

Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger: Leibniz Universität Hannover (LUH)
Projektleitung: Prof. Dr. Günter Groß
Arbeitspaketleiter: Prof. Dr. Günter Groß, Prof. Dr. Björn Maronga,
Prof. Dr. Siegfried Raasch, Dr. Matthias Sühling
Förderkennzeichen: 01LP1911A
Vorhabenbezeichnung: Verbundprojekt Stadtklima im Wandel Phase 2: Modellbasierte
Stadtplanung und Anwendung im Klimawandel (MOSAIK-2),
Teilprojekt 1: Koordination, Communitymodell, Modellevaluierung,
Optimierung, Unsicherheit, Wolken, Eisphase, Multiagentenmodell,
Windwurfmodellierung
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2019 - 31.12.2023

Teil I - Kurzbericht

Das Projekt "Stadtklima im Wandel Phase 2: Modellbasierte Stadtplanung und Anwendung im Klimawandel (MOSAIK-2)" wurde von der Leibniz Universität Hannover unter der Leitung von Prof. Dr. Günter Groß sowie Prof. Dr. Björn Maronga, Prof. Dr. Siegfried Raasch und Dr. Matthias Sühning durchgeführt. Ziel war es, das Stadtklimamodell PALM-4U, das in der ersten Phase des Projekts entwickelt wurde, weiterzuentwickeln, zu