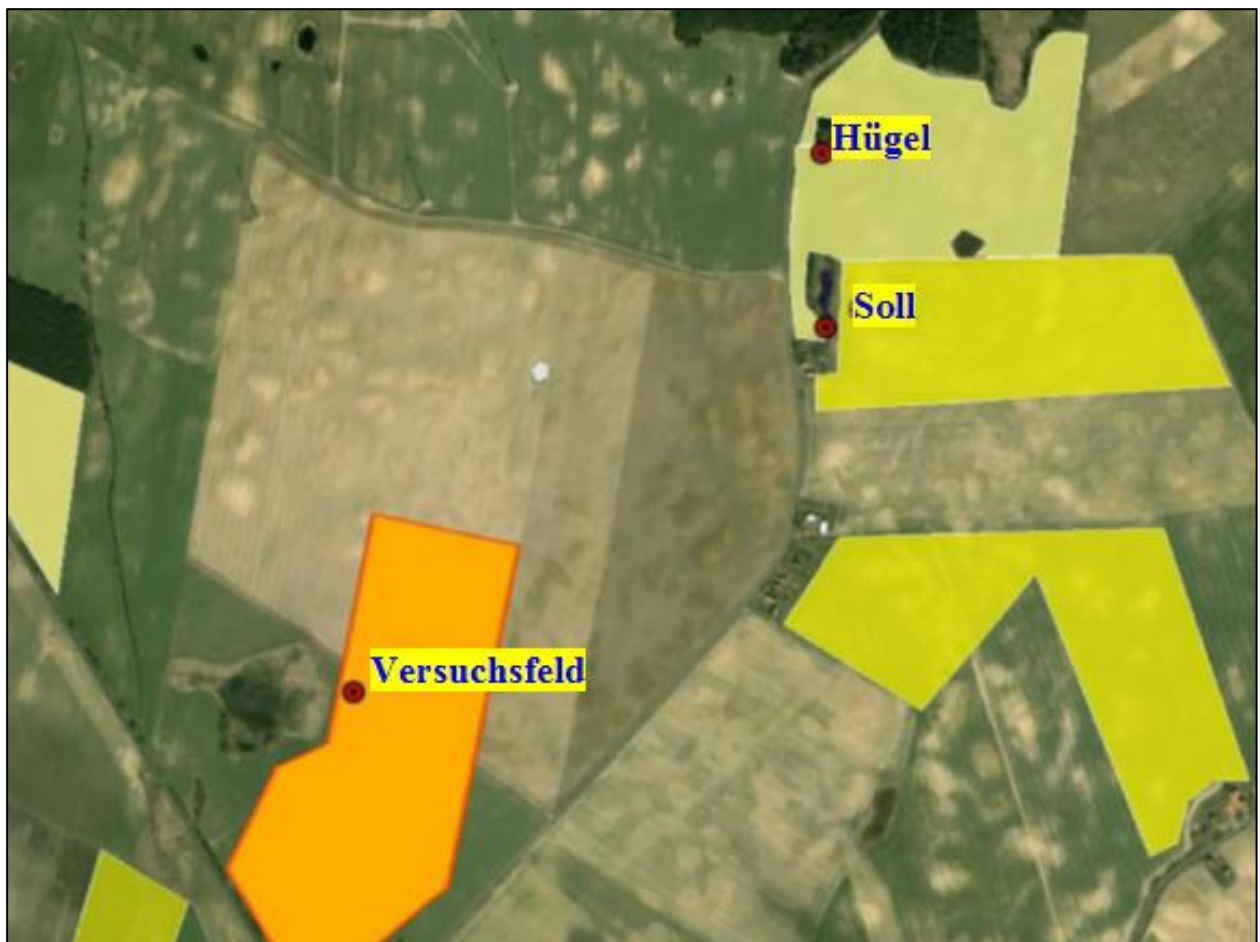


Abb. 101: Standortbereiche zur Erfassung der Maispollendeposition auf Pflanzenblättern. Standort zentrales Maisversuchsfeld (orange, spätblühendes Maisfeld), Standorte „Soll“ und „Hügel“ am Maisfeld rechts oben (gelb, frühblühendes Maisfeld). (Hintergrundbild aus Google Earth, Grafik Hofmann)



Abb. 102: Messstandort „Soll“ am nordöstlichen Maisfeld. (Bild: Hofmann)



Abb. 103: Messstandort „Hügel“ am nordöstlichen Maisfeld. (Bild: Hofmann)



Abb. 104: Messstandort zentrales Mais-„Versuchsfeld“. (Bild: Hofmann)

Tab. 16: Eigenschaften der ausgewählten Pflanzenarten in Bezug auf Eignung für Blattdepositions-messungen im Untersuchungsgebiet.

	Mais <i>Zea mais</i>	Brombeere <i>Rubus sp.</i>	Wiesen-Sauerampfer <i>Rumex acetosa</i>	Brennnessel <i>Urtica dioica</i>	Weißer Gänsefuß <i>Chenopodium album</i>
Vorkommen	+++	+-	+-	+-	+-
Häufig/Selten	H	H	H	H	H
Futterpflanze für Schmetterlingslarven	-	+++	+++	+++	+ (Nachtfalter)
Praktikabilität für in-situ-Mikroskopie	+++	++	+++	+++	++
Blattstruktur (Akzeptor-Eigenschaft)	groß, glatt	3-fingrig, gezähnt, behaart	groß, glatt	gezähnt, behaart	glatt
Auswahl	+++	+++	+++	+++	++

Tab. 17: Bedeutung der ausgewählten Pflanzenarten als Futterpflanzen für Schmetterlingslarven (Tag- und Nachtfalter).

Grosse Brennnessel <i>Urtica dioica L.</i>	Großer Sauerampfer <i>Rumex acetosa L.</i>	Brombeere <i>Rubus spp.</i>	Gänsefuss <i>Chenopodium alba</i>
Admiralfalter <i>Vanessa atalanta</i> Distelfalter <i>Vanessa cardui</i> Kleiner Fuchs <i>Nymphalis urticae</i> Tagpfauenauge <i>Inachis io</i>	Brauner Feuerfalter <i>Lycaena tityrus</i> Dukaten-Feuerfalter <i>Lycaena virgaureae</i> Kleiner Feuerfalter <i>Lycaena phlaeas</i> Lilagold-Feuerfalter <i>Lycaena hippothoe</i> Violetter Feuerfalter <i>Lycaena alciphron</i>	Brombeer-Perlmutterfalter <i>Lycaena alciphron</i> Kleiner Perlmutterfalter <i>Issoria lathonia</i> Magerrasen-Perlmutterfalter <i>Boloria dia</i>	diverse Nachtfalter



Abb. 105: Raupen des Kleinen Fuchses (*Nymphalis urticae*) auf einem Brennnesselblatt am Standort „Soll“ im Saumbereich des nordöstlichen Maisfeldes (2.8.2010). (Bild: Hofmann)

4.2.4 Erfassung der Maispollendeposition im Freiland

Die Maispollendeposition wurde gemäß der in Kap. 4.2.2 ausgearbeiteten Methode der strukturierten Probenahme an Blättern von Mais sowie ausgewählten Futterpflanzen der Schmetterlinge (Brennnessel, Sauerampfer, Brombeere und Gänsefuß) im Nahbereich der Maispollenquellen (im Feldrandbereich und im Saumbereich bis ca. 1 m Abstand) aufgenommen.

- Pro Standort und Aufnahmetag wurden jeweils 3 Blätter von 3 Pflanzen pro Art mit unterschiedlicher Stellung ausgewählt und pro Blatt an ca. 27 Probenahmepunkten Aufnahmen erstellt und analysiert.
- Die Pflanzen und Blätter wurden markiert, so dass die Zeitreihen soweit als möglich an denselben Blättern erstellt wurden.
- Mais und Brennnessel wurden täglich beprobt, falls von der Witterung her möglich.
- Die anderen Arten wurden abwechselnd beprobt, wobei unterschiedliche Tageszeiten von vormittags bis nachmittags berücksichtigt wurden.

Der Untersuchungszeitraum im Jahr 2010 war, vor allem im August, von häufigen Gewittern mit starken Windböen, Niederschlägen und Blitzschlag gekennzeichnet, so dass die Freilandarbeiten aus Sicherheitsgründen einige Male unterbrochen werden mussten. Die Messungen begannen an den zwei Standorten „Soll“ und „Hügel“ am nordöstlich gelegenen Maisfeld. Dieses Maisfeld setzte mit der Blüte am 24./25. Juli ein (gemessen an der Maisblüte in der Region in 2010 relativ früh bis mittelfrüh), doch nach kurzer Zeit wurde auf Grund ungünstiger Witterungsbedingungen die Blüte unterbrochen. Nachdem sich das Wetter besserte und die Hauptblüte im zentralen Maisversuchsfeld einsetzte, erfolgten die Aufnahmen ab dem 7.8. am zentralen Versuchsfeld.

In der Regel arbeiteten zwei Personen pro Aufnahmeteam im Tandem: Eine erstellte die Aufnahmen mit dem Digitalmikroskop an der Pflanze, die andere arbeitete am Notebook und verwaltete die Aufnahmen. Die Aufnahmen wurden von der Gerätesoftware DinoCapture fortlaufend codiert und unmittelbar in einem Probenahmedatenblatt in Excel mit Angabe von Codierung und Vergrößerung verzeichnet.

Die Bilder wurden im Labor mittels DinoCapture ausgewertet. Der dargestellte Bildausschnitt wurde voll ausgezählt. Die Größe der dargestellten Zählfläche hing vom verwendeten Gerät und von der Bildsoftware ab und wurde für jede Aufnahmeserie über ein Eichpräparat mit Messskala gerätespezifisch kalibriert. Die Software erlaubt eine Unterteilung des Bildes mittels Rahmen- und Rastersetzung, was sich bei höherer Pollendichte als

zweckdienlich erweist. Randständige Pollen wurden nur auf jeweils einer Seite gezählt (z.B. nur links und oben).

Die relativ großen Maispollen (80-125 µm Durchmesser) sind im Regelfall bei der angewendeten Vergrößerung eindeutig identifizierbar. Bei dehydrierten Pollen und aggregierten Pollen war eine farbinverse Darstellung (in der Software enthalten) hilfreich. Bei sehr hoher Pollendichte wurde das Bild in mehrere Abschnitte geteilt, die Pollen markiert und über die Markierung durch die Software automatisch gezählt. Pollenablagerungen und Pakete mit mehreren Schichten übereinander wurden bestmöglich nach sichtbarer Pollenanzahl über Fläche mal Höhe geschätzt. Auf Grund häufig vorkommender Aggregationen und Überlagerungen wurde der Einsatz von automatischer Bilderkennungssoftware als zu fehlerträchtig verworfen. Die Pollenanzahl pro Bild wurde entsprechend der jeweiligen Zählfläche auf Anzahl der Pollen pro cm² umgerechnet. Gerätespezifisch lag die Zählfläche bei 200facher Vergrößerung zwischen 2,1 mm x 2,5 mm = 5,25 mm² bis 2,2 mm x 2,7 mm = 5,94 mm².

Die absolute Nachweisgrenze (NWG) ist mit 1 Maispollen pro Bild definiert. Für die statistischen Auswertungen wurden Werte unter der Nachweisgrenze mit $\frac{2}{3}$ der Nachweisgrenze angegeben. Dies folgt der Praxis bei der Auswertung von Immissionsdaten und entspricht der Annahme, daß Werte unter der Nachweisgrenze einer Dreiecksverteilung im Bereich zwischen Null und Nachweisgrenze folgen (HOFMANN ET AL. 2001). Die Dokumentation und Auswertung der Daten erfolgte mittels Excel 2011 unter Verwendung des Statistiktools XLSTAT 2011 und R.

Als Kennzahlen der Messwerte-Verteilung wurden für jeden Standort und jede Pflanzenart pro Tag sowie über den Gesamtzeitraum arithmetischer Mittelwert, geometrischer Mittelwert, Median, 5 %- und 95 %-Quantilswerte sowie Minimum und Maximum der Blattdepositions-werte ermittelt und die Verläufe über die Zeit grafisch in Excel dargestellt.

Schließlich wurden über Korrelationsanalysen Äquivalenzfaktoren für den Bezug der Blattdepositionen der verschiedenen Pflanzenarten untereinander abgeschätzt.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Verteilung der Messwerte zur Maispollendeposition auf den Pflanzenblättern

Die Variation der Maispollendeposition auf Pflanzenblättern wurde während der Maisblüte in 2010 über insgesamt 5.378 digitalmikroskopischen Aufnahmen erfasst und quantitativ ausgewertet. Davon entfielen 2.498 auf Mais, 1.646 auf Brennnessel, 243 auf Ampfer, 324 auf Brombeere und 586 auf Gänsefuß. Um die Variation der Pollendepositionswerte zu kennzeichnen, wurde mittels XSTAT (2011) die Dichteverteilung der Messwerte auf Nor-

malverteilung geprüft, wobei die Werte unter der NWG berücksichtigt wurden. Die Messwerte-Verteilung entsprach nicht einer Normalverteilung (linksschief), sondern kam einer Log-Normalverteilung nahe, so dass die Messwerte für die statistische Auswertung log-transformiert wurden. Die Histogramme zur Dichteverteilung der Messwerte sind in Abb. 106 für Mais und in Abb. 107 für Brennnessel abgebildet. Eine Zusammenstellung der wesentlichen Kennzahlen findet sich in Tab. 18.

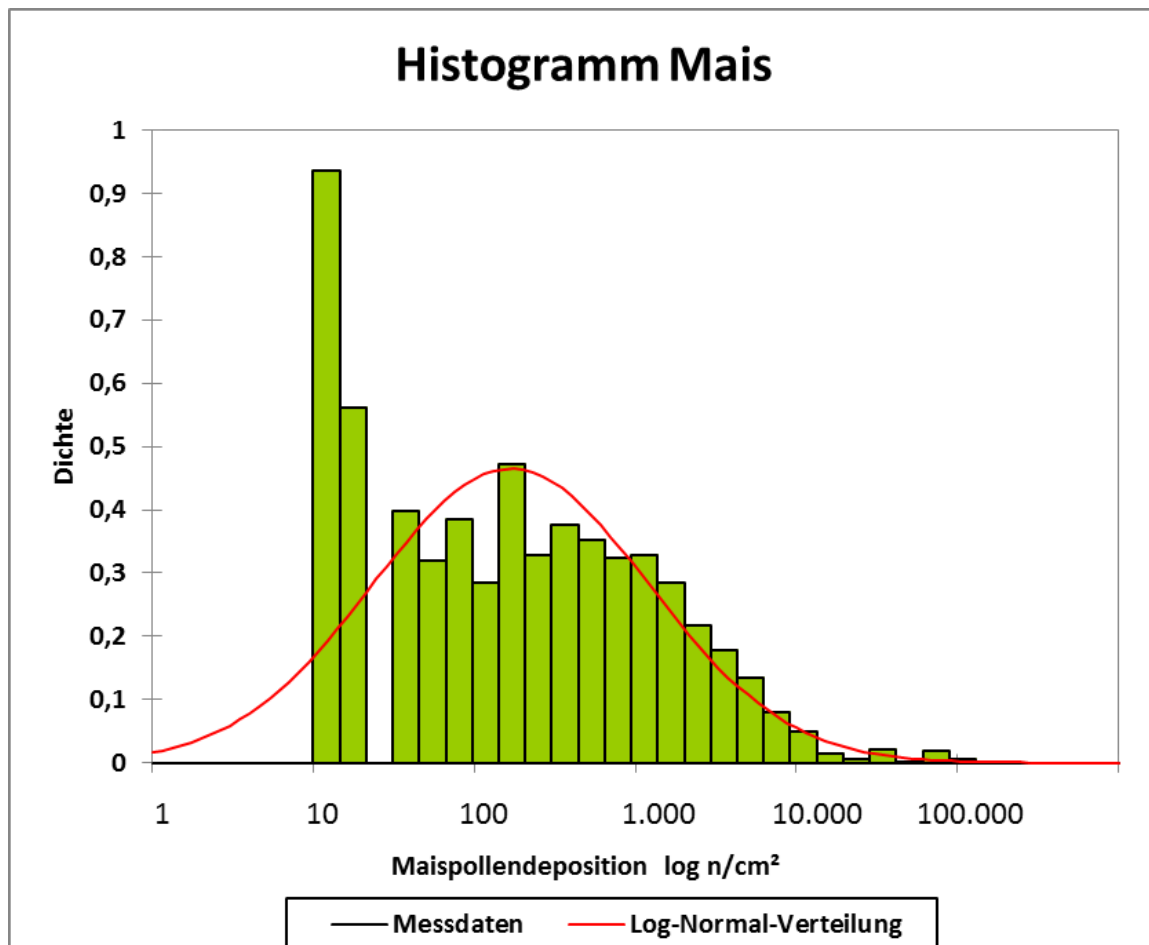


Abb. 106: Histogramm der Maispollendepositions ($\log n/\text{cm}^2$) auf Maisblättern mit log-Normal-Dichteverteilung ($n=2.498$). Die beiden linken Balken kennzeichnen Werte unter der NWG. (Grafik: Hofmann)

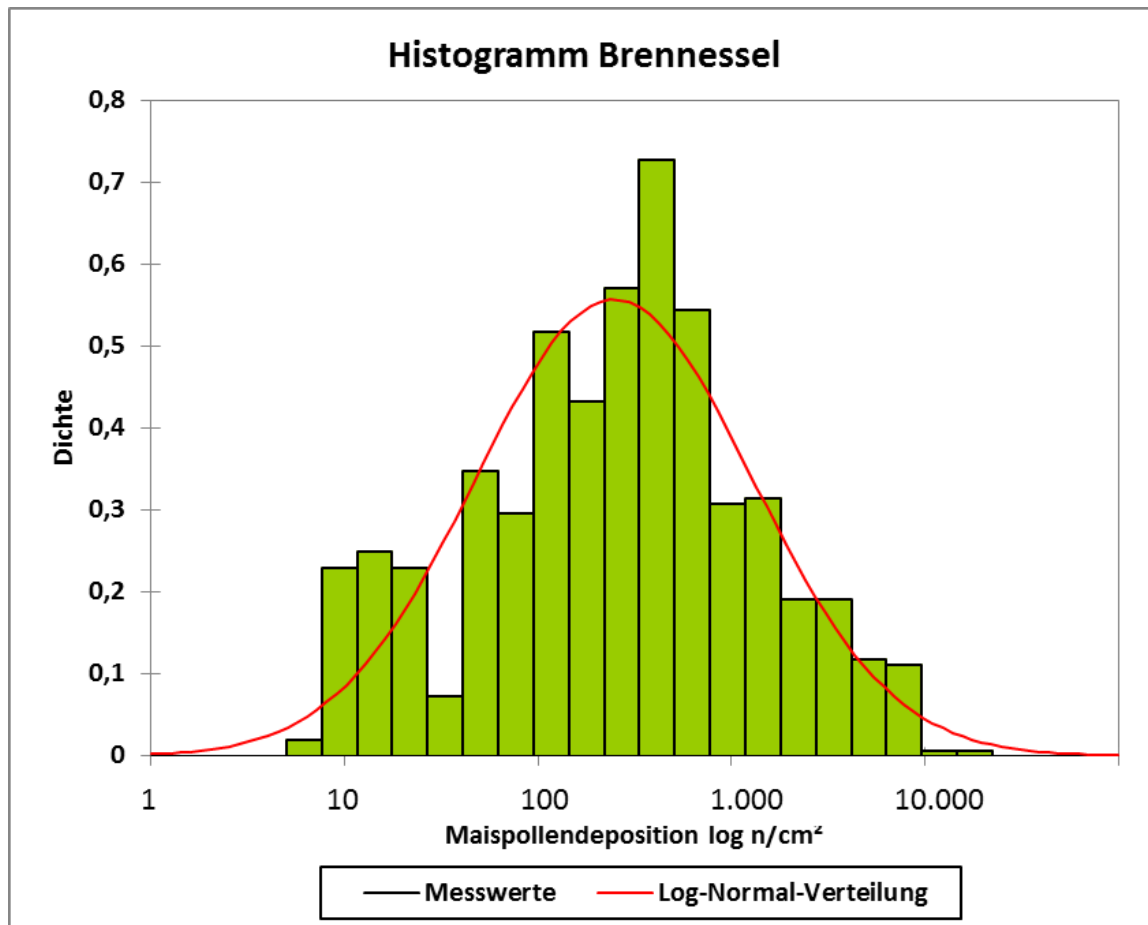


Abb. 107: Histogramm der Maispollendepositionsdaten auf Brennnesselblättern ($\log n/\text{cm}^2$) quell-nah im zentralen Versuchsfeld mit log-Normal-Dichteverteilung ($n=836$). (Grafik: Hofmann)

Die Messwerte-Verteilung wurde für den geometrischen Mittelwert, den Median, das Maximum, das Minimum sowie die Quantilswerte 2 %, 5 %, 10 %, 25 %, 75 %, 90 %, 95 % und 98 % berechnet, differenziert nach entsprechenden Tageswerten pro Pflanze sowie gemittelt für Pflanzenart und Standort. Maximum, Minimum, Median und die Quantils-werte wurden als Kennziffern für die Verteilung angegeben, die direkt von der Messwer-te-Verteilung abgeleitet werden und keine Normalverteilung voraussetzen. Sie sind in Bezug zur Anzahl der Messwerte zu werten. Als Parameter zur Kennzeichnung eines mittleren Pollendepositionswertes ist der arithmetische Mittelwert auf Grund der schiefen Wertever-teilung nicht geeignet, daher wurden geometrischer Mittelwert (arithmetisches Mittel der log-transformierten Werte) und der Median (50 %-Quantilswert) betrachtet.

Tab. 18: Kennzahlen der Maispollendepositionsdaten

Art	Mais	Brennnessel Feld	Brennnessel gesamt	Gänsefuß- Feld	Ampfer Feldrand 1m	Brombeere Feldrand 1m
Messwerte n	2.498	836	1.646	586	324	324
Messtage	31	11	20	8	3	4
Maximum	103.000	13.802	13.802	17.098	2.356	874
98 %-Quantil	8.800	6.386	4.326	5.974	1.011	589
95 %-Quantil	4.612	3.770	2.158	4.532	589	472
90 %-Quantil	2.524	2.078	1.009	3.389	418	336
75 %-Quantil	761	700	350	989	171	190
geom. Mittel- wert	169	246	100	374	53	66
Std. Abw. (Faktor)	7,21	5,2	5,5	4,2	4,6	3,4
Median	162	288	95	412	38	66
25 % - Quantil	36	82	19	144	13	19
10 % - Quantil	12	21	13	41	13	13
Minimum	< NWG	< NWG	< NWG	< NWG	< NWG	< NWG

4.3.2 Maispollendeposition auf Blättern von Mais

4.3.2.1 Variation der Pollendeposition

Die Pollendepositionswerte auf den Maisblättern umspannen über den gesamten Erhebungszeitraum einen breiten Wertebereich von unter der Nachweisgrenze bis 103.000 Maispollen/cm². Der geometrische Mittelwert der 2.498 Messwerte lag bei 169 n/cm² mit einem 95 %-Konfidenzintervall von 158 bis 180 n/cm², der Median ergab 162 n/cm². Der Schwankungsbereich der Messwerte, angezeigt über die Quantile, weist für das 95 %-Quantil einen Wert von 4.612 n/cm² aus und für das 98 %-Quantil einen Wert von 8.800 n/cm², auf der anderen Seite der Verteilung liegen die Minima unter der NWG. Während der 95 %-Vertrauensbereich des Mittelwertes mit einer Abweichung von unter 10 % des Mittelwertes angegeben werden kann, liegt der entsprechende Schwankungsbereich für die Einzelwerte der Blattdepositionen in etwa bei einem Faktor von 50 (obere Grenze

des 95 %-Vertrauensbereiches entspricht dem 97,5 %-Quantil, die untere dem 2,5 %-Quantil).

Die folgenden Aufnahmen veranschaulichen exemplarisch die Ergebnisse zur Variation der Maispollendeposition auf den Maisblättern: Die Aufnahmen erfolgten innerhalb des Maisfeldes im Bereich 5-10 m vom Bestandsrand:

- Die Abb. 108 und Abb. 109a-d illustrieren exemplarisch anhand von Nahaufnahmen die ohne Vergrößerung sichtbare Variation von Maispollen auf der Blattoberfläche.
- Abb. 110 bis Abb. 113 zeigen exemplarische Mikroskop-Aufnahmen mit dem DinoLite Pro, die die Variation der Messwerte zur Pollendeposition veranschaulichen.



Abb. 108: Nahaufnahme eines Maisblattes nach Blühbeginn am Standort „Hügel“ (28.7.2010) mit den zu Beginn der Messreihe markierten Transektpunkten; deutlich ist die inhomogene Verteilung der Maispollen auf dem Blatt mit Aggregationsbereichen auf und auch abseits der Mittelrippe zu erkennen. (Bild: Boessenkool/Schütz)



Abb. 109: Inhomogene Verteilung der Pollendeposition auf den Maisblättern in Nahaufnahmen
a (links oben): Maisblatt nach Blühbeginn, 28.7.2010 „Hügel“;
b (rechts oben): Maisblatt nach Blühbeginn, 28.7.2010 „Hügel“;
c (links unten): Maisblatt in Fahnennähe zur Vollblüte, 6.8.2010 Versuchsfeld);
d (rechts unten): Akkumulation am Blattgrund nach Regen, 7.8.2010 Versuchsfeld.
(Bilder: Boessenkool/Schütz)

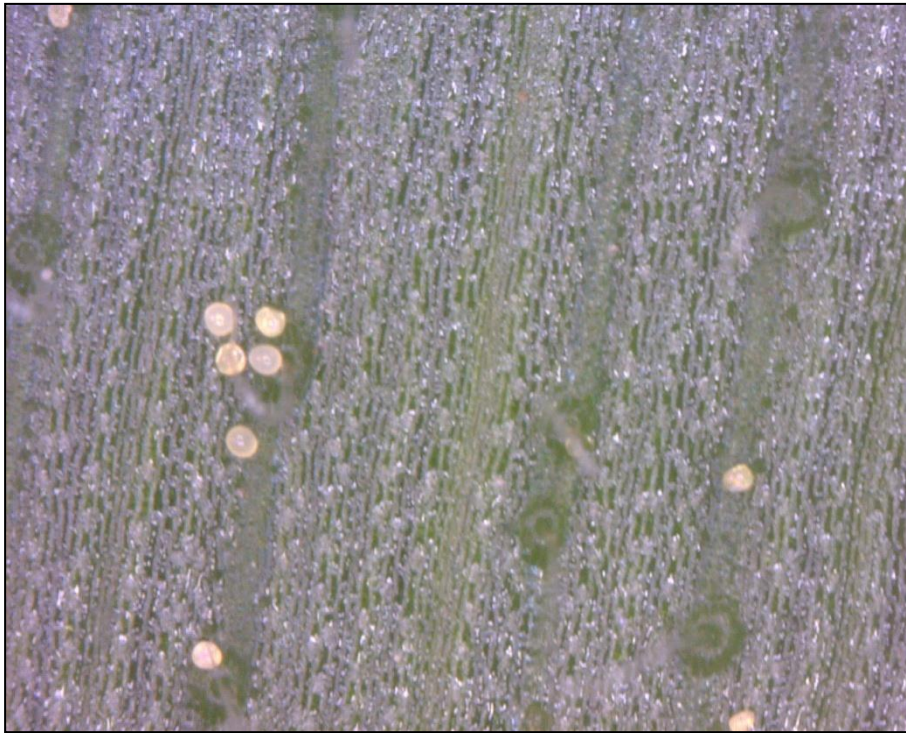


Abb. 110: Maisblatt, 200x, 9 Maispollen/Zählfläche entsprechend 162 Maispollen/cm², 28.7.2010, „Hügel“ (M1.2 T, 0306).

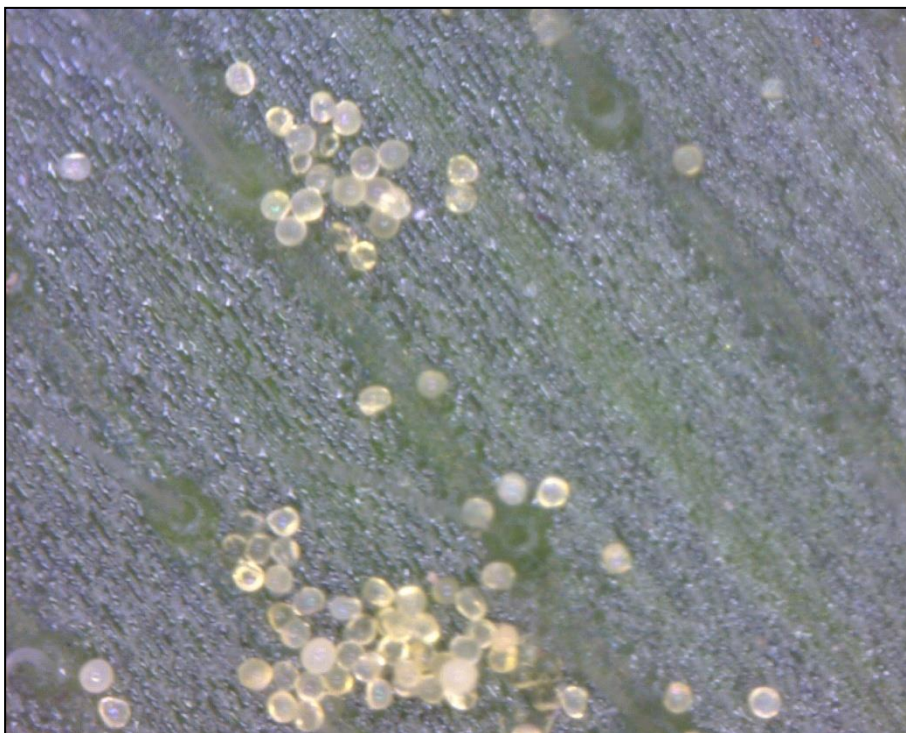


Abb. 111: Maisblatt, 200x, 76 Maispollen/Zählfläche = 1368/cm², 28.7.2010, „Hügel“ (M1.1AM C2, 0287).

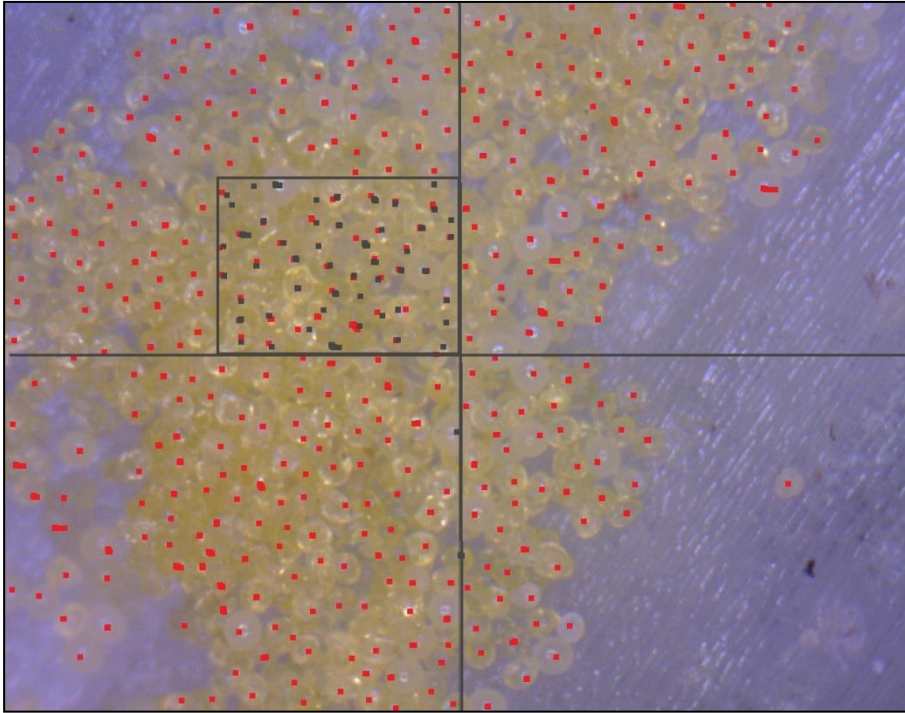


Abb. 112: Maisblatt, 200x, Auswertung mit Hilfslinien und Markierung der Maispollen zur Quantifizierung über die Software, 379 Maispollen/Zählfläche = $6.822/\text{cm}^2$, 28.7.2010, „Hügel“ (200x, M2.2 C4, 0001).



Abb. 113: Maisblatt, 50x, Akkumulation am Blattgrund nach Regen, 12.8.2010, Versuchsfeld. Eine exakte Auszählung ist hier nicht mehr möglich, Abschätzung erfolgt über Pollendichte an Oberfläche mal Anzahl Schichten sichtbar am Riss unter 200x;
 $>5.000 \text{ Pollen/Zählfläche} = >103.000 \text{ n/cm}^2$ (812.M.D C5 B076).

4.3.2.2 Zeitlicher Verlauf der Maispollendeposition auf Maisblättern

Die Ergebnisse zum zeitlichen Verlauf der Maispollendeposition auf den Maisblättern sind als Zeitreihen in den folgenden Grafiken dargestellt.

In Abb. 114 finden sich die Ergebnisse für den Standort „Hügel“ am nordöstlichen Maisfeld, das zu den frühblühenden Maisfeldern im Jahr 2010 gehörte. Die *in-situ*-Erfassung der Maispollendeposition auf den Blättern wurde nach Einsetzen der Blüte am 28. Juli aufgenommen und am Standort bis zum 6. August durchgeführt. Mit Witterungsbesserung und einsetzender Hauptblüte am zentralen Versuchsfeld wurden die Messungen am 7. August dorthin verlagert, wodurch die nachfolgend wiederauflebende Blüte am Standort „Hügel“ nicht mehr quantitativ erfasst wurde.

Der geometrische Mittelwert bewegt sich vom 28. Juli bis 31. Juli im Bereich 163 bis 224 Maispollen/cm², nach Regenschauern und Gewittern ist jedoch ein zunächst langsamer, dann stärkerer Rückgang der Maispollenblüte und -deposition am Standort bis auf 34 n/cm² festzustellen. Die Variation der Maispollendeposition wird durch die 95 %- und 5 %-Quantilswerte sowie Minimum und Maximum gekennzeichnet. Die Pollendeposition auf den Blättern variiert von Werten unter der Nachweisgrenze bis 14.112 n/cm² im Maximum, das 95 %-Quantil erreicht Werte bis 4.765 n/cm². Der nahezu parallele Verlauf von Tagesmaxima und 95 %-Quantilswert zum geometrischen Mittel weist eine stetige, hohe Variation der Blattdepositionswerte über die Zeit aus. Der Faktor Tagesmaximum zu Tagesmittelwert liegt im Wertebereich von 27- bis zum 87-fachen des Mittelwertes, für das 95 %-Quantil im Bereich des 14-29-fachen des Mittelwertes.

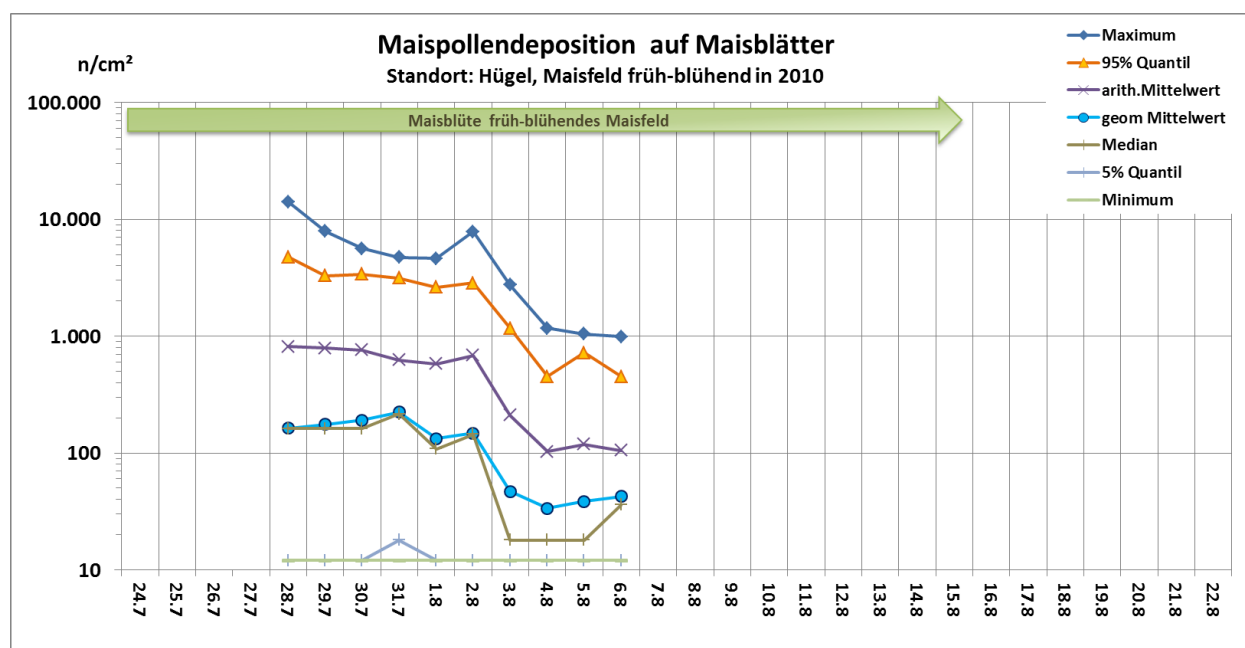


Abb. 114: Variation der Maispollendeposition auf Maisblättern über die Zeit am Standort „Hügel“. N = 945 Messwerte. (Grafik: Hofmann)

In Abb. 115 werden die Ergebnisse für den Standort „Soll“ am selben nordöstlichen Maisfeld dargestellt. Hier wurde die *in-situ*-Erfassung der Maispollendeposition auf den Blättern nach Einsetzen der Blüte am 28. Juli begonnen und bis zum 6. August durchgeführt.

Auch an diesem Standort weisen Maxima und 95 %-Quantilswerte eine hohe Variation und parallele Verläufe zum Tagesmittel aus. Die Verläufe zeigen einen vergleichbaren Einbruch der Blüte und Blattdepositions-werte wie am Standort „Hügel“, allerdings ist hier bereits vom 29. Juli auf den 31. Juli ein leichter Rückgang festzustellen. Der geometrische Mittelwert nimmt hier einen vergleichbaren Wertebereich von 285-29 Maispollen/cm² ein. Die 95 %-Quantilswerte erreichen hierbei Werte bis 3.434 n/cm², die Tagesmaxima bis 7.614 n/cm. Der Faktor Tagesmaximum zu Tagesmittelwert liegt im Wertebereich vom 18- bis zum 39fachen des Mittelwertes, für das 95 %-Quantil im Bereich 14- bis zum 19fachen des Mittelwertes.

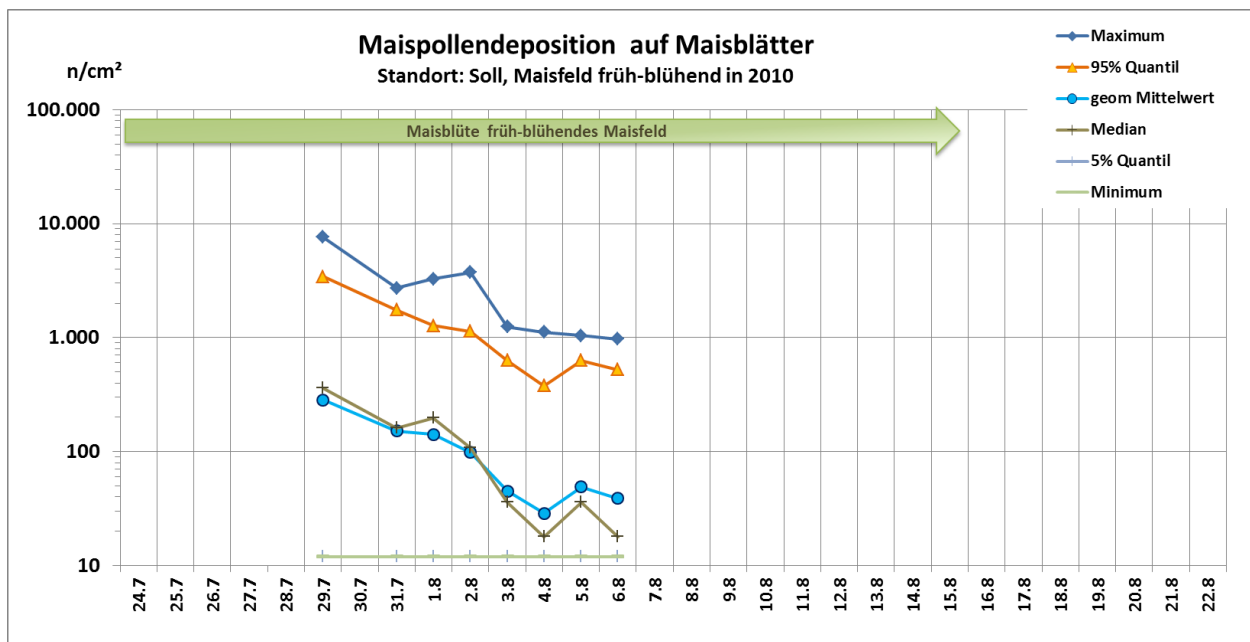


Abb. 115: Variation der Maispollendeposition auf Maisblättern über die Zeit am Standort „Soll“. Auswertung aller Tageswerte am Standort. N= 648 Messwerte. (Grafik: Hofmann)

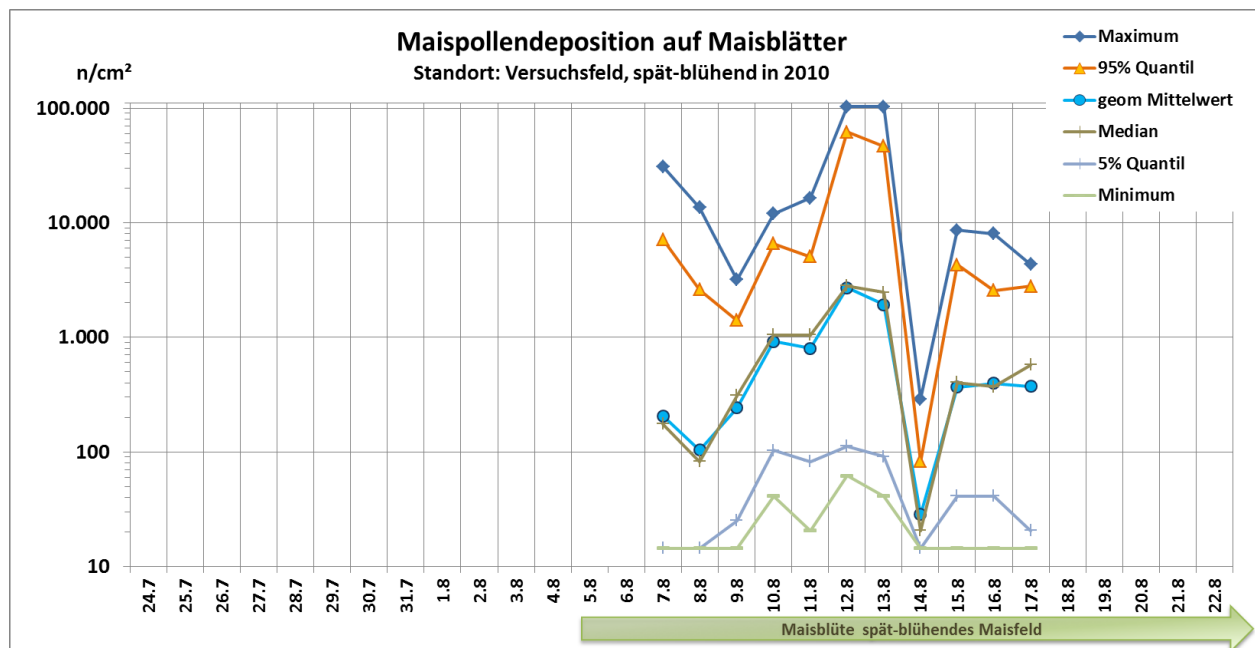


Abb. 116: Variation der Maispollendeposition auf Maisblätter über die Zeit am Standort „Versuchsfeld“. Auswertung aller Tageswerte am Standort. N = 905 Messwerte. (Grafik: Hofmann)

Aus Abb. 116 gehen die Ergebnisse für den Standort „Versuchsfeld“ hervor, das zu den spät-blühenden Maisfeldern in der Region im Jahr 2010 gehörte. Dort konnte die *in-situ*-Erfassung der Maispollendeposition auf den Blättern nach Einsetzen der Blüte im Feld am 7. August aufgenommen und bis zum 17. August durchgeführt werden. Aus den Ergebnissen der kontinuierlichen Pollenkonzentrationsmessungen in der Luft im Maisfeld zeigte sich, dass die Blüte im zentralen Maisversuchsfeld am 5. August einsetzte. Die Hauptblüte verlief im spätblühenden Feld kompakter und erstreckte sich über 2 Wochen bis zum 18. August, die Nachblüte mit geringeren Konzentrationswerten bis über das Messende am 22. August hinaus (siehe Abb. 28 in Kap. 3.3.3).

Die Maispollenblüte trat im August nach Wetterbesserung in ihre Hochphase, die Deposition erreichte ihre höchsten Werte. Auch hier ist ein paralleler Verlauf von Maxima, 95 %-Quantilswerten und Tagesmittelwerten zu erkennen, selbst am markanten Einbruch am 14. August, wo ein heftiges Gewitter mit sehr starken Niederschlägen niederging. Die höchsten Werte waren am 12. und 13. August festzustellen. Die Tagesmittelwerte erreichten an diesen Tagen Werte von 2.710 n/cm² und 1.926 n/cm², die Tagesmaxima Werte >103.000 Maispollen/cm². Der Faktor Tagesmaximum zu Tagesmittelwert nimmt einen Wertebereich vom 10- bis 149-fachen des Mittelwertes ein, für das 95 %-Quantil im Bereich vom 6- bis 66fachen.

4.3.3 Maispollendeposition auf Blättern der Brennnessel

4.3.3.1 Variation der Pollendeposition

Die Maispollendepositionswerte auf den Brennnesselblättern über den gesamten Mess-Zeitraum nahmen einen Wertebereich von unter der Nachweisgrenze bis 13.802 n/cm^2 ein. Der entsprechende geometrische Mittelwert war bei 100 n/cm^2 anzusetzen mit einem 95 %-Konfidenzintervall von 92 bis 108 n/cm^2 , der Median lag bei 95 n/cm^2 . Die Verteilung der Messwerte weist für das 95 %-Quantil einen Wert von 2.158 n/cm^2 aus und für das 98 %-Quantil einen Wert von 4.326 n/cm^2 , auf der anderen Seite liegen die Quantilswerte von 10 % bei 13 n/cm^2 und die Minima unter der NWG. Der 95 %-Vertrauensbereich des Mittelwertes schwankt weniger als 10 % um den Mittelwert, demgegenüber liegt der entsprechende Schwankungsbereich für die Einzelwerte der Blattdepositionen bei einem Faktor von ca. des 40-fachen zum Mittelwert (die obere Grenze des 95 %-Vertrauensbereiches entspricht dem 97,5 %-Quantil, die untere dem 2,5 %-Quantil).

Die folgenden Aufnahmen veranschaulichen die Variation der Maispollendeposition auf Brennnesselblättern:



Abb. 117: Messung der Pollendeposition auf Brennnesselblättern: Standort „Soll“ 28.7.–6.8.2010, ca. 1 m Abstand vom Feldrand, natürlicher Bestand. (Bilder: Haase/Niemann/Schiebel)



Abb. 118: Messung der Pollendeposition auf Brennnesselblättern: Standort „Versuchsfeld“, 7.8.–17.8.2010, im Feld in Bestandslücke. (Bild: Hofmann)



Abb. 119: Nahaufnahme eines Brennnesselblatts am 1.8.2010, Standort „Soll“, mit den zu Beginn der Messreihe (29.7.) markierten Transsekten. Zu erkennen ist die inhomogene Verteilung der Maispollen mit einer Aggregation in der Blattspreite abseits der Mittelrippe. (Bild: Haase/Niemann/Schiebel)

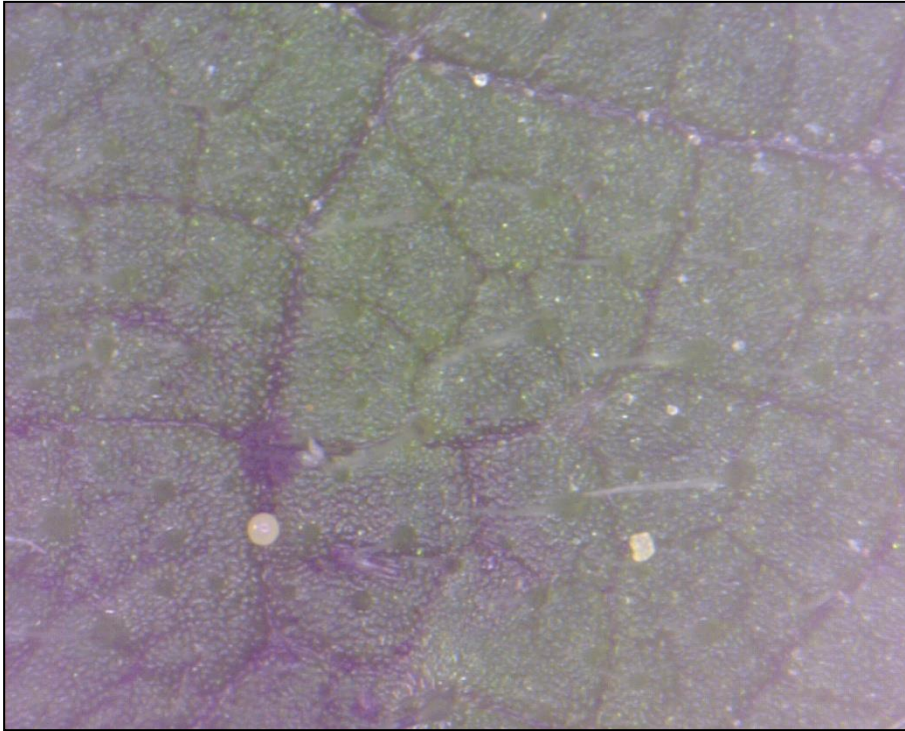


Abb. 120: Brennnesselblatt, 200x, 2 Maispollen/Zählfläche entsprechend 38 Maispollen/cm², 30.7.2010, „Soll“ (B7.C2, 0021).



Abb. 121: Brennnesselblatt, 200x, 180 Maispollen/Zählfläche entsprechend 3.708 Maispollen/cm², 12.8.2010, „Versuchsfeld“ (812.B.D-2 T3, B130).



Abb. 122: Brennnesselblatt, 200x, ca. 670 Maispollen/Zählfläche entsprechend 13.802 Maispollen/cm², 12.8.2010, „Versuchsfeld“ (812.B.D-1 C1, B137).

4.3.3.2 *Zeitlicher Verlauf der Maispollendeposition auf Blättern der Brennnessel*

Aus Abb. 123 gehen die Ergebnisse zum zeitlichen Verlauf der Maispollendeposition auf Brennnesselblättern für den Standort „Soll“ am nordöstlichen Maisfeld hervor. Die mittleren Tageswerte der Maispollendeposition bewegten sich bis zum 2. August auf einem Niveau von 50 bis 70 n/cm². Der witterungsbedingte Rückgang der Pollenschütte mit Gewitterregen führte zu einem Rückgang der Blattdepositionen am 3.8. auf 18 n/cm². Am 4. August erfolgte ein Anstieg auf 35 n/cm² gefolgt von einem Rückgang auf 16 n/cm². Die Kennzahlen zur Variation folgen diesem Verlauf. Die Tagesmaxima liegen im Bereich von 133 bis 4.275 n/cm², die 95 %-Quantile reichen bis 494 n/cm² und die 98 %-Quantile bis 760 n/cm².

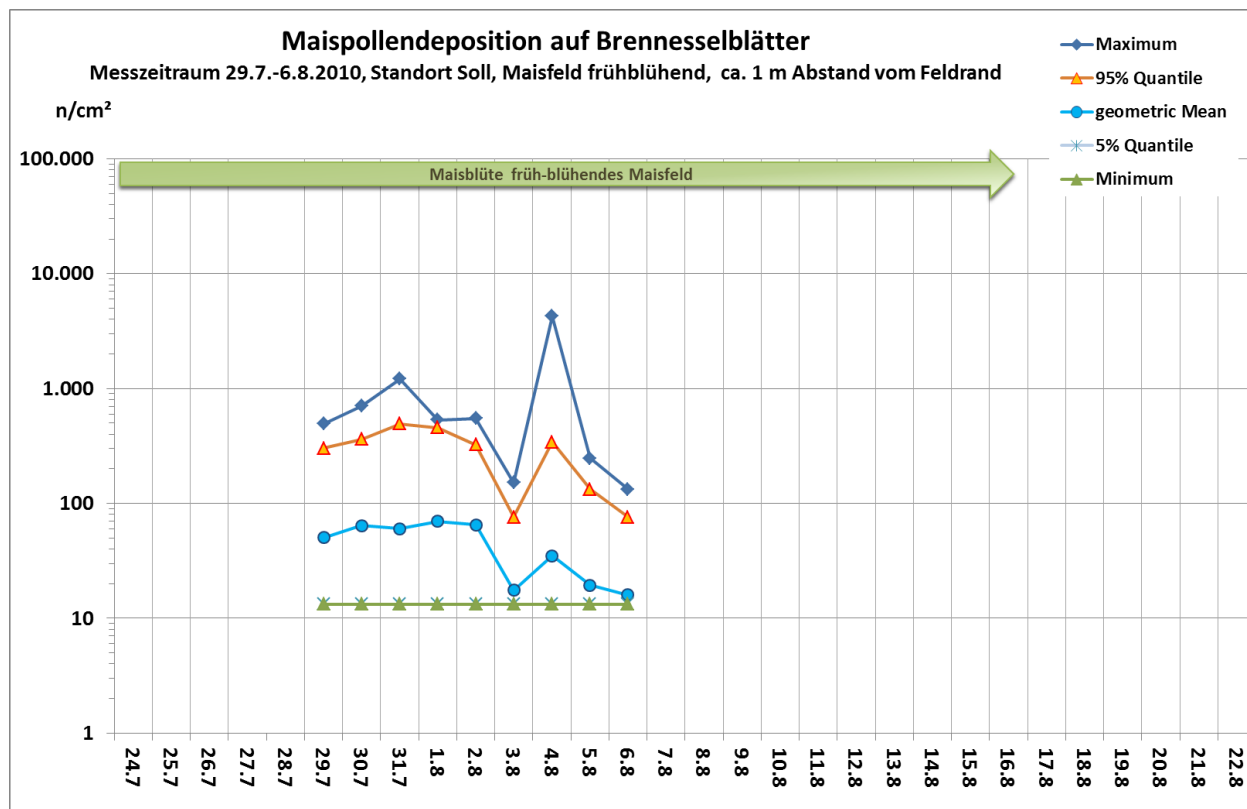


Abb. 123: Variation der Maispollendeposition auf Brennessel-Blättern über die Zeit am Standort „Soll“ in ca. 1 m Entfernung vom Feldrand. Auswertung aller Tageswerte am Standort. N = 810 Messwerte. (Grafik: Hofmann)

Nach Wetterbesserung und Einsetzen der Hauptblüte wurden die Messungen am 7. August an den Standort „Versuchsfeld“ verlegt und bis zum 17. August dort durchgeführt. Abb. 124 enthält die entsprechenden Ergebnisse zur Variation der Maispollendeposition auf den Brennessel-Blättern. Die Maispollendeposition stieg vom 7. August steil an und erreichte die höchsten Werte am 10., 12. und 13. August, gefolgt von einem abrupten Einbruch am 14. August nach schwerem Gewittersturm. Die Werte stiegen unmittelbar danach wieder stark an und verblieben auf hohem Niveau bis Messende am 17. August. Hierbei ist anzumerken, dass es im August nahezu täglich Regenschauer gab. Die Tagesmittelwerte stiegen von 20 n/cm² am 7. August auf 502 n/cm² am 10. August und sie erreichten ihr Maximum am 12. August mit einem Wert von 1.645 n/cm². Nach dem Einbruch am 14. August mit einem Wert von 26 n/cm² bewegten sie sich vom 15. bis 17. August auf einem Niveau von 227 bis 329 n/cm². Auch hier weisen die Verläufe von Maxima, Minima und Quantilswerten eine stetig hohe Variation aus. Die Tagesmaxima nehmen einen Bereich von 82 n/cm² bis 13.802 Maispollen/cm² am 12. August ein - zugleich der höchste gemessene Wert für Brennesseln in der Messreihe. Die 98 %-Quantilswerte umspannen einen Wertebereich von 82 bis 9.100 n/cm², die 95 %-Quantilswerte von 82 bis 7.416 n/cm².

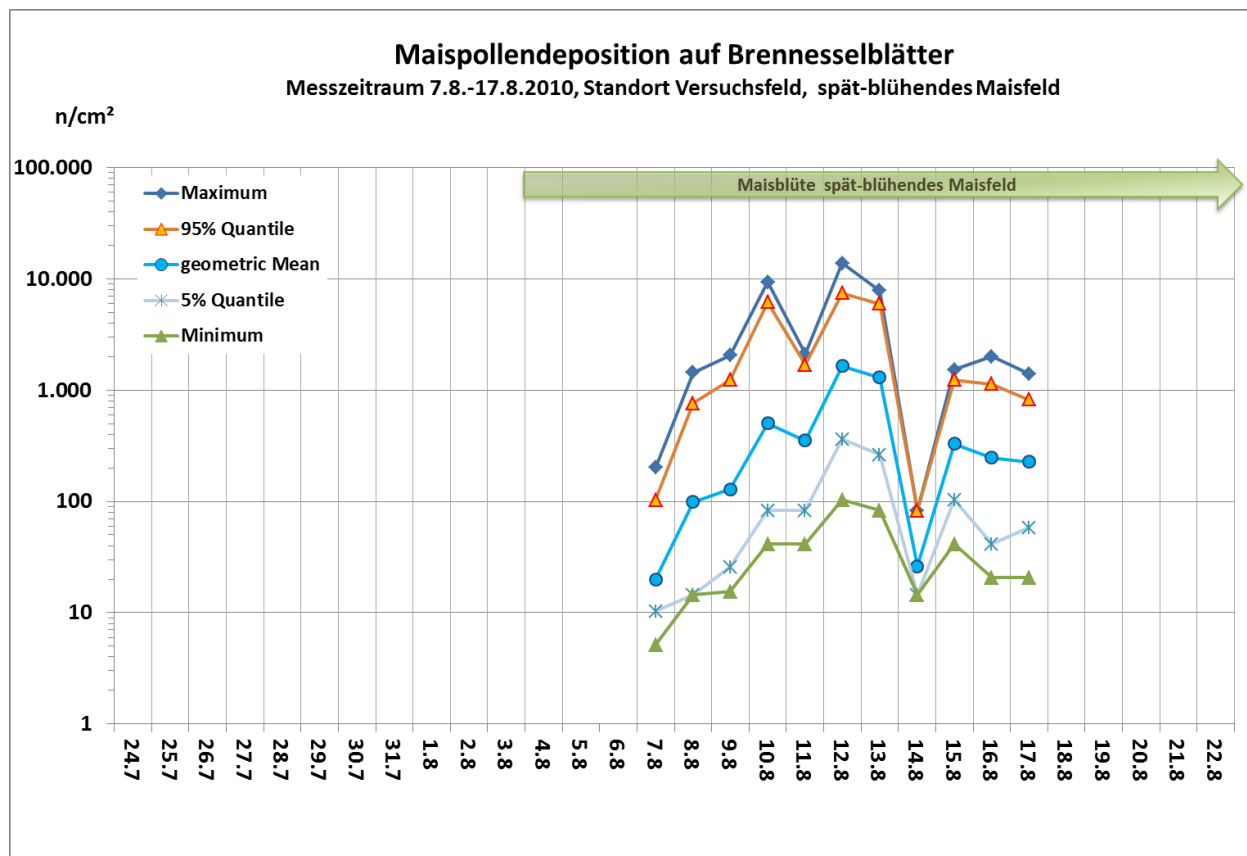


Abb. 124: Variation der Maispollendeposition auf Brennesselblättern über die Zeit am Standort „Soll“ in ca. 1 m Entfernung vom Feldrand. Auswertung aller Tageswerte am Standort. N= 836 Messwerte. (Grafik: Hofmann)

4.3.4 Maispollendeposition auf Gänsefuß-Blättern

4.3.4.1 Variation der Pollendeposition

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung in Tab. 18 weisen für die Maispollendepositionswerte auf den Gänsefuß-Blättern über den gesamten Erhebungszeitraum einen Wertebereich von unter der Nachweisgrenze bis 17.098 Maispollen/cm² auf. Der geometrische Mittelwert liegt bei 374 n/cm² mit einem 95 %-Konfidenzintervall von 330 bis 424 n/cm², der Median liegt bei 412 n/cm². Der Schwankungsbereich der 586 Messwerte, angezeigt über die Quantile, weist für das 95 %-Quantil einen Wert von 4.532 n/cm² aus und für das 98 %-Quantil einen Wert von 5.974 n/cm². Die unteren Quantilswerte von 10 % lagen bei 42 n/cm², die 5 %-Quantilswerte bei 21 n/cm² und das Minimum unter der Nachweisgrenze. Während der 95 %-Vertrauensbereich des Mittelwertes mit einer Abweichung von 13 % um den Mittelwert angegeben werden kann, liegt der entsprechende Schwankungsbereich für die Einzelwerte der Blattdepositionen in etwa bei einem Faktor von 15 und für das Maximum beim 45-fachen des Mittelwertes.

Die folgenden Aufnahmen veranschaulichen die Variation der Maispollendeposition auf Gänsefuß-Blättern:

- Abb. 125 zeigt den Standort. Die Aufnahmen erfolgten im Maisversuchsfeld im Bereich des Bestandsrandes ca. 10 m vom Feldrand, das rechte Teilbild zeigt eine Gänsefußpflanze.
- Abb. 126 die Nahaufnahme eines Gänsefußblattes.
- Abb. 127 bis Abb. 128 enthalten exemplarische Mikroskop-Aufnahmen mit dem DinoLite Pro zur Variation der Messwerte der Pollendeposition.



Abb. 125: Messung der Pollendeposition auf Gänsefußblättern am Standort „Versuchsfeld“, rechts Nahaufnahme Gänsefuß (10.8.2010). Der Messort liegt im Maisfeld ca. 10 m vom Feldrand mit verbreitetem Gänsefußvorkommen. (Bilder: Hofmann)



Abb. 126: Gänsefußblatt in Nahaufnahme, „Versuchsfeld“ (12.8.2010). (Bild: Hofmann)

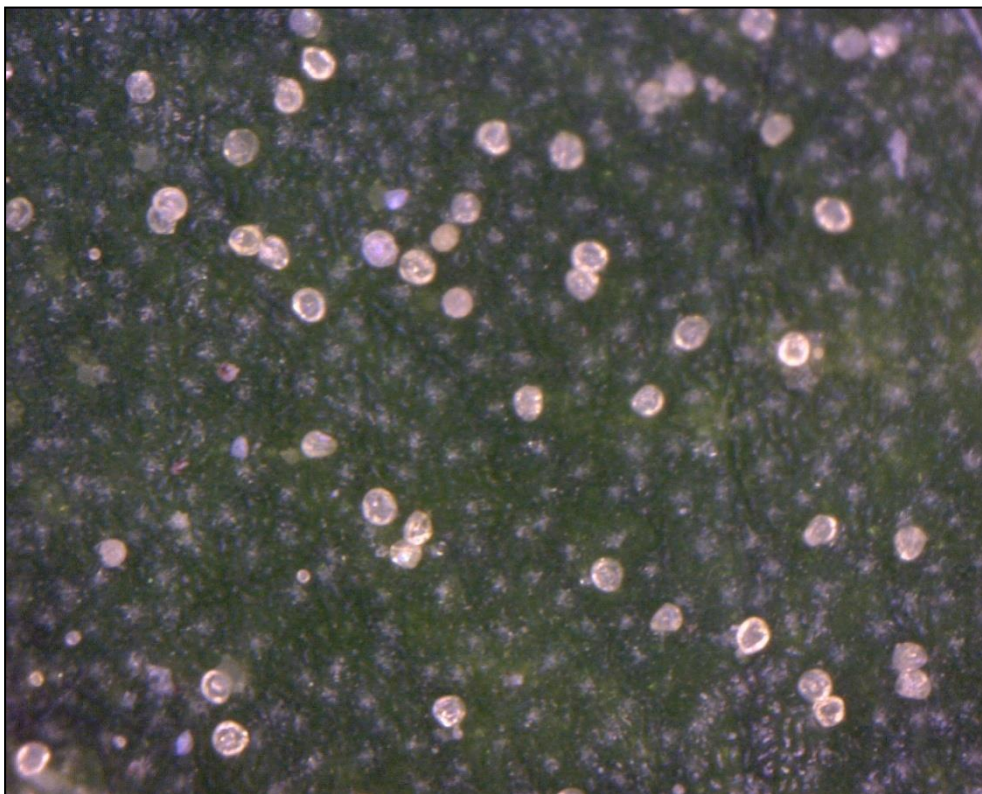


Abb. 127: Gänsefußblatt, 200x, 45 Maispollen/Zählfläche entsprechend 927 Maispollen/cm², 12.8.2010, „Versuchsfeld“ (812.G.D-1 T3, B207).

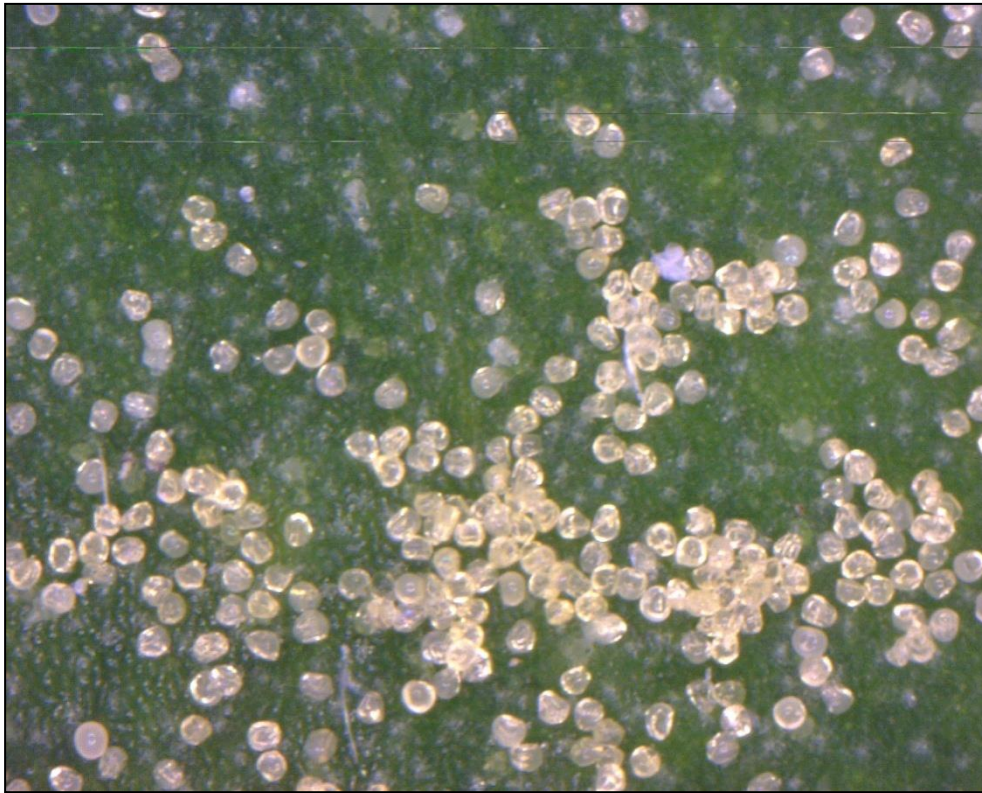


Abb. 128: Gänsefußblatt, 200x, 210 Maispollen/Zählfläche entsprechend 4.326 Maispollen/cm², 13.8.2010, „Versuchsfeld“ (813.G.D-1 T1, 0145).

4.3.4.2 Zeitlicher Verlauf der Maispollendeposition auf Gänsefuß-Blättern

Abb. 129 illustriert die Ergebnisse zur Maispollendeposition auf Gänsefußblättern am Standort „Versuchsfeld“, das zu den spätblühenden Maisfeldern in der Region gehörte. Für Gänsefuß wurde die *in-situ*-Erfassung der Maispollendeposition auf den Blättern vom 10. bis zum 17. August vorgenommen. Aus den Ergebnissen der kontinuierlichen Pollenkonzentrationsmessungen in der Luft im Maisfeld zeigte sich, dass die Blüte im zentralen Maisversuchsfeld am 5. August einsetzte. Die Hauptblüte verlief im spätblühenden Feld kompakter und erstreckte sich über 2 Wochen bis 18. August, die Nachblüte mit geringeren Konzentrationswerten bis über das Messende am 22. August hinaus (siehe Abb. 28, Kap. 3.3.3).

Die Maispollendepositionswerte auf Gänsefuß-Blättern weisen einen parallelen Verlauf von Maxima, Tagesmittel und den beiden Quantilswerten auf. Die höchsten Werte traten am 12. August auf. Das Wetter des 14. August mit einem heftigen Gewittersturm und sehr starken Niederschlägen spiegelt sich in einem Rückgang der Blattdeposition wider. Die Tagesmittelwerte beginnen am 10. August mit 245 n/cm² und steigen an bis auf 1.406 n/cm² am 12. August, danach gehen sie bis auf 80 n/cm² zurück. Die Tagesmaxima starten mit 4.965 n/cm², kulminieren bei 17.098 n/cm² am 12. August und pendeln sich nach dem Gewitter am 14. August auf einem Niveau um 1.000 n/cm² ein. Der Faktor Tagesmaximum zu

Tagesmittelwert nimmt einen Wertebereich vom 3- bis 20-fachen des Mittelwertes ein, für das 95 %-Quantil im Bereich des 2- bis 16-fachen.

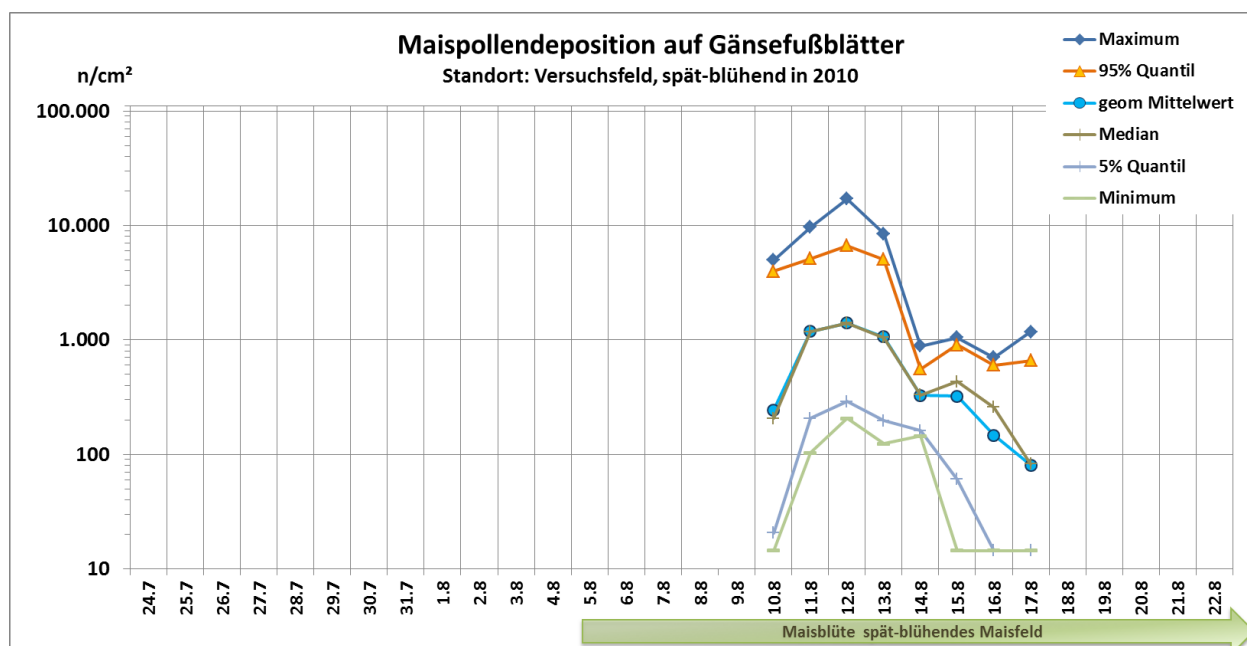


Abb. 129: Variation der Maispollendeposition auf Gänsefußblättern über die Zeit im Versuchsfeld am Bestandsrand. N = 586 Messwerte. (Grafik: Hofmann)

4.3.5 Maispollendeposition auf Blättern von Ampfer und Brombeere

4.3.5.1 Variation der Pollendeposition

Die Maispollendeposition auf Blättern von Ampfer und Brombeere wurde ergänzend und abwechselnd an einigen Tagen im ersten Messzeitraum erhoben. Ampfer wurde an 3 Mess-tagen am Standort „Soll“ (29.7., 31.7., 4.8.) erfasst, Brombeere an 4 Messtagen am Standort „Hügel“ (1.8., 2.8., 4.8., 6.8.). Die statistischen Kennzahlen zu den Ergebnissen der Mais-pollendepositionsmessungen in Tab. 18 weisen für Ampfer bei 324 Messwerten einen Wertebereich von unter der Nachweisgrenze bis $2.356 \text{ Pollen}/cm^2$ aus, für Brombeere bei ebenfalls 324 Messwerten einen Wertebereich bis $874 \text{ n}/cm^2$. Die entsprechenden geomet-rischen Mittelwerte lagen bei $53 \text{ Maispollen}/cm^2$ für Ampfer und bei $66 \text{ n}/cm^2$ für Brom-beere. Der Schwankungsbereich der Messwerte weist bei Ampfer für das 95 %-Quantil ei-nen Wert von $589 \text{ Maispollen}/cm^2$ aus und bei Brombeere $472 \text{ Maispollen}/cm^2$, für das 98 %-Quantil bei Ampfer einen Wert von $1.011 \text{ Maispollen}/cm^2$ und bei Brombeere $589 \text{ n}/cm^2$. Der Faktor Maximum zu Mittelwert beträgt bei Ampfer das 45-fache des Mit-telwertes und bei Brombeere das 13-fache.

Die folgenden Aufnahmen veranschaulichen die Ergebnisse zur Maispollendeposition auf den Ampfer- und Brombeerblättern:

- Die Maispollendeposition auf Ampferblättern wurde am Standort „Soll“ in ca. 1 m Abstand vom Maisfeldrand erfasst (Abb. 130), Abb. 131 zeigt ein Ampferblatt in Nahaufnahme.
- Für Brombeere wurde die Beprobung am Standort „Hügel“ ebenfalls in ca. 1 m Abstand vorgenommen (Abb. 103), Abb. 132 zeigt eine Nahaufnahme eines Brombeer-Blattes.
- In beiden Fällen („Soll“, „Hügel“) handelt es sich um natürliche Bestände.
- Die in Abb. 133 bis Abb. 135 dargestellten Mikroskop-Aufnahmen mit dem DinoLite Pro veranschaulichen die Variation der Messwerte zur Pollendeposition auf den Ampfer und Brombeer-Blättern.

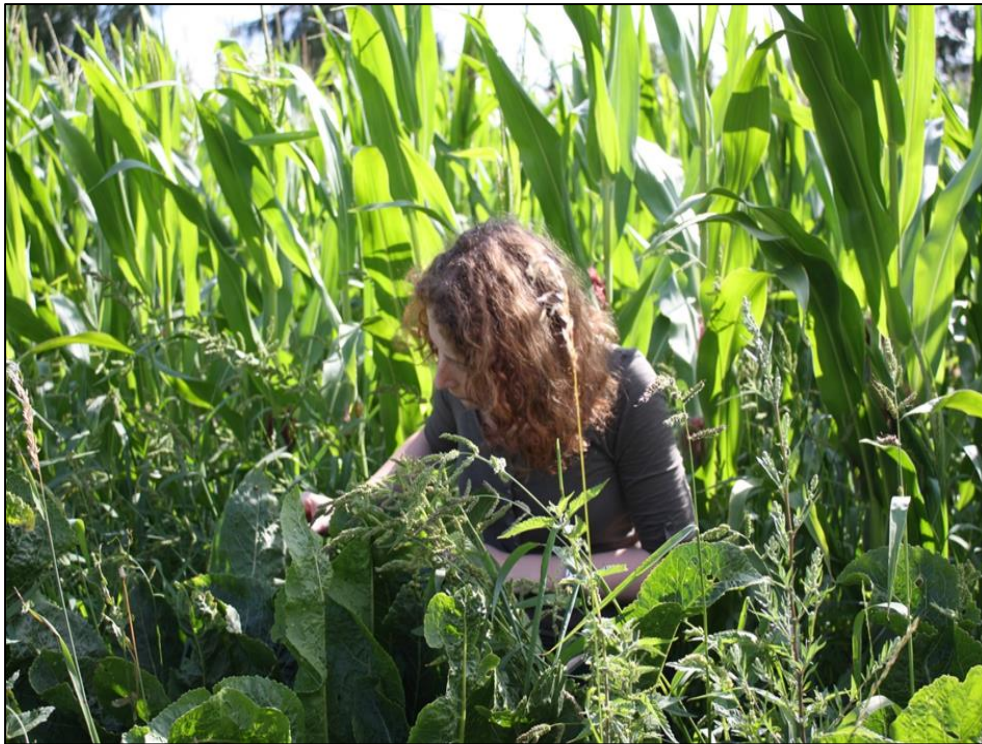


Abb. 130: Messung der Pollendeposition auf Ampferblättern am Standort „Soll“, natürlicher Bestand, Erfassung am 29.7., 31.7. und 4.8. in ca. 1 m Abstand vom Feldrand. (Bild: Haase/Niemann/Schiebel)



Abb. 131: Ampferblatt am Standort „Soll“ in Nahaufnahme. (Bild: Haase/Niemann/Schiebel)



Abb. 132: Brombeerblatt am Standort „Hügel“ in Nahaufnahme (2.8.2010). (Bild: Haase/Niemann/Schiebel)



Abb. 133: Ampferblatt, 200x, 78 Maispollen/Zählfläche entsprechend 1.482 Maispollen/cm², 29.7.2010, „Soll“ (A2L.C1, 0017).



Abb. 134: Brombeerblatt, 200x, 11 Maispollen/Zählfläche, 209 Maispollen/cm² entsprechend, 2.8.2010, „Hügel“ (R5.T1, 0001).

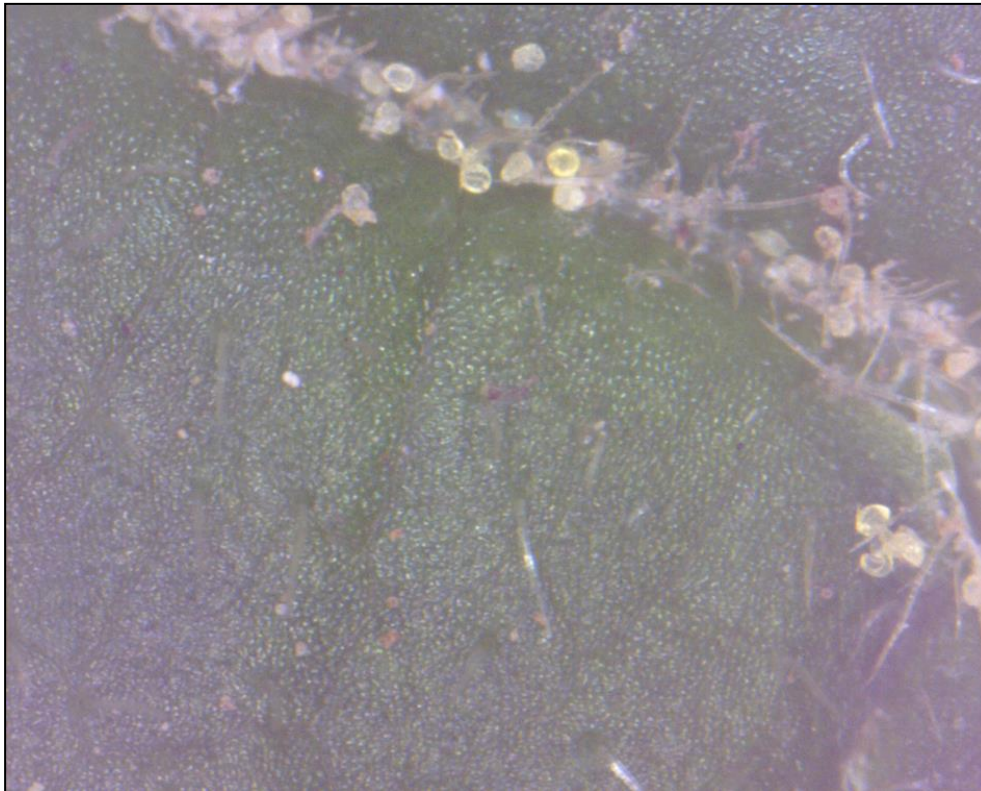


Abb. 135: Brombeerblatt, 200x, 36 Maispollen/Zählfläche, 701 Maispollen/cm² entsprechend, 1.8.2010, „Hügel“ (R2.C1, 0020).

4.3.5.2 Zeitlicher Verlauf der Maispollendeposition auf Blättern von Ampfer und Brombeere

Die Ergebnisse zur Variation der Maispollendeposition über die Zeit gehen aus Abb. 136 für Ampferblätter und aus Abb. 137 für Brombeerblätter hervor. Die Messungen fanden in der ersten Blühphase des frühblühenden nordöstlichen Maisfeldes statt. Auch für Ampfer und Brombeere wird eine hohe Streuung der Messwerte festgestellt. Sie zeigt sich im parallelen Verlauf von Maxima und Quantilswerten zu den Tagesmitteln, wobei die Streuung bei Ampfer höher ausfällt als bei Brombeere. Beide weisen im Vergleich zu Mais und Brennnessel die höchsten Werte im Zeitraum 29. Juli bis 2. August auf und einen Rückgang der Blattdeposition im Zeitraum bis 5. August. Die vermehrte Pollenschüttung spiegelt sich in einem Anstieg der Blattdepositionswerte bei der am 6. August beprobten Brombeere wieder.

Die Maispollendeposition bei Ampfer erreichte hierbei für die Tagesmaxima Werte bis zu 2.356 n/cm², für die 95 %-Quantilswerte bis zu 1.108 n/cm² und für die Tagesmittel bis zu 246 n/cm². Die Messwerte als Verhältnis Tagesmaximum zu Tagesmittel schwanken vom 30-fachen bis zum 50-fachen des Mittelwertes.

Bei Brombeere erreichte die Maispollendeposition für die Tagesmaxima Werte bis zu 874 n/cm², für die 95 %-Quantilswerte bis zu 589 n/cm² und für die Tagesmittel bis zu

137 n/cm². Die Messwerte als Verhältnis Tagesmaximum zu Tagesmittel schwanken vom 6- bis 9-fachen des Mittelwertes.

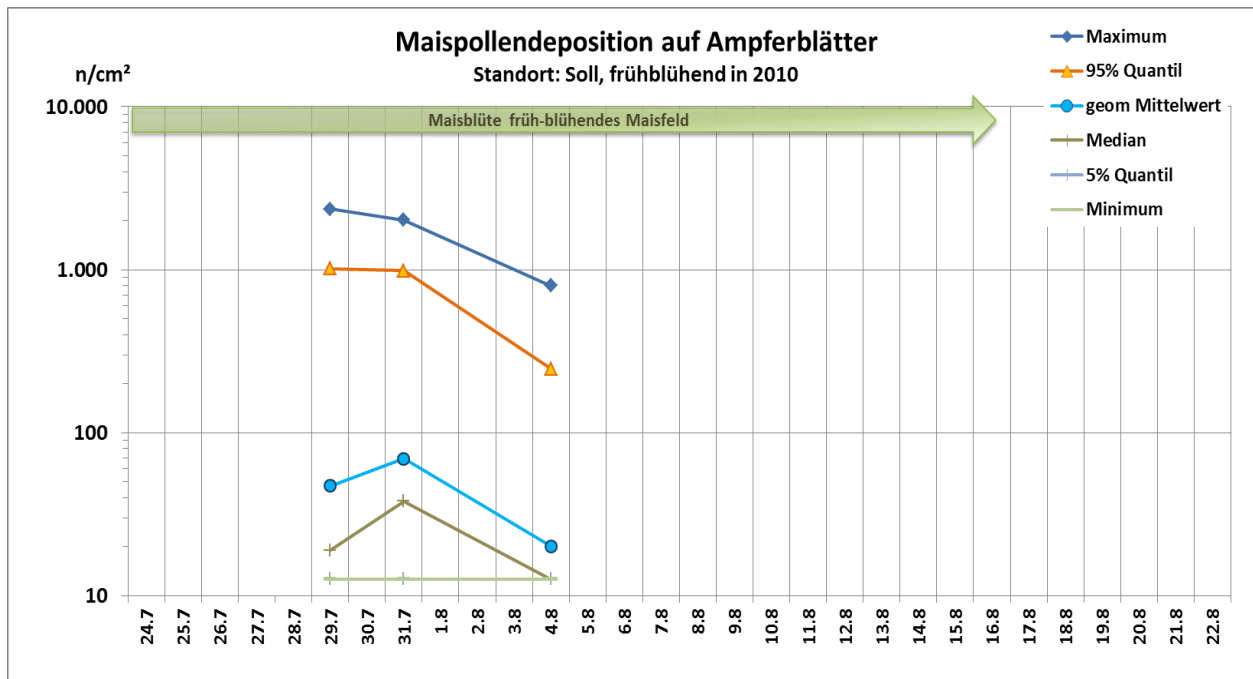


Abb. 136: Variation der Maispollendeposition auf Ampferblättern über die Messtage hinweg. Die Erfassung erfolgte am Standort „Soll“ am 29. Juli vor- und nachmittags sowie am 31. Juli und 4. August. N = 324 Messwerte. (Grafik: Hofmann)

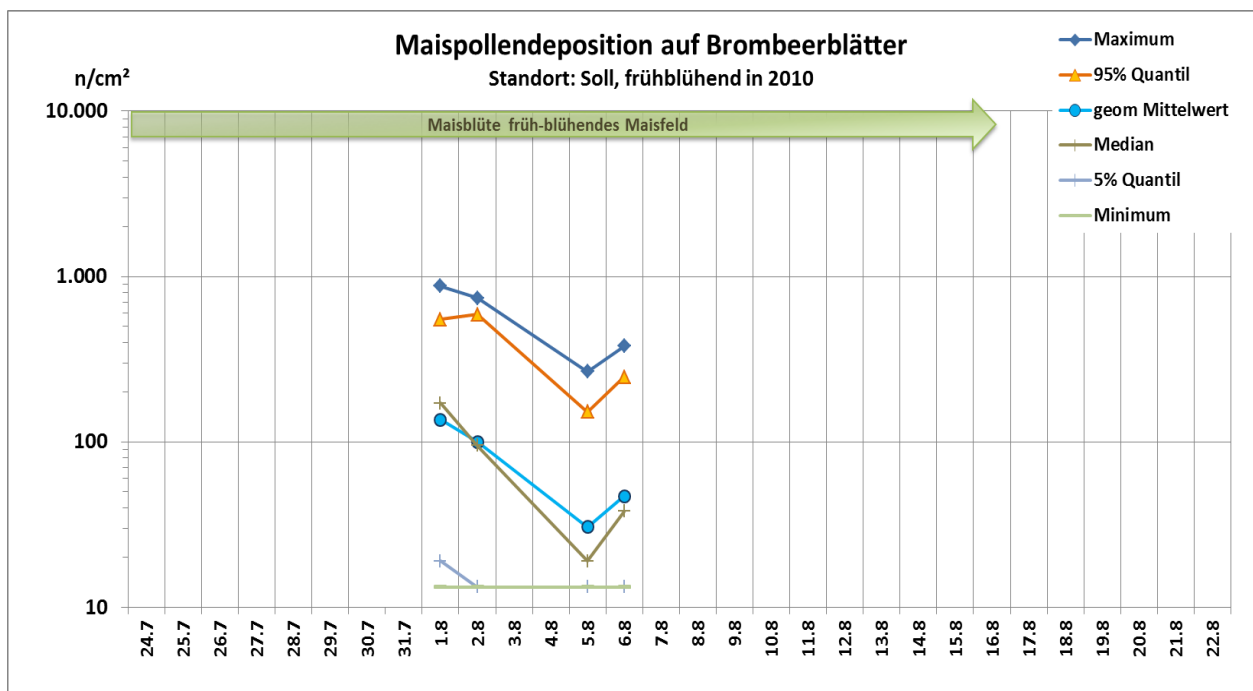


Abb. 137: Variation der Maispollendeposition auf Brombeerblättern über die Messtage. Die Erfassung erfolgte am Standort „Hügel“ am 1.8., 2.8., 5.8. und 6.8.. N = 324 Messwerte. (Grafik: Hofmann)

4.3.6 Vergleich der Maispollendeposition auf verschiedenen Pflanzenarten: Art-spezifische Äquivalenzfaktoren

Für einen Vergleich der Maispollendeposition auf verschiedenen Pflanzenarten werden die zeitlichen Verläufe in einer Grafik dargestellt. Zum Ausgleich unterschiedlicher Messabstände vom Feldrand wurden zunächst die Messdaten auf einen Abstand von 0,2 m (quellnah) standardisiert. Eine Anpassung war bei den Messungen an Ampfer und Brennnessel vom Standort „Soll“ (29. Juli bis 6. August) erforderlich, die in ca. 1 m Abstand erfolgten. Hierzu wurde ein Faktor von 2,56 gemäß der Abstandsfunktion aus der standardisierten Erfassung der Maispollendeposition mit dem PMF angelegt (Regressionsgleichung siehe Abb. 14, Kap. 3.2.3, sowie HOFMANN 2007 UND HOFMANN ET AL. 2012).

Aus Abb. 138 gehen die zeitlichen Verläufe der Maispollendeposition für die Tagesmittelwerte hervor und aus Abb. 139 entsprechend diejenigen für die 95 %-Quantilswerte. In beiden Abbildungen sind deutliche Ähnlichkeiten für den zeitlichen Verlauf der Blattdepositionen bei den verschiedenen Pflanzenarten zu erkennen, wenngleich bei einzelnen Tageswerten auch Abweichungen festzustellen sind. In der ersten Blühphase bis zum 5. August weisen die Tagesmittelwerte der Maispollendeposition auf Blättern von Mais, Brennnessel und Ampfer eine vergleichbare Entwicklung auf vergleichbarem Niveau auf, die Brombeere weist ebenfalls einen vergleichbaren Trend auf, allerdings auf höherem Niveau. Dieser Unterschied egalisiert sich etwas bei den 95 %-Quantilswerten. Im oberen Messwerte-bereich liegen die Werte näher beieinander. Dies ändert sich nach Wetterbesserung und intensiverer Pollenschüttung ab dem 6. August, wie die Beobachtungen im zentralen Versuchsfeld während der Hauptblüte zeigen. Die Pollenschütte im Versuchsfeld, das zu den spätblühenden in der Region gehört, beginnt erst zu diesem Zeitpunkt und verläuft dann intensiver als in der ersten Phase der Frühblüher, für die jetzt die 2. Blühphase einsetzte. Sämtliche Maisfelder in der Region, deren Blühbeginn vorher asynchron war, traten nun in die Hauptblüte ein. Auch in dieser Phase weist die Blattdeposition für die verschiedenen Pflanzenarten vergleichbare Trends auf, allerdings treten auch deutlichere Abweichungen bei einzelnen Tageswerten auf. Bei allen drei Spezies ist der Anstieg im Zeitraum 5. August bis 13. August mit einer Kulmination um den 11. bis 12. August zu erkennen. Die Tages-Mittelwerte erreichen hier Werte deutlich über 1.000 n/cm^2 , die 95 %-Quantilswerte einen Wertebereich von 6.674 n/cm^2 (Gänsefuß), 7.416 n/cm^2 (Brennnessel) und bis 61.800 n/cm^2 bei Mais.

Wegen eines starken Gewitters sackten die Werte am 14. August rasch ab, um anschließend schnell wieder anzusteigen. Unterschiede zeigten sich bei Tages-Mittelwerten, mal weist Mais, mal Brennnessel und mal Gänsefuß die höheren Werte auf. Anzumerken ist, dass in der Periode nach dem 6. August nahezu täglich Sommerschauer und Wärmegewitter mit unterschiedlich starker Ausprägung auftraten, allerdings auch rasche Abtrocknung durch

kräftige Winde und Sonne mit nachfolgender, wieder einsetzender Pollenschüttung. Wind und Regen führte zu Verlagerungen der Pollen, sowohl auf dem Blatt mit Zunahme der Dichteviation und Agglomerationen, als auch zu Abtrag und Verlagerung auf weiter unten liegende Blätter. Dies könnte eine Erklärung für die deutlich höheren Blattdepositionen am 8. August und 10. August bei der Brennessel sein, die mit ca. 30 bis 50 cm Wuchshöhe vor Wind geschützt, im unteren Bereich des Maisbestands stand, dessen Bestandshöhe bereits 1,8 bis 2,1 m erreichte.

Wenngleich bei einzelnen Tageswerten mit Abweichungen zu rechnen ist, so liessen sich insgesamt deutliche Bezüge in der Pollendeposition zwischen den Pflanzenarten erkennen. Nimmt man Mais als Referenz, so ergaben sich für Brennessel ein mittlerer Äquivalenzfaktor von 0,4, für Gänsefuß 0,6, für Ampfer 0,6 und für Brombeere 2,7, die mittleren Verläufe betreffend (geom. Mittelwerte).

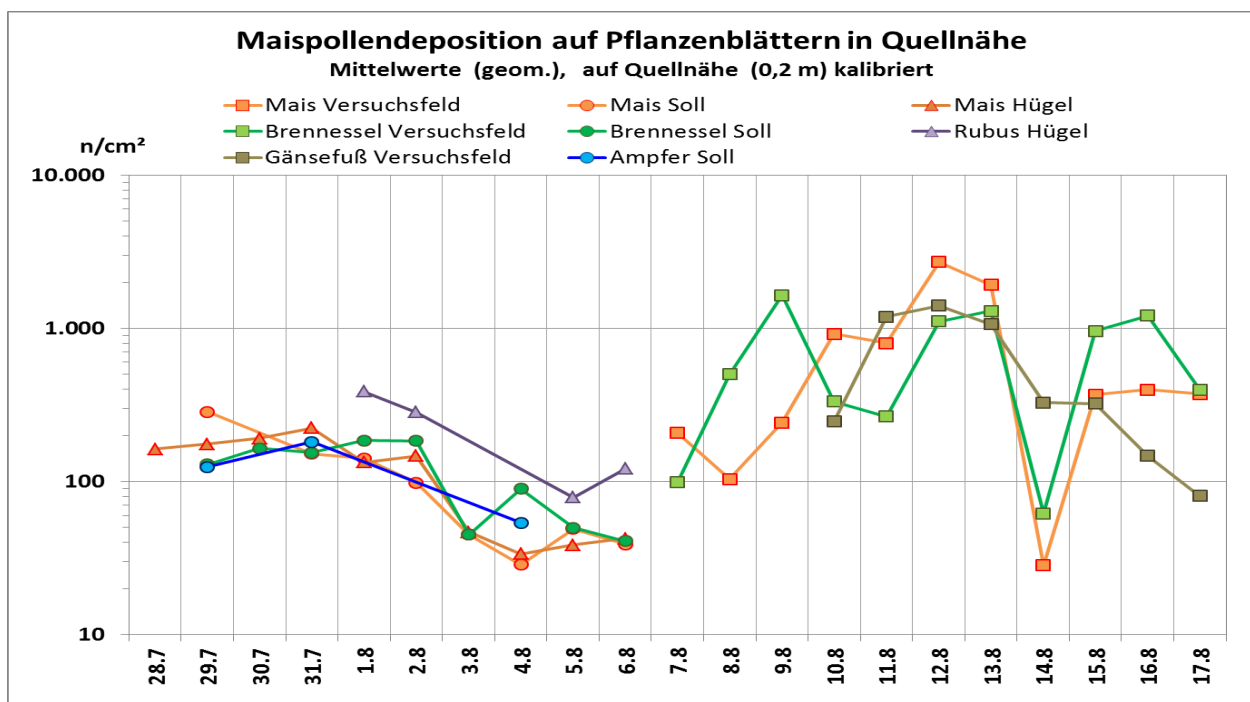


Abb. 138: Vergleichende Darstellung zum Verlauf der Maispollendeposition über die Zeit für die verschiedenen Pflanzenarten bezogen auf Quellnähe (0,2 m). (Grafik: Hofmann)

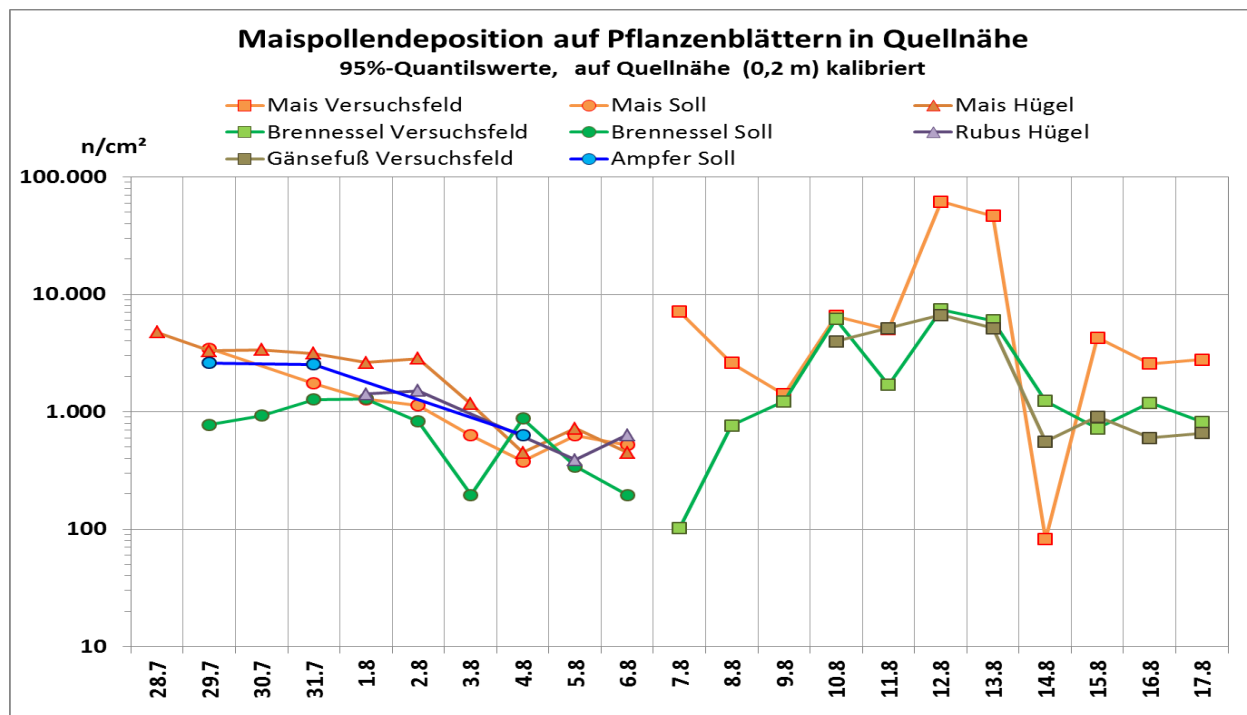


Abb. 139: Vergleichende Darstellung zum Verlauf der Maispollendeposition über die Zeit für die verschiedenen Pflanzenarten bezogen auf Quellnähe (0,2 m) und Berücksichtigung von Äquivalenzfaktoren (Bezug Mais=1; Brennessel 0,4; Ampfer 0,6; Brombeere 2,7). (Grafik: Hofmann)

4.4 Zusammenfassende Bewertung der Blattdepositionsmessungen

In dieser Untersuchung wurde die Pollendeposition auf den Blättern von Mais und von ausgewählten Futterpflanzen bestimmter Schmetterlingsarten erfasst. Insgesamt wurden 5.378 Maispollendepositionswerte auf den Blättern ermittelt. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen für Mais, Brennessel, Ampfer, Brombeere und Gänsefuß detailliert, wie sich die Pollendepositionswerte über die Blühperiode verändern.

Mit den Beispielarten wurden bei den Erhebungen der Pollendeposition unterschiedliche Blattmorphologien als Akzeptor-Eigenschaften berücksichtigt, wobei sich charakteristische Bezüge zwischen den Arten ergaben. Diese Bezüge können in einer Näherung über Äquivalenzfaktoren im Mittel ausgedrückt werden. Die Intensität der Pollendeposition auf Futterpflanzen von Schmetterlingen folgte dabei dem Blütenverlauf des Mais. Im Vergleich zu den täglichen Immissionsraten der Pollen bilden die gemessenen Daten zur Pollendeposition auf Blättern eine über die Zeit akkumulierte Belastung ab, in der Einträge und Austräge über die Zeit bilanziert werden. Wind, Regen und Blattbewegungen bestimmen maßgeblich die Verlagerungsprozesse von Pollen auf den Blättern. Hierbei kann es auch zu Austrägen kommen. Die Verlagerungsprozesse führen zu einer stark inhomogenen Verteilung der Pollendeposition auf den Blattoberflächen und zu lokal deutlich höheren Pollendichten als sich aus einem über die gesamte Blattfläche gemittelten Wert abschätzen ließe. Dieser Aspekt wurde bislang in der Expositionsabschätzung und Risikobewertung zu wenig beachtet.

Mit den Untersuchungen im Jahr 2010 wurde erstmalig die Variation der Maispollendeposition auf Blattoberflächen über die Blühperiode des Mais *in situ* differenziert beobachtet. Der Großteil der Literaturdaten beschränkte sich bisher auf die Erhebung und Darstellung von Mittelwerten der Deposition über die gesamte Blattfläche (vgl. Zusammenfassung MÜSCHE ET AL. 2009). Die unterschiedlich dichte Verteilung der Pollen auf den Blattoberflächen bedingt jedoch eine entsprechend unterschiedliche Exposition von NZO. Dies bedeutet, dass Teile der Population von Schmetterlingsraupen (als Beispiel für NZO) höheren und auch niedrigeren Dosen ausgesetzt ist als im Mittel über das Blatt anzunehmen ist. Bei linearen Dosis-Wirkungs-Zusammenhängen würden sich die Unterschiede in der Belastung bei den Wirkungen im Mittel ausgleichen. Dosis-Wirkungs-Beziehungen sind jedoch vielmehr als nicht-linear mit in der Regel sigmoidem Verlauf anzunehmen, d.h. mit zunehmender Variation der Exposition werden Teile der Population höheren Belastungen ausgesetzt, die zu überproportionalen Wirkungen führen, die sich im Mittel nicht mehr ausgleichen (PERRY ET AL. 2010). Daher ist die Kenntnis über die Variation der Pollendeposition auf den Blattoberflächen von erheblicher Bedeutung für die Risikoabschätzung, da bei einer alleinigen Betrachtung von Mittelwerten die Gefahr einer systematischen Unterschätzung von Risiken besteht. Die hier dargestellten Ergebnisse belegen eine hohe Variabilität der Pollendeposition auf den Blattoberflächen der Pflanzen. Sie weisen damit auf die Bedeutung und Notwendigkeit von in-situ Messungen mit entsprechend hoher Auflösung im Bereich von wenigen Quadratmillimetern hin, da dies in der Größenordnung des Fraßes kleiner, in der Regel empfindlicheren Larvalstadien liegt. Die Erfassung von Mittelwerten im Quadratzentimeterbereich oder gar nur von Blattmittelwerten reicht für eine adequate Risikoanalyse nicht aus.

Die Messung von *in-situ*-Daten zur Blattdeposition sind die unmittelbarste Art und Weise, die Belastung von Futterpflanzen mit *Bt*-Pollen abzuschätzen. Der hohe Aufwand der Untersuchungen und die hohe Variabilität der Pollenschütte, die maßgeblich von den Witterungsbedingungen des Versuchsjahrs, pflanzenbaulichen Maßnahmen und der verwendeten Sorte abhängt, zeigen jedoch die Grenzen von Blattdepositionsmessungen im Freiland auf. Für repräsentative Aussagen sind umfangreiche Erhebungen erforderlich, die über den gesamten Blühzeitraum durchzuführen und dabei die spezifischen Unterschiede der verschiedenen Pflanzenarten zu berücksichtigen sind. Derartige Erhebungen sind zudem nur innerhalb und im unmittelbaren Nahbereich von Pollenquellen sinnvoll, da der Erhebungsaufwand von der Höhe der Depositionswerte abhängt und auf Grund mit der Entfernung vom Feld abnehmender Werte überproportional zunimmt.

Für die Erfassung der räumlichen Verteilung der Pollendeposition in der Landschaft und für Vergleiche der Pollendeposition von Standort zu Standort sind daher, wie bei anderen Immissionsparametern auch, für diesen Zweck standardisierte Verfahren - wie das nach

VDI-Richtlinie 4330-3 standardisierte Verfahren der technischen Pollensammlung mit dem PMF - erforderlich, die eine Erhebung vergleichbarer Daten ermöglichen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigten für die unterschiedlichen Pflanzenarten charakteristische Bezüge der Blattdepositionsdaten, die im Mittel über Äquivalenzfaktoren ausgedrückt werden können. Dies erlaubt Bezüge der Akzeptor-spezifischen, sprich Pflanzenart-spezifischen Blattdeposition zur standörtlichen Maispollendeposition, die mittels standardisiertem Verfahren des PMF erhoben wird.

5. Exposition von Gewässerökosystemen durch den Maisanbau mit Pollen und Streu

5.1 Anlass und Zielstellung

Eine mögliche Exposition und damit Wirkung auf Nicht-Ziel-Organismen (NZO) in Gewässerökosystemen wurde in der Risikoanalyse von GVO allgemein und speziell für *Bt*-Mais über lange Zeit negiert (MONSANTO 2007). Allerdings wurde eine solche Risikoanalyse bereits frühzeitig gefordert, als die Verfahren für ein Umweltmonitoring von GVO entwickelt wurden (VDI 4330-1 2006). Neuere Untersuchungen weisen darauf hin, dass nicht nur terrestrische, sondern auch Gewässerökosysteme durch *Bt*-Maisanbau über Pollen, Streu und Wurzelausscheidungen exponiert werden (ROSI-MARSHALL ET AL. 2007, TANK ET AL. 2010a, JENSEN ET AL. 2010), dass das *Bt*-Toxin lang anhaltend in den Gewässern bis ins Frühjahr hinein nachweisbar ist und dass in den Gewässern empfindliche Organismen wie z.B. Köcherfliegenlarven (ROSI-MARSHALL ET AL. 2007) und Daphnien (BØHN ET AL. 2008 UND 2010) vorkommen, die auf das *Bt*-Toxin empfindlich reagieren, so dass mögliche Schäden nicht auszuschliessen sind. Zudem wurde gezeigt, dass transgene DNA von *Bt*-MON810 in Muscheln in Freilandgewässern angereichert und vervielfältigt wird (DOUVILLE ET AL. 2007).

Zu Exposition und Wirkung von *Bt*-Mais auf einzelne Wasserorganismen und aquatische Systeme lagen bisher keine Daten für Deutschland vor. Gerade Gewässerökosysteme repräsentieren besonders hochwertige und häufig vorkommende Lebensräume, zu deren Schutz derzeit europaweit erhebliche Anstrengungen nach der EU-Wasserrahmen-Richtlinie (WRRL) unternommen werden. Ziel dieses Vorhabens war es, das Thema aufzugreifen und erste Untersuchungen in Deutschland auf der Ebene der Exposition vorzunehmen.

Hierzu wurden im Vorhaben die möglichen Expositionspfade beschrieben und der Eintrag über den Luftpfad näher untersucht. Während der Polleneintrag über das standardisierte Verfahren des PMF (Pollenmassenfilter) erfasst werden konnte, bedurfte es der Entwicklung geeigneter Messmethoden, um den Streueintrag zu evaluieren. Im Jahr 2009 wurden erste Freilandversuche hierzu durchgeführt und Streueinträge aus der Maisernte (Häcksel) charakterisiert. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurde die Streufalle verbessert. Im Jahr 2010 folgten weiterführende Untersuchungen zum Eintrag von Pollen und Streu, welche zum Ziel hatten, für die Streu nach Partikelgröße differenzierte, entfernungsabhängige Gradienten zu entwickeln, aus denen sich Mindestabstände zur Minderung der Exposition ableiten lassen, wie dies bereits zuvor für den Pollenflug erfolgt war.

5.2 Exposition von Gewässerökosystemen

Die Exposition von Gewässerökosystemen durch Eintrag von Pollen und Streu aus dem *Bt*-Maisanbau sind in Abb. 140 und Abb. 141 skizziert. Die Exposition lässt sich in vier Aspekte differenzieren:

1. Pollenflug: Pollen werden im Sommer während der Maisblüte über den Wind verfrachtet und gelangen so in Gewässer aller Art. Der Pollenflug erstreckt sich über den Zeitraum der Maisblüte, in Deutschland in der Regel je nach Region und Anbau über 4 bis 8 Wochen (Juli bis August in Brandenburg, s. Kap. 3).

2. Streueintrag: In Brandenburg wird Mais überwiegend als Häcksel⁵¹ für Biogasanlagen und als Viehfutter (Silage) geerntet, Körnermais⁵² kommt nur in geringem Umfang vor. Beim Häckseln erfolgt ein Streueintrag in Gewässer über den Wind unmittelbar während der Ernte sowie über Verfrachtung von auf dem Boden abgelagerten Streupartikeln durch den Regen und durch Einschwemmung in die Gewässer (Erosion). Während der Streueintrag über den Wind sich auf die Erntezeit im September und Oktober konzentriert, kann die Einschwemmung in Gewässer über den Boden während des folgenden Winterhalbjahrs bis zur erneuten Bestellung des Feldes erfolgen.



Abb. 140: Exposition von Gewässerökosystemen durch Pollen- und Streueintrag. (Grafik: Hofmann)

⁵¹ Die Pflanze mit Stengel und Kolben mit Körner wird direkt beim Erntevorgang auf dem Feld in ca. 1 cm große Stücke (Häcksel) zerkleinert.

⁵² Ernte nur der Kolben bzw. Körner.

3. Drift im Gewässer: Die ins Gewässer eingetragenen Pollen und Streupartikel können im Gewässerstrom transportiert werden und sich ablagern. Je nach Partikelgröße, Dichte und Fließbedingungen werden die Partikel resuspendiert und weiter verfrachtet, bis sie in Senken endgültig deponiert und abgebaut werden.

4. Grundwasser/Drainagen: Über Ausscheidungen von Wurzeln und durch Abbau von Pflanzenteilen werden Toxine wie das *Bt* im Boden freigesetzt und gelangen über Grundwasserströme und Drainagen in die Gewässer.

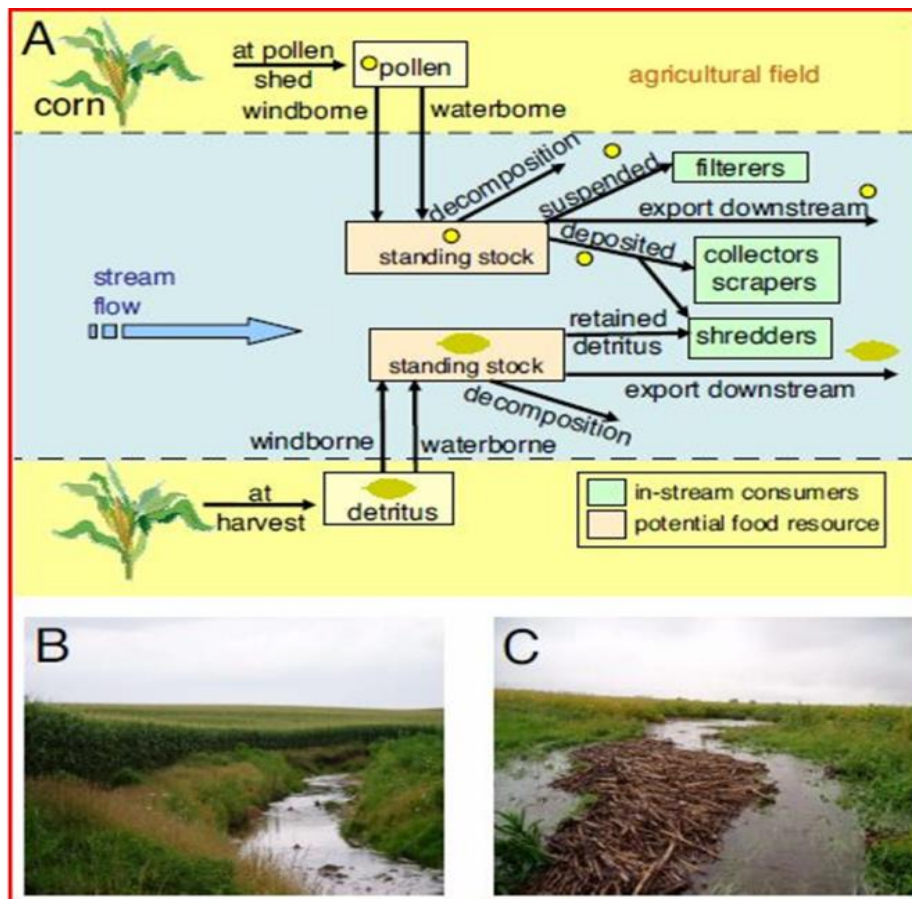


Abb. 141: Schema potentieller Stoffeinträge aus dem Maisanbau in Gewässerökosysteme (aus ROSI-MARSHALL ET AL. 2007, FIG. 1)

Während zur Ausbreitung von Maispollen ein relativ guter Kenntnisstand vorliegt (VDI 4330-3 2007, HOFMANN 2007, HOFMANN ET AL. 2005 UND 2010, FOLLONI ET AL. 2012), ist dies für die Verlagerung grobpartikulärer Maisstreu über den Wind- und Bodenpfad und der Ableitung der Deposition bzw. dem Eintrag in Gewässerökosysteme nicht der Fall. Der Eintrag organischer Substanz wurde bislang hauptsächlich im Rahmen gewässerökologischer Untersuchungen von Fließgewässern abgeschätzt, und zwar vor dem Hintergrund der Nährstoffzufuhr sowie des Kohlenstoff-bzw. Energiehaushaltes (organic matter budgets) (TANK ET AL. 2010a, ROSI-MARSHALL ET AL. 2007, LANGHANS 2006, ELOSEGI & POZO 2005; POZO & ELOSEGI

2005, BENFIELD ET AL. 2000, MINSHALL 1996, WEBSTER & MEYER 1997, WEBSTER ET AL. 1994 UND 1999, FISHER & LIKENS 1973).

Zu Projektbeginn war nur eine einzige Arbeit mit Freilanddaten zum Eintrag von Maiserntee-Rückständen in Gewässer mit Bezug auf den GVO-Anbau veröffentlicht (ROSI-MARSHALL ET AL. 2007). Allgemein lagen nur wenige Informationen zu *Bt* und Gewässerökosysteme bzw. Wirkung auf Organismen vor (DOUVILLE ET AL. 2005 und 2007, BØHN ET AL. 2008). Im Verlauf des Projektes kamen wenige weitere Untersuchungen (PRIHODA & COATS 2008a UND b, SWAN & PALMER 2004, SWAN ET AL. 2009, GRIFFITHS ET AL. 2009, JENSEN ET AL. 2010, TANK ET AL. 2010b, CHAMBERS ET AL. 2010, KRATZ ET AL. 2010, VIKTOROV 2011) und Ansätze zur Risikobewertungen (siehe WOLT & PETERSON 2010, CARSTENS ET AL. 2011) hinzu. Vergleichswerte zum Eintrag allgemeiner organischer Substanz in Gewässersysteme in agrarisch genutzten Gebieten finden sich z.B. bei TANK ET AL. (2010a).

Das Vorsorgeprinzip gebietet es, bei der ökotoxikologischen Bewertung von Umweltschadstoffen und der Abschätzung des Eintrags in Ökosysteme nicht nur die mittleren Verhältnisse („Normal-Bedingungen“), sondern auch ungünstige Bedingungen („Worst-Case“) in Betracht zu ziehen.

Grundsätzlich kann ein Eintrag von Streu- und Maispartikeln, freigesetzter DNA sowie GVO-Produkten wie *Bt*-Toxinen in die Gewässer über den Oberflächenabfluss und durch die Bodenpassage, insbesondere über Drainagen, erfolgen (TANK ET AL. 2010b). Bodenart, Geländeform, Feldgröße, Hangneigung, Niederschlagsmenge, Art und Bewuchs von Gewässerrandstreifen sowie Erosionsrinnen auf dem Acker und verletzte Uferböschungen stellen eine Auswahl bedeutender Faktoren für den Transport von Streupartikeln und den Eintrag in Gewässer dar. Häufig findet im Frühjahr ein Abtransport in Gewässer mit der Schneeschmelze statt.

Von der Vielzahl möglicher Situationen würde im „Worst-Case“ anzunehmen sein, dass die gesamte auf dem Acker befindliche Streumenge ins angrenzende Gewässer gelangt.

Die Gestaltung der Übergangszonen vom Acker zum Gewässer, die Erhaltung intakter Gewässer-Randstreifen, naturnah gestaltete Sedimentfänge in den Gewässern, insbesondere an Übergangsbereichen von Entwässerungsgräben in die Gewässer, stellen einige Beispiele vielfältiger Gestaltungsmöglichkeiten für eine wirksame Reduzierung von Einträgen dar, die bereits jetzt vielerorts im Hinblick auf andere Einflüsse umgesetzt bzw. erwogen werden und die sich auch für eine Reduzierung von Einträgen aus dem *Bt*-Maisanbau positiv auswirken können.

Eine Besonderheit des Transportes in Fließgewässern ist, dass einmal in das Gewässer eingetragene Substanzen mit dem Gewässerstrom verdriftet, d.h. mehrfach abgelagert und wieder aufgeschwemmt und somit weiter verfrachtet werden können, bis diese endgültig

deponiert werden. Durch diese Prozesse können auch entferntere, stromabwärts gelegene Schutzgebiete erheblich exponiert werden.

Unter Worst-Case-Annahmen wie z.B. bei extremen Hochwasserereignissen, können sich die Maispartikel aus dem mitunter verzweigten Einzugsgebiet in Senken, an Hindernissen, in überfluteten Auenbereichen oder Einmündungen in Seen in großen Mengen ansammeln. Hierbei können an den Akkumulationsorten im Unterlauf Konzentrationen erreicht werden, die erheblich über denen an den Eintrittsorten in der Nähe der Felder liegen (s. Abb. 141C).

5.3 Aufgabenstellungen

In Bezug auf den Eintrag von Streupartikeln über den Luftpfad kann das gleiche Ausbreitungsmodell wie für Pollen herangezogen werden (Lagrange Partikelausbreitungsmodell, z.B. AUSTAL2000/LASAT, s. Kap. 3). Allerdings umfassen die Streupartikel größere Fraktionen bis in den cm-Bereich, die über die gängigen, bis dato validierten Größenbereiche (bis ca. 50 μm) erheblich hinausgehen. In der Literatur über Streueinträge aus dem Maisanbau und auch allgemein zu Streu erfolgt eine Unterscheidung in Grobstreu über 1 mm Durchmesser und Feinstreu kleiner 1 mm (TANK ET AL. 2010a, ROSI-MARSHALL ET AL. 2007). Das Ausbreitungsverhalten von Partikeln in der Luft hängt wesentlich von der Größe ab und erfordert eine weitergehende Differenzierung der Feinfraktion kleiner 1 mm.

Hierzu fanden sich jedoch keine näheren Angaben, so dass es zunächst galt, die Partikelfractionen für Maisstreu mit den Feinstreu-Bestandteilen im Größenbereich von wenigen μm bis 1.000 μm (1 mm) quantitativ zu differenzieren, damit diese überhaupt einer Ausbreitungsmodellierung zugänglich gemacht werden können.

Die anschließende Aufgabe bestand darin, über geeignete Messmethoden die Streu-Depositionen auch im Freiland quantitativ zu erfassen, wobei eine ausreichend differenzierte Erfassung der Partikelfractionen möglich sein musste.

Letztlich galt es über Freilandmessungen die Streueinträge in unterschiedlichen Entfernungen zum Maisfeld zu untersuchen und auf mögliche Gradienten zu prüfen.

Zur Erfüllung dieser Messaufgabe wurden vorhandene methodische Ansätze in dem Vorhaben entsprechend weiterentwickelt. Nähere Erläuterungen finden sich in den entsprechenden Fachkapiteln weiter unten.

Im Gegensatz zum Luftpfad lagen zum Eintrag von Maispartikeln und das *Bt*-Toxin in die Gewässer über den Bodenpfad, sei es über die Oberfläche durch Erosion, Run-Off etc. oder auch durch Sickerwasser und Drainagen, keine hinreichend differenzierten Modellansätze vor, mit denen eine adäquate Abschätzung für Streu- und Pollenpartikel durchzuführen wäre. Ansätze bot das Modell EROSION 3D (MICHAEL 2001, WERNER 2002), jedoch wären Modellentwicklungen erforderlich gewesen, die in diesem Vorhaben nicht zu leisten waren.

Dieselbe Beurteilung gilt zu den Transportvorgänge in den Gewässern, den Umbau- und letztlich Ablagerungsprozessen, geeignete Modelle für Pollen- und Maisstreupartikel waren nicht zu finden.

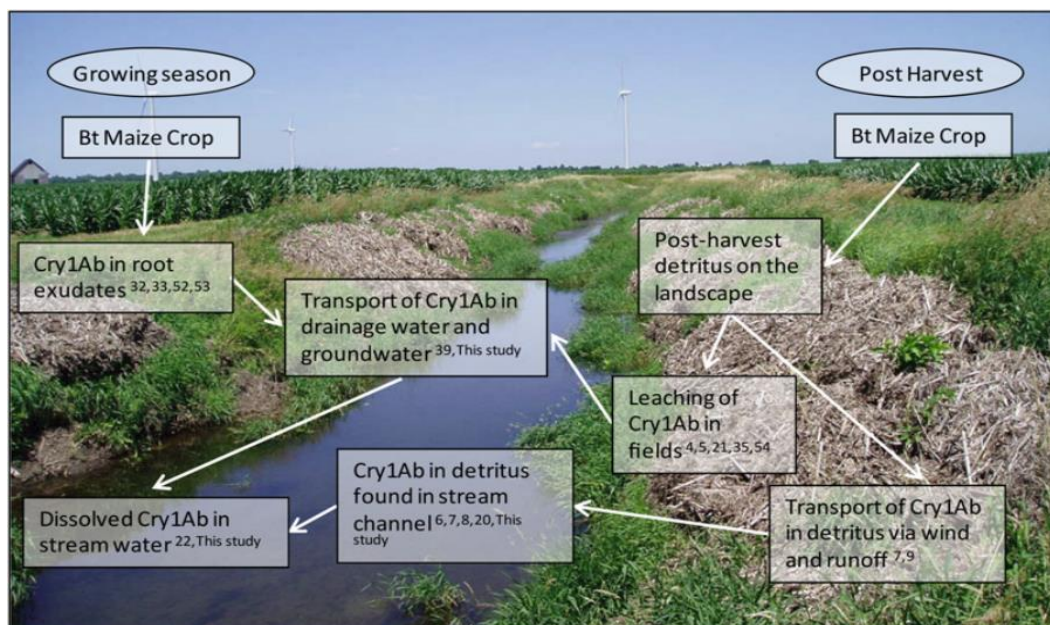


Abb. 142: Eintragspfade von Mais und Cry1Ab-Proteinen in Gewässerökosysteme. Das Foto zeigt Maisansammlungen in der Gewässerzone und am Böschungsrand (aus: TANK ET AL 2010b, Fig. 3).

5.4 Das Untersuchungsgebiet

Als Untersuchungsgebiet wurde das Einzugsgebiet des Flusses Welse im Landkreis Uckermark im nördlichen Brandenburg gewählt, in dem auch die anderen Untersuchungen des Vorhabens stattfanden. Neben naturschutzrechtlich geschützten Fließ- und Standgewässern sowie mehrjährigem großflächigem Maisanbau weist die Region weitere Vorteile auf. Die Untersuchungen zum Streueintrag sind sehr aufwändig und bedürfen der Unterstützung durch Landwirte und andere Infrastrukturgeber. Diese Unterstützung war im Untersuchungsraum bestens gewährleistet. Das Gut Kerkow, auf dessen Flächen die Versuche stattfanden, das nahe gelegene NABU-Zentrum Blumenberger Mühle sowie die benachbarte, rundum besetzte DWD-Wetterwarte boten erhebliche logistische Unterstützung. Dadurch waren eine fachgerechte Vorbereitung und Durchführung der Messungen im Gelände sowie eine zeitnahe begleitende Probenaufbereitung möglich.

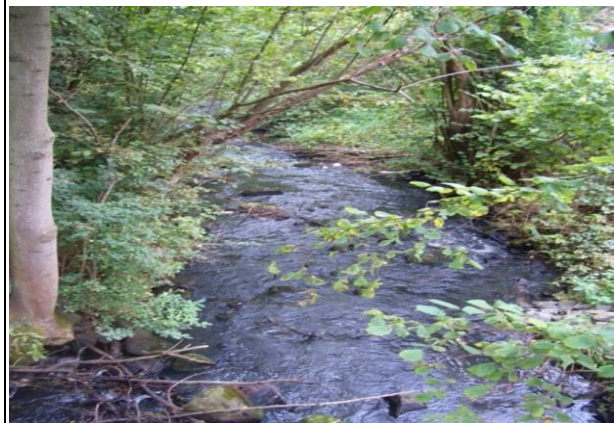
Zur Einordnung des Untersuchungsgebietes wurden die Verteilung von Maisanbau und Gewässerökosystemen in Brandenburg per GIS analysiert und Informationen, Hinweise und Empfehlungen von gebietskundigen Personen aus dem gesamten Land Brandenburg eingeholt. Weitere potentielle Schwerpunktbereiche für Maisanbau und Gewässerökosysteme mit unterschiedlich ausgeprägten Fließgewässersystemen wie dem Baruther Urstromtal, dem Oderbruch, der Niederlausitz und dem Gebiet um Liebenwalde wurden berücksichtigt.



a) Die Welse durchfließt im Oberlauf die Blumenberger Teiche.



b) Die Welse im Raum Kerkow.



c) Naturnaher Abschnitt der Welse bei Görldorf.



d) Die Welse weist mehr Stau und Mühlen auf, hier Ziehhener Mühle.



e) Der kanalisierte Unterlauf der Welse im Urstromtal.



f) Die Welse bei Kummerow vor Einmündung in die Oder.

Abb. 143a-f: Verschiedene, exemplarische Gewässerabschnitte der Welse ab Blumenberger Teiche.
(Bilder: Kuhn/Mante/Hofmann)

5.5 Quantifizierung des aerogenen Polleneintrages in Gewässer

Um die Exposition durch Pollenflug zu erfassen, wurden in den drei Versuchsjahren 2009 bis 2011 systematische Versuche zu Pollenausbreitung und -eintrag in Relation zur Entfernung vom Feldrand durchgeführt sowie im Jahr 2010 exemplarisch entsprechende Gewässerökosysteme mit untersucht. Zum Einsatz kam das nach VDI 4330-3 (2007) standardisierte Verfahren des PMF. Von insgesamt 23 Standorten waren 8 Gewässerökosysteme zuzuordnen. Eine Beschreibung der Vorgehensweise und der Ergebnisse insgesamt findet sich im Teilbericht zum Maispollenflug (siehe Kap. 3.2.33.3.4).



Abb. 144: Exemplarische Standorte zur Erfassung der Exposition von Gewässerökosystemen durch Pollenflug mittels PMF, berücksichtigt wurden u.a. Gräben und Feuchtgebiete (links), Sölle (Mitte) und offene Gewässer (rechts, Blumenberger Teich). (Bilder: Hofmann)

Die Ergebnisse aus den Maispollendepositionsmessungen gehen aus Abb. 145 hervor. In der Grafik wurden die Ergebnisse zur Pollendepositionsmessung im Untersuchungsgebiet der Jahre 2009 und 2010 in den Regressions-Zusammenhang von Maispollendeposition in Relation zur Entfernung vom nächsten Maisfeld aus überregionalen Freilandmessungen gestellt. Auf der linken senkrechten Achse ist die Maispollendeposition als Anzahl an Maispollen pro m^2 angegeben, auf der rechten Achse als Massendeposition in g TS pro m^2 . Hierbei wurden 250 ng (10^{-9} g) als mittleres Trockengewicht für Maispollen angesetzt (HOFMANN ET AL. 2009a). Maispollen variieren in der Größe zwischen $60\text{-}125 \mu\text{m}$ Durchmesser. Entsprechend schwankt ihr Frischgewicht zwischen ca. 140 ng bis 1.300 ng , für ein Maispollenkorn mit mittlerem Durchmesser von $90 \mu\text{m}$ ist ein Frischgewicht von ca. 480 ng anzunehmen. FONSECA ET AL. (2003) geben für Trockengewichte eine Spanne von $150\text{-}500 \text{ ng}$

pro Maispollen an, bei EMBERLIN (1999) findet sich eine Angabe von ca. 247 ng als mittleres Pollengewicht. Die Ergebnisse zur Maispollendeposition aus den Erhebungen in 2010 sind farblich hervorgehoben (gelb und blau). Acht von 23 Standorten beziehen sich auf Gewässerökosysteme (blau). Aus den dargestellten Ergebnissen in Abb. 145 ist zu erkennen, dass sich die Gewässerstandorte in den allgemeinen Trend der Offenlandmessungen einfügen. Der 95 %-Vertrauensbereich der Messwerte zeigt an, dass im unmittelbaren Nahbereich zu Maispollenquellen mit Einträgen von ca. 250.000 bis 20 Millionen Maispollen/m² entsprechend einem Massendepositionseintrag von ca. 0,06-5 g/m², im statistischen Mittel ca. 0,6 g/m², zu rechnen ist. In 10 m Entfernung sind Einträge von 40.000 bis 3 Millionen Pollen/m² zu erwarten, entsprechend 0,01-0,75 g TS/m², in 100 m Entfernung 0,0025-0,2 g TS/m² und in 1.000 m Entfernung noch 0,0003-0,05 g TS/m².

Als wesentliches Ergebnis lässt sich festhalten, dass sich der Eintrag von Maispollen über die Luft in Gewässerökosysteme in den allgemeinen Trend einfügt.

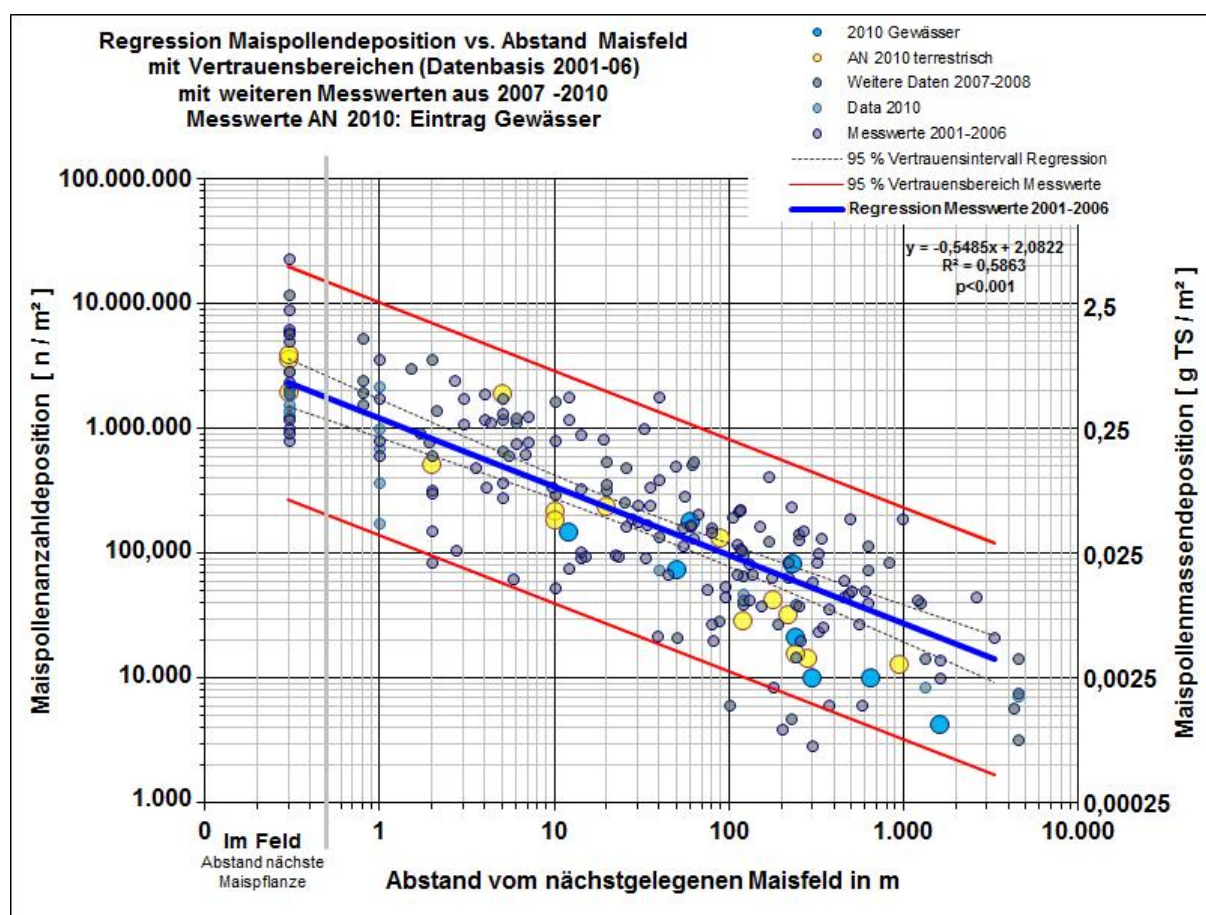


Abb. 145: Zusammenhang von Maispollendeposition und Abstand zum nächstliegenden Maisfeld (vgl. Kap. 3.2.33.3.4). Die Ergebnisse der Erhebungen in Phase II (2010) sind farblich markiert mit Differenzierung der Gewässerstandorte (blau). (Grafik: Hofmann)

5.6 Charakterisierung und Quantifizierung von Streueinträgen aus der Maisernte (Häcksel) im Versuchsjahr 2009

Im September 2009 wurden auf Maisflächen des Guts Kerkow zuerst Untersuchungen zur Charakterisierung von Maisstreu-Einträgen, die bei der Häckselernte entstehen, durchgeführt.

Es erfolgten dann Versuche zur Quantifizierung der Streueinträge, wobei wir verschiedene Methoden zum Auffangen des Häckselgutes in Anlehnung an die von ROSI-MARSHALL ET AL. (2007) und ELOSEGI & POZO (2005) verwendeten bzw. die vorgestellten Streufallen verwendeten. Ziel dieser Untersuchungen war es, die bis dahin entwickelte methodische Vorgehensweise auf ihre Eignung unter realen Bedingungen zu testen, sowie einen ersten Eindruck der Streudepositionen während der Ernte zu erhalten.

Unter Einsatz dieser Fallen sowie weiterer Messgeräte zur Bestimmung meteorologischer Größen und zur Messung sehr feiner Partikel (Partikelgröße bis 12 μm) wurden dann die Streudepositionen auf einem Maisfeld während des Ernteprozesses in Abwindlage bestimmt. Ziel der Versuche war es, die Streueinträge differenziert nach verschiedenen Partikelfractionen in Abhängigkeit von der Entfernung zum Maisfeld zu quantifizieren. Dazu wurden Streufallen in unterschiedlicher Entfernung zum Maisfeld positioniert, das verdriftete Häckselgut aufgefangen und analysiert.

Die Erfahrungen resultierten in einer Verbesserung der Streufallen zur Erfassung aller Partikelfractionen, die dann in den folgenden Freiland-Versuchen des Jahres 2010 eingesetzt wurden.

5.6.1 Erfassung des Streu-Eintrages im Nahbereich der Erntemaschine

Um die aus der Ernte von Mais verbreitete Streu (Häcksel) zu charakterisieren, erfolgte im Herbst 2009 auf Flächen des Gutes Kerkow zunächst eine Erfassung des Maisstreu-Eintrages durch Begleitung der Erntemaschine sowie eine größenfraktionierte Analyse der Zusammensetzung der Streu.

Betriebsbedingt variiert die Emissionsrate des Häckselgutes je nach Position und Füllstand des Hängers. Zur Ermittlung einer repräsentativen Größenordnung des Streueintrages wurde die Erntemaschine daher über eine 50 m Wegstrecke mit 3 Metallwannen (100 cm lang, 10 cm breit, 10 cm hoch) an der Seite des Auffangwagens begleitet (Abstand vom Wagen 1 m/2 m/3 m, vom Feldrand 6 m/7 m/8 m). Die Messanordnung ist in Abb. 146 skizziert.

Die Proben wurden vor und nach der Trocknung gewogen und der Maisstreu-Eintrag in g TS/m^2 ermittelt.

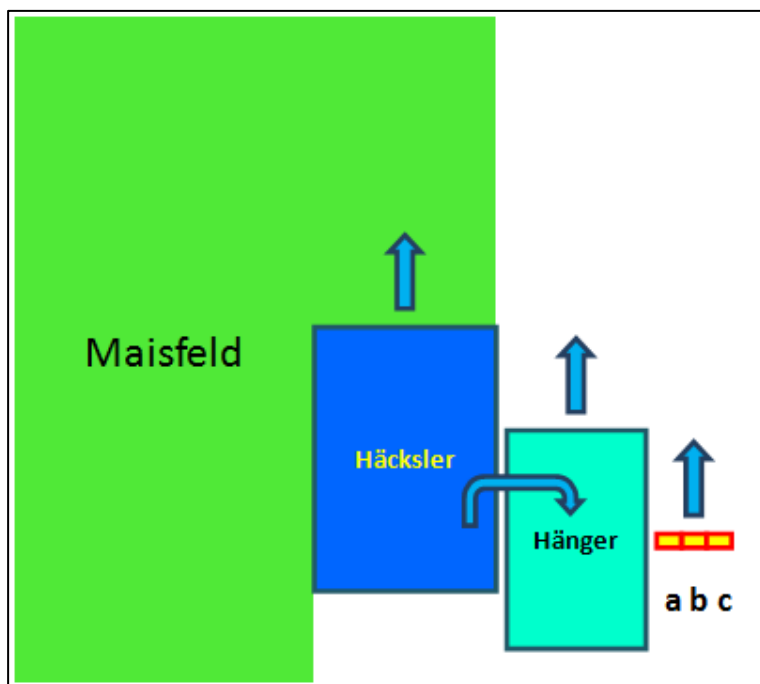


Abb. 146: Skizze der Messanordnung zur Erfassung der Maistreueinträge im Nahbereich der Erntemaschine. Streufallen vom Typ „Metallwanne“ (1 m x 10 cm x 10 cm), die in 1 m (a), 2 m (b) und 3 m (c) Entfernung neben dem Sammelfahrzeug während des Erntevorgangs über 50 m mitgeführt wurden. Die Spurbreite des Hängers betrug 6 m. (Grafik: Hofmann)

Tab. 19: Deposition von Maishäcksel im Nahbereich der Erntemaschine

	Abstand vom Wagen [m]	Abstand Maisfeld von [m]	bis [m]	Sammel- fläche [m ²]	Weg- strecke [m]	Bezugs- fläche [m ²]	Frisch- gewicht FG [g]	Trocken- Gewicht TG [g]	Trocken- substanz TS % %	Deposition [g TG/m ²]
E-a	1	6	7	0,1 m x 1 m	50	5	88,2	31,1	35 %	6,22
E-b	2	7	8	0,1 m x 1 m	50	5	65,9	25,6	39 %	5,12
E-c	3	8	9	0,1 m x 1 m	50	5	16,4	6,4	39 %	1,28

Die Ergebnisse gehen aus Tab. 19 hervor. Die Trockensubstanzwerte (TS) der Maistreue liegen mit 35 % bis 39 % im Normalbereich für Silomais. Die Probe stammt aus der Mittagsernte. Für die Deposition im Nahbereich wurden Werte von 6,22 g TG/m² bis 1,28 g TG/m² ermittelt, hochgerechnet auf den Hektar sind das ca. 12 bis 62 kg TG/ha bzw. 35 bis 180 kg FG/ha. Dies entspricht dem Wertebereich von ROSI-MARSHALL ET AL. (2007). Lokal können noch deutlich höhere Einträge vorkommen, z.B. bei Hängerwechsel, Fehlpositionierung des Überführungsrohres oder starken Windstößen.

Der Ernteertrag bei Silomais liegt üblicherweise bei 35-55 t/ha (die gesamte Pflanze mit Kolben/Körnern wird gehäckselt, Bodenabstand ca. 30-50 cm).

Bei Körnermais wird der Kolben geerntet, der Ertrag liegt bei ca. 7-11 t/ha, wobei die Spindel des Kolbens 10-15 des Gewichtes ausmacht.

5.6.2 Ermittlung der Trockensubstanz von erntefrischer Maisstreu (Häckselgut)

Erntefrisches Maishäckselgut aus dem Sammelwagen wurde bei 60°C über 24 h getrocknet und das Frisch- und Trockengewicht sowie die Trockensubstanz in Prozent bei zwei Parallelproben ermittelt.

Die Ergebnisse gehen aus Tab. 20 hervor. Die Proben stammen aus der abendlichen Ernte bei gutem Wetter und weisen dementsprechend einen relativ hohen TS-Gehalt im oberen Normbereich von 42 % bis 45 % auf.

Tab. 20: Frisch- und Trockengewicht von Maishäcksel. Trocknung bei 60°C über Nacht.

	Probe 1	Probe 2
	[g]	[g]
Frischgewicht	100,0	316
Trockensubstanz	44,6	132
TS- %	45 %	42 %

5.6.3 Differenzierung von Grob- und Feinfraktionen der Maisstreu

Getrocknete Maisstreu (Häckselgut aus Probe 1) wurde mittels Trockensiebung (Analysette pro, Fritsch GmbH) und Siebturm (100 mm Ø Metallsiebe, Maschenweiten 1 mm, 180 µ, 125 µm, 63 µ, Siebpfanne; Siebung 30 sec mit 0,5 mm) in die entsprechenden Größenklassen aufgetrennt. Anschließend wurde zur weiteren Separation eine Nasssiebung der Feinfraktionen (Siebe 125 µ, 63 µ, Siebpfanne mit Auslauf in Becherglas, Vakuumfiltration (Sartorius) auf 12 µm Membranfilter Ø 50 mm) vorgenommen. Die Proben wurden über 24 h bei 60°C getrocknet und fotografiert (s. Abb. 147) und anschließend auf einer Laborpräzisionswaage (Mettler, Genauigkeit bis 0,0001 g) ausgewogen. Die Ergebnisse der Wiegung finden sich in Tab. 21. Die Proben wurden dann unter Vergrößerung mit dem Binokular sowie die Feinfraktionen unter dem Mikroskop analysiert und fotografisch dokumentiert (s. Abb. 148).

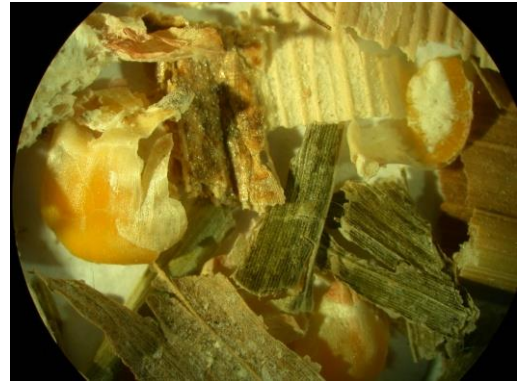


Abb. 147: Differenzierung von Maisstreu-Häcksel in Grob- und Feinfraktionen. (Bild: Hofmann)

Tab. 21: Maisstreu Häckselgut, Anteile der Grob- und Feinfraktionen (Probe I).

	Partikelfraktion	[g]	%
Frischgewicht		100	
Trockengewicht		44,6	100 %
Grobfraktion	> 1 mm	40,3	91,9 %
Feinfraktion	< 1 mm	4,3	8,1 %
Aufteilung Feinfraktion	> 180 µm	3,05	7,0 %
	> 125 µm	0,14	0,3 %
	> 63 µm	0,021	0,1 %
	> 12 µm	0,0065	0,1 %

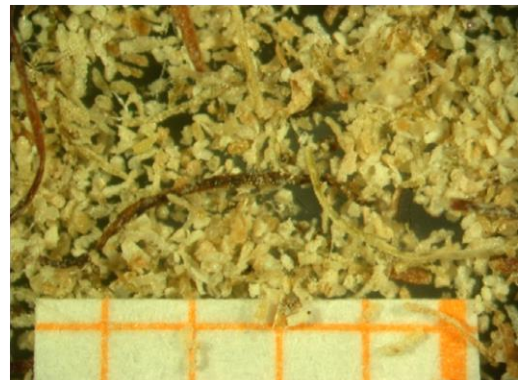
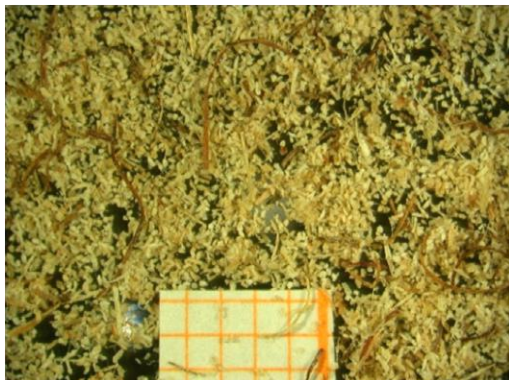
**Grob-
Fraktion
> 1 mm**



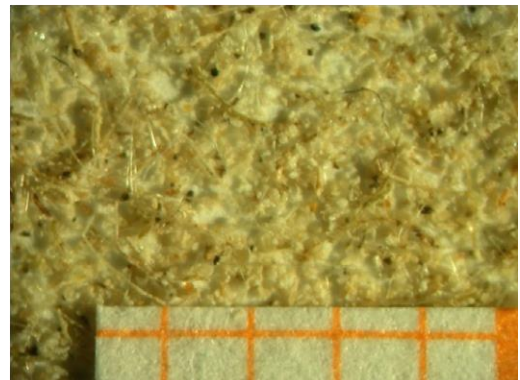
**Feinfraktion
< 1mm
> 180 µm**



**Feinfraktion
< 180 µm
> 125 µm**



**Feinfraktion
< 125 µm
> 63 µm**



Feinfraktion

< 63 μm

> 12 μm

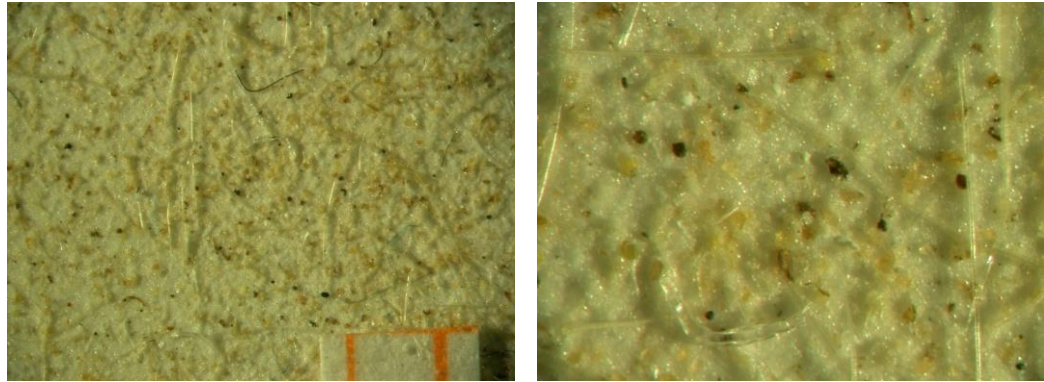


Abb. 148: Maisstreu-Häckselgut, Bestandteile von Grob- und Feinfraktionen. Digitalbilder unter Vergrößerung, rechts jeweils die Ausschnittvergrößerung. Das mitfotografierte Millimeterpapier gibt die Größenverhältnisse an. (Bilder: Hofmann/Kuhn)

Die Ergebnisse zur Fraktionierung des Maisstreu-Häckselgutes in Tab. 21 zeigen, dass ca. 92 % der Trockengewichts-Anteile der Grobfraktion >1 mm zuzuordnen sind. Die Mikroskopaufnahmen in Abb. 148 veranschaulichen, dass die groben Maishäcksels überwiegend aus Bruchstücken von Blättern, Stengeln, Kolben und Körnern mit Durchmesser von bis ca. 1 cm bestehen. Die weitere Differenzierung der verbleibenden Feinfraktion kleiner 1 mm von ca. 8 % ergibt, dass die Größenklasse >180 μm mit 7 % den Hauptanteil einnimmt, wobei diese einen hohen Anteil länglicher Maispflanzenfasern sowie Gewebebruchstücke aufweisen. Die Fraktion 125-180 μm besteht aus deutlich kleineren, kompakteren Bruchstücken von Körnern, Blättern und Stengeln sowie langgestreckten Fasern und Grana. Zur Größenklasse 63-125 μm zählen die Maispollen, die trotz der späten Jahreszeit noch einzeln vorkommen. Ansonsten überwiegen entsprechend feine Bruchstücke von Körnern, Gewebe und Grana (Blatthaare). Die Feinfraktion 12-63 μm weist feine Gewebebruchstücke und Maisstärkekörner und vor allem auch Pilzsporen sowie einige längliche Grana auf. Damit befinden sich neben Körnerbruchstücken und Maispflanzen-Gewebeteilen, Fasern, Grana und Pollen auch freie Mais-Stärkekörner sowie Sporen in der Streu.

5.7 Quantifizierung des Maisstreueintrages in Relation zur Entfernung vom Maisfeld in 2009

Um den Streueintrag in Abhängigkeit der Entfernung vom Maisfeld zu ermitteln, wurden Streufallen bei einem ca. 100 m breiten und längeren Abschnitt eines Maisschlages auf der Abwindseite installiert. Die Messanordnung ist in Abb. 149 skizziert. Hierzu wurden im Jahr 2009 verschiedene Streufallentypen getestet.

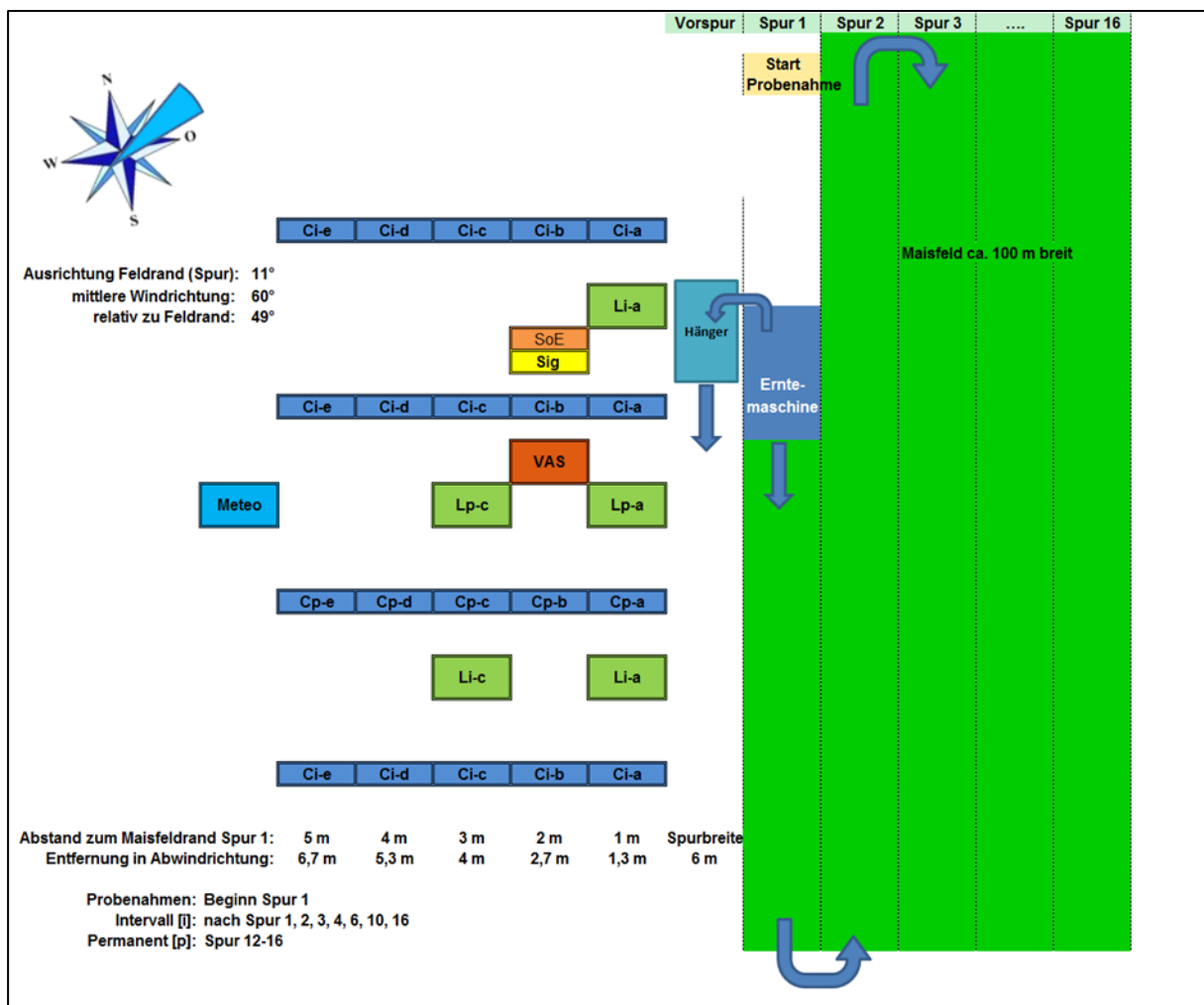


Abb. 149: Versuchsanordnung zur Erfassung des Streueintrages im Jahr 2009. (Grafik: Hofmann)

C = Streufalle, offene Metallwannen (1 m x 0,1 m = 0,1 m²)

L = Streufalle, Netz (Maschenweite 1 mm, 0,5 m x 0,5 m = 0,25 m²)

SoE = Objektträger, Passivsammlung, offene Exposition, 2 Parallelen

Sig = Sigma-2, Passivsammler gem. VDI 2119 + 4330 Bl. 3,

trockene Deposition (Sedimentation), 2 Parallelen

SW = volumetrischer Aktivsammler (Sporewatch), kontinuierliche Erfassung der Feinpartikel-Konzentration

Meteo = Davis Vantage Pro 2 (Windrichtung, -geschwindigkeit, Feuchte, Temperatur).

Mit jeder Erntespur erhöhte sich dabei die Entfernung der Emissionsquelle von den Messgeräten, so dass hierdurch die Streubelastung in Abhängigkeit zur Entfernung untersucht werden konnte. Die Probennahmen erstreckten sich von Spur 1 bis Spur 16.

Für die Auswertung ist zu beachten, dass bei der Ernte eines Maisfeldes in der Regel zunächst eine Vorspur freigeräumt wird, wobei der Streuauswurf in den Sammelwagen (Hänger), als maßgeblicher Emissionsort, hinter der Erntemaschine in dessen Spur fährt. In den folgenden Spuren fährt der Sammelwagen dann neben der Erntemaschine her. Für unseren Versuch war bereits ein Teil des Maisfeldes geräumt, so dass wir dort die Messgeräte aufstellen konnten.

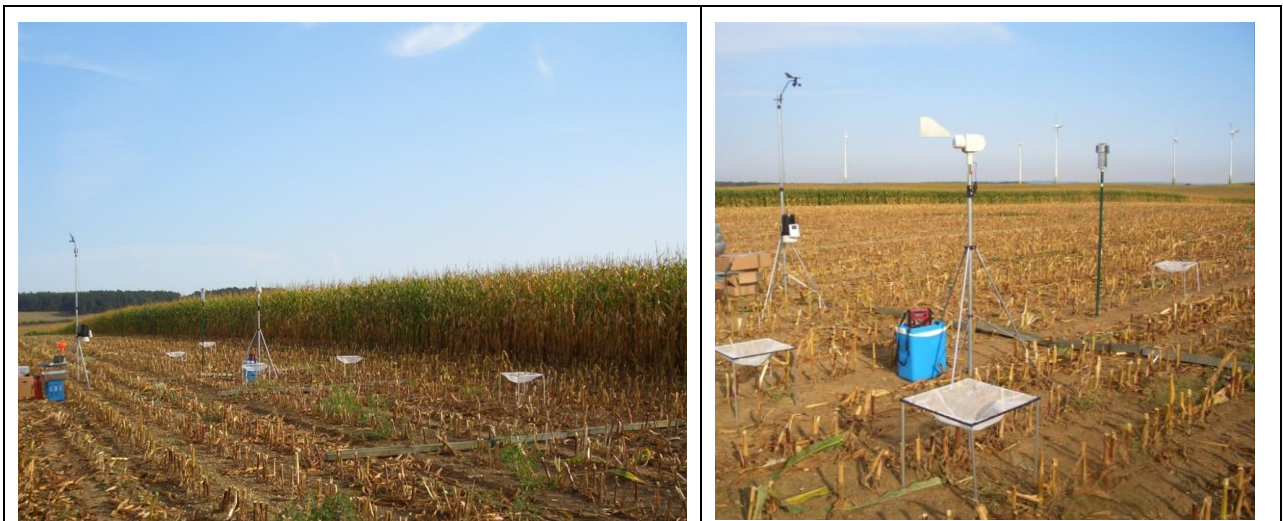


Abb. 150: Messstelle am Maisfeld mit Netzen und Metallwannen für den Streufalleintrag, Aktivsammler Sporewatch (Partikelkonzentration, kontinuierliche Erfassung), Passivsammler Sigma-2 und Objektträger sowie Meteorologie-Messstation (Davis Vantage Pro2). (Bilder: Mante)



Abb. 151: Streufallbelastung in Abwindlage beim Passieren der Erntemaschinen, Maisfeldrand ca. 18 m entfernt. (Bilder: Hofmann)

5.7.1 Erfassung des Streueintrages mittels Streufall-Netzen

Streufallnetze sind als gängige Methode zur Erfassung der Grobpartikel >1mm in der Literatur beschrieben (ROSI-MARSHALL ET AL. 2007). Für die Versuche im Jahre 2009 wurden 5 Streufallnetze (0,25 m²) angefertigt (Abb. 152) und neben dem Maisfeldrand in 2 Abständen (Abb. 149, a, c) aufgestellt. Die Beprobung begann mit der 2. Spur. Drei Fallen (Li) dienten der sukzessiven Beprobung nach der 1., 3., 4., 6., 10. und 16. Erntespur. Eine Reihe (Lp) verblieb von der 1. bis zur 16. Spur über den gesamten Erntevorgang.



Abb. 152: Streufallnetz 0,5 m x 0,5 m, Maschenweite 1 mm. (Bild: Mante)

Für die Probenahme wurde der Inhalt der Fallen in entsprechende Transportbehälter (0,7 l Einheitsglasgefäße, 1,5 l PET-Flaschen) umgefüllt, wobei die Netze zuerst umgedreht in eine entsprechend große Metallwanne (Normbehälter N2/1) gehängt und mittels Drucksprüher nass ausgespritzt wurden und dann die Proben aus der Metallwanne unter Zuhilfenahme eines Trichters in die Gefäße gespült wurden.

Im Labor erfolgte eine Siebtrennung in Grobfraktion > 1mm und Feinfraktion > 1mm, letztere weiter separiert in die Größenklassen größer und kleiner 63 µm. Die Streuproben wurden per Vakuumfiltration (Sartorius) auf 12 µm Membranfilter Ø 50 mm (Whatman) abgeschieden und in Petridisks aufbewahrt, größere Mengen in PS-Becher. Die anschlie-

ßende Trocknung der Proben erfolgte bei 60°C über 24h. Die Proben wurden dann auf entsprechender Laborwaage ausgewogen (Mettler, Genauigkeit bis 0,0001 g) und fotografiert.

Die Ergebnisse sind in Abb. 153 dargestellt. In allen Fraktionen der Streu war ein deutlicher Zusammenhang von Streueintrag zur Entfernung feststellbar. Im Nahbereich überwogen die Grobpartikel mit Einträgen in Höhe von ca. 10 g/m², im folgenden Verlauf nahmen sie stetig ab bis auf unter 0,01 g/m² in ca. 100 m Entfernung.

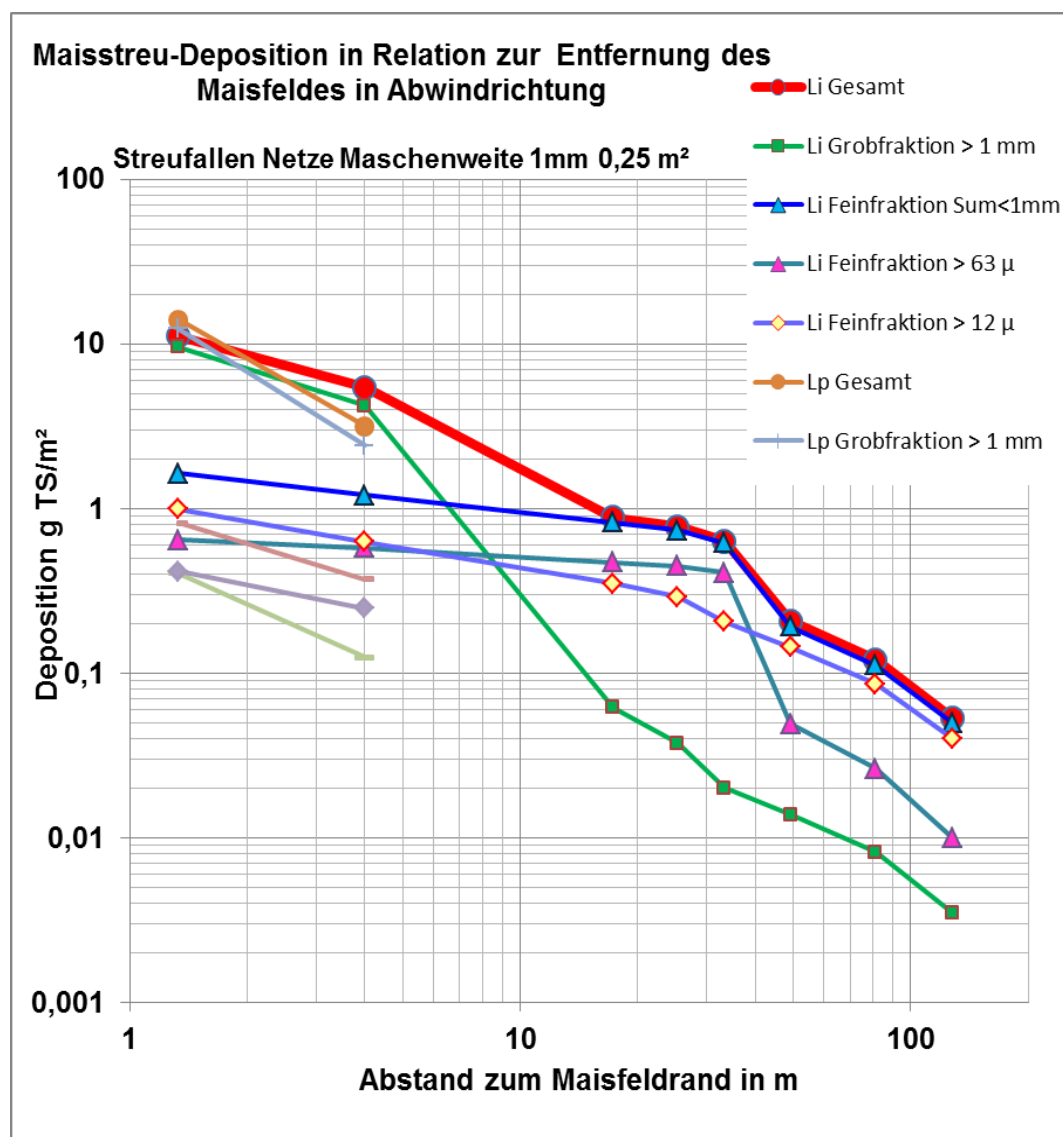


Abb. 153: Maisstreu-Deposition in Relation zur Entfernung vom Maisfeld in Abwindrichtung mittels Streufallen-Netzen aus den Versuchen im Jahr 2009. (Grafik: Hofmann)

Li = sukzessive Exposition

Lp = permanente Exposition.

Auf Grund der trockenen Witterung und der kurzen Standzeit blieben an den Netzen auch Feinpartikel haften. Die Feinpartikel lagen im Nahbereich bei ca. 1 g/m² und nahmen mit

der Entfernung zunächst nur geringfügig ab, so dass bereits bei einer Entfernung von 10 m die Feinpartikel anteilmäßig überwogen. Erst ab dem Entfernungsbereich 30 bis 40 m zeigten auch die Feinpartikel $>63\ \mu\text{m}$ einen entsprechend stärkeren Abwärtstrend. Ab ca. 50 m Entfernung bildete die feinste Fraktion von $12\text{-}63\ \mu\text{m}$, die deutlich weiter getragen wurde, den wesentlichen Anteil.

Ein Problem stellt das Ausblasen durch Wind bei trockener Witterung dar, was wir auch beobachteten und durch Anfeuchten minimierten.

5.7.2 Erfassung des Streueintrages per Metallwannen-Streufalle

Für die Versuche wurden 20 Metallwannen (1m lang, 0,1 m breit, 0,1 m hoch) vom VERN e.V. in Greiffenberg zur Verfügung gestellt (Abb. 154) und neben dem Maisfeldrand in 4 Reihen in 5 Abständen (siehe Abb. 149, a, b, c, d, e) aufgestellt. Die Beprobung begann mit der 2. Spur. Drei Reihen (Ci) dienten der sukzessiven Beprobung nach der 1., 2., 3., 4., 6., 10. und 16. Spur. Eine Reihe (Cp) verblieb von der 1. bis zur 16. Spur über den gesamten Erntevorgang.

Für die Probenahme wurde der Inhalt der Wannen in entsprechende Transportbehälter (0,7 l Einheitsglasgefäße, 1,5 l PET-Flaschen) umgefüllt, wobei die Wannen nass zur Übernahme der Partikel ausgespült wurden.

Im Labor erfolgte eine Siebtrennung in Grobfraktion $> 1\text{mm}$ und Feinfraktion $< 1\text{mm}$, letztere weiter separiert in die Größenklassen größer und kleiner $63\ \mu\text{m}$. Die Streuproben wurden per Vakuumfiltration (Sartorius) auf $12\ \mu\text{m}$ Membranfilter $\varnothing 50\ \text{mm}$ abgeschieden und in Petridisks aufbewahrt, größere Mengen in PS-Becher. Die anschließende Trocknung der Proben erfolgte bei 60°C über 24h. Die Proben wurden dann auf einer Laborwaage ausgewogen (Mettler, Genauigkeit bis $0,0001\ \text{g}$).



Abb. 154: Metallwannen-Streufalle 1 m x 0,1 m x 0,1 m (VERN e.V.). (Bild: Hofmann)

Die Ergebnisse der Versuche gehen aus Abb. 155 hervor. Auch bei den Metallwannen war in allen Fraktionen ein deutlicher Zusammenhang von Streueintrag zur Entfernung feststellbar. Im Nahbereich überwogen die Grobpartikel mit einem Eintrag in Höhe von ca. 20 g/m² und nahmen im folgenden Verlauf stetig ab auf ca. 0,02 g/m² in 120 m Entfernung.

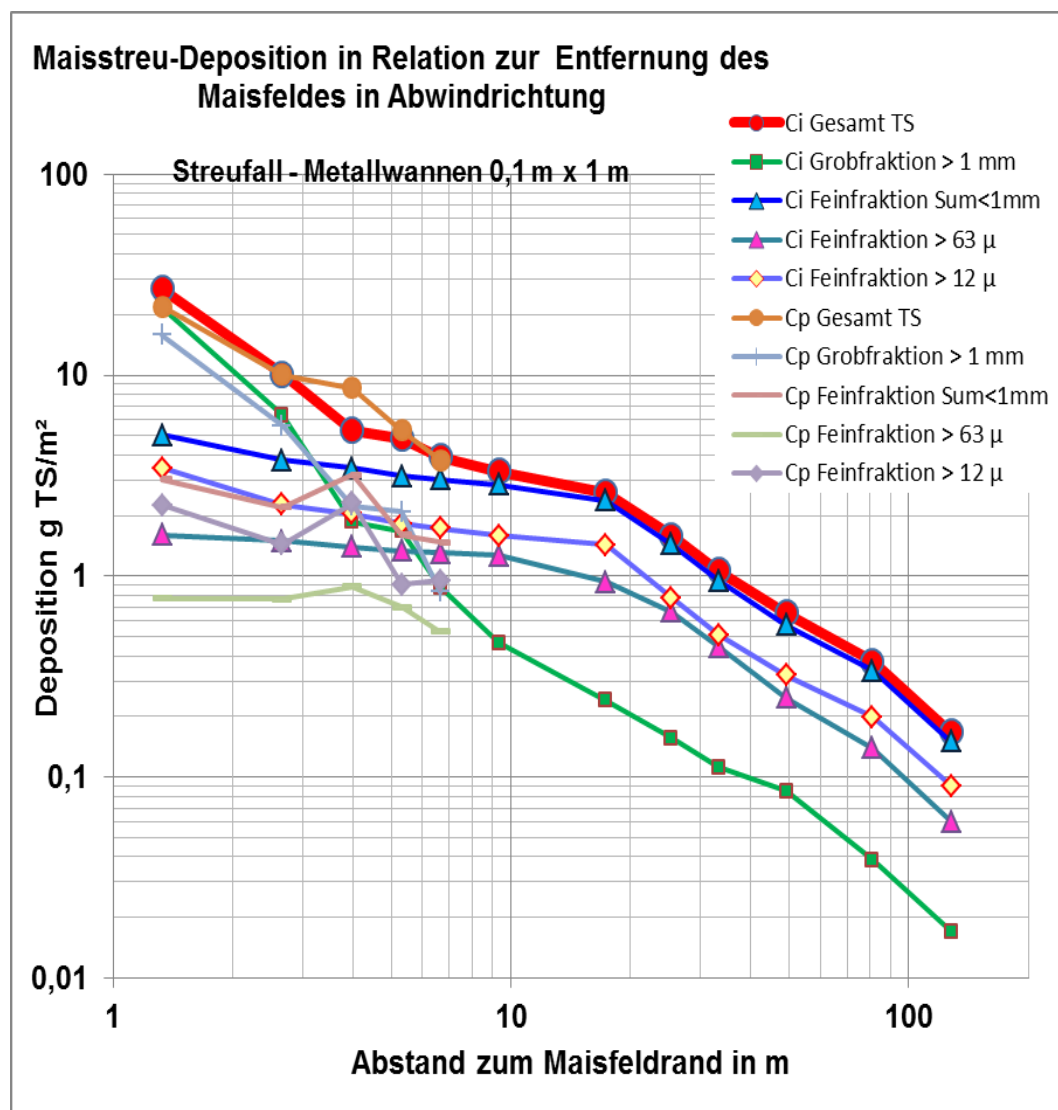


Abb. 155: Maisstreu-Deposition in Relation zur Entfernung vom Maisfeld in Abwindrichtung mittels Metallwannen als Streufallen. (Grafik: Hofmann)

Ci = sukzessive Exposition

Cp = permanente Exposition.

Die Feinpartikel erreichten bei den Wannen im Nahbereich einen Wert von ca. 5 g/m². Die Netze mit 1 mm Maschenweite wiesen demgegenüber ca. 1 g auf, so dass bei den Netzen nur ca. 20 % der Feinpartikel < 1 mm miterfasst wurden.

Die Feinpartikel nahmen mit der Entfernung zunächst geringfügig ab, in 10 m Entfernung überwogen bereits die Feinpartikel anteilig. Einen entsprechend stärkeren Abwärtstrend zeigten die Feinpartikel ab ca. 20 m. Die feinste Fraktion 12-63 μm überwog stetig.

Auch bei den Metallwannen war das Ausblasen durch Wind bei trockener Witterung trotz Anfeuchten ein Problem, das zu berücksichtigen ist. Gegenüber den Netzen werden die Feinfraktionen <1 mm grundsätzlich besser erfasst. Auf Grund der Ausblasgefahr sind mit beiden Fallentypen längere Expositionszeiten jedoch kaum möglich.

5.7.3 Erfassung von Feinstreupartikeln mittels Sporewatch

Eine kontinuierliche Erfassung aller Partikel-Fraktionen inklusive der größeren Partikel über 100 μm über ein und dasselbe Verfahren ist aus methodischen Gründen nicht möglich. Die Erfassung fokussierte hier auf die Feinstreu-Partikel im Größenbereich <100 μm , wofür der volumetrische Aktivsampler Sporewatch (Burkard Scientific Ltd., Abb. 156) verwendet wurde. Das Gerät entspricht der gängigen Sporen- und Pollenfalle nach HIRST (1952), erfasst werden Aerosolpartikel im Größenbereich von ca. 1-100 μm . Der Volumenstrom beträgt 10 l/min. Die Partikel werden durch einem 14 mm breiten und 2 mm hohen Einlassschlitz eingesaugt, der über eine Windfahne ausgerichtet wird. Die Partikel werden über Impaktion auf einen Klebestreifen abgeschieden, der hinter dem Schlitz auf einer Trommel befestigt ist, die sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit dreht und den Klebestreifen am Schlitz vorbeiführt. Dadurch gelangt man zu einer kontinuierlichen Auswertung der Partikelkonzentration in der Luft unter dem Mikroskop mit einer Zeitauflösung, die von der Schlitzhöhe und der Drehgeschwindigkeit der Trommel bestimmt wird. In dem Versuch wurde ein 24h-Modus angelegt, was eine zeitliche Auflösung von ca. 17 Minuten (2fache Schlitzbreite) erlaubt. Eine ausführliche Methoden-Beschreibung findet sich bei BRITISH AEROBIOLOGY FEDERATION (1995).



Abb. 156: Sporewatch zur Erfassung der Aerosolpartikel im Größenbereich von ca. 1 μm bis ca. 100 μm . Die Messungen erfolgten bei trockener Witterung ohne Regenschild. (Bild: Hofmann)

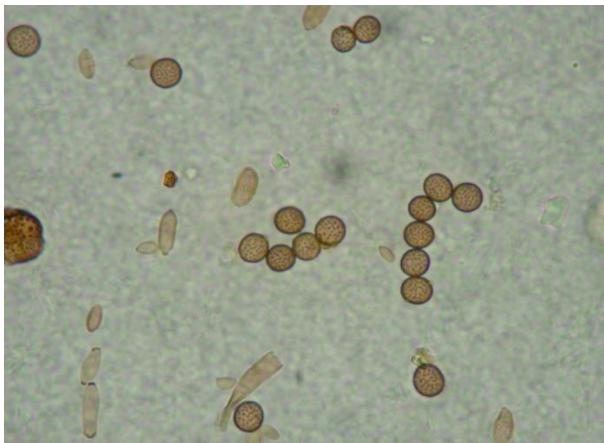
Der Klebestreifen wird nach der Probenahme in 48 mm lange Abschnitte unterteilt und diese auf Objektträger mit Moviol und Fuchsin als Färbelösung aufgebracht. Nach Aushärtung der Präparate werden diese unter dem Mikroskop (Nikon SZ1000 mit Digitalkamera) bei 100 bis 400facher Auflösung analysiert. Während des Feldversuchs wurden die Durchgangszeiten der Erntemaschine notiert, so dass ein zeitlicher Abgleich mit dem Verlauf der Aerosolabscheidungen vorgenommen werden konnte. Hierbei wurde das Passieren der Erntemaschine in orthogonalem Abstand zur Feldkante als auch in Abwindlage (Leeposition als Distanz zur Emissionsquelle) vermerkt. Die Lage des Expositionsortes wurde nicht feldmittig gewählt, so dass bei Spurwechsel auf der längeren Feldseite durch die Laufgeschwindigkeit der Erntemaschine eine sichere Differenzierung der Banden gewährleistet war und auf der kürzeren Seite eine mögliche Überlappung der Zeitfenster geprüft werden konnte.

Parallel wurden die standörtlichen Wetterdaten mit der mobilen Wetterstation Vantage 2 Pro von Davis mit Display und Datenlogger erfasst (Abb. 150 und Abb. 165). Die batterieversorgte semi-professionelle Anlage mit Funkübertragung erwies sich als recht praktikabel für den Zweck einer kurzzeitigen Feldmessung. Die Ergebnisse wiesen vergleichbare Werte zur naheliegenden DWD-Wetterwarte auf (30-Minuten-Mittelwerte).

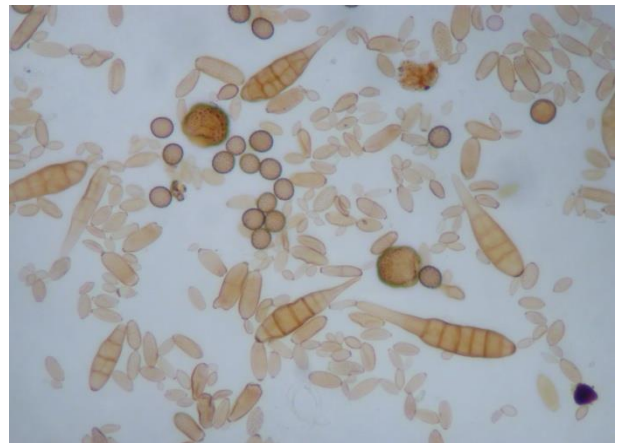
Die Ergebnisse der visuellen mikroskopischen Analyse (siehe Abb. 157) zeigten, dass sich unter mikroskopischer Auflösung die verschiedenen Aerosolbestandteile der Feinfraktion $<100\text{ }\mu\text{m}$ sich differenziert erfassen lassen. Ein hoher Anteil der Aerosolpartikel in der Abwindfahne der Maiserntemaschinen im Größenordnungsbereich $<100\text{ }\mu\text{m}$ bestand aus Pilzsporen (v.a. *Alternaria* und *Cladosporium*). Als weitere Bestandteile kamen insbesondere Maispflanzenteile (Fasern, Stärkekörner, Gewebebruchstücke, Haare), Bodenpartikel (anorganische Bestandteile und Humuspartikel), Pollen, Insektenteile und Algen vor. Die beim Schreddern freigesetzten Maisbestandteile waren vielfältiger Natur, eine Identifizierung der Maisbestandteile in der mikroskopischen Einzelpartikelanalyse war zwar hier möglich, wäre jedoch bei Mischeinträgen aus anderer Vegetation - was bei längeren Expositionszeiten zu erwarten wäre - nur bedingt möglich.

Die Ergebnisse aus der quantitativen Partikelanalyse der Fangstreifen sind in Tab. 22 verzeichnet. Mit der Sporewatch wurden vor allem die Feinpartikel im Größenbereich von 1 bis ca. $100\text{ }\mu\text{m}$ erfasst. Der gewählte Sammelmodus erlaubte ein Zeitfenster von 8,6 Minuten als minimale zeitliche Auflösung. Die Zeitdifferenz zwischen dem Vorbeiziehen der Erntemaschine beim Spurwechsel auf der längeren Feldseite lag mit 15 bis 27 Minuten stets darüber. Dies spiegelte sich in einer deutlichen Differenzierung erkennbarer Banden erhöhter Aerosolabscheidungen und Zwischenzonen wieder. Der Zeitunterschied auf der kürzeren Feldseite lag bei 3 bis 9 Minuten, so dass hier die Zeitfenster überlappten. Dies war auf den Präparaten zu erkennen, die Banden waren hier nicht mehr durch Zwischen-

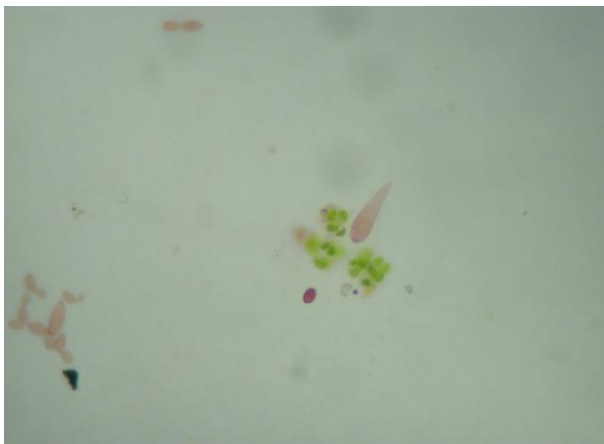
zonen getrennt. Der kontinuierliche Vortrieb der Trommel mit dem Fangstreifen bewirkte eine eindeutige zeitliche Zuordnung als „laufendes Fenster“, so dass aus den Partikel-Abscheidungen entsprechend der Verlauf der mittleren Konzentration der Luftbelastung über die Zeit erfasst werden konnte und eine eindeutige Zuordnung zu den einzelnen Erntespuren gelang.



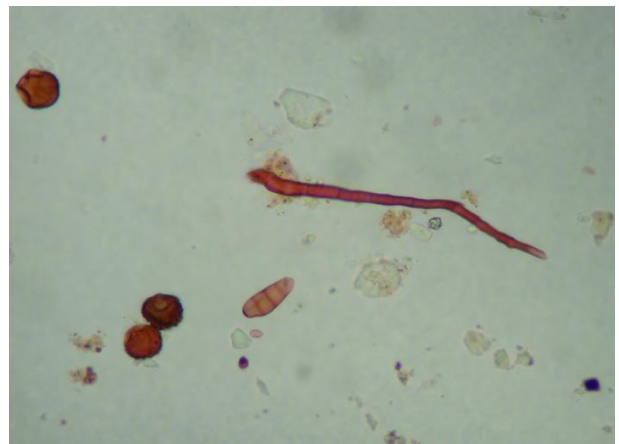
Sporen; linker Bildrand mittig Stärkekorn



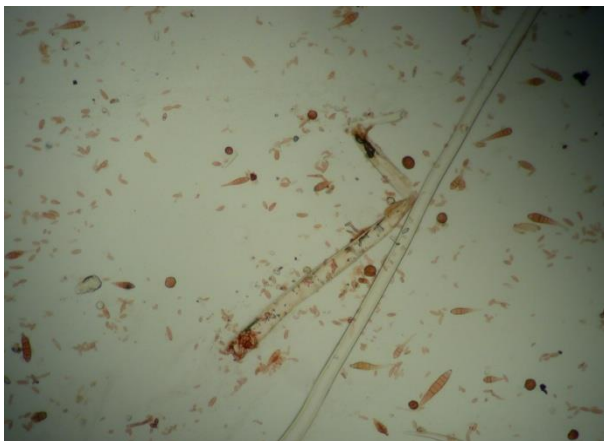
Pilzsporen, Stärkekörner



Grünalgen



Insektenbein, Stärkekörner, Sporen, Minerale



Maispflanzenfaser und Haar 100x



400x

Abb. 157: Charakteristische Aerosolpartikel der Feinfraktion $<100\ \mu\text{m}$ während der Maisernte (Sporewatch, 10 l/min). (Bilder: Hofmann/Kuhn)

Tab. 22: Ergebnisse der quantitativen Einzelpartikelanalyse aus den Luftkonzentrations-Messungen mit der Sporewatch (10 l/min). Alle Angaben in n/m³.

	Alter- naria	Clado- sporium	Sum Sporen	Mais- stärke körner	Mais- fasern	Pollen	Haare	Varia	Total
Vor/ Zwischen- spuren	5.708	50.740	56.449	8.245	634			2.051	77.379
Spur 1-2	29.267	654.399	683.666	14.420	761	3.552	3.298	14.126	719.824
Spur 3-4	31.713	335.521	367.234	14.588	1.903	2.537	1.903	22.199	410.363
Spur 5-6	31.713	408.460	440.173	16.491		6.343		21.565	484.571
Spur 7-8	13.954	233.406	247.359	52.009	1.269	5.074	1.269	26.639	333.618
Spur 9-10	6.343	36.787	43.129	53.277		1.269	1.269	16.491	115.434
Spur 11-12	8.880	177.591	186.471	15.222				13.954	215.647
Spur 13-14	5.074	101.481	106.555	8.880				7.611	123.045
Spur 15-16	3.806	58.351	62.157	7.611				3.806	73.574
MW	15.796	234.164	249.960	22.110	578	2.086	860	16.721	292.315
%	5,4 %	80 %	86 %	7,6 %	0,2 %	0,7 %	0,3 %	5,7 %	100 %

Auffällig war die sehr hohe Sporenbelastung von Mittelwerten bis über 500.000 Pilzsporen/m³ (quantifiziert für *Alternaria* und *Cladosporium*), die beim Erntevorgang in der Umgebungsluft entstanden. Die Werte in den Zwischenspuren betrugen um 50.000 Sporen/m³. Normalwerte von Sporen in der Luft variieren stark über das Jahr hinweg von < 1 pro m³ bis mehreren tausend pro m³ (siehe VDI 4350), Werte über 1.000 in der Außenluft gelten in der Regel als hoch belastet.

Die extrem hohe Sporenbelastung während der Maisernte in der Nähe der Felder wirft damit auch Fragen im Hinblick auf mögliche Gefahren für die Gesundheit und im Hinblick auf möglicherweise angeratene Arbeitsschutzmaßnahmen der Erntearbeiter auf. Dies sollte einer entsprechend näheren Prüfung unterzogen werden.

Seit einigen Jahren wird aufgrund lufthygienischer Untersuchungen über eine Zunahme der Sporenbelastung berichtet, für die bis dato keine zufriedenstellende Erklärung gefunden wurde. Der hier gezeigte hohe Einfluss der Maisernte auf die Sporenbelastung könnte in

Zusammenhang mit der erheblichen Zunahme des Maisanbaus ein möglicher Grund für das erhöhte Sporenaufkommen im Herbst darstellen, da die Erntezeit der meisten anderen Getreidearten zu der Zeit bereits vorüber ist.

Aus Abb. 158 gehen die Ergebnisse in Relation zur Entfernung hervor. Die Partikelkonzentrationen der Feinfraktion kleiner 100 µm zeigte entfernungsabhängige Unterschiede. Die Gesamtbelastung wird maßgeblich von den Sporen bestimmt. Bei den Sporen kommen Maxima bis in den Entfernungsbereich von 50 m vor, danach ist mit schwankenden Werten ein tendenzieller Rückgang der Luftbelastung auf Werte der Zwischenspur als Referenz bis in den größten Entfernungsbereich von 130 m erkennbar. Die freigesetzten Maisstärkekörner lagen im Größenordnungsbereich <63 µm, wobei die Anzahl feinerer Partikel < 20 µm deutlich überwog. Die Maximalwerte wurden hier im mittleren Entfernungsbereich 59-83 m gemessen.

Das Verfahren der kontinuierlichen Erfassung mittels volumetrischer Sammler, hier Sporewatch nach Hirst mit 10 l/min, eignet sich zur zeitlich differenzierten Erfassung der Feinpartikel kleiner 100 µm, die bei der Maisernte auftreten. Die Ergebnisse zeigen, dass der Erntevorgang mit einer extrem hohen Sporenbelastung verbunden ist.

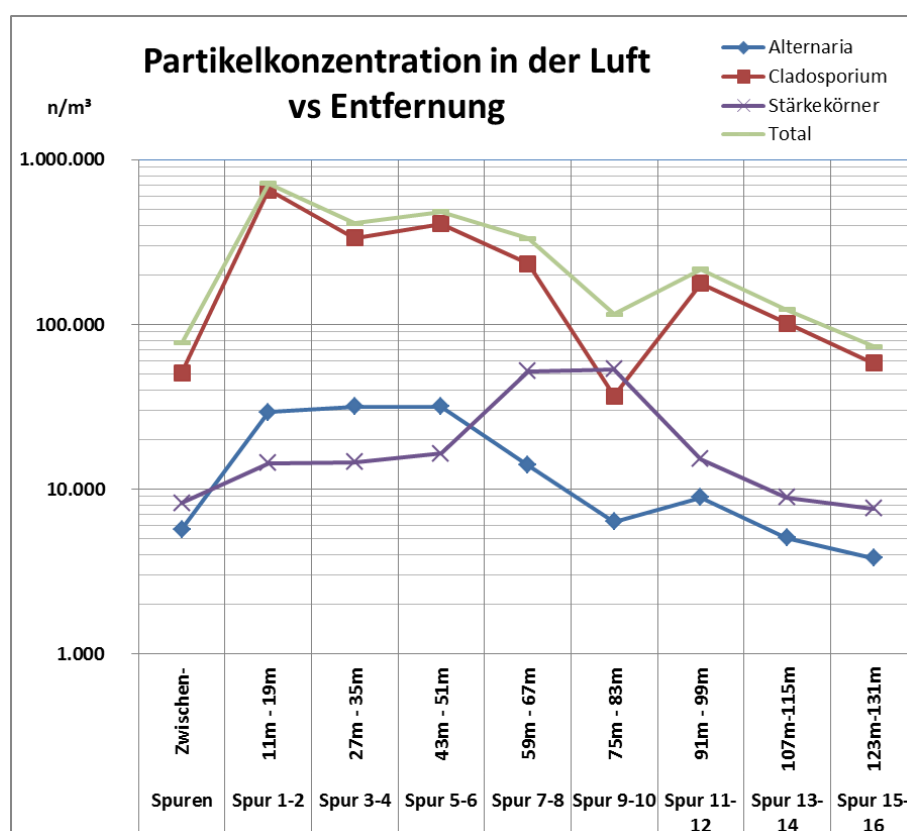


Abb. 158: Entfernungsabhängige Partikelkonzentration in der Luft während der Erntedurchgänge des Maishäckslers am 14.9.2009 gemessen mit der Sporewatch. (Grafik. Hofmann)

5.8 Quantifizierung der Streueinträge in Relation zur Entfernung im Jahr 2010

Mit den Versuchen im Jahr 2009 konnte die Methodik zur Erfassung des aerogenen Streueintrages während der Maisernte getestet und erste Ergebnisse zum Ausbreitungsverhalten gewonnen werden. Im Herbst 2010 wurden weitere systematische Untersuchungen zum aerogenen Streueintrag durchgeführt.

Hierzu wurde ein verbesserter Streufallen-Typ aus transparentem Kunststoff mit hohen Rändern (OKT Multibox XXL, 52 cm x 43 cm x 26 m) eingesetzt, so dass sowohl Grob- als auch Feinstreupartikel erfasst werden (siehe Abb. 161 ff.). Der hohe Rand dient der Vermeidung von Ausblaseeffekten, zusätzlich wurden die Innenflächen der Boxen mit einem Sprühgerät angefeuchtet. Der Fallentyp ist funktional und günstig, so dass er in hoher Stückzahl einsetzbar ist.

Während der Maisernte (Häckseln) wurden 142 Streufallen in Abwindrichtung des Versuchsfeldes von 1 m bis 200 m Abstand zum Feldrand entfernt positioniert. Das Versuchsdesign wird in Abb. 159 skizziert. Die Streufallen wurden entlang dreier Transsekte, einer annähernd potentiellen Abstandsfunktion entsprechend, gleichmäßig und mit Entfernung zunehmender Sammelfläche verteilt. Der mittlere Transsekt wurde hierbei mit Zwischenabständen versehen. Die Transsekte wurden vom Feldrand V-förmig aufeinander zulau fend angeordnet, so dass auch die weiter entfernten Fallen bei Windrichtungsänderungen möglichst optimal im Abwindsektor lagen (Abb. 160 - Abb. 163). Ergänzend wurden 6 Fallen in einem an ein Maisfeld angrenzendes Gewässer („Soll“) im Raum Schmargendorf exponiert (Abb. 164).

Um feinere Streuanteile kleiner 100 µm zu erfassen, wurde ein Aktivsammler eingesetzt (Sporewatch, Burkard Scientific Ltd.), der darüber hinaus eine zeitliche Auflösung erlaubt (Abb. 165).

Zusätzlich wurde eine mobile Meteorologie-Messstation (Davis Vantage Pro 2, Abb. 166) eingesetzt, die mit Windmesser (3 m Höhe), Temperatur-, Feuchte- und Regensensor sowie einem externen Display mit Funkübertragung und Datenlogger ausgestattet war.

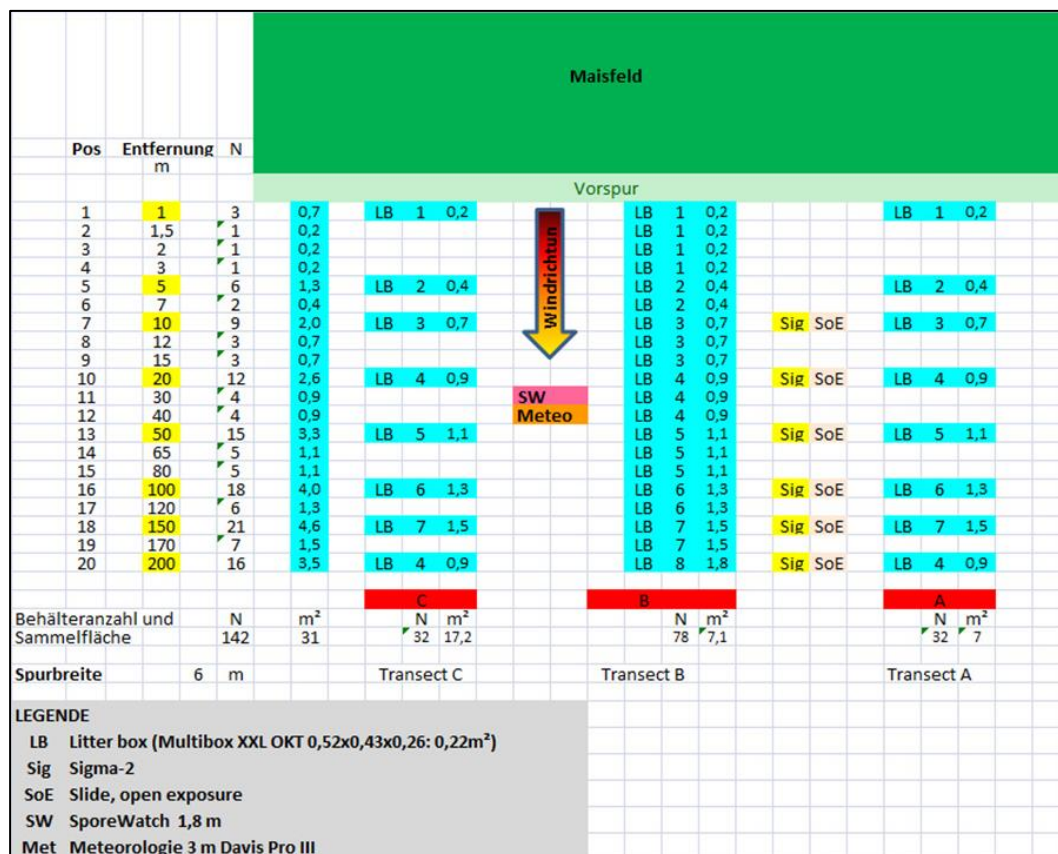


Abb. 159: Schema des Versuchsdesigns zur Erfassung des Streueintrages während der Maisernte im Oktober 2010. (Grafik: Hofmann)



Abb. 160: V-förmige Anordnung der Transsekte mit den Streufallen auf der vornehmlichen Abwindseite des Maisfeldes für eine möglichst breite Abdeckung von Windrichtungs-Änderungen. (Bild: Hofmann)



Abb. 161: Streufallen (OKT Multi Box XXL, 0,22 m²: 52 cm x 43 cm x 26 cm). Rechts daneben der Passivsammler Sigma-2. Transsekt A mit Blick auf Feldrand, Vordergrund Standort in 20 m Entfernung vom Feldrand. (Bild: Hofmann)



Abb. 162: Anordnung der Streufallen (LB: litter boxes) entlang des mittleren Transsektes B, beginnend 1 m vom Feldrand bis in 200 m Entfernung. Die Fallen im Nahbereich sind versetzt angeordnet zur Vermeidung von Anströmeffekten. (Bild: Hofmann)



Abb. 163: Lage der ersten Streufallen entlang Transsekt B aus Seitenansicht vom Feldrand bis 10 m Entfernung. (Bild: Hofmann)



Abb. 164: Positionierung der Streufallen im Gewässer („Soll“) neben einem Maisfeld. (Bilder: Hofmann)



Abb. 165: Mobile Meteorologie-Messstation mit Funkdisplay und Datenlogger (Davis Vantage Pro II), Windmesser (Richtung und Geschwindigkeit) in 3 m Höhe, Temperatur-, Feuchte- und Niederschlagssensor in 1,5 m; rechts volumetrischer Aerosolsammler Sporewatch (1,8 m Höhe, 10 l/min; Burkard Scientific Ltd.) (Bild: Hofmann)

Die Maisernte erstreckte sich am Hauptfeld im Herbst 2010 mit Unterbrechungen über 3 Tage (2.10., 6.10., 7.10.2010).

In Abb. 166 wird der Erntevorgang illustriert. Über die Erntemaschine wird in einer 6 m breiten Spur der Mais bodennah geschnitten und Stängel, Blatt und Kolben in zentimetergroße Stücke gehäckselt. Das Häckselgut wird in der Maschine auf Feuchte analysiert und über den Schwenkarm in den Anhänger des nebenher fahrenden Traktors überführt. Ausnahme ist die erste Erntespur im Feld, wo der Sammelwagen hinter der Erntemaschine fährt. Bei Bedarf kann ein Feuchtemittel mit einer speziellen mikrobiologischen Impfung für die Silage appliziert werden. Damit möglichst wenig Erntegut verlorengelassen, müssen sich die Fahrer von Erntemaschine und Traktor spurtreu und mit gleicher Geschwindigkeit bewegen, wofür eine gute Abstimmung der Fahrer bei der Fahrzeuge erforderlich ist.



Abb. 166: Erntevorgang von Mais mit Häcksler und begleitendem Sammelfahrzeug. (Bild: Hofmann)



Abb. 167: Eintrag von Streu in Umwelt: Allgemein durch Wind, besonders hoher Eintrag bei ungenauer Positionierung des Sammelfahrzeuges, hohem Füllstand und bei Wechsel des Sammelfahrzeuges. (Bilder: Kuhn/Hofmann)

Beim Erntevorgang gelangt ein Teil der Streupartikel in die Umwelt (Abb. 167)⁵³, vor allem dann, wenn die gehäckselte Streu von der Erntemaschine in den Sammelwagen überführt wird. Ein Verlust von Erntegut erfolgt durch Windverblasen und im besonderen Maße durch mangelnde Synchronisation zwischen Erntemaschine und Taktor über eine ungenaue Positionierung des Schwenkarms der Erntemaschine zum Sammelfahrzeug. Letzteres passiert leicht bei hohem Füllstand und beim Wechsel des Sammelfahrzeuges.

In Abb. 168 wird beispielhaft eine Streufalle nach Durchgang der Erntemaschine gezeigt. Gut zu erkennen sind die größeren Bestandteile der Maisstreu.

Nach Abschluss des Erntevorgangs wird die Streuprobe durch Ausspülen der Falle in ein verschließbares Glasgefäß überführt (Abb. 169). Das Beispiel zeigt eine Probe aus 1 m Entfernung. Die Proben werden zum Schutz vor Lichteinfall mit Aluminiumfolie ummantelt und kühl aufbewahrt (Kühlschrank).

Die Separation der Streupartikel aus der wässrigen Probe mit Auftrennung der Größensfraktionen erfolgte im Labor nach der in 2009 ausgearbeiteten Methode. Zunächst wurde die Streuprobe im Glasgefäß zur Dispersion abgesetzter und anhaftender Feinpartikel 30 Sekunden im Ultraschallbad (Sonorex) unter Zugabe von ca. 50 ml 0,1 %-iger Tickorpurlösung (Detergenz für Ultraschallanwendung) behandelt und dann unmittelbar mittels Nasssiebung über eine Siebkaskade in gröbere und feinere Bestandteile aufgetrennt. Hierzu wurde eine Siebmaschine verwendet (Analysette Pro der Firma Fritsch, Einstellung Mikro) mit einer Siebkaskade bestehend aus zwei Analysesieben von 100 mm Durchmesser mit den Maschenweiten 1 mm und 63 µm und einer Siebpfanne mit seitlichem Auslauf zum Auffangen des Durchlaufgutes mit Partikeln < 63 µm in ein 1.000 ml-Becherglas (Abb. 170a).

⁵³ Die unterhalb der Schnittfläche verbleibende Pflanzenteile (Stengel- und Wurzelkörper) verbleiben zwar auch in der Umwelt, sind allerdings im Boden verhaftet und werden in der Regel nicht mit dem Wind verfrachtet.



Abb. 168: Streufalle nach Durchgang der Erntemaschine. Gut zu erkennen sind die größeren Bestandteile des eingetragenen Maisstreuerguts. (Bild: Hofmann)



Abb. 169: Überführung der Streuprobe aus dem Sammelgefäß im Gelände in ein verschließbares Glasgefäß mittels Spritzflasche; rechts Beispiel einer Streuprobe aus 1 m Entfernung. (Bilder: Hofmann)

Die Abscheidung der Proben erfolgte dann per Vakuumfiltration (Sartorius, Abb. 170b) auf 12 μm Membranfilter (Whatman) und Aufbewahrung in 50 mm-Petrischalen oder bei größeren Mengen (Grobfraktion) in verschließbare 125 ml-Kunststoff-Einmalgefäße (siehe Abb. 171). Die Trocknung der Proben wird in den Gefäßen bei 60°C im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz durchgeführt (Feinfraktion <63 μm 6 h, <1 mm 24 h und Grobfraktion >1 mm je nach Masse ca. 48 h). Anschließend werden die Proben über eine Präzisions-Laborwaage abhängig vom Gesamtgewicht auf bis zu 0,01 mg Genauigkeit ausgewogen (Sartorius Analytic AC 120S). Für die Ermittlung der Streudeposition in g pro m^2 Flächeneinheit wird die gemessene Probenmenge [g] durch die jeweils angelegte Sammelfläche [m^2] geteilt.



Abb. 170: a) Siebmaschine (Analysette Pro, Fritsch GmbH) mit Siebkaskade aus Analysesieben (100 mm Durchmesser) mit Maschenweiten 1 mm (oben), 63 μm (mittig) und Siebpfanne mit seitlichem Auslauf zum Auffangen des Durchlaufgutes mit Partikeln < 63 μm in 1.000 ml – Becherglas; b) Abscheidung der Partikelfractionen mittels Vakuumfiltration (Sartorius) auf 12 μm Membranfilter zur anschließenden Trocknung und Wiegung. (Bilder: Hofmann)



Abb. 171: Beispiele einer größenfraktionierten Maisstreuprobe (Bilder: Hofmann)

Rechts: Grobpartikel > 1mm;

Mitte: Feinpartikel < 1mm und > 63 μ ;

Unten: Feinpartikel < 63 μ m und größer 12 μ m.

Die Ergebnisse aus den Streueintrags-Messungen im Jahr 2010 sind in Abb. 172 in Abhängigkeit von der Entfernung zum Maisfeldrand zusammenfassend dargestellt. Auf der waagerechten x-Achse ist die Entfernung in m im logarithmischen Maßstab aufgetragen, die senkrechte y-Achse bezeichnet die Streudeposition in g Trockensubstanz pro m². Dargestellt sind die Ergebnisse für Gesamteintrag, Grobfraktion >1 mm und Feinfraktion <1 mm sowie die Feinfraktion differenziert in die Fraktionen >63 μ m - 1 mm und >12 μ m - 63 μ m. Deutlich ist für sämtliche Fraktionen der Maisstreu ein entfernungsabhängiger Gradient bis in den Entfernungsbereich von ca. 100 m zu erkennen. Die Ausprägung des Gradienten hängt hierbei von der Partikelgröße ab und stellt sich wie folgt für die einzelnen Fraktionen dar.

Der Gesamteintrag an Maisstreu im Jahr 2010 (rote Kurve mit Kreismarkierung) beträgt in 1 m Entfernung 15 g/m² und nimmt in Form eines stetigen Gradienten mit der Entfernung ab. Er lässt sich bis in den Entfernungsbereich von ca. 100-120 m verfolgen, wo sich der Streueintrag auf einen Hintergrundlevel von ca. 0,02 bis 0,04 g/m² einpendelt.

Die Grobfraktion mit Streupartikeln größer als 1 mm (grüne Kurve mit Rechteckmarkierung) weist den größten Anteil im unmittelbaren Nahbereich mit ca. 10 g/m² in 1 m Entfernung auf und nimmt erwartungsgemäß am raschesten mit der Entfernung ab. Der Gradient ist deutlich und konsistent ausgeprägt und lässt sich bis in den Entfernungsbereich von 20-30 m verfolgen, die Kurve pendelt sich auf einen Hintergrundlevel von 0,01-0,02 g/m² ein.

Die Summe der Feinfraktion <1 mm (blaue Kurve mit blauer Dreieckmarkierung) beginnt in 1 m Entfernung mit einem Eintrag von ca. 3 g/m² und zeigt ebenfalls einen stetigen Gra-

dienten, der allerdings deutlich schwächer abfällt als Grob- und Gesamtstreu bis in ca. 15 m Entfernung, wo die Kurve auf einen parallelen Verlauf zum Gesamtstaub einschwenkt und von da an rascher abnimmt bis in den Entfernungsbereich von 100-120 m, wo sie ebenfalls Hintergrundniveau erreicht (ca. 0,02 g/m²).

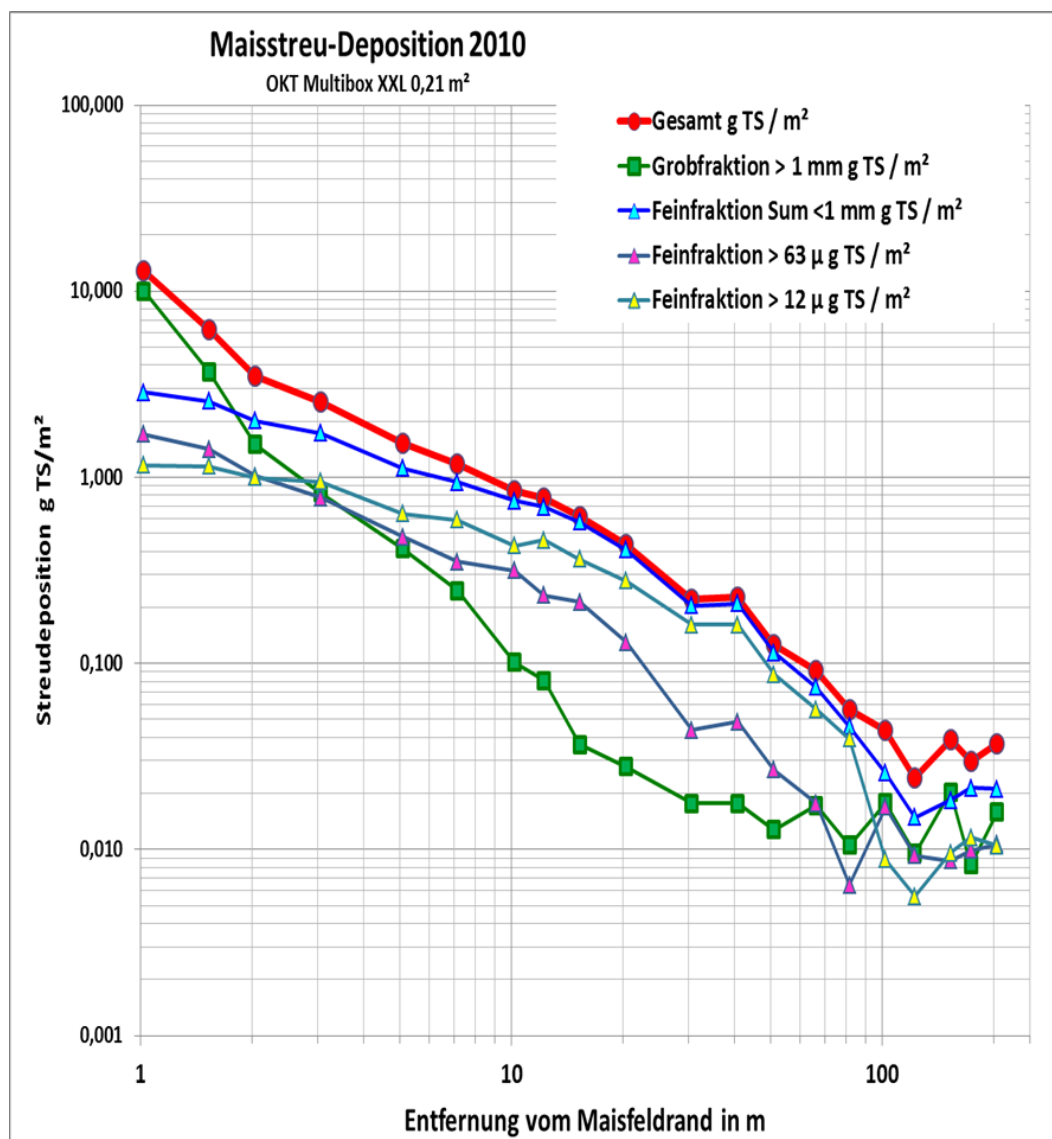


Abb. 172: Eintrag von Maisstreu in Relation zur Entfernung vom Maisfeldrand aus den Versuchen in 2010 in Kerkow bei Angermünde in Brandenburg. (Grafik: Hofmann)

Die differenzierte Betrachtung der Feinfraktion zeigt, dass die Feinfraktion >63 µm bis 1 mm (blaue Kurve mit lila Dreiecken) von ca. 1,6 g/m² in 1 m Entfernung einen gleichmäßigen Gradienten bis in ca. 15-20 m Entfernung aufweist, dann beginnt steiler abzufallen, bis sie ebenfalls in ca. 100 m Entfernung auf ein Hintergrundniveau von ca. 0,01 g/m² einschwingt.

Die Feinfraktion $<63\mu\text{m}$ bis $12\mu\text{m}$ startet mit dem geringsten Massenanteil in 1 m Entfernung von ca. $1,1\text{ g/m}^2$ und zeigt einen deutlich flacheren Abfall des Gradienten als die anderen Fraktionen, der bis in den Entfernungsbereich von 40-50 m anhält. Danach zeigt auch diese Fraktion einen stärkeren Abfall mit Einschwenken auf Hintergrundniveau im Entfernungsbereich 100-120 m.

Die zu beobachtenden Verläufe ergeben ein stimmiges Bild: Die gröbste Fraktion zeigt den stärksten Abfall, umso feiner die Partikel, desto flacher der Gradient. Von der Masse her stellt die Grobfraktion den größten Anteil im Nahbereich bis in ca. 2-5 m Entfernung, ab ca. 5 m überwiegt die Feinfraktionen $>61\mu\text{m}$ und von ca. 10-20 m an die der Feinpartikel $<63\mu\text{m}$.

5.9 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse zum Pollen- und Streufalleintrag in Gewässerökosysteme

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen 2009 und 2010 zum Eintrag von Pollen und Streu aus dem Maisanbau in Gewässerökosysteme lassen sich wie folgt zusammenfassend bewerten:

Der Vergleich der Ergebnisse aus den beiden Jahren 2009 und 2010 zur Streufalldeposition in Abb. 173 weist deutliche Ähnlichkeiten im Verlauf der Gradienten, d.h. in der Abnahme über die Distanz, auf, so dass sich die Ergebnisse gegenseitig stützen. Aus den Ergebnissen lassen sich daher plausibel erste Ausbreitungsgradienten für Streurückstände aus der Maishäckselernte ableiten.

In den absoluten Werten zur Streudeposition liegen die Werte aus dem Jahr 2009 etwas höher als 2010. Ein wesentlicher Grund dürfte in der unterschiedlichen Witterung liegen. Im Jahr 2009 erfolgte die Ernte im September bei trockenem, sonnigen und windigen Wetter, die Maispflanzen und die Streupartikel waren demgemäß relativ trocken und wurden daher leichter verblasen. Im Jahr 2010 erfolgte die Ernte Anfang Oktober bei deutlich kühlerer Witterung mit höherer Luftfeuchtigkeit, die Maispflanzen waren morgens feucht vom Tau und trockneten erst langsam ab.

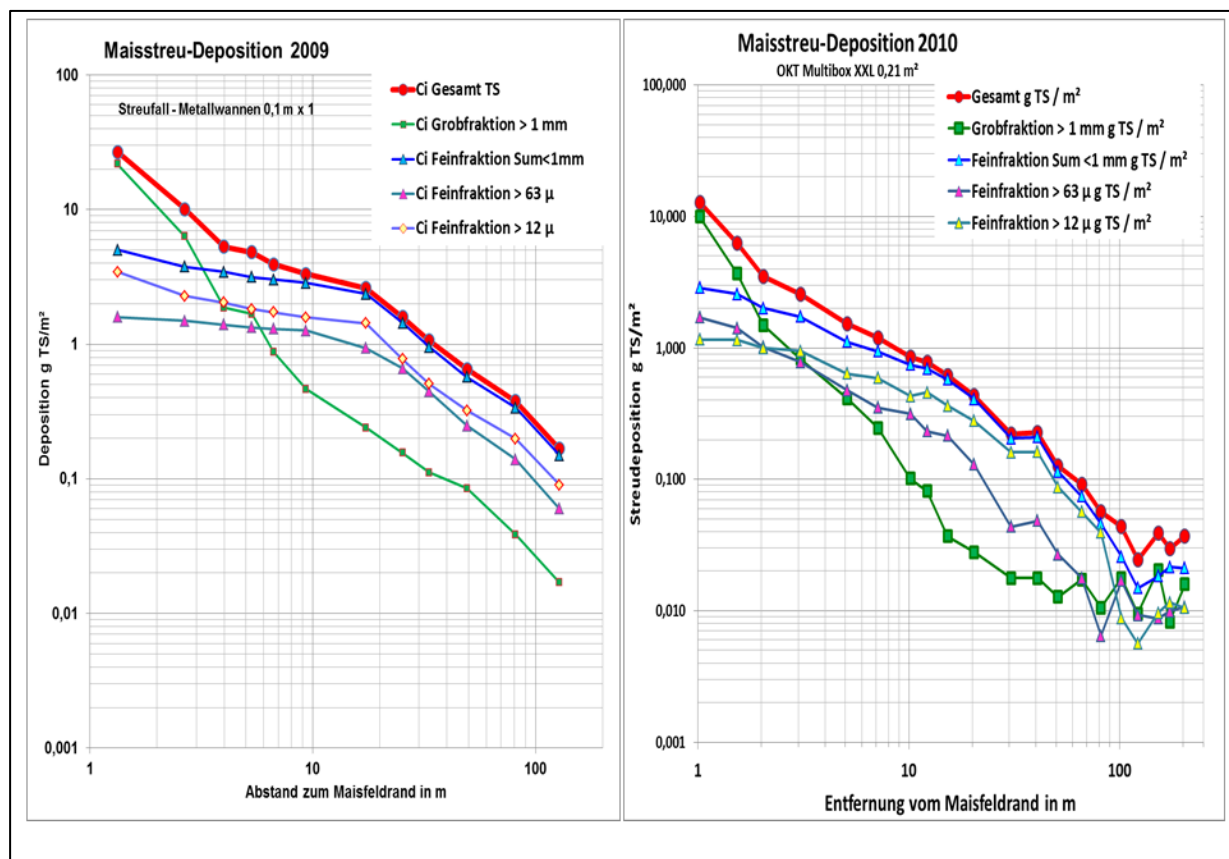


Abb. 173: Vergleich der Gradienten zur Streu-Depositionen in Relation zur Entfernung aus den beiden Versuchsjahren 2009 und 2010. (Grafik: Hofmann)

Der Eintrag von Pollen und Streu aus dem Maisanbau in Gewässerökosysteme ist trotz der hohen Bedeutung des Maisanbaus für Agrarökosysteme erst relativ spät untersucht worden. TANK ET AL. (2010a) berichten, dass Maisstreu einen verbreiteten Eintrag in Gewässerökosysteme darstellt und dort lange Verweilzeiten aufweist. Selbst sechs Monate nach der Ernte findet man noch Maisstreuteile in den Gewässern (siehe Abb. 175a, b). Maisstreu nimmt bis zu 17 % des im Gewässer transportierten allochthonen partikulären Kohlenstoffes im Mittleren Westen der USA unter normalen Abflussbedingungen ein, mit deutlich höheren Anteilen bei Hochwasser-Ereignissen (DALZELL ET AL. 2007, MUNSON & CAREY 2004, STONE ET AL. 2005). Quantitative Angaben zum Eintrag von Pollen und Streu aus dem Maisanbau in Gewässer-Ökosysteme der Agrarlandschaft - mit Bezug zum GVO-Anbau – finden sich in nur drei Untersuchungen: ROSI MARSHALL ET AL. (2007) und TANK ET AL. (2010b) für den mittleren Westen der USA (Indiana) (siehe Abb. 174 und Abb. 175) und JENSEN ET AL. (2010) für Maryland, USA. Die Ergebnisse lassen sich mit unseren Untersuchungsbefunden wie folgt vergleichen:

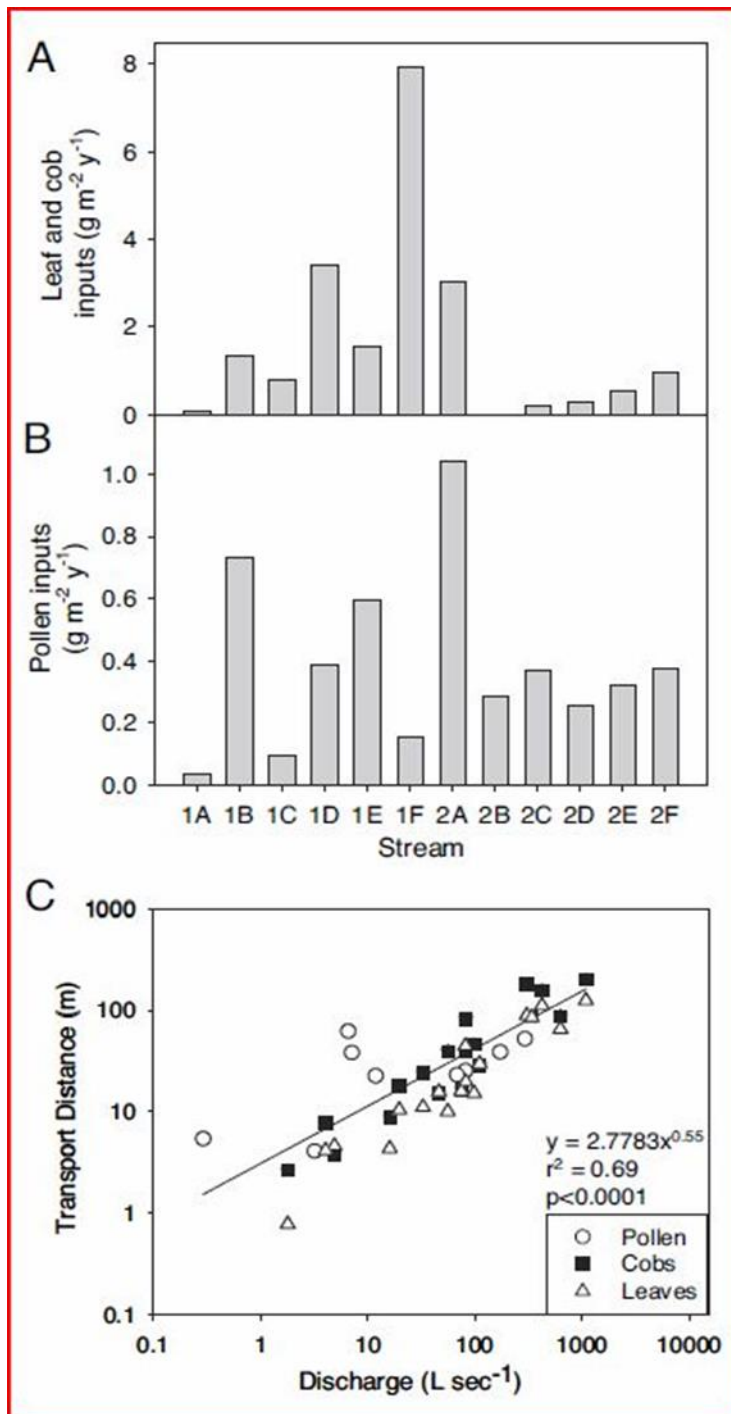


Fig. 2. Input rates and transport distances of corn byproducts in 12 streams (1A–1F and 2A–2F) in northern Indiana. (A and B) Annual leaf litter and cob (A) and corn pollen (B) input rates in $\text{g m}^{-2} \text{y}^{-1}$. (C) Relationship between transport distances of pollen, leaves, and cobs across a range of discharges for 12 streams ($r^2 = 0.69$, $P < 0.0001$, $y = 2.78x^{0.55}$).

Abb. 174: Eintragsraten und Transportdistanzen von Maispollen und -streu für 12 Gewässer in Indiana, USA (aus: ROSI-MARSHALL ET AL. 2007, Fig. 2).

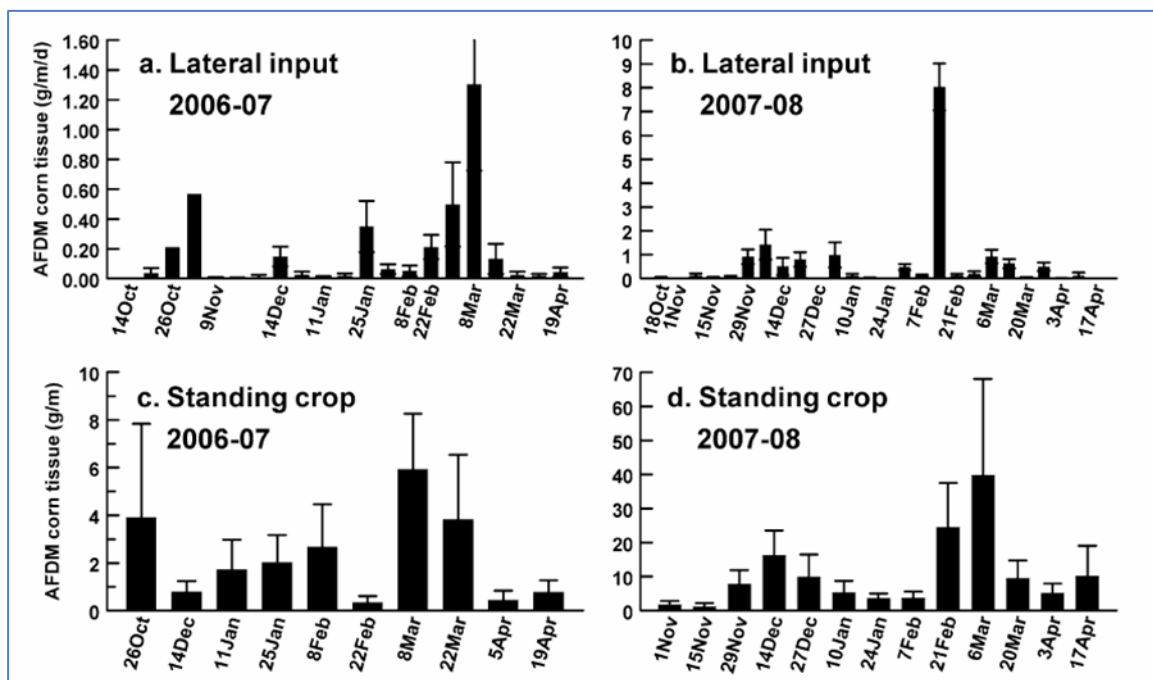


Abb. 175: Lateraler Eintrag von Maispflanzengeweben nach der Ernte in ein angrenzendes Gewässer (Mittelwerte). a) Laterale Einträge 2006-2007. b) Laterale Einträge 2007-2008. c) Mais-Biomasse Acker 2006-2007. d) Mais Biomasse Ackerfläche 2007-2008. (aus: JENSEN ET AL. 2010, Fig. 1) [Anmerkung: Die Einträge sind auf 1 m² Fläche bezogen, so dass die Einheiten korrekterweise lauten müssen: g/m² und g/m²/d].

Der Eintrag von Maispollen über die Luft (Abb. 174B) aus dem Maisanbau im Mittleren Westen der USA wurde von ROSI-MARSHALL ET AL. (2007) im Bereich 0,1-1 g TS/m² festgestellt, mit Abständen vom nächsten Maisfeld von 6-41 m. Nach unseren Untersuchungen in Brandenburg sind Einträge für diesen Entfernungsbereich von 0,01-0,9 g TS/m² zu erwarten, so dass unsere Untersuchungen die Ergebnisse von ROSI-MARSHALL ET AL. (2007) bestätigen. Aus unseren Ergebnissen lässt sich darüber hinaus ableiten, dass im Nahbereich von Maispollenquellen Polleneinträge bis 5 g TS/m² und im Mittel um 0,6 g TS/m² zu erwarten sind. Die Untersuchungen von ROSI-MARSHALL ET AL. (2007) wurden anhand von Erhebungen an 12 Standorten gewonnen, jeweils 6 im Jahr 2005 und 6 im Jahr 2006. Unsere Untersuchungen zur Pollendeposition in Relation zur Entfernung vom nächsten Maisfeld beruhen auf Erhebungen an insgesamt 216 Standorten aus den Jahren 2001 bis 2010, wobei die statistische Regressionsanalyse anhand der Ergebnisse in den Jahren 2001 bis 2006 mit 122 Standorten vorgenommen wurde und die weiteren Ergebnisse der Jahre 2007-2010 diesen Zusammenhang bestätigten (s. Kap. 3.4.4). Die Aussagen zum aerogenen Polleneintrag beruhen damit auf einer breiten Datenbasis und einer statistisch gesicherten Ableitung einer Abstandsfunktion.

Streueinträge: Die Ergebnisse von ROSI-MARSHALL ET AL. (2007) an 12 Standorten zeigen Streueinträge in Gewässerökosysteme im Bereich von 0,1-7,9 g TS/m² über den Entfernungsbereich 6-41 m an (Abb. 174A, Abb. 175a, b). JENSEN ET AL. (2010) führten ihre Mes-

sungen bei einem angrenzenden Gewässer in Maryland, USA, über 4 Jahre durch und beobachteten Werte von 29,9-62,7 g/m². Nach den Ergebnissen unserer Untersuchungen in Brandenburg in 2009 und 2010 wurden für den Abstandsbereich von 6-41 m Streueinträge von ca. 0,2-4 g TS/m² festgestellt, im Nahbereich bis 27 g TS/m² gehend. Damit bestätigen unsere Ergebnisse die Ergebnisse sowohl von ROSI-MARSHALL ET AL. (2007) als auch von JENSEN ET AL. (2010) zum Streueintrag. Unsere Untersuchungsergebnisse ergänzen diese durch Differenzierung der Partikel-Fraktionen und Ausweisung von entfernungsabhängigen Gradienten. Diese erklären auch die unterschiedlichen Wertebereiche bei ROSI-MARSHALL ET AL. (2007) und JENSEN ET AL. (2010), da die Erhebungen unterschiedliche Abstandsbereiche (siehe oben) berücksichtigten.

Unsere Ergebnisse weisen für die einzelnen Streufraktionen unterschiedlich ausgeprägte Gradienten aus. Der Vergleich der Masseneinträge von Streu und Pollen zeigt, dass im Nahbereich die Streueinträge um ca. eine Größenordnung gegenüber den Polleneinträgen überwiegen und im weiteren Entfernungsbereich über ca. 50 m Entfernung Feinpartikel und Pollen.

Im Hinblick auf Abstandsgrenzen zur Reduzierung von Streueinträgen ist dies von großer Bedeutung, da die biologisch-ökologischen Wirkungen von der Partikelgröße der Streufraktion abhängen. Dies betrifft sowohl die Freisetzung von Schadstoffen ins Gewässer, wie z.B. das *Bt*-Toxin, als auch die Bioverfügbarkeit. Größere Partikel bedürfen zunächst der Zerkleinerung, bevor sie für andere, kleinere Organismen verfügbar sind. Die Zersetzungs- und Abbauvorgänge laufen hierbei in der Regel in mehreren Stufen ab, wobei ganze Organismen-Gemeinschaften mit unterschiedlichen Spezialisierungen bis hin zum mikrobiellen Abbau beteiligt sind. Obgleich dies zu den Grundfunktionen von Gewässerökosystemen zu zählen ist, wurden in den bisher durchgeführten Untersuchungen, auch in der Risikoabschätzung von CARSTENS ET AL. (2011), Feinstreupartikel unter 1 mm nicht weiter differenziert.

Kleinere Partikel können jedoch von Gewässerorganismen leichter aufgenommen werden, ebenso treten Schadstoffe schneller ins Wasser über, wie z.B. das *Bt*-Toxin, so dass die Feinfraktionen der Streu für einen größeren Organismenkreis unmittelbar bioverfügbar sind. In filtrierenden Benthos-Organismen wie Muscheln können erhebliche Anreicherungen von Stoffen erfolgen, wie dies bereits DOUVILLE ET AL. (2007) am Beispiel des *Bt*-Mais und Gewässern zeigten. In der Risikoabschätzung von CARSTENS ET AL. (2011) blieb dieser Aspekt unberücksichtigt. Größere Partikel hingegen können von den kleineren Gewässerorganismen nicht direkt aufgenommen werden und bedürfen zunächst einer Zerkleinerung und Aufschließung. Dies erfolgt über entsprechende Zersetzergemeinschaften, die dann als erste exponiert sind.

Um die Belastungen durch Einträge zu reduzieren sind daher nicht nur der Gesamteintrag, sondern vielmehr auch die einzelnen Größenfraktionen zu beachten. Unsere Ergebnisse erlauben erstmals differenzierte Erkenntnisse zur Streu- und Ausbreitung über den Luftpfad und zum Eintrag in die Gewässer in Abhängigkeit von der Partikelgröße. Damit ist eine wissenschaftliche Grundlage für eine Ableitung geeigneter Abstandsregeln für den GVO-Maisanbau im Hinblick auf Gewässer gegeben. Die Datenbasis zum Streueintrag erlaubt plausible Schlussfolgerungen, ist aber noch exemplarisch zu bewerten und gilt vorbehaltlich einer Absicherung über weitere Freilanduntersuchungen.

In Abb. 174C von ROSI-MARSHALL ET AL. (2007) wird auf einen weiteren Aspekt hingewiesen, der für die Expositionsabschätzung von Gewässern von Bedeutung ist: Die Beziehung der Transportdistanz eingetragener Substanzen wie Pollen, Streu und Kolben im Gewässer in Abhängigkeit von der Abflussmenge und damit auf die grundsätzliche Eigenschaft von Fließgewässern im Gegensatz zu terrestrischen Ökosystemen, dass eingetragenes Material über größere Distanzen regelmäßig weiter verfrachtet werden kann. Besonders bei Hochwasserereignissen können eingetragene Stoffe über mehrere Kilometer weiter verdriftet werden.

Dies hat zur Folge, dass nicht nur unmittelbar an ein Maisfeld angrenzende Gewässerabschnitte exponiert werden, sondern sich dies auch an weiter entfernte, am Unterlauf gelegene Gebiete auswirken kann. Beim Transport ist nicht nur mit einer Verdünnung, sondern auch mit Akkumulationen zu rechnen, wie z.B. an überschwemmten Uferbereichen, Auen, Senken, an Hindernissen wie Wehren und Brücken, Buchten, Ufer- und Schilfzonen. Hierbei sammeln sich die aus dem verzweigten Oberlauf eingetragenen Stoffe, so dass es zu massiven Streuakkumulationen kommen kann, deren Konzentration um das Vielfache höher als an den einzelnen Eintrittsstellen bei den Maisfeldern ausfallen kann.

In der bisherigen Risikobewertung (siehe z.B. CARSTENSEN ET AL. 2011) werden nur die direkten Einträge angesetzt und die in Fließgewässern vorkommenden Akkumulationsprozesse im Gewässer vernachlässigt. Worst-Case-Annahmen sind daher - anders als von den Autoren behauptet - nicht angemessen berücksichtigt.

Unsere Ergebnisse belegen, dass sich über Abstandsregelungen die Exposition von Gewässerökosystemen wirksam mindern lässt. Um die aerogenen Streu- und Polleneinträge effektiv zu reduzieren halten wir Abstände des *Bt*-Maisanbaus zum Gewässer im Bereich von 50 m bis 100 m für erforderlich. Geringere Abstände unter 50 m wirken sich für die Feinpartikel kaum nennenswert aus und Abstände über 100 m lassen sich messtechnisch nicht mehr differenzieren.

6. Zusammenfassung

In dem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundes (BMU) und Landes Brandenburg (MUGV) wurden für die Risikobewertung von *Bt*-Mais drei Aspekte behandelt:

- Validierung der Ausbreitungsmodellierung für Maispollen anhand von Freiland-Daten.
- Erfassung der Variabilität der spezifischen Maispollendeposition auf Futterpflanzen von Schmetterlingen.
- Ermittlung der Exposition von Gewässerökosystemen durch Maispollen und -streu.

Das Vorhaben wurde im Juni 2009 begonnen. Es beinhaltete drei Phasen mit Freilandmessungen in den Jahren 2009 bis 2011 im Raum Angermünde in Brandenburg und wurde im Sommer 2012 erfolgreich abgeschlossen. Die Ergebnisse wurden auf einer Fachveranstaltung am 8. Oktober 2012 in Berlin präsentiert und die Beiträge als Tagungsband veröffentlicht (VÖGEL ET AL. 2013).

6.1 Validierung der Ausbreitungsmodellierung für Maispollen anhand von Freilanddaten

Ausbreitungsmodelle stellen bewährte Instrumente der Regelungspraxis dar. Allerdings zeigten sich bei der Ausbreitungsmodellierung von Maispollen Widersprüche zwischen Modellvorhersagen und Freilandmessungen (HOFMANN ET AL. 2009a). Der Gradient der Maispollenausbreitung mit einem Lagrange Partikel-Modell verläuft nach Messergebnissen aus dem Freiland deutlich flacher als per Modell berechnet. Dies bedeutet dass im Entfernungsbereich von über 10 m vom Feldrand aus beginnend und zunehmend ausprägend im Schnitt mehr Partikel gemessen wurden als im Modell vorhergesagt (long extending tail, siehe AYLOR ET AL. 2003). Ähnliche Befunde wurden auch von weiteren Autoren berichtet, wobei unterschiedliche Ausbreitungsmodelle verwendet wurden, u.a. von LOOS ET AL. (2003), AYLOR ET AL. (2006), BRUNET ET AL. (2003), ARRITT ET AL. (2007), BOEHM ET AL. (2008).

In dem Forschungsvorhaben wurde den Ursachen nachgegangen und auf Basis einer Ausbreitungsrechnung mit einem Lagrangeschen Partikelmodell nach Richtlinie VDI 3945 Blatt 3 (2000) eine Lösung erarbeitet. Das verwendete Modell stellt auch die Grundlage für die TA-Luft Ausbreitungsrechnung AUSTAL2000 dar und es hat sich inzwischen über lange Jahre bewährt. In diesem Vorhaben wurden zur Validierung über drei Phasen in den Jahren 2009 bis 2011 wechselweise Modellierungen und Freilandmessungen zu Meteorologie, dem zeitlichen Verlauf des Maispollenfluges und der räumlichen Verteilung der Pollenimmission vorgenommen.

Die Erfassung meteorologischer Daten erfolgte zweifach. Zum Einen an der nahen Wetterwarte Angermünde des DWD, aus deren Daten die Ausbreitungsklassen in Form von AK-Term-Daten abgeleitet wurden. Des weiteren wurden im Jahr 2010 detaillierte Messungen von Windrichtung und -geschwindigkeit, Temperatur und Feuchte innerhalb und außerhalb eines Maisfeldes inklusive der Erfassung von Turbulenzdaten über dreidimensionale Ultraschallanemometer vorgenommen.

Für den zeitlichen Verlauf des Maispollenfluges wurde die Maispollenkonzentration in allen drei Jahren kontinuierlich über den Blühzeitraum an ausgewählten Standorten mittels volumetrischer Pollenmonitore erfasst. Hierzu wurden drei Pollenmonitore PMO (TIEM technic), zwei Pollenmonitore des DWD und eine Burkard-Pollenfalle eingesetzt, die aufeinander kalibriert waren.

Für die Erfassung der räumlichen Verteilung der Maispollenimmission wurde das nach VDI 4330 Blatt 3 standardisierte Verfahren der technischen Pollensammlung mit dem Passivsammler PMF eingesetzt (VDI 4330-3 2007). Aus vorangegangenen repräsentativen Erhebungen mit dem standardisierten Verfahren des PMF über die Jahre 2001-2006 war der Gradient der Maispollendeposition in Abstand zum nächsten Maisfeldrand unter regulären Anbaubedingungen mit Vertrauensintervallen bereits bekannt (HOFMANN 2007). Die damaligen Ergebnisse bildeten die Grundlage für die in Brandenburg getroffene Abstandsregelung zu sensiblen Schutzgebieten im Jahre 2008 (OBER ET AL. 2008, HOFMANN ET AL. 2008, 2009, 2010). Ziel des aktuellen Vorhabens war eine effiziente Prüfung der Ausbreitungsrechnung über standardisierte Erhebungen der räumlichen Verteilung der Pollenimmission und damit des Gradienten der Maispollendeposition in Relation zur Entfernung vom Maisfeld.

Insgesamt wurden im Untersuchungsraum über die Jahre 2009-2011 zur räumlichen Verteilung der Pollenimmission 53 Standorte mit dem PMF untersucht und an 9 Standorten der zeitliche Verlauf mit Hilfe von Pollenmonitoren erfasst.

Die Arbeiten zur Validierung der Ausbreitungsmodellierung knüpften an Ergebnisse aus vorherigen Vorhaben zur Maispollenausbreitung mit Daten aus Freilandmessungen mit dem PMF an (HOFMANN 2007, HOFMANN ET AL. 2009a, HOFMANN ET AL. 2010). Zunächst wurden mittels Ausbreitungsrechnung grundlegende Tests zur Flugweite von Maispollen in Abhängigkeit von Meteorologie und Feldgeometrie im Abgleich mit den vorhandenen sowie den in Phase 1 erhobenen Freilanddaten durchgeführt. Hierbei ist der Einfluss anderer Maisflächen in der Umgebung zu beachten ebenso wie diverse meteorologische Situationen, wie z.B. Starkwinde, thermische Aufwinde und allgemein turbulenter Windverhältnisse. Diesen Aspekten wurde nachgegangen und entsprechende, hierzu vorliegende Daten aus der Literatur miteinbezogen (u.a. VAN HOUT ET AL. 2008).

Aus den Ergebnissen der Ausbreitungsrechnungen in Phase 1 ließ sich schließen, dass das eingesetzte Partikelmodell nach VDI plus Grenzschichtmodell für Detailuntersuchungen der Maispollenausbreitung geeignet ist. Hierbei wurde deutlich, dass der Einfluss meteorologischer Bedingungen wie Turbulenz und stärkere Winde sowie der Einfluss von Umlandfeldern beachtet werden muss, wobei ein besonderer Einfluss von Thermik aus den vorliegenden Daten nicht ableitbar war. Ebenso wurde festgestellt, dass sich auf den Gradienten der Pollendeposition der Einfluss von Umlandfeldern insbesondere ab einem Entfernungsbereich von ca. 100 m erheblich auswirkt und bis in den 10 km-Entfernungsbereich zu spüren ist. Dies führte u.a. zu der Schlussfolgerung, dass für die Freilandmessungen zur Validierung der Ausbreitungsmodellierung von Maispollen ein entsprechend ausreichend großes Untersuchungsgebiet von 30 km mal 30 km mit allen darin befindlichen Maisfeldern zu berücksichtigen sowie eine detaillierte Erfassung der Meteorologie vorzunehmen ist.

In den Phasen 2 und 3 wurde dementsprechend als Untersuchungsraum ein 30 km x 30 km Gebiet zur Berücksichtigung von Überlagerungseffekten festgelegt. Per GIS wurden sämtliche Maisfelder in dem Raum erfasst und bei den Ausbreitungsrechnungen berücksichtigt. In 2011 erfolgten zudem systematische phänologische Erhebungen an den Maisbeständen mit dem Ziel einer Zuordnung und Berücksichtigung von früh- und spätblühenden Feldern. In den Jahren 2010 und 2011 wurde der zeitliche Verlauf des Pollenfluges in einzelnen zentralen Versuchsfeldern über den Zeitraum der Maispollenblüte kontinuierlich mittels der Pollenmonitore erfasst. Die Auswertung erfolgte als Stundenwerte, 3-Stundenwerte und mittlere Tageswerte der Maispollenkonzentration. Des weiteren wurde die akkumulierte Gesamtmission über den Blühzeitraum ermittelt. Die Erfassung der räumlichen Verteilung der Maispollenimmission mit dem PMF erfolgte innerhalb und außerhalb der Maisfelder in einem ca. 10 km mal 10 km großen Bereich um die zentralen Versuchsfelder, ermittelt wurde die Maispollendeposition als Gesamtdosition. Die Ausbreitungsrechnungen wurden jeweils vor den Freilandmessungen zur effizienten Festlegung des Probenahmedesigns als auch nachher zur Validierung anhand der im Freiland festgestellten Messwerte vorgenommen. Für das standardisierte Verfahren des PMF lagen umfangreiche Referenzmessungen zur Maispollendeposition vor, die seit dem Jahr 2001 an verschiedenen Standorten in Deutschland, der Schweiz und Belgien verteilt gewonnen wurden. Diese Daten erlauben es, die Ergebnisse aus den Versuchen in den Jahren 2009 bis 2011 im Raum Angermünde einzuordnen.

Die Freilandmessungen führten zu folgenden Hauptergebnissen:

- Die Ergebnisse der PMF-Messungen zur räumlichen Verteilung der Maispollendeposition in Angermünde über die Jahre 2009 bis 2011 fügten sich in den überregional festgestellten, repräsentativen Regressionszusammenhang von Maispollendeposition in

Relation zur Entfernung vom nächsten Maisfeld ein. Die Ergebnisse unserer Untersuchungen bestätigten den Gradient der Maispollendeposition der Studie von Hofmann (2007).

- Die kontinuierliche Erfassung der Maispollenkonzentration innerhalb und außerhalb der Maisfelder zeigte, dass der Maispollenflug mit einer hohen zeitlichen und räumlichen Variation auftritt und im Untersuchungsgebiet mit Maispollenflug von der ersten Julihälfte bis in die späte, zweite Augushälfte zu rechnen ist. Die Analyse der Tagesgänge belegte, dass die Pollenfreisetzung vornehmlich tagsüber von morgens bis in den frühen Nachmittag hinein erfolgte; Voraussetzung ist eine gute, trockene Witterung. Bei ungünstigen Witterungsbedingungen, z.B. einem Gewitterregen oder Kälteeinbruch, wird die Pollenschüttung unterbrochen, wobei die Unterbrechung über mehrere Tage, je nach Witterungsverlauf, andauern kann. Die Pollenschüttung kann nach einer Unterbrechung bei einsetzenden günstigen Bedingungen, wie Wärme, Sonne und trocknende Winde, auch am selben Tage, wieder einsetzen. Während unter günstigen Bedingungen die Maispollenblüte in – vornehmlich beobachtet - spätblühenden Feldern über ca. 2-3 Wochen relativ kompakt verlief, wurde vor allem bei den früh einsetzenden Beständen mehrere, durch ungünstige Witterung bedingte Blühunterbrechungen festgestellt, die die Blühperiode auf bis deutlich über 3 Wochen im selben Feld hinaus verlängerten. Durch unterschiedliches Blühverhalten der Maisfelder wurde in der Region ein Maispollenflug über einen Zeitraum von über 6 Wochen festgestellt. Langjährige Pollenflugmessungen am Referenzstandort Ganderkesee von 1993 bis 2010 belegen dass unter den norddeutschen Klimabedingungen mit Maispollenflug von Anfang Juli bis Anfang September zu rechnen ist.
- Der Vergleich der Tagesgänge von Pollenkonzentration und meteorologischen Daten zeigte, dass keine direkte Korrelation in der Tagesperiodik von Pollenfreisetzung zu einzelnen klassischen Parametern wie Temperatur, Wind und Feuchte bestand, wohl aber mit komplexeren Turbulenzparametern. Dies bestätigt Annahmen aus der Literatur (siehe u.a. VAN HOUT ET AL. 2008, VINER ET AL. 2010).
- Die Messungen der Pollenimmissionen mit zeitauflösenden PMO-Geräten und zeitintegrierenden PMF-Geräten wurden mit den Ergebnissen von Ausbreitungsrechnungen verglichen, in denen die konkrete Feldanordnung und die zeitabhängige, örtliche Meteorologie berücksichtigt wurde. Der gemessene Abfall der Pollenimmission als Funktion der Entfernung vom Feld wurde von den Modellrechnungen wiedergegeben. Auch der modellierte Absolutwert des über die Blüteperiode integrierten Pollenflusses stimmte gut mit den PMF-Messungen überein.

- Mit den Vergleichen ist das Ausbreitungsmodell in Kombination mit den für diesen Einsatzbereich gewählten Standard-Parametersetzungen erfolgreich für die Maispollenausbreitung validiert worden.
- Für die konkrete Situation Angermünde 2011 zeigte sich, dass einfache Annahmen zur Emissionsrate ausreichten, um den gemessenen, über die Blühperiode integrierten Pollenfluss mit einer Ausbreitungsrechnung zufriedenstellend wiederzugeben. In diesem Fall ist die Berechnung der Immissionsverteilung nur für ein kleines Testfeld erforderlich, die Gesamtimmission ergibt sich hieraus durch mathematische Faltung mit der Feldverteilung (Verfahren „TAF“; vgl. VÖGEL ET AL. 2013). Soweit die Voraussetzungen seiner Anwendung erfüllt sind, liefert dieses Verfahren eine einfache Abschätzung der Maispollenimmission unter Berücksichtigung der örtlichen Meteorologie und Feldverteilung.

Die gestellten Aufgaben im Vorhaben zur Validierung der Ausbreitungsmodellierung als auch zur Überprüfung des Gradienten als Grundlage der Abstandsregelung wurden damit erfolgreich absolviert.

6.2 Variabilität der spezifischen Maispollendeposition auf Futterpflanzen von Schmetterlingen

Die Variabilität der Maispollendeposition ist von grundlegender Bedeutung für die ökotoxikologische Bewertung der Maispolleneinträge. Die Deposition von Partikeln wird nicht nur von der Konzentration in der Luft bestimmt, sondern maßgeblich auch von Eigenschaften des Akzeptors, sprich wie gut Maispollen an der Blattoberfläche haften bleiben. Dies hängt wesentlich von morphologischen Eigenschaften der Pflanzenarten ab, ob z. B. das Blatt glatt oder strukturiert ist, rau, behaart, wachsig, klebrig etc.. Die abgelagerten Pollen verteilen sich hierbei nicht gleichmäßig über die Blattoberflächen sondern vielmehr inhomogen so dass Teile der Blattflächen mit höheren Pollendichten und andere Teile mit niedrigeren als im Mittel belegt sind. Dies ist von erheblicher Bedeutung für die Risikoabschätzung von GVO, da Teile der Schmetterlingspopulation auf den Blättern der Futterpflanzen damit erheblich höheren Dosen an *Bt*-Pollen ausgesetzt sind als im Mittel über das Blatt anzunehmen wäre und da nicht-lineare Wirkungsbeziehungen anzunehmen sind, sich die Effekte nicht ausgleichen (Perry et al. 2010). Über die Variabilität der Blattdepositionen existieren allerdings keine hinreichend genauen Daten, aus methodischen Gründen wurden in bisherigen Untersuchungen überwiegend Mittelwerte erhoben.

In dem Vorhaben wurde mit Hilfe eines neuen Messverfahrens, der mobilen Digitalmikroskopie, das eine sichere Erfassung von Maispollen direkt auf den Blättern im Freiland mit ausreichender Feinauflösung gestattet (HOFMANN ET AL. 2011), die Variabilität der Mais-

pollendeposition auf unterschiedlichen Futterpflanzen über den Blühzeitraum erfasst. Für eine repräsentative Erfassung wurde ein statistisches, strukturiertes Probenahmedesign mit insgesamt 27 Messpunkten pro Blatt und drei Blättern von drei Pflanzen pro Aufnahme-tag und Ort entwickelt. Die Erhebungen wurden über den Blühzeitraum von Mais im Juli-August 2010 an 3 Standorten durchgeführt. Hierbei wurden neben Mais verschiedene Pflanzenarten berücksichtigt (Brennnessel *Urtica dioica*, Ampfer *Rumex acetosa*, Brombeere *Rubus sp.*, Gänsefuß *Chenopodium album*), die unterschiedliche Blattmorphologien als Akzeptor-Eigenschaften aufweisen und zugleich Futterpflanzen diverser Schmetterlingsarten repräsentierten. Insgesamt wurden 5.378 Maispollendepositionswerte auf den Blättern von Mais, Brennnessel, Ampfer, Brombeere und Gänsefuß erhoben. Davon entfielen 2.498 auf Mais, 1.646 auf Brennnessel, 324 auf Ampfer, 324 auf Brombeere und 586 auf Gänsefuß.

Die Ergebnisse belegten eine stark inhomogene Verteilung der Maispollendeposition auf den Blattoberflächen. Hierbei wurden erhebliche Translokationen über die Zeit festgestellt. Bedingt durch Blattbewegung, Wind und Regen, zeigten sich nicht nur partielle Austräge sondern vielmehr auch Aggregationen und Akkumulationen, die insbesondere an Blattstrukturen wie Rippen, Adern und Blattscheiden auftraten.

In den Untersuchungen wurden als Ergebnis folgende Maispollendepositionsdaten festgestellt, wobei die Dichteverteilung der Messwerte einer log-Normal-Verteilung folgte. Auf Blättern von Mais lagen die Maispollendepositionswerte im Mittel (geometrische Mittel) bei 169 n/cm^2 , der 75 %-Quantilswert bei 761 n/cm^2 , der 95 %-Quantilswert bei 4.612 n/cm^2 und das Maximum erreichte einen Wert 103.000 n/cm^2 . Auf Brennnesselblättern wurden im Mittel (geometrisch) 100 n/cm^2 erfasst (im Feld 700 n/cm^2) und als 75 %-Quantilswert 350 n/cm^2 , als 95 %-Quantilswert 2.158 n/cm^2 und im Maximum 13.802 n/cm^2 . Die Maispollendepositionswerte auf Blättern von Gänsefuß, Ampfer und Brombeere erreichten Mittelwerte (geometrisch) von 374 n/cm^2 , 53 n/cm^2 und 66 n/cm^2 , 75 %-Quantilswerte von 989 n/cm^2 , 171 n/cm^2 und 190 n/cm^2 , 95 %-Quantilswerte von 4.532 n/cm^2 , 1.011 n/cm^2 und 589 n/cm^2 und Maxima von 17.098 n/cm^2 bei Gänsefuß und 2.356 n/cm^2 bei Ampfer und 874 n/cm^2 bei Brombeere.

Die Maispollendepositionswerte wiesen bei den verschiedenen Pflanzenarten ähnliche Trends über die Zeit bei unterschiedlichen Niveaus auf. Hierbei zeigten sich charakteristische Bezüge zwischen den Arten, die in einer Näherung über Äquivalenzfaktoren im Mittel ausgedrückt werden konnten.

Die hohe räumliche und zeitliche Variabilität der Maispollendepositionen auf den Blättern von Futterpflanzen der Schmetterlinge belegen die Bedeutung und Notwendigkeit von *in-situ*-Messungen mit entsprechend hoher Auflösung im Bereich von wenigen Quadratmillimetern. Dies entspricht der Größenordnung der Verzehrfläche kleiner, empfindlicher Lar-

venstadien. Die alleinige Erhebung mittlerer Werte pro Quadratzentimeter oder gar der ganzen Blattfläche, wie durch bisher gängige Verfahren durch z.B. Abwaschung der Pollen üblich, reichen für ein adäquates Risiko Assessment nicht aus.

Blattdepositionsmessungen allgemein und insbesondere feinräumlicher in-situ Messungen sind jedoch auch mit einem hohen Aufwand verbunden, da für repräsentative Aussagen auf Grund der hohen Variabilität tägliche Messungen an vielen Pflanzen und Blättern über den Blühzeitraum von mehreren Wochen im Gelände erforderlich sind. Die Einordnung von einzelnen Tageswerten hingegen ist ohne genaue Kenntnis des dynamischen Verlaufs von Pollenschütte und Deposition seriös nicht möglich.

Die hohe Variabilität und damit der hohe Aufwand von Blattdepositionsmessungen weist auch auf die Grenzen derartiger, Akzeptor-spezifischer Erhebungen hin. Eine praktikable Anwendung ist auf den Nahbereich von Pollenquellen, d.h. in und in unmittelbarer Nähe zum Feld beschränkt, da der Aufwand mit der Entfernung überproportional steigt. Für standörtliche Vergleiche der Maispollendepositionsbelastung sind Blattdepositionsmessungen, allgemein Akzeptor-spezifische Erhebungen, auf Grund der hohen Variabilität nicht geeignet. Hierfür werden standardisierte Messverfahren, wie der technischen Pollensammlung mit dem PMF gemäß VDI 4330-3, benötigt. Bezüge zwischen standardisierter und Akzeptor-spezifischer Blattdeposition im Mittel sind möglich und können über Äquivalenzbeziehungen ausgedrückt werden.

6.3 Exposition von Gewässerökosystemen durch Maispollen und -streu

Eine Exposition und Wirkung von Nicht-Ziel-Organismen (NZO) in Gewässerökosystemen wurde lange Zeit nicht beachtet bzw. negiert.⁵⁴ Neuere Untersuchungen von ROSI-MARSHALL ET AL. (2007) wiesen jedoch Belastungen von Gewässerökosystemen mit *Bt*-Toxin in den Maisanbaugebieten von Indiana in den USA sowie negative Effekte auf Köcherfliegenlarven im Labor nach. BØHN ET AL. (2008) zeigte im Labortest, dass auch Daphnien auf *Bt*-Toxin aus Pollen empfindlich reagieren und DOUVILLE ET AL. (2007) wies eine Anreicherung und Vielfältigung von transgener DNA aus MON810-Maislinien in Muscheln in Kanada nach. Zur Exposition von Wasserorganismen und aquatischen Systemen lagen bisher für Deutschland keine Daten vor. Aufgabe der vorliegenden Untersuchung war es, diesen neuen Aspekt in der Risikobewertung von *Bt*-Mais aufzugreifen, geeignete Methoden zur Quantifizierung des Eintrages von Pollen und Streu in Gewässern zu entwickeln und damit erste Untersuchungen zur Exposition vorzunehmen.

⁵⁴ Monitoring-Plan von Monsanto an BVL 2007 sowie darin befindliches Auftragsgutachten.

Folgende Aspekte sind bei der Exposition von Gewässerökosystemen zu differenzieren (ROSI-MARSHALL ET AL. 2007):

- Eintrag über Pollenflug während der Maisblüte im Sommer über den Zeitraum Juli bis August.
- Eintrag von Ernterückständen während und nach der Maisernte von Herbst (September/Oktober) bis in das nächste Frühjahr hinein, wobei Unterschiede zwischen der Ernte von Körnermais und Silo-/Futtermais, der gehäckselt wird, bestehen:
 - Direkter Eintrag von Streupartikeln während des Erntevorgangs über den Luftpfad.
 - Indirekter Eintrag von auf dem Ackerboden deponierten Streupartikeln über Einschwemmung in die Gewässer durch z.B. Wassererosion nach starken Regenfällen, Überschwemmungen oder im Zuge von Schneeschmelze im Frühjahr.
 - Indirekter Eintrag v.a. kleinerer Partikel und des *Bt*-Toxins über die Bodenpassage, hier insbesondere über Drainagen.
- Drift im Gewässer, so dass die eingetragenen Substanzen auch weiter im Unterlauf befindliche Stellen und Schutzgebiete erreichen können. Hierbei sind die Stoffe komplexen Transport- und Umbauvorgängen ausgesetzt. Die Stoffe können mehrfach abgelagert, wieder aufgeschwemmt (z.B. durch Hochwasser) und an weiter im Unterlauf befindlichen Stellen abgelagert und dort auch akkumuliert werden. An Stellen wie Wehren, Uferrandbereichen, Kolken, Obstruktionen, Auenbereichen, Schilfzonen etc. kann es zu Materialkonzentrationen kommen, die das Vielfache dessen betragen, was an den ursprünglichen Eintragsorten in unmittelbarer Nähe der Maisfelder gemessen wird.

In dem Vorhaben wurden Freilandmessungen zur Exposition über den Luftpfad durchgeführt. Hier standen Verfahren zur Verfügung, auf die zugegriffen werden konnte. Die Freilandversuche wurden mit konventionellem Mais durchgeführt, da Unterschiede im Ausbreitungsverhalten von Pollen und Streu von *Bt*-Mais nicht anzunehmen sind.

Zur Untersuchung der Polleneinträge in Gewässerökosysteme wurde das standardisierte Verfahren des PMF herangezogen und die Einträge mit denen der terrestrischen Systeme verglichen.

Für die Erfassung der Streueinträge über den Luftpfad wurden im Herbst 2009 und im Herbst 2010 Freilandversuche mit Streufallen durchgeführt. Da die Ausbreitung und auch die Verfügbarkeit und Wirkung wesentlich von der Größenfraktion der Maispartikel abhängt, wurden hierbei die Größenbestandteile (Fraktionen) des Maishäckselgutes ermittelt. Des weiteren wurden diverse Streufallen getestet und weiterentwickelt, so dass eine

sichere Erfassung und Unterscheidung der Streubestandteile mit Grobstreu größer 1 mm und Feinfraktion kleiner 1 mm sowie erstmals einer weiteren Differenzierung der Feinfraktion bis in den 12 µm Bereich ermöglicht wurde. In den Freilandversuchen wurden insgesamt 173 Streufallen so positioniert, dass ein Entfernungsbereich vom Feldrand bis in 200 m Abstand abgedeckt wurde und auch Gewässerökosysteme berücksichtigt wurden.

Die Untersuchungen zur Exposition der Gewässerökosysteme führten zu folgenden Ergebnissen:

- Der Eintrag von Pollen in Gewässerökosysteme über den Luftpfad unterscheidet sich nicht vom Eintrag in terrestrische Ökosysteme, so dass derselbe Entfernungsgradient für die Berechnung der Exposition durch Pollen, ob terrestrisch oder aquatisch, angewendet werden kann. Die Polleneinträge können zudem über die gleichen, standardisierten Verfahren zur technischen Pollensammlung (VDI 4330-3 2007) erfasst und damit auch einer Kontrolle unterzogen werden wie bei den terrestrischen Ökosystemen.
- Auch für den Eintrag von Maispartikeln als Ernterückstände über den Luftpfad während der Häckselernte über die beiden Versuchsjahre 2009 und 2010 wurden deutlich ausgeprägte, übereinstimmende Gradienten der Maisstreu depositionen in Relation zur Entfernung vom Maisfeld nachgewiesen, die bis in den Entfernungsbereich von 100 m messtechnisch von anderen Einträgen differenziert werden konnten.
- Hierbei zeigte sich eine Fraktionierung der Maisstreibestandteile: Während die Grobfraktion über 1 mm den überwiegenden Anteil der Einträge im Nahbereich ausmachten überwiegen die Feinpartikel im weiteren Entfernungsbereich. Hierbei war für die Feinpartikel bis in den Entfernungsbereich von 50 m im Vergleich zum mittleren Gradienten eine nur geringfügige Abnahme festzustellen, so dass eine maßgebliche Reduzierung der Exposition für diese Fraktion erst im Entfernungsbereich über 50 m zu gewährleisten wäre. Dies ist von besonderer Bedeutung, da für Feinpartikel eine besondere hohe Bioverfügbarkeit anzunehmen ist. Für eine wirksame Reduzierung der Exposition aus ökotoxikologischer Sicht sind daher Abstände über 50 m erforderlich.
- Die Ergebnisse eröffnen Regelungsansätze zur Expositionsminderung von Gewässerökosystemen über Pufferabstände (KRATZ ET AL. 2010, VÖGEL ET AL. 2013).
- Für die Erfassung der Exposition von Gewässerökosystemen über den Eintrag von Pollen und Ernterückständen aus dem Maisanbau über den Luftpfad stehen mit den Ergebnissen aus dem Vorhaben geeignete wissenschaftliche Verfahren zur Verfügung.
- Weiterer Forschungsbedarf besteht für Verfahren zur Quantifizierung der Einträge in Gewässerökosysteme nach der Ernte über den eingangs erwähnten Bodenpfad (oberirdische Einschwemmung und Bodenpassage/Drainage) sowie zur Quantifizierung der

Transport- und Ablagerungsprozesse im Gewässer für Pollen und Maisstreu unter Einbeziehung der bedeutsamen Feinpartikel und von Worst-Case-Bedingungen (z.B. Hochwasserereignisse).

- Abschließend ist der Forschungsbedarf zu geeigneten Verfahren auf der Wirkungsebene zu erwähnen. Der Wissensstand zur Wirkung des Bt-Toxins auf aquatische Ökosysteme und Organismen ist rudimentär verglichen zu anderen Schadstoffen im Agrarbereich, wie z.B. Pflanzenschutzmitteln. Verfahrensansätze wurden für Köcherfliegen, Muscheln und Daphnien (im Labor) beschrieben, jedoch sind bis dato keine Freilandderhebungen in der EU bekannt.

7. Summary

Prior to cultivation of a new genetically modified organism (GMO) and release to the environment, a GMO-specific risk assessment has to be undertaken in the EU. In this research project we focused on three topics relevant for the risk assessment and management of *Bt*-maize:

- Validation of maize pollen dispersal modeling by 3-years field measurements
- Measuring the spatial distribution of maize pollen deposition on host plants of butterflies
- Evaluation of the exposure to freshwater ecosystems by pollen and harvest by-products of maize cultivation

The research project started in 2009. It included three seasons of field measurements during the years 2009 until 2011 in the area of Angermünde, Brandenburg, Germany. The project was successfully accomplished in the summer of 2012. The results were publically presented on 8th October 2012 in Berlin and the proceedings have been published recently (VÖGEL ET AL. 2013).

7.1 Validation of maize pollen dispersal modeling by 3-years field measurements

Dispersal models are well known to be valuable instruments for risk assessment and management. But in the case of maize pollen discrepancies have been found between the results of dispersal models and field measurements (HOFMANN ET AL. 2009a). Using a Lagrange dispersal model the gradient of maize pollen deposition of the field data shows a much longer extending tail with higher values at distances over 10 m leading to a gap between model and field data that increases by distances disproportionally high. This finding has been reported by several authors using various types of dispersal models (e.g. LOOS ET AL. 2003, AYLOR ET AL. 2006, BRUNET ET AL. 2003, ARRITT ET AL. 2007, BOEHM ET AL. 2008). As cause for this discrepancy various reasons have been discussed such as turbulences by stronger winds, thermal updrifts and overlapping influence of neighbouring fields.

In this research project this particular problem and its causes were analysed in more detail and a solution was worked out using a standardized Lagrange particle model (VDI 3945-3 2000). This model type has been used for regulatory purposes in the field of air pollution in Germany for more than 10 years (AUSTAL2000, TA-Luft) and with great success. We validated the model by 3 periods of successive modeling and field measurements during the years 2009 to 2011. This included detailed measurements of meteorology and the temporal and spatial variation of maize pollen release and deposition in the area.

Meteorological data were gained at the nearby weather station of the German Weather Service DWD at Angermünde and by separate measurements within and outside of a maize field in the year 2010 using 3D-ultrasonic anemometers for three dimensional measurements of wind direction and –speed above canopy height and sensors for temperature and humidity. Further classified data on meteorological conditions and stability of the atmosphere (AK-Term) were used for dispersal modeling.

For measuring the temporal variation of maize pollen concentration in the air volumetric pollen samplers were used, allowing an assessment with high temporal resolution down to hourly values. Six volumetric pollen monitors have been used, calibrated to each other: Three volumetric pollen monitors of the type PMO (TIEM technic GbR), two of the type DWD, and one Hirst-type (Burkard Manufacturing Ltd.). The PMO and the DWD type are volumetric samplers with omni-directional inlet that allow measurements of maize pollen concentration even under turbulent wind conditions which occur commonly in canopy height within the field and close to the margin. The Hirst-type is the standard pollen trap in European allergy networks but for maize pollen this type can be used only outside the fields.

For spatial dispersion of the pollen deposition we used the standardized passive sampling method with the pollen mass filter PMF according to the guideline VDI 4330-3 (2007) that guarantees comparable data. Here the total accumulated deposition over the flowering period is measured. By results of representative previous studies with the same standardized method of the PMF from 2001 to 2006 (Hofmann 2007, Hofmann et al. 2010) the gradient of maize pollen deposition in relation to the distance from field margin has already been known and was characterized statistically by regression analysis with its variation. These results have been used already for the definition of isolation buffer distances of *Bt*-maize cultivation to nature reserve areas in the range of 800 m to 1,000 m in Brandenburg and Bavaria. Task of this research project was to re-evaluate the gradient of pollen deposition as basis of these isolation buffer distances, too.

For assessment of the spatial distribution standardized measurements of pollen deposition with the PMF were performed at 53 sample sites in total during the years 2009 to 2011. For temporal variation the pollen concentration was measured continuously with the volumetric pollen monitors at 9 sites.

The main results are as follows:

- The results of the measurements with the PMF in the years 2009-2011 on the spatial distribution of maize pollen deposition fitted well into the nationwide representative regression gradient of maize pollen deposition in relation to distance to the field margin. The results of our study confirmed the findings of Hofmann (2007).

- The continuous measurements of maize pollen concentration in the air within and outside of the maize fields in 2010 and 2011 revealed a high temporal and spatial variation of maize pollen shedding. In the study area maize pollen shedding took place from first half of July until second half of August. The analysis of the hourly values on maize pollen concentration confirmed the reported daily pattern of maize pollen release predominantly occurring from morning hours to afternoon with peak concentration around midday. Pollen shedding took place preferably under dry (drying), warm weather conditions. Unfavorable weather conditions, like thunderstorms, rainy and cold weather, stops pollen release. This break can last for several days until improvement in the weather. Under favorable weather conditions, pollen shedding takes place relatively compact during 2-3 weeks within a field. Due to the breaks of pollen shedding under unfavorable weather conditions, this period can be extended to much longer periods more than 3 weeks even within the same field. This was especially observed among early flowering fields. Because of variation between maize fields in their flowering behavior (early to late ones) one has to reckon with maize pollen shedding in the region for a period longer than 6 weeks from first half of July until second half of August. Long term measurements from 1993 to 2010 at the reference site Ganderkesee, Lower Saxony, show that under the temperate climate conditions of Northern Germany maize pollen shedding can last from beginning of July to early September (Hofmann et al. 2013).
- Comparing the daily pattern of hourly values on maize pollen release rates with meteorological data this showed that maize pollen release was not directly correlated to classical single meteorological parameters such as temperature, wind speed or humidity but rather with complex parameters on turbulence. This confirms earlier findings of VAN HOUT ET AL. (2008) and VINER ET AL. (2010).
- Pollen concentration was measured both in a time resolved manner using PMO devices and in time integrated form using PMF devices. The results were compared to dispersion calculations in which the actual field configuration and the time dependent, local meteorology were accounted for. The model calculations were able to reproduce the measured concentration drop as a function of distance from the field. The modelled pollen flux integrated over the flowering period agreed well with the one measured by the PMF devices.
- The comparisons successfully validated the dispersion model in combination with the applied standard settings for applications to maize pollen dispersion.
- For the actual situation Angermünde 2011, simple assumptions on the pollen emission rate turned out to be sufficient to reproduce the measured pollen flux integrated over the flowering period. In this case it is sufficient to model the concentration (or deposi-

tion) distribution only for a small test field. The total result can then be derived by a mathematical convolution of the concentration distribution for the test field with the actual field distribution (method "TAFF", see Vögel et al. 2013). If the conditions for its application are met, this method provides a simple estimate of pollen concentration, yet taking into account the actual field distribution and the local meteorology.

The tasks of this project on validation of the dispersal modeling of maize pollen as well as on proving the gradient of maize pollen deposition in relation to the distance to the next field margin have been successfully accomplished.

7.2 Spatial distribution of maize pollen deposition on host plants of butterflies

For risk assessment regarding non target organisms like butterflies, this requires data on the temporal and spatial variability of maize pollen deposition on host plants. The deposition of aerosol particles like pollen is determined not only by the concentration in the air. Moreover it depends on conditions of the acceptor's surface, for example the morphology of the leaf's surface, if it is glossy, hairy, waxy, sticky etc. (AYLOR ET AL. 2003). The maize pollen are distributed inhomogeneous on the leaf surface so that parts of the leaf area are clogged with higher pollen densities and others with lower. This is of major importance thus consequently parts of the population of butterfly larvae feeding on the leave are exposed with higher doses of *Bt*-maize pollen than on average. As we have to assume non-linear dose-response-relationships this does not equalize (PERRY ET AL. 2010).

Although there are some literature data available on maize pollen deposition on host plants, the recorded data are based on indirect measurements such as shaking or washing off pollen, or removing parts of the plant or the pollen with adhesive tapes. These methods lack precision and they do not include the necessary information such as the spatial and temporal variation of pollen deposition on the leaves.

In this study a new method based on mobile digital microscopy has been applied enabling a direct *in situ* analysis of the maize pollen deposition on the leaves which has sufficient resolution to identify maize pollen safely and to assess the variability of deposition of maize pollen on various host plant leaves in space and time (Hofmann et al. 2011). The measurements were done at three sites during the flowering season in 2010. Various plant species were chosen, maize (*Zea mays*), stinging nettle (*Urtica dioica*), sorrel (*Rumex acetosa*), blackberry (*Rubus sp.*) and goosefoot (*Chenopodium album*), representing different leaf morphologies in respect to acceptor conditions as well as to host plants of different butterflies. For representative sampling of maize pollen deposition 27 images of size 5 mm² have been taken from 3 leaves and 3 plants per species, site and date, respectively. In total the

study comprised 5,378 images with measurement data on maize pollen deposition. 2,498 values are denoted to *Zea*, 1,646 to *Urtica*, 586 to *Chenopodium* and 324 to *Rumex* and *Rubus*, respectively.

The results showed inhomogeneous distribution of the pollen loads on the leave surfaces giving evidence of a high variability of maize pollen deposition over space and time. Hereby translocation of pollen on the surface has been detected by wind, rain and leave movements. This led not only to partial outputs as reported in the literature for example in washing off the pollen by rain, but moreover to aggregation and accumulation of the pollen deposits on the leave surface, predominantly at structures like hairs, veins or the leaf basis.

The maize pollen deposition data were almost log-normally distributed. On the leaves of *Zea maize* we found a geometric mean value of 169 n/cm², a 75 %-quantile value of 761 n/cm², a 95 %-quantile value of 4,612 n/cm² and a maximum that reached 103,000 n/cm². On the leaves of *Urtica* the geometric mean value was 100 n/cm² in total, the 75 %-quantile value 350 n/cm², the 95 %-quantile value 2,158 n/cm² and the maximum 13,802 n/cm². On the leaves of *Chenopodium*, *Rumex* and *Rubus* the maize pollen deposition reached geometric mean values of 374 n/cm², 53 n/cm² und 66 n/cm², respectively. The 75 %-quantile values were 989 n/cm², 171 n/cm² and 190 n/cm², the 95 %-quantile values 4,532 n/cm², 1,011 n/cm² and 589 n/cm² and the maxima 17,098 n/cm², 2,356 n/cm² and 874 n/cm².

Even though on different levels, the results on maize pollen deposition showed similar trends across the flowering period for the various plant species allowing statistical correlations.

The high temporal and spatial variability of maize pollen deposition found on the leaves of the host plants of butterflies prove the need and relevance of *in situ* measurements with adequately fine resolution of a few square millimeters per spot size. This matches to the dimension of leave area consumed by the smaller, sensitive first instars of butterfly larvae. Average values per square cm or even per leaf derived from washing off the pollen are not detailed enough to meet the requirements for an adequate risk assessment.

The high variability of pollen deposition on surfaces and the respective high effort for direct measurements of pollen deposition indicate the limitations of direct measurements on leave surfaces (species-specific) and in general of acceptor-specific assessments of deposition values. Such methods are confined to areas with higher numbers of pollen deposition e.g., sites within or close to the edge of maize fields. For meso- or macroscale measurements of spatial or temporal variation (e.g., variation between sites, gradients from the field to greater distances) standardized measurement methods are required to guarantee comparable data such as the passive sampler PMF according to VDI guideline 4330 pp.3.

Correlations between plant-specific and standardized pollen deposition are possible and may be expressed statistically.

7.3 Exposure to freshwater ecosystems by pollen and harvest by-products of maize cultivation

In the process of risk assessment of *Bt*-maize potential exposure and effects on non-target organisms (NTO) in aquatic ecosystems have been neglected for a long time.⁵⁵ But ROSI-MARSHALL ET AL. (2007) demonstrated abundant exposure of headwater streams to the *Bt*-toxin deriving at the corn belt of Indiana, USA, as well as negative effects of the *Bt*-toxin on caddiesflies (*Trichoptera*) in laboratory test. BØHN ET AL. (2008) showed in toxicity tests that water flees (*Daphnia*) are negative affected by the *Bt*-toxin from maize pollen. DOUVILLE ET AL. (2007) detected accumulation and reproduction of transgene DNA from *Bt*-maize MON810 in mussels collected out of freshwater streams in Canada. For Germany there have been no data nor assessments available on exposure and potential effects of aquatic ecosystems by *Bt*-maize residuals up to now. Task of this project was to pick up this new aspect in risk assessment of *Bt*-maize performing first steps for exposure assessment. This includes the development of practicable methods for quantification of exposure of freshwater ecosystems by pollen and harvest residuals of maize.

For the exposure of aquatic ecosystems following pathways are differentiated (ROSI-MARSHALL ET AL. 2007):

- Dispersal by wind and input of pollen into the aquatic ecosystems during the flowering period of maize in the summer season (July to August).
- Input of harvest residuals during harvesting of maize in autumn (September/October) and later until next spring with specific aspects depending on type of maize cultivation and harvesting. Whereas in the corn belt of the USA corn cob dominates, here in Germany most of the maize is cultivated for silage, feeding and biogas production and for this the maize plant gets chaffed into small pieces immediately at harvesting:
 - Direct input of harvest residues during harvesting via air.
 - Indirect input of residues deposited on the soil and translocated by rain or wind into the adjacent aquatic systems. This may occur from harvest in autumn until next spring.

⁵⁵ Monitoring-Plan from Monsanto to BVL 2007 with attachments.

- Indirect input of smaller particles and of the *Bt*-toxin via groundwater or drainage system.
- Drift within the freshwater streams so that sensitive and protected habitats located downstreams can get exposed and affected, even if they are far away. Repeated deposition and resuspension of the particles are common and worst case situations like heavy floods are of relevance. A special and important difference of freshwater streams in contrary to dispersal in the air is that the drifted maize material gets accumulated at particular locations downstreams like obstructions, river banks, flooded wetlands or at the shore of the next lake. Here all the material collected by all the headwater streams of the watershed accumulates and concentration levels of maize material may be reached that far outnumber those of the places of origin next to the maize fields (ROSI-MARSHALL ET AL. 2007).

In this project exposure by aerial input of pollen and harvest residuals was measured in the field. The experiments were done using conventional maize fields, thus there is no difference in the dispersal of gm- and non-gm particles in the air.

For the measurements of pollen input into aquatic ecosystems the standardized method with the PMF was used and the results compared with the deposition to terrestrial ecosystems as described before.

For assessment of the input of harvest residuals (chaffs) via air field measurements were undertaken in autumn 2009 and 2010 during harvesting using litter fall boxes. Dispersal of particles in the air by wind depends from the aerodynamic particle size as well as potential exposure and effects on organisms. Therefore the maize harvest residues were characterized in their particle size fractions and several fractions were distinguished in the measurements of deposition: coarse particle fraction greater than 1 mm diameter and fine particle fraction smaller than 1 mm, and for the first time in literature, the latter further divided into 3 fractions down to 12 µm. In total 173 litter fall boxes have been placed around the maize fields in several distances up to 200 m from field edge regarding aquatic ecosystems, too.

The main results of this project on exposure of aquatic ecosystems are as follows:

- The aerial input of pollen to aquatic ecosystems does not differ compared to the input to terrestrial ecosystems, so that the same gradient of pollen deposition in relation to distance is applicable. The aerial input of pollen to aquatic ecosystems can be measured by the same standardized method according VDI 4330-3 (2007) with the PMF as used for terrestrial systems.
- For the aerial input of maize particle residuals during harvesting we detected pronounced gradients of deposition in relation to distance to the field. The gradients have

been in concordance for both years 2009 and 2010 enabling to distinguish the input of maize residues from other sources up to the distance of ca. 100 m.

- The results show distinct differences in the dispersal of the various size fractions of harvest residuals: Whereas the coarse particles greater 1 mm dominate the deposition at close distances to the field edge below 10 m this changes to the fine particle fraction smaller than 1 mm at farer distances. For the first 50 m the fine particle fraction decline only with slow rates below average compared to the mean gradient, so that a relevant reduction of input for this particle fraction can be ensured only at distances greater than 50 m. This is especially important because of the relevance of finer particles in respect to bioavailability, e.g. for all smaller species, detritivores, filterers and for leaching of the *Bt*-toxin, too. Therefore, from a ecotoxicological point of view, for a significant reduction in exposure distances greater than 50 m would be necessary.
- These results of the project enables approaches to reduce exposure and risks by riparian buffer strips between gm-maize fields and the banks of aquatic ecosystems for risk management (KRATZ ET AL. 2010, VÖGEL ET AL. 2013).
- The results of the project demonstrate that for assessment of exposure to aquatic ecosystems by pollen and harvest residuals from maize cultivation via air appropriate scientific methods are available.
- Further research on the level of exposure is needed for the quantification of input after harvesting via soil (wash-in) and groundwater (soil passage and drainage) as well as for translocation, deposition and accumulation in the streams and banks of the water bodies. This implies to regard important worst-case situations like heavy rains, floods and regular cases like snow melt, too. All these aspects have been neglected in actual risk assessments of *Bt*-maize towards aquatic ecosystems (for example, see JENSEN ET AL. 2012).
- Finally, research is required on the bio-ecological effect level. The scientific knowledge if potential effects of the *Bt*-toxin to aquatic ecosystems and their biocoenosis is less than low compared to other common substances in the agro-environment like pesticides for example.

8. Verzeichnisse

8.1 Literaturverzeichnis

- Arritt, R.W.; Clark, C.A.; Goggi, A.S.; Lopez Sanchez, H.; Westgate, M.E.; Riese, J.M. (2007): Lagrangian numerical simulations of canopy air flow effects on maize pollen dispersal. *Field Crops Research* 102: 151-162.
- Aylor, D.E.; Schultes, N.P.; Shields, E.J. (2003): An aerobiological framework for assessing cross-pollination in maize. *Agricultural and Forest Meteorology* 119: 111-129.
- Aylor, D.E.; Boehm, M.T. (2006): Quantifying Aerial Concentrations of Maize Pollen in the Atmospheric Surface Layer Using Remote-Piloted Airplanes and Lagrangian Stochastic Modeling. *American Meteorological Society* 45: 1003-1015.
- Benfield, E.F. (1997): Comparison of litterfall input to streams. *Journal of the North American Benthological Society* 16: 104-108.
- Boehm, M.T.; Aylor, D.E.; Shields, E.J. (2008): Maize Pollen Dispersal under Convective Conditions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47 (1): 291-307.
- Bøhn, T.; Primicerio, R.; Hessen, D.O.; Traavik, T. (2008): Reduced fitness of *Daphnia magna* fed a Bt-transgenic maize variety. *Arch. Environ. Contam. Toxicol* 55: 584-592.
- Bøhn, T.; Traavik, T.; Primicerio, R. (2010): Demographic responses of *Daphnia magna* fed transgenic Bt-maize. *Ecotoxicology* 19: 419-430.
- British Aerobiology Federation (1995): The Pollen Count Guide. 1st Edition. The National Pollen and Hayfever Bureau, Rotherham, UK.
- Brunet, Y.; Foueillassar, F.; Audran, A.; Garrigou, D.; Dayau, S. (2003): Evidence for long-range transport of viable maize pollen. In: Proceedings of the 1st European Conference on the Co-existence of Genetically Modified Crops with Conventional and Organic Crops, Helsingør, Denmark, November 13-14.
- Carstens, K.; Anderson, J.; Bachman, P.; De Schrijver, A.; Dively, G.; Federici, B.; Hamer, M.; Gielkens, M.; Jensen, P.; Lamp, W.; Rauschen, S.; Ridley, G.; Romeis, J.; Waggoner, A. (2011): Genetically modified crops and aquatic ecosystems: considerations for environmental risk assessment and non-target organism testing. *Transgenic Research* 4: 813-842.
- Chambers, C.P.; Whiles, M.R.; Rosi-Marshall, E.J.; Tank, J.L.; Royer, T.V.; Griffiths, N.A.; Evans-White, M.A.; Stojak, A.R. (2010): Responses of stream macroinvertebrates to Bt maize leaf detritus. *Ecological Applications* 20: 1949-1960.
- Chamecki, M.; Gleicher, S.C.; Dufault, N.S.; Isard, S.A. (2011): Diurnal variation in settling velocity of pollen released from maize and consequences for atmospheric dispersion and cross-pollination. *Agr Forest Meteorology* 151: 1055-1065.
- Dalzell, B.J.; Filley, T.R.; Harbor, J.M. (2007): The role of hydrology in annual organic carbon loads and terrestrial organic matter export from a Midwestern agricultural watershed. *Geochim Cosmochim Acta* 71: 1448-1462.
- Di-Giovanni, F.; Kevan, P.G.; Nasr, M.R. (1995): The variability in settling velocities of some pollen and spores. *Grana* 34: 39-44.
- Douville, M.; Gagné, F.; Masson, L.; McKay, J.; Blaise, C. (2005): Tracking the source of *Bacillus thuringiensis* Cry1Ab endotoxin in the environment. *Biochem Syst Ecol* 33: 219-232.
- Douville, M.; Gagné, F.; Blaise, C.; André, C. (2007): Occurrence and persistence of *Bacillus thuringiensis* (Bt) and transgenic Bt corn cry1Ab gene from an aquatic environment. *Ecotoxicol Environ Saf* 66: 195-203.
- EFSA (2009): Applications (EFSA-GMO-RX-MON810) for renewal of authorisation for the continued marketing of (1) existing food and food ingredients produced from genetically modified insect resistant maize MON810; (2) feed consisting of and/or containing maize MON810, including the use of seed for cultivation; and of (3) food and feed additives, and feed materials produced from maize MON810, all under Regulation (EC) No 1829/2003 from Monsanto. *EFSA Journal*, doi:10.2903/j.efsa.2009.1149.

- EFSA (2011a): Scientific Opinion on application (EFSA-GMO-CZ-2008-54) for placing on the market of genetically modified insect resistant and herbicide tolerant maize MON 88017 for cultivation under Regulation (EC) No 1829/2003 from Monsanto. EFSA Journal, 9(11), 2428 [152 pp.]. doi:10.2903/j.efsa.2011.2428.
- EFSA (2011b): Scientific Opinion updating the evaluation of the environmental risk assessment and risk management recommendations on insect resistant genetically modified maize 1507 for cultivation. EFSA Journal, 9(11): 2429 [73 pp.]. doi:10.2903/j.efsa.2011.2429.
- EFSA (2011c): Statement supplementing the evaluation of the environmental risk assessment and risk management recommendations on insect resistant genetically modified maize Bt11 for cultivation. EFSA Journal, 9(12), 2478 [44 pp.]. doi:10.2903/j.efsa.2011.2478.
- Elosegi, A.; Pozo, J. (2005): Litter input. In: Graca, A.S.; Bårlocher, F.; Gessner, M.O. (eds.): Methods to study litter decomposition. A practical guide. Springer: 3-11.
- Fisher, S.G.; Likens, G.E. (1973): Energy flow in Bear Brook, New Hampshire: an integrative approach to stream ecosystem metabolism. Ecological Monographs 43: 421-439.
- Folloni, S.; Kagkli, D.M.; Rajcevic, B.; Guimaraes, N.C.C.; Van Droogenbroeck, B.; Valicente, F. H.; Van den Eede, G.; Van den Buöcke, M. (2012): Detection of airborne genetically modified maize pollen by real-time PCR. Molecular Ecology Resources 12: 810-821.
- Fonseca, A.E.; Westgate, M.E.; Doyle, R.T. (2002): Application of fluorescence microscopy and image analysis for quantifying dynamics of maize pollen shed. Crop Sci. 42: 2201-2206.
- Fonseca, A.E.; Westgate, M.E.; Grass, L.; Dornbos, D.L. (2003): Tassel Morphology as an Indicator of Potential Pollen Production in Maize. Online. Crop Management doi: 10.1094/CM-2003-0804-01-RS 20.4.2008
- Fonseca, A.E.; Lizaso, J.I.; Westgate, M.E.; Grass, L.; Dornbos, D.L. (2004): Simulating potential kernel production in maize hybrid seed fields. Crop Sci. 44: 1696-1709.
- Griffiths, N.A.; Tank, J.L.; Royer, T.V.; Rosi-Marshall, E.J.; Whiles, M.R.; Chambers, C.P.; Frauendorf, T.C.; Evans-White, M.A. (2009): Rapid decomposition of maize detritus in agricultural headwater streams. Ecol Appl 19: 133-142.
- Hirst, J.M. (1952): An automatic volumetric spore trap. Annals of Applied Biology 39: 257-265.
- Hofmann, F.; Schlechtriemen, U.; Wosniok, W.; Siemers, U.; Bracke, G.; Giesemann, G.; Duve, M. (2001): Luftgüte-Rindenmonitoring – Ein neues Probenahmegerät und Verfahren zum Biomonitoring von Luftschadstoffen für akkumulierbare Substanzen mit der Möglichkeit des Fingerprintings von Immissionsquellen. Gate to EHS (Environmental Health Sciences), Ecomed, Landsberg: 176 S.
http://www.oekologiebuero.de/Hofmann_et al_2001_Rindenmonitoring.pdf (last access: 29.3.2012).
- Hofmann, F. (2002): Technische und biologische Pollenakkumulatoren und PCR-Screening für eine erste Stufe eines GVP-Umweltmonitorings. Symposium „Monitoring von gentechnisch veränderten Pflanzen: Instrument einer vorsorgenden Umweltpolitik“ am 13. Juni 2002 im Bundespresseamt, Berlin. UBA-Texte 23/03: 77-79.
- Hofmann, F.; Breitfuss, G. (2002): Der PollenMassenFilter PMF – ein neuartiger Passivsammler für das Umweltmonitoring von GVP. Symposium „Monitoring von gentechnisch veränderten Pflanzen: Instrument einer vorsorgenden Umweltpolitik“ am 13. Juni 2002 im Bundespresseamt, Berlin. UBA-Texte 23/03: 80.
- Hofmann, F.; Schlechtriemen, U.; Wosniok, W.; Foth, M.; Breitfuss, G.; von der Ohe, W.; von der Ohe, K.; Dietze, V.; Schultz, E.; Tappeser, B. (2003): Technische und biologische Pollenakkumulatoren und PCR-Screening für eine erste Stufe eines GVP-Umweltmonitorings. Modellprojekt zum Langzeitmonitoring von GVP: Bremen. (BMU/UBA/BfN, Land Bremen). In: Monitoring von Umweltwirkungen gentechnisch veränderter Organismen - Ergebnisse der Modellprojekte von Bund und Ländern, Fachtagung am 25.5.2003, Berlin, UBA-Texte 53/03, S.33-56.
- Hofmann, F.; Schlechtriemen, U.; Wosniok, W.; Foth, M. (2005): GVO-Pollenmonitoring. Technische und biologische Pollenakkumulatoren und PCR-Screening für ein Monitoring von gentechnisch veränderten Organismen. BfN-Skripten 139: <http://www.bfn.de/fileadmin/MDb/documents/skript139.pdf> (last access: 15.10.2011)
- Hofmann, F. (2007): Kurzgutachten zur Abschätzung der Maispollendeposition in Relation zur Entfernung von Maispollenquellen mittels technischem Pollensammler PMF. BfN, Bonn.

- http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/agrogentechnik/07-05-31_Gutachten_Pollendeposition_end.pdf (last access 29.10.2012).
- Hofmann, F.; Epp, R.; Kalchschmid, A.; Kratz, W.; Kruse, L.; Kuhn, U.; Maisch, B.; Müller, E.; Ober, S.; Radtke, J.; Schlechtriemen, U.; Schmidt, G.; Schröder, W.; von der Ohe, W.; Vögel, R.; Wedl, N.; Wosniok, W. (2008): GVO-Pollenmonitoring zum Bt-Maisanbau im Bereich des NSG/FFH-Schutzgebietes Ruhlsdorfer Bruch. Z. Umweltwissenschaften Schadstoffforschung 20 (4): 275-289.
http://link.springer.com/article/10.1007_%2Fs12302-008-0016-2?LI=true (last access 15.10.2011).
- Hofmann, F.; Janicke, L.; Janicke, U.; Wachter, R.; Kuhn, U. (2009a): Modellrechnung zur Ausbreitung von Maispollen unter Worst-Case-Annahmen mit Vergleich von Freilandmessdaten. BfN, Bonn.
http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/Hofmann_et_al_2009_Maispollen_WorstCase_Mo dell.pdf
- Hofmann, F.; Schlechtriemen, U.; Kuhn, U.; von der Ohe, W.; von der Ohe, K.; Kruse, L.; Epp, R.; Müller, E.; Kalchschmid, A.; Wachter, R.; Vögel, R. (2009b): Durchführung eines Pollenmonitorings an Kulturmais in FFH-Lebensräume - Projektbericht 2008 -. Fachbeiträge des Landesumweltamtes Brandenburg, Heft 110, Potsdam. http://www.mugv.brandenburg.de/cms/media.php/2320/fb_110.pdf (last access 29.10.2012).
- Hofmann, F.; Epp, R.; Kalchschmid, A.; Kratz, W.; Kruse, L.; Kuhn, U.; Maisch, B.; Müller, E.; Ober, S.; Radtke, J.; Schlechtriemen, U.; Schmidt, G.; Schröder, W.; von der Ohe, W.; Vögel, R.; Wedl, N.; Wosniok, W. (2010): Monitoring of Bt-Maize pollen exposure in the vicinity of the nature reserve Ruhlsdorfer Bruch in northeast Germany 2007 to 2008. Z. Umweltwissenschaften Schadstoffforschung 22 (3): 229-251.
<http://www.springerlink.com/content/c2012622208376x1/> (last access 15.10.2011).
- Hofmann, F.; Otto, M.; Kuhn, U.; Ober, S.; Schlechtriemen, U.; Vögel, R. (2011): A New Method for *in Situ* Measurement of Bt-Maize Pollen Deposition on Host-Plant Leaves. Insects 2(2): 12-21.
<http://www.mdpi.com/2075-4450/2/1/12> (last access 29.10.2012).
- Hofmann, F.; Schlechtriemen, U.; Kuhn, U.; Wittich, K.P.; Koch, W.; Ober, S.; Vögel, R.; Otto, M. (2013): Variation of Maize Pollen Shedding in North Germany and its Relevance for GMO-Monitoring. Breckling, B. & Verhoeven, R. (eds.): Implications of GM-Crop Cultivation at Large Spatial Scales. Proceedings of the Third GMLS-Conference 2012 in Bremen. Theorie in der Ökologie, 17: 19 – 25.
http://www.gmls.eu/beitraege/19_Hofmann.pdf (last access: 10.4.2013)
- Janicke, L.; Janicke, U. (2000): Vorschlag eines meteorologischen Grenzschichtmodells für Lagrangesche Ausbreitungsmodelle. Berichte zur Umweltphysik Nummer 2, Auflage 1, Ingenieurbüro Janicke: 1439-8222.
- Janicke, L.; Janicke, U. (2003): Entwicklung eines modellgestützten Beurteilungssystems für den anlagenbezogenen Immissionsschutz. UFOPLAN 200 43 256, im Auftrag des Umweltbundesamtes. Siehe <http://www.austal2000.de>.
- Jarosz, N.; Loubet, B.; Durand, B.; Foueillassar, X.; Huber, L. (2005): Variations in maize pollen emission and deposition in relation to microclimate. Environ. Sci. Technol. 39: 4377-4384.
- Jensen, P.D.; Dively, G.P.; Swan, C.M.; Lamp, W.O. (2010): Exposure and non-target effects of transgenic Bt corn debris in streams. Environ Entomol 39: 707-714.
- Kawashima, S.; Matsuo, K.; Du, M.; Takahashi, Y.; Inoue, S.; Yonemura, S. (2004): An algorithm for estimating potential deposition of corn pollen for environmental assessment. Environmental Biosafety Research 3: 197-207.
- Kawashima, S.; Clot, B.; Fujita, T.; Takahashi, Y.; Nakamura, K. (2007): An algorithm and a device for counting airborne pollen automatically using laser optics. Atmospheric Environment 41: 7987-7993.
- Kratz, W.; Mante, C.; Hofmann, F.; Schlechtriemen, U.; Kuhn, U.; Ober, S.; Vögel, R. (2010): Exposure of maize harvest by-products to aquatic ecosystems and protected nature reserves in Brandenburg, Germany. Breckling, B. & Verhoeven, R. (eds.): Large-area Effects of GM-Crop Cultivation. Proceedings of the Second GMLS-Conference 2010 in Bremen. Theorie in der Ökologie 16, 20-21. http://www.mapserver.uni-vechta.de/generisk/gmls2010/beitraege/GMLS2_Kratz.pdf (last access: 10.4.2013)
- Lang, A.; Beck, R.; Bauchenß, J.; Pommer, G.; Arndt, M. (2005): Monitoring der Umweltwirkungen des Bt-Gens. Projektbericht StMUGV Bayern. Schriftenreihe Bd. 7 der LfL, Freising-Weihenstephan.
- Langhans, S. (2006): Riverine floodplain heterogeneity as a controller of organic matter dynamics and terrestrial invertebrate distribution. Dissertation, ETH Zürich, DISS. ETH NO. 16997.

- Loos, C.; Seppelt, R.; Meier-Bethke, S.; Schiemann, J.; Richter, O. (2003): Spatially explicit modelling of transgenic maize pollen dispersal and cross pollination. *Journal for Theoretical Biology* 225 (2): 241-255.
- Michael, A. (2001): Anwendung des physikalisch begründeten Erosionsprognosemodells EROSION 2D/3D – Empirische Ansätze zur Ableitung der Modellparameter. Freiburger Forschungshefte C 488, Geoökologie, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2001.
- Minshall, G.W. (1996): Organic Matter Budgets. In: Hauer, F.R. & Lamberti, G.A. (eds.): *Methods in stream ecology*. Academic Press: 591-605.
- Munson, S.A.; Carey, A.E. (2004): Organic matter sources and transport in an agriculturally dominated temperate watershed. *Appl Geochem* 19: 1111-1121.
- Ober, S.; Hofmann, F.; Schlechtriemen, U.; Kuhn, U.; Wedl, N.; von der Ohe, W.; von der Ohe, K.; Radtke, J.; Müller, A.; Kalchschmid, A.; Kruse, L.; Epp, R. (2008): Durchführung eines Pollenmonitorings von Mais im Naturschutzgebiet Ruhlsdorfer Bruch 2007. Fachbeiträge des Landesumweltamtes Brandenburg, Heft 109, Potsdam. http://www.mugv.brandenburg.de/cms/media.php/2320/fb_109.pdf (last access 29.10.2012).
- Perry, J.N.; Devos, Y.; Arpaia, S.; Bartsch, D.; Gathmann, A.; Hails, R.S.; Kiss, J.; Lheureux, K.; Manachini, B.; Mestdagh, S.; Neemann, G.; Ortego, F.; Schiemann, J.; Sweet, J.B. (2010): A mathematical model of exposure of non-target Lepidoptera to Bt-maize pollen expressing Cry1Ab within Europe. *Proceedings. Biological sciences / The Royal Society* 277: 1417-1425.
- Perry, J.N.; Devos, Y.; Arpaia, S.; Bartsch, D.; Gathmann, A.; Hails, R.S.; Kiss, J.; Lheureux, K.; Manachini, B.; Mestdagh, S.; Neemann, G.; Ortego, F.; Schiemann, J.; Sweet, J.B. (2011) The usefulness of a mathematical model of exposure for environmental risk assessment. *Proceedings of the Royal Society of London series B* 278: 982-984.
- Perry, J.N.; Devos, Y.; Arpaia, S.; Bartsch, D.; Gathmann, A.; Hails, R.S.; Kiss, J.; Lheureux, K.; Manachini, B.; Mestdagh, S.; Neemann, G.; Ortego, F.; Schiemann, J.; Sweet, J.B. (2012) Estimating the effects of Cry1F Bt-maize pollen on non-target Lepidoptera using a mathematical model of exposure. *Journal of Applied Ecology*, 49, 29-37.
- Pozo, J.; Elosegí, A. (2005): Coarse benthic organic matter. In: Graca, A.S.; Bärlocher, F.; Gessner, M.O. (eds.): *Methods to study litter decomposition. A practical guide*. Springer: 25-31.
- Prihoda, K.R.; Coats, J.R. (2008a): Aquatic fate and effects of *Bacillus thuringiensis* Cry3Bb1 protein: toward risk assessment. *Environ Toxicol Chem* 27: 793-798.
- Prihoda, K.R.; Coats, J.R. (2008b): Fate of *Bacillus thuringiensis* Cry3Bb1 protein in a soil microcosm. *Chemosphere* 73: 1102-1107.
- Rosi-Marshall, E.J.; Tank, J.L.; Royer, T.V.; Whiles, M.R.; Evans-White, M.; Chambers, C.; Griffiths, N.A.; Pokelsek, J.; Stephen, M.L. (2007): Toxins in transgenic crop byproducts may affect headwater stream ecosystems. *Proc Natl Acad Sci USA* 104: 16204-16208.
- Rosi-Marshall, E.J.; Tank, J.L.; Royer, T.V.; Whiles, M.R. (2008): Reply to Beachy et al. and Parrott: Study indicates Bt corn may affect caddisflies. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 105: E11.
- Schmidt, J.E.U.; Braun, C.U.; Whitehouse, L.P.; Hilbeck, A. (2008): Effects of activated Bt transgene products (Cry1Ab, Cry3Bb) on immature stages of the ladybird *Adalia bipunctata* in laboratory ecotoxicity testing. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 56: 221-228.
- Shaw, R.H.; Tavangar, J.; Ward, D.P. (1983): Structure of Reynolds stress in a canopy layer. *J. Climate Appl. Meteorol.* 22: 1922-1931.
- Stone, M.L.; Whiles, M.R.; Webber, J.A.; Williard, K.W.J.; Reeve, J.D. (2005): Macroinvertebrate communities in agriculturally impacted southern Illinois streams: patterns with riparian vegetation, water quality, and in-stream habitat quality. *J Environ Qual* 34: 907-917.
- Swan, C.M.; Jensen, P.D.; Dively, G.P.; Lamp, W.O. (2009): Processing of transgenic crop residues in stream ecosystems. *J Appl Ecol* 46: 1304-1313.
- Swan, C.M.; Palmer, M.A. (2004): Leaf diversity alters litter breakdown in a Piedmont stream. *J N Am Benthol Soc* 23: 15-28.
- Tank, J.L.; Rosi-Marshall, E.J.; Griffiths, N.A.; Entekin, S.A.; Stephen, M.L. (2010a); A review of allochthonous organic matter dynamics and metabolism in streams. *J. N. Am. Benthol. Soc.*, 2010 29(1): 118-146.

- Tank, J.L.; Rosi-Marshall, E.J.; Royer, T.V.; Whiles, M.R.; Griffiths, N.A.; Frauendorf, T.C.; Treering, D.J. (2010b): Occurrence of maize detritus and a transgenic insecticidal protein (Cry1Ab) within the stream network of an agricultural landscape. *Proc Natl Acad Sci USA* 107: 17645-17650.
- Werner, M. (2002): *EROSION 3D Benutzerhandbuch*. GeoGnostics Software.
- Van Hout, R.; Chamecki, M.; Brush, G.; Katz, J.; Parlange, M.B. (2008): The influence of local meteorological conditions on the circadian rhythm of corn (*Zea mays* L.) pollen emission. *Agric. For. Meteorol.* 148: 1078-1092.
- Viktorov, A.G. (2011): Transfer of Bt corn byproducts from terrestrial to stream ecosystems. *Russian Journal of Plant Physiology* 58: 543-548.
- Viner, B.J.; Westgate, M.E.; Arritt, W.R. (2010): A model to predict diurnal pollen shed in maize. *Crop Science* 50: 235-245.
- Vögel, R.; Ober, S.; Hofmann, F.; Unseld, C. (2013): Agrogentechnik und Naturschutz - Wie können Schutzgebiete und aquatische Systeme wirksam vor dem Eintrag von Bt-Toxin geschützt werden? Vorstellung der Ergebnisse eines dreijährigen Projektes mit konkreten Handlungsempfehlungen an das Land Brandenburg. Fachbeiträge des Landesamtes für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz (LUGV), Heft Nr. 133. Potsdam. <http://www.lugv.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.310761.de> (last access 10.4.2013)
- Webster, J.R.; Covich, A.P.; Tank, J.L.; Crockett, T.V. (1994): Retention of Coarse Organic Particles in Streams in the Southern Appalachian Mountains. *Journal of the North American Benthological Society* 13 (2): 140-150.
- Webster, J.R.; Meyer, J.L. (1997): Organic matter budgets for streams: a synthesis. *Journal of the North American Benthological Society* 16(1), 141-161.
- Webster, J.R.; Benfield, E.F.; Ehrmann, T.P.; Schaeffer, M.A.; Tank, J.L.; Hutchens, J.J.; D'Angelo, D.J.D. (1999): What happens to allochthonous material that falls into streams? A synthesis of new and published information from Coweeta. *Freshwater Biology* 41: 687-705.
- Winkler, H.; Ostrowski, R.; Wilhelm, M. (1992): *Pollenbestimmungsbuch der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienste (PID)*. TAKT-Verlag, Paderborn.
- Wolt, J.D.; Peterson, R.K.D. (2010): Prospective formulation of environmental risk assessments: probabilistic screening for Cry1A(b) maize risk to aquatic insects. *Ecotoxicol Environ Saf* 73: 1182-1188.

Richtlinien, Gesetze, Verordnungen, Erlasse:

26. BImSchV: Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV) v. 16.12.1996. http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschv_26/gesamt.pdf (last access 29.10.2012).
4. BImSchV: Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen) (4. BImSchV) v. 24.7.1985, Stand 17.8.2012. http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschv_4_1985/gesamt.pdf (last access 29.10.2012).
- BayNatSchG (Gesetz über den Schutz der Natur, die Pflege der Landschaft und die Erholung in der freien Natur (Bayerisches Naturschutzgesetz – BayNatSchG) vom 23. Februar 2011. <https://www.verkuendung-bayern.de/gvbl/jahrgang:2011/heftnummer:4/seite:8> (last access 29.10.2012).
- BEMV: Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder v. 20.8.2002 mit Stand 7.7.2005. <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bemfv/gesamt.pdf> (last access 29.10.2012).
- BImSchG: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG) v. 26.9.2002, Stand 27.6.2012. <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschg/gesamt.pdf> (last access 29.10.2012).
- Erllass BBG (2008): Runderlass des Brandenburger Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz v. 27.3.2008 über Anbau von *Bt*-Mais und Schutzgebiete - Anforderungen an Sicher-

- heitsabstände und Erforderlichkeit von Verträglichkeitsprüfungen.
<http://www.mugv.brandenburg.de/cms/detail.php/lbm1.c.239586.de> (last access 29.10.2012).
- GenTG: Gentechnikgesetz – Gesetz zur Regelung der Gentechnik i.d.F. vom 16. Dezember 1993 (BGBl. I S. 2066), zuletzt geändert am 01. April 2008 (BGBl. I S. 499). <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/gentg/gesamt.pdf> (last access 29.10.2012).
- GenTPflEV: Gentechnik-Pflanzenerzeugungsverordnung vom 7. April 2008 (BGBl. I S. 655).
- GIRL: Geruchsimmissions-Richtlinie - Feststellung und Beurteilung von Geruchsimmissionen in der Fassung v. 29.2.2008 und einer Ergänzung v. 10.9.2008. [verfasst vom Länderausschuss für Immissionsschutz LAI mit Umsetzung in den Ländern, hier Brandenburg]
<http://www.mugv.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.2318.de/girl.pdf> (last access 29.10.2012).
- Richtlinie 2001/18/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. März 2001 über die absichtliche Freisetzung genetisch veränderter Organismen in die Umwelt und zur Aufhebung der Richtlinie 90/220/EWG des Rates; <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2001:106:0001:0038:DE:PDF> (last access 29.10.2012).
- StrlSchV: Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) v. 20.7.2001.
http://www.uni-hannover.de/imperia/md/content/agu/dokumente/strlschv_2012_02.pdf (Last access 29.10.2012).
- TA Lärm: Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm) v. 26.8.1998.
<http://www.umweltbundesamt.de/laermprobleme/publikationen/talaerm.pdf> (last access 29.10.2012).
- TA Luft: Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24.06.2002. GMBI. 2002, Heft 25-29, 511-605.
<http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/taluft.pdf> (last access 29.10.2012).
- UVPG: Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) v. 24.2.2010, Stand 17.8.2012.
<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/uvpg/gesamt.pdf> (last access 29.10.2012).
- VDI 3945-3 [VDI-Richtlinie 3945 Blatt 3] (2000): Umweltmeteorologie - Atmosphärische Ausbreitungsmodelle - Partikelmodell. VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Bd. 1a, Beuth Verlag, Berlin.
- VDI 4330-1 [VDI-Richtlinie 4330 Blatt 1] (2006): Monitoring der Umweltwirkungen von GVO – Rahmenrichtlinie. VDI-Richtlinie 4330 Blatt 1, Beuth.
- VDI 4330-3 [VDI-Richtlinie 4330 Blatt 3] (2007): Monitoring der Wirkungen von gentechnisch veränderten Organismen (GVO) – Pollenmonitoring – Technische Pollensammlung mit Pollenmassenfilter PMF und Sigma-2-Sammler. VDI-Handbuch Biotechnologie, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Bd. 1a . Beuth-Verlag, Berlin.
- VG Frankfurt (Oder), Beschl. v. 13.07.2007, Az.: 7 L 170/07.
- WHG: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) v. 31.7.2009.
http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/whg_2009/gesamt.pdf (last access 29.10.2012).

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Lage des Untersuchungsraumes bei Angermünde, Uckermark, Brandenburg.	2
Abb. 2: Überblick über die Landnutzung im Untersuchungsraum. Die Hauptversuchsflächen befinden sich bei Kerkow im Zentrum.....	3
Abb. 3: Gemessene Vertikalprofile in und über einem Maisfeld nach SHAW ET AL. (1983).....	7
Abb. 4: Zeitlicher Verlauf meteorologischer Größen über einem Maisfeld nach VAN HOUT ET AL. (2008).....	10
Abb. 5: Verhältnis der Pollenkonzentration an der Oberkante des Maisfeldes und der doppelten Höhe $c(h)/c(2h)$ als Funktion von v_s/σ_w (Sedimentationsgeschwindigkeit v_s ; vertikale Geschwindigkeitsfluktuationen an der Maisfeld-Oberkante σ_w).....	12
Abb. 6: Mittlere Konzentration als Funktion des Abstandes von einem Maisfeld (Ausdehnung 300 m mal 700 m) für eine zufällige Anordnung von Messpositionen. Die Werte wurden mit einer Ausbreitungs-Rechnung über eine Woche im Sommer bestimmt (Emission zwischen 9:00 und 14:00 Uhr der Stärke 300 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde).....	15
Abb. 7: Verteilung der statistisch angeordneten Maisfelder im Zentrum des Gebietes von 32 km mal 32 km und die dazugehörige Konzentrationsverteilung, die sich aus der Überlagerung der Verteilung für das vorher betrachtete Einzelfeld ergibt. Der Bedeckungsgrad beträgt 10 %.	16
Abb. 8: Mittlere Konzentration als Funktion des Abstandes zum nächstliegenden Maisfeld, wie sie sich für die zufällige Anordnung von Maisfeldern mit einem Bedeckungsgrad von 10 % ergibt. Jede Farbe zeigt das Ergebnis für eine andere Realisierung der zufälligen Feldanordnung.	17
Abb. 9: Maisanbau 2009 im Untersuchungsgebiet Angermünde (Kerkow-Blumenberger Mühle) und Standorte der Pollensammler PMF.....	18
Abb. 10: Der technische Pollensammler PMF mit Sigma-2 gemäß VDI-Richtlinie 4330-3 (2007).....	19
Abb. 11: Standorte der Pollensammler PMF 1-14 am zentralen Versuchsfeld B.....	20
Abb. 12: Standorte der Pollensammler 1 bis 18 in Phase 1 im Jahr 2009.....	23
Abb. 13: Referenzstandorte: Standortbereiche Maispollen-Monitoring seit 2001.	25
Abb. 14: Ergebnisse der Maispollendepositionsmessungen in Phase I in Relation zur Entfernung vom Maisfeld. Mit überregionalen Vergleichdaten und Einordnung in den darüber definierten Regressionszusammenhang aus HOFMANN 2007.....	26
Abb. 15: Variation der Maispollendeposition im Bereich des Maisfeldes B. Erfassung mittels PMF über Blühzeitraum. Die Größe der Kreisflächen symbolisiert die Höhe der Pollendeposition.....	27
Abb. 16: Geländeprofil im Bereich des Dorfes Kerkow und seiner nördlichen Umgebung.....	28
Abb. 17: Ausbreitungsrechnung für eine isotrope Windrose, indifferent Schichtung und ein quadratisches Maisfeld (blaues Quadrat): Pollenkonzentration mit Berücksichtigung des Geländeprofiles (oben) und für ebenes Gelände (unten).....	29
Abb. 18: Statistische Auswertung der meteorologischen Zeitreihen (AKTerm mit Stundenmitteln) für die Jahre 2002 bis 2005 für den Standort Angermünde und den Zeitraum 9:00 Uhr bis 14:00 Uhr während der Monate Juli und August. Der innere Kreis zeigt die Verteilung der Windrichtung (Richtung, aus der der Wind weht). Der mittlere Kreis zeigt die Verteilung der Windgeschwindigkeit, der äußere Kreis die Verteilung der Schichtungsstabilität.	32
Abb. 19: Konzentrationsverteilung für ein etwa 50 ha großes Maisfeld für verschiedene Jahre. Dargestellt ist der Mittelwert über die Monate Juli und August, wobei eine Emission von 300 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde während der Zeit zwischen 9:00 und 14:00 Uhr angenommen wurde.....	33
Abb. 20: Konzentrationsverteilung für ein etwa 50 ha großes Maisfeld für verschiedene Jahre. Dargestellt ist der Mittelwert über eine Woche im Sommer (27. Juli - 2. August), wobei eine Emission von 300 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde während der Zeit zwischen 9:00 und 14:00 Uhr angenommen wurde.....	34

Abb. 21: Konzentrationsverteilung für ein etwa 50 ha großes Maisfeld für verschiedene Jahre. Dargestellt ist der Mittelwert über eine Woche im Sommer (27. Juli - 2. August), wobei eine Emission von 300 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde während der Stunden zwischen 9:00 und 14:00 Uhr mit labiler Schichtung (Klug/Manier-Klassen IV und V) angenommen wurde.....	35
Abb. 22: Lage der Maisfelder im Untersuchungsraum mit Versuchsfeld bei Angermünde (Rahmen: 30 km x 30 km).....	37
Abb. 23: Messpositionen.....	39
Abb. 24: Standorte der Pollenmonitore in 2010.....	41
Abb. 25: Pollenmonitor PMO von TIEM-technic GbR	43
Abb. 26: Pollenmonitor des DWD.....	44
Abb. 27: Die klassische Burkard-Falle (Burkard Manufacturing Ltd., Hirst-Prinzip)	44
Abb. 28: Ergebnisse zum zeitlichen Verlauf des Maispollenfluges. Mittlere Tageswerte der Maispollenkonzentration. Pollenmonitore PMO, DWD, Burkard.....	45
Abb. 29: Kumulierte Maispollenkonzentration. Basis: mittlere Tageswerte. Pollenmonitore PMO, DWD, Burkard.	46
Abb. 30: Verlauf der prozentualen Maispollenkonzentration. Tageswerte in Prozent des kumulierten Jahreswertes. Pollenmonitore PMO, DWD, Burkard.....	47
Abb. 31: Vergleich der Tageswerte der prozentualen Maispollenkonzentration am Standort AN6 (PMO, Feldmitte) in Angermünde mit dem langjährigem Mittel am Referenzstandort ländlicher Raum in Ganderkesee (1994-2007, Daten: Wachter aus HOFMANN ET AL. 2009a).....	48
Abb. 32: Standortübersicht der 23 Pollen-Massenfilter PMF zur Messung der räumlichen Verteilung.....	49
Abb. 33: Ausschnittsdarstellung der Standorte der PMF-Pollensammler zur Messung der räumlichen Verteilung der Maispollendeposition 2010 für das Versuchsfeld mit näherer Umgebung.....	50
Abb. 34: Ergebnisse der PMF-Messungen zur räumlichen Verteilung der Maispollendeposition in.....	52
Abb. 35: Ergebnisse der PMF-Messungen zur räumlichen Verteilung der Maispollendeposition über den Blühzeitraum in 2010. Ausschnitt Maisversuchsfeld und nähere Umgebung.....	53
Abb. 36: Referenzstandorte der PMF-Messungen 2001-2010 zur Maispollendeposition in Relation zur Entfernung vom nächsten Maisfeld.	54
Abb. 37: Ergebnisse der PMF-Messungen zur Maispollendeposition in Relation zur Entfernung vom nächsten Maisfeld, Vergleich mit Regressionszusammenhang aus Referenzerhebungen 2001-2006 sowie weiteren Referenzmessungen bis 2010.	55
Abb. 38: Lage der Messstationen zur Meteorologie innerhalb und außerhalb des Maisversuchsfeldes sowie der DWD Wetterwarte Angermünde.....	56
Abb. 39: Messplatz AN6 inmitten des Maisfeldes zum Zeitpunkt der Installation vor der Maisblüte Mitte Juli. Messstation mit 3D-Ultraschall-Anemometer (USA) an der Spitze (6,85 m), 2-D USA, Feuchte- und Temperaturmesseinheit, Datenlogger.	57
Abb. 40: Messplatz AN1 außerhalb des Feldes 50 m westlich vom Maisfeldrand im Feuchtgebiet. Messstation mit 3D-Ultraschall-Anemometer (USA) an der Spitze (6,85 m), 2-D USA, Feuchte- und Temperaturmesseinheit, Datenlogger.	57
Abb. 41: Messeinrichtungen zur Meteorologie am Mast. 3D-Ultraschall-Anemometer (USA) an der Spitze (6,85 m), 2-D USA, Feuchte- und Temperaturmesseinheit (5,65 m).....	58
Abb. 42: Dreidimensionales Ultraschall-Anemometer.	59
Abb. 43: Zweidimensionales Ultraschall-Anemometer.	59
Abb. 44: Temperatur- und Feuchtesensor mit Strahlungsschutz.	59
Abb. 45: Dreistündige Pollenkonzentration in Feldmitte (AN6), Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit sowie relative Luftfeuchte und Niederschlagsintensität.....	65

Abb. 46: Dreistündige Pollenkonzentration über dem Maisfeld an Tagen mit hohen Pollenschüttungen (9.-12. August 2010). Zeitgleich dargestellt ist die über dem Maisfeld gemessene Flusssdichte des turbulenten Wärmestroms. Ferner ist die über dem Maisfeld gemessene Schubspannungs-Geschwindigkeit als Kenngröße für den Impulsfluss dargestellt.....	66
Abb. 47: Windgeschwindigkeit U_a und Windrichtung R_a	69
Abb. 48: Windgeschwindigkeit U_a , Windrichtung R_a , Temperatur T_p , relative Luftfeuchte R_h und reziproke Monin-Obukhov-Länge MO_s für den Zeitraum 22.07.2010 bis 06.08.2010.....	71
Abb. 49: Windgeschwindigkeit U_a , Windrichtung R_a , Temperatur T_p , relative Luftfeuchte R_h und reziproke Monin-Obukhov-Länge MO_s für den Zeitraum 07.08.2010 bis 22.08.2010.....	72
Abb. 50: Verlauf von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und vertikaler Geschwindigkeitsfluktuationen, gemessen mit dem Ultraschall-Anemometer im Versuchsfeld und am Rand des Versuchsfeldes.....	73
Abb. 51: Streudiagramm der vertikalen Geschwindigkeits-Fluktuationen. (Grafik: Janicke).....	74
Abb. 52: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung. Links: Über den Zeitraum der Pollenmessungen (22.7. bis 22.8.2010). Rechts: Über den Zeitraum der höchsten Pollenausschüttung im Versuchsfeld (8.8. bis 17.8.2010).....	74
Abb. 53: Verlauf der 3-Stunden-Mittel, nur Feld, unskaliert.....	79
Abb. 54: Verlauf der 3-Stunden-Mittel, nur Feld, skaliert.....	80
Abb. 55: Streudiagramm von gemessenen und modellierten, skalierten Werten.....	81
Abb. 56: Verlauf der 3-Stunden-Mittel.....	82
Abb. 57: Streudiagramm von gemessenen und modellierten, skalierten Werten.....	82
Abb. 58: Verlauf des kumulierten 3-Stundenmittels.....	83
Abb. 59: Verlauf der Tages-Mittel. Durchgezogene Linien: gemessen.....	84
Abb. 60: Streudiagramm von gemessenen und modellierten, skalierten Werten.....	84
Abb. 61: Verlauf des kumulierten Tages-Mittels.....	85
Abb. 62: Über den Zeitraum 22.07.2010 bis 22.08.2010 integrierte Pollenflusssdichte als Funktion des Abstandes zum nächsten Maisfeld.....	87
Abb. 63: Streudiagramm von berechnetem Konzentrationsmittel und dem aus der integrierten, berechneten Flusssdichte abgeschätzten Konzentrationsmittel.....	88
Abb. 64: Modellierter bodennahe Konzentrationsverteilung der Pollen (Mittelwert über den Zeitraum 22.07.2010 bis 22.08.2010). Links: Nur Beiträge vom Versuchsfeld. Rechts: Beiträge von Versuchsfeld und Umlandfeldern.....	88
Abb. 65: Modellierter Deposition (Depositionsflusssdichte aufgrund trockener Deposition) der Pollen (Mittelwert über den Zeitraum 22.07.2010 bis 22.08.2010). Links: Nur Beiträge vom Versuchsfeld. Rechts: Beiträge von Versuchsfeld und Umlandfeldern.....	89
Abb. 66: Zeitreihen der Maispollenkonzentration.....	90
Abb. 67: Lage der Maisfelder im Untersuchungsraum bei Angermünde, Versuchsfelder im Zentrum.....	93
Abb. 68: Klassifizierung der Maisfelder im Umfeld der Versuchsfelder (A, B, C) nach Blühverhalten.....	94
Abb. 69: Standorte der Pollenmonitore in 2011 zur Erfassung der Variation der Maispollenemission und -immission in den Maisfeldern A, B und C.....	97
Abb. 70: Detailskizze der Pollenmonitor-Messstandorte in und zwischen den Maisfeldern A und B.....	98
Abb. 71: Detailskizze zur Lage der Pollenmonitor-Messstandorte in Maisfeld C.....	98
Abb. 72: Pollenmonitor PMO-LV _{Solar} mit Passivsammler PMF (AN1) und PMF/Sigma-2 (AN2) am Standort AN1 im Maisfeld A.....	99
Abb. 73: Pollenmonitor PMO-LV _{Solar} mit Passivsammler PMF (AN5) und PMF/Sigma-2 (AN6) am Standort AN5 im Maisfeld B kurz vor Blühbeginn am 19.7.2011.....	99

Abb. 74: Pollenmonitor PMO-LVSolar mit Passivsammler PMF (AN3), dahinter PMF/Sigma-2 (AN4) an der Messstation AN3 im Maisfeld C während der Maisblüte (2.8.2011)	100
Abb. 75: Messstandort AN7 mit Pollenmonitor Burkard im Solarbetrieb und Passivsammler PMF im Sojafeld zwischen den Maisfeldern A und B (19.7.2011)	100
Abb. 76: Solarstation der 12V-Pollenmonitor-Messstationen (TIEM technic GbR).....	101
Abb. 77: Mittlere Tageswerte der Maispollenkonzentration im logarithmischen Maßstab.	104
Abb. 78: Verlauf der 3h-Werte zur Maispollenkonzentration in logarithmischem Maßstab.	105
Abb. 79: Mittlerer Tagesgang der Maispollenkonzentration.	106
Abb. 80: Tagesgang der Maispollenkonzentration zur Hochblüte.....	106
Abb. 81: Unterbrechung der Maispollenkonzentration aufgrund ungünstiger Witterung, Wiederaufnahme der Schütte noch am selben Tag nach eintretender Wetterbesserung.....	107
Abb. 82: Kumulierte Maispollenkonzentration.	108
Abb. 83: Kumulierte prozentuale Maispollenkonzentration Maßstab AN1 (Maisfeld A), AN5 (Maisfeld B), AN3 (Maisfeld C) und AN7 (Sojafeld zwischen A und B).	109
Abb. 84: Mittlere Tageswerte der prozentualen Maispollenkonzentration.	110
Abb. 85: Variation der Tageswerte der prozentualen Maispollenkonzentration für die Untersuchungen im Raum Angermünde während der Versuchsjahre 2010 und 2011.	111
Abb. 86: Variation der prozentualen Maispollenkonzentration am Referenzstandort Westerloge über die Jahre 1993 bis 2007 mit langjährigem Mittel.....	111
Abb. 87: Standortübersicht der PMF-Messungen zur räumlichen Verteilung der Maispollendeposition 2011(n = 22) - Lage der Maisfelder im näheren Umfeld der Versuchsfelder (A, B, C)..	112
Abb. 88: Standorte der PMF-Messungen zur räumlichen Verteilung der Maispollendeposition 2011 im Bereich der Versuchsfelder A-C.	113
Abb. 89a-g: Ausschnitts-Darstellungen zur Lage der PMF-Standorte für die räumliche Erfassung der Maispollendeposition im Raum Angermünde 2011 (n=22).....	115
Abb. 90a-r: Standorte der PMF-Pollensammler AN 1-22 in 2011.	118
Abb. 91: Referenzstandorte der PMF-Messungen 2001-2011 in Deutschland, Schweiz und Belgien zur Maispollendeposition in Relation zur Entfernung vom nächsten Maisfeld.....	120
Abb. 92: Ergebnisse der PMF-Messungen zur Maispollendeposition in Relation zur Entfernung vom nächsten Maisfeld, Vergleich der Ergebnisse aus Angermünde 2009 bis 2011 mit Ergebnissen aus den Regressionsanalysen der Erhebungen 2001-2006 sowie weiterer Erhebungen bis 2011.	121
Abb. 93: Statistische Auswertung der meteorologischen Zeitreihe.....	124
Abb. 94: Über die Messperiode (33 Tage) integrierte Pollenflussdichte als Funktion des Abstandes zum nächsten Maisfeld nach Ansatz 1 (Ableitung der Emission der Umlandfelder aus den Emissions-Zeitreihen der Versuchsfelder).....	129
Abb. 95: Über die Messperiode (33 Tage) integrierte Pollenflussdichte als Funktion des Abstandes zum nächsten Maisfeld nach Ansatz 2 (einheitlicher, konstanter Skalierungsfaktor für die Umlandfelder).	129
Abb. 96: Über die Messperiode (33 Tage) integrierte Pollenflussdichte als Funktion des Abstandes zum nächsten Maisfeld nach Ansatz 3 (Emissionsrate von knapp 3 bzw. 13 Pollen pro Quadratmeter und Sekunde bei Nacht bzw. bei Tag für alle Felder).....	130
Abb. 97: Über die Messperiode (33 Tage) integrierte Pollenflussdichte als Funktion des Abstandes zum nächsten Maisfeld nach Ansatz 1/2 ohne Berücksichtigung der Umlandfelder.....	130
Abb. 98: Portables Digitalmikroskop Dino-Lite Pro 1.3 MP betrieben am USP-Port des Notebooks mit 8 LED-Ringbeleuchtung an einem <i>Rumex</i> -Blatt auf dem Labortisch und rechts im Geländeeinsatz.	136

Abb. 99: Ausschnitt der Blattoberseite von <i>Centaurea scabiosa</i> , aufgenommen mit dem DinoLite Pro 1.3 bei 200-facher Vergrößerung im Freiland neben einem Maisfeld (5 m), Ausschnitt hier ca. 2,5 mm ² .	137
Abb. 100: Stukturiertes Probenahme-Design mit insgesamt 27 Probenahme-Punkten (Bildflächen) pro Blatt, gebildet aus 3 Transsekten à 5 und 4 Clustern à 3 Probenahme-Punkten aus hoch und niedrig belegten Bereichen.	139
Abb. 101: Standortbereiche zur Erfassung der Maispollendeposition auf Pflanzenblättern. Standort zentrales Maisversuchsfeld (orange, spätblühendes Maisfeld), Standorte „Soll“ und „Hügel“ am Maisfeld rechts oben (gelb, frühblühendes Maisfeld).	140
Abb. 102: Messstandort „Soll“ am nordöstlichen Maisfeld.	141
Abb. 103: Messstandort „Hügel“ am nordöstlichen Maisfeld.	141
Abb. 104: Messstandort zentrales Mais-„Versuchsfeld“.	142
Abb. 105: Raupen des Kleinen Fuchses (<i>Nymphalis urticae</i>) auf einem Brennnesselblatt am Standort „Soll“ im Saumbereich des nordöstlichen Maisfeldes (2.8.2010).	143
Abb. 106: Histogramm der Maispollendepositions (log n/cm ²) auf Maisblättern mit log-Normal-Dichteverteilung (n=2.498).	146
Abb. 107: Histogramm der Maispollendepositionsdaten auf Brennnesselblättern (log n/cm ²) quell-nah im zentralen Versuchsfeld mit log-Normal-Dichteverteilung (n= 836).	147
Abb. 108: Nahaufnahme eines Maisblattes nach Blühbeginn am Standort „Hügel“ (28.7.2010) mit den zu Beginn der Messreihe markierten Transsektpunkten; deutlich ist die inhomogene Verteilung der Maispollen auf dem Blatt zu erkennen mit Aggregationsbereichen auf und auch abseits der Mittelrippe.	149
Abb. 109: Inhomogene Verteilung der Pollendeposition auf den Maisblättern in Nahaufnahmen a (links oben): Maisblatt nach Blühbeginn, 28.7.2010 „Hügel“; b (rechts oben): Maisblatt nach Blühbeginn, 28.7.2010 „Hügel“; c (links unten): Maisblatt in Fahnnähe zur Vollblüte, 6.8.2010 Versuchsfeld; d (rechts unten): Akkumulation am Blattgrund nach Regen, 7.8.2010 Versuchsfeld.	150
Abb. 110: Maisblatt, 200x, 9 Maispollen/Zählfläche entsprechend 162 Maispollen/cm ² , 28.7.2010, „Hügel“ (M1.2 T, 0306).	151
Abb. 111: Maisblatt, 200x, 76 Maispollen/Zählfläche = 1368/cm ² , 28.7.2010, „Hügel“ (M1.1AM C2, 0287).	151
Abb. 112: Maisblatt, 200x, Auswertung mit Hilfslinien und Markierung der Maispollen zur Quantifizierung über die Software, 379 Maispollen/Zählfläche = 6.822/cm ² , 28.7.2010, „Hügel“ (200x, M2.2 C4, 0001).	152
Abb. 113: Maisblatt, 50x, Akkumulation am Blattgrund nach Regen, 12.8.2010, Versuchsfeld. Eine exakte Auszählung ist hier nicht mehr möglich, Abschätzung erfolgt über Pollendichte an Oberfläche mal Anzahl Schichten sichtbar am Riss unter 200x; >5.000 Pollen/Zählfläche = >103.000 n/cm ² (812.M.D C5 B076).	152
Abb. 114: Variation der Maispollendeposition auf Maisblättern über die Zeit am Standort „Hügel“. N = 945 Messwerte.	153
Abb. 115: Variation der Maispollendeposition auf Maisblättern über die Zeit am Standort „Soll“. Auswertung aller Tageswerte am Standort. N= 648 Messwerte.	154
Abb. 116: Variation der Maispollendeposition auf Maisblätter über die Zeit am Standort „Versuchsfeld“. Auswertung aller Tageswerte am Standort. N = 905 Messwerte.	155
Abb. 117: Messung der Pollendeposition auf Brennnesselblättern: Standort „Soll“ 28.7.–6.8.2010, ca. 1 m Abstand vom Feldrand, natürlicher Bestand.	156
Abb. 118: Messung der Pollendeposition auf Brennnesselblättern: Standort „Versuchsfeld“, 7.8.–17.8.2010, im Feld in Bestandslücke.	157

Abb. 119: Nahaufnahme eines Brennesselblatts am 1.8.2010, Standort „Soll“, mit den zu Beginn der Messreihe (29.7.) markierten Transsekten. Zu erkennen ist die inhomogene Verteilung der Maispollen mit einer Aggregation in der Blattspreite abseits der Mittelrippe.	157
Abb. 120: Brennesselblatt, 200x, 2 Maispollen/Zählfläche entsprechend 38 Maispollen/cm ² , 30.7.2010, „Soll“ (B7.C2, 0021).	158
Abb. 121: Brennesselblatt, 200x, 180 Maispollen/Zählfläche entsprechend 3.708 Maispollen/cm ² , 12.8.2010, „Versuchsfeld“ (812.B.D-2 T3, B130).	158
Abb. 122: Brennesselblatt, 200x, ca. 670 Maispollen/Zählfläche entsprechend 13.802 Maispollen/cm ² , 12.8.2010, „Versuchsfeld“ (812.B.D-1 C1, B137).	159
Abb. 123: Variation der Maispollendeposition auf Brennessel-Blättern über die Zeit am Standort „Soll“ in ca. 1 m Entfernung vom Feldrand. Auswertung aller Tageswerte am Standort. N = 810 Messwerte.	160
Abb. 124: Variation der Maispollendeposition auf Brennesselblättern über die Zeit am Standort „Soll“ in ca. 1 m Entfernung vom Feldrand. Auswertung aller Tageswerte am Standort. N= 836 Messwerte.	161
Abb. 125: Messung der Pollendeposition auf Gänsefußblättern am Standort „Versuchsfeld“, rechts Nahaufnahme Gänsefuß (10.8.2010). Der Messort liegt im Maisfeld ca. 10 m vom Feldrand mit verbreitetem Gänsefußvorkommen.	162
Abb. 126: Gänsefußblatt in Nahaufnahme, „Versuchsfeld“ (12.8.2010).	163
Abb. 127: Gänsefußblatt, 200x, 45 Maispollen/Zählfläche entsprechend 927 Maispollen/cm ² , 12.8.2010, „Versuchsfeld“ (812.G.D-1 T3, B207).	163
Abb. 128: Gänsefußblatt, 200x, 210 Maispollen/Zählfläche entsprechend 4.326 Maispollen/cm ² , 13.8.2010, „Versuchsfeld“ (813.G.D-1 T1, 0145).	164
Abb. 129: Variation der Maispollendeposition auf Gänsefußblättern über die Zeit im Versuchsfeld am Bestandsrand. N = 586 Messwerte.	165
Abb. 130: Messung der Pollendeposition auf Ampferblättern am Standort „Soll“, natürlicher Bestand, Erfassung am 29.7., 31.7. und 4.8. in ca. 1 m Abstand vom Feldrand.	166
Abb. 131: Ampferblatt am Standort „Soll“ in Nahaufnahme.	167
Abb. 132: Brombeerblatt am Standort „Hügel“ in Nahaufnahme (2.8.2010).	167
Abb. 133: Ampferblatt, 200x, 78 Maispollen/Zählfläche entsprechend 1.482 Maispollen/cm ² , 29.7.2010, „Soll“ (A2L.C1, 0017).	168
Abb. 134: Brombeerblatt, 200x, 11 Maispollen/Zählfläche, 209 Maispollen/cm ² entsprechend, 2.8.2010, „Hügel“ (R5.T1, 0001).	168
Abb. 135: Brombeerblatt, 200x, 36 Maispollen/Zählfläche, 701 Maispollen/cm ² entsprechend, 1.8.2010, „Hügel“ (R2.C1, 0020).	169
Abb. 136: Variation der Maispollendeposition auf Ampferblättern über die Messtage hinweg. Die Erfassung erfolgte am Standort „Soll“ am 29. Juli vor- und nachmittags sowie am 31. Juli und 4. August. N = 324 Messwerte.	170
Abb. 137: Variation der Maispollendeposition auf Brombeerblättern über die Messtage. Die Erfassung erfolgte am Standort „Hügel“ am 1.8., 2.8., 5.8. und 6.8. N = 324 Messwerte.	170
Abb. 138: Vergleichende Darstellung zum Verlauf der Maispollendeposition über die Zeit für die verschiedenen Pflanzenarten bezogen auf Quellnähe (0,2 m).	172
Abb. 139: Vergleichende Darstellung zum Verlauf der Maispollendeposition über die Zeit für die verschiedenen Pflanzenarten bezogen auf Quellnähe (0,2 m) und Berücksichtigung von Äquivalenzfaktoren (Bezug Mais=1; Brennessel 0,4; Ampfer 0,6; Brombeere 2,7).	173
Abb. 140: Exposition von Gewässerökosystemen durch Pollen- und Streueintrag.	177
Abb. 141: Schema potentieller Stoffeinträge aus dem Maisanbau in Gewässerökosysteme (aus ROSI-MARSHALL ET AL. 2007, Fig. 1)	178

Abb. 142: Eintragspfade von Mais und Cry1Ab-Proteinen in Gewässerökosysteme. Das Foto zeigt Maisansammlungen in der Gewässerzone und am Böschungsrand (TANK ET AL 2010b, Fig. 3).	181
Abb. 143a-f: Verschiedene, exemplarische Gewässerabschnitte der Welse ab Blumenberger Teiche.	182
Abb. 144: Exemplarische Standorte zur Erfassung der Exposition von Gewässerökosystemen durch Pollenflug mittels PMF, berücksichtigt wurden u.a. Gräben und Feuchtgebiete (links), Sölle (Mitte) und offene Gewässer (rechts, Blumenberger Teich).	183
Abb. 145: Zusammenhang von Maispollendeposition und Abstand zum nächstliegenden Maisfeld.	184
Abb. 146: Skizze der Messanordnung zur Erfassung der Maistreueinträge im Nahbereich der Erntemaschine.	186
Abb. 147: Differenzierung von Maisstreu-Häcksel in Grob- und Feinfraktionen.	188
Abb. 148: Maisstreu Häckselgut, Bestandteile von Grob- und Feinfraktionen. Digitalbilder unter Vergrößerung, rechts jeweils die Ausschnittvergrößerung.	190
Abb. 149: Versuchsanordnung zur Erfassung des Streueintrages im Jahr 2009.	191
Abb. 150: Messstelle am Maisfeld mit Netzen und Metallwannen für den Streufalleintrag, Aktivsammler Sporewatch (Partikelkonzentration, kontinuierliche Erfassung), Passivsammler Sigma-2 und Objektträger sowie Meteorologie-Messstation (Davis Vantage Pro2).	192
Abb. 151: Streufallbelastung in Abwindlage beim Passieren der Erntemaschinen, Maisfeldrand ca. 18 m entfernt.	192
Abb. 152: Streufallnetz 0,5 m x 0,5 m, Maschenweite 1 mm.	193
Abb. 153: Maisstreu-Deposition in Relation zur Entfernung vom Maisfeld in Abwindrichtung mittels Streufall-Netzen aus den Versuchen im Jahr 2009.	194
Abb. 154: Metallwannen-Streufalle 1 m x 0,1 m x 0,1 m (VERN e.V.).	195
Abb. 155: Maisstreu-Deposition in Relation zur Entfernung vom Maisfeld in Abwindrichtung mittels Metallwannen als Streufallen.	196
Abb. 156: Sporewatch zur Erfassung der Aerosolpartikel im Größenbereich von ca. 1 µm bis ca. 100 µm.	197
Abb. 157: Charakteristische Aerosolpartikel der Feinfraktion <100 µm während der Maisernte (Sporewatch, 10 l/min).	199
Abb. 158: Entfernungsabhängige Partikelkonzentration in der Luft während der Erntedurchgänge des Maishäckslers am 14.9.2009 gemessen mit der Sporewatch.	201
Abb. 159: Schema des Versuchsdesigns zur Erfassung des Streueintrages während der Maisernte im Oktober 2010.	203
Abb. 160: V-förmige Anordnung der Transsekte mit den Streufallen auf der vornehmlichen Abwindseite des Maisfeldes für eine möglichst breite Abdeckung von Windrichtungs-Änderungen.	203
Abb. 161: Streufallen (OKT Multi Box XXL, 0,22 m ² : 52 cm x 43 cm x 26 cm). Rechts daneben der Passivsammler Sigma-2. Transsekt A mit Blick auf Feldrand, Vordergrund Standort in 20 m Entfernung vom Feldrand.	204
Abb. 162: Anordnung der Streufallen (LB: litter boxes) entlang des mittleren Transsektes B, beginnend 1 m vom Feldrand bis in 200 m Entfernung. Die Fallen im Nahbereich sind versetzt angeordnet zur Vermeidung von Anströmeffekten.	204
Abb. 163: Lage der ersten Streufallen entlang Transsekt B aus Seitenansicht vom Feldrand bis 10 m Entfernung.	205
Abb. 164: Positionierung der Streufallen im Gewässer („Soll“) neben einem Maisfeld.	205
Abb. 165: Mobile Meteorologie-Messstation mit Funkdisplay und Datenlogger (Davis Vantage Pro II), Windmesser (Richtung und Geschwindigkeit) in 3 m Höhe, Temperatur-, Feuchte- und Niederschlagssensor in 1,5 m; rechts volumetrischer Aerosolsammler Sporewatch (1,8 m Höhe, 10 l/min; Burkard Scientific Ltd.)	206

Abb. 166: Erntevorgang von Mais mit Häcksler und begleitendem Sammelfahrzeug.....	207
Abb. 167: Eintrag von Streu in Umwelt: Allgemein durch Wind, besonders hoher Eintrag bei ungenauer Positionierung des Sammelfahrzeuges, hohem Füllstand und bei Wechsel des Sammelfahrzeuges.	207
Abb. 168: Streufalle nach Durchgang der Erntemaschine.....	209
Abb. 169: Überführung der Streuprobe aus dem Sammelgefäß im Gelände in ein verschließbares Glasgefäß mittels Spritzflasche; rechts Beispiel einer Streuprobe aus 1 m Entfernung.....	209
Abb. 170: a) Siebmaschine (Analysette Pro, Fritsch GmbH) mit Siebkaskade aus Analysesieben (100 mm Durchmesser) mit Maschenweiten 1 mm (oben), 63 µm (mittig) und Siebpfanne mit seitlichem Auslauf zum Auffangen des Durchlaufgutes mit Partikeln < 63 µm in 1.000 ml – Becherglas; b) Abscheidung der Partikelfractionen mittels Vakuumfiltration (Sartorius) auf 12 µm Membranfilter zur anschließenden Trocknung und Wiegung.	210
Abb. 171: Beispiele einer größenfraktionierten Maisstreuprobe: Rechts: Grobpartikel > 1mm; Mitte: Feinpartikel < 1mm und > 63 µ; Unten: Feinpartikel < 63 µm und größer 12 µm.	211
Abb. 172: Eintrag von Maisstreu in Relation zur Entfernung vom Maisfeldrand aus den Versuchen in 2010 in Kerkow bei Angermünde in Brandenburg.	212
Abb. 173: Vergleich der Gradienten zur Streu-Depositionen in Relation zur Entfernung aus den beiden Versuchsjahren 2009 und 2010.	214
Abb. 174: Eintragsraten und Transportdistanzen von Maispollen und –streu für 12 Gewässer in Indiana, USA (aus: ROSI-MARSHALL ET AL. 2007, Fig. 2).	215
Abb. 175: Lateraler Eintrag von Maispflanzengeweben nach der Ernte in ein angrenzendes Gewässer (Mittelwerte). a) Laterale Einträge 2006-2007. b) Laterale Einträge 2007-2008. c) Mais-Biomasse Acker 2006-2007. d) Mais Biomasse Ackerfläche 2007-2008. (aus: JENSEN ET AL. 2010, Fig. 1) [Anmerkung: Die Einträge sind auf 1 m ² Fläche bezogen, so dass die Einheiten korrekterweise lauten: g/m ² und g/m ² /d].	216

8.3 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Wertebereiche von Schichtungsparametern.....	9
Tab. 2: Ergebnisse der Maispollendepositionsmessungen mit dem PMF in Phase II (2010).....	51
Tab. 3: Klimadaten der DWD-Wetterwarte Angermünde für Juli 2010 (Quelle: DWD Wetterwarte Angermünde).....	61
Tab. 4: Klimadaten der DWD-Wetterwarte Angermünde für August 2010 (Quelle: DWD Wetterwarte Angermünde).....	62
Tab. 5: Übersicht über mittlere Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Temperatur und Feuchte vom 04.08. bis 22.08.....	70
Tab. 6: Vergleich der Messwerte für die Positionen AN1, AN2, AN5 und AN6.	86
Tab. 7: Auflistung der Maisfelder im Umfeld von Kerkow mit Ergebnissen der phänologischen Beobachtungen und Klassifizierung der Versuchsfelder	96
Tab. 8: Vergleich der Sammeleffizienz der Pollenmonitore PMO-High Volume, PMO-LV _{Solar} (Low Volume) und Burkard-Falle (Low Volume) in Vergleichsmessungen mit dem nach VDI 4330 Bl. 3 (2007) standardisierten Verfahren Pollen-Massenfilter PMF mit Ableitung von Kalibrierfaktoren (Bezugssystem PMO High Volume)	102
Tab. 9: Ergebnisse der Maispollendepositions-Messungen mit dem PMF aus den Versuchen im Raum Angermünde in 2011.	119
Tab. 10: Verhältnis PMO zu PMF anhand der ermittelten Pollenflussdichten	127
Tab. 11: PMF-Positionen, Abstand zum nächsten Maisfeld (m), PMF-Meßwert (Pollen/m ²), modellierter Wert (Pollen/m ²) und Verhältnis von modelliertem zu gemessenem Wert nach Ansatz 1 ($f = 0,85$).....	131
Tab. 12: PMF-Positionen, Abstand zum nächsten Maisfeld (m), PMF-Meßwert (Pollen/m ²), modellierter Wert (Pollen/m ²) und Verhältnis von modelliertem zu gemessenem Wert nach Ansatz 2 ($f = 0,85$, $s_u = 13$).....	131
Tab. 13: PMF-Positionen, Abstand zum nächsten Maisfeld (m), PMF-Meßwert (Pollen/m ²), modellierter Wert (Pollen/m ²) und Verhältnis von modelliertem zu gemessenem Wert nach Ansatz 3 ($s = 13$).....	132
Tab. 14: PMF-Positionen, Abstand zum nächsten Maisfeld (m), PMF-Meßwert (Pollen/m ²), modellierter Wert (Pollen/m ²) und Verhältnis von modelliertem zu gemessenem Wert nach Ansatz 1/2 ohne Berücksichtigung der Umlandfelder ($f = 0,85$, $s_u = 0$).....	132
Tab. 15: Ergebnisse aus den Untersuchungen zum Probenahmedesign der Blattdepositionsmessungen.....	138
Tab. 16: Eigenschaften der ausgewählten Pflanzenarten in Bezug auf Eignung für Blattdepositionsmessungen im Untersuchungsgebiet.....	142
Tab. 17: Bedeutung der ausgewählten Pflanzenarten als Futterpflanzen für Schmetterlingslarven (Tag- und Nachtfalter).....	143
Tab. 18: Kennzahlen der Maispollendepositionsdaten.....	148
Tab. 19: Deposition von Maishäcksel im Nahbereich der Erntemaschine	186
Tab. 20: Frisch- und Trockengewicht von Maishäcksel.....	187
Tab. 21: Maisstreu Häckselgut, Anteile der Grob- und Feinfraktionen (Probe I).	188
Tab. 22: Ergebnisse der quantitativen Einzelpartikelanalyse aus den Luftkonzentrations-Messungen mit der Sporewatch (10 l/min).	200

8.4 Abkürzungsverzeichnis

µm	Mikrometer (10^{-9} Meter)
AG	Arbeitsgemeinschaft
AKTerm	Ausbreitungsklassen-Zeitreihe
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVEL	Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft
<i>Bt</i>	<i>Bacillus thuringiensis</i>
CEN	Comité Européen de Normalisation
cm	Zentimeter
DIN	Deutsches Institut für Normung
DNA	Deoxyribonucleic Acid
DNS	Desoxyribonukleinsäure
DWD	Deutscher Wetterdienst
EFSA	European Food Safety Authority
ELISA	Enzyme-linked immuno sorbent assay (Antikörperbasiertes Nachweissystem für GVO)
F&E	Forschung & Entwicklung
FFH	Flora-Fauna-Habitat
GMT	Greenwich Mean Time
GPS	Global Positioning System
GR	Globalstrahlung
gv	gentechnisch verändert
GVO	Gentechnisch veränderte Organismen
GVP	Gentechnisch veränderte Pflanzen
HR	Herbizidresistenz
HTML	Hypertext Markup Language
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
InVeKoS	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem
JRC	European Joint Research Center
km	Kilometer
LUGV	Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg
m	Meter
mm	Millimeter (10^{-3} Meter)
MS	Microsoft, Redmond, WA, USA
MUGV	Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg
MW	Mittelwert
n.s.	nicht signifikant
n; N	Anzahl
NO	Nordost
NSG	Naturschutzgebiet
NW	Nordwest
NWG	Nachweisgrenze
O	Ost
PCR	Polymerase Chain Reaction (DNA-Nachweissystem für GVO)
PMF	Pollenmassenfilter (Passivsammler)
PMO	Pollenmonitor (Aktivsammler, kontinuierliche Erfassung)
r	Korrelationskoeffizient nach Pearson

RL	Richtlinie
S	Süd
s	Sekunde
SO	Südost
SRU	Rat von Sachverständigen für Umweltfragen
SW	Südwest
TA	Technische Anleitung
TIEM	TIEM Integrierte Umweltüberwachung GbR
Tsd.	Tausend
UBA	Umweltbundesamt
UTM	Universal transverse Mercator-Projektion
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDI-RL	VDI Richtlinie
W	West
Z	z-Transformation
Σ	Summe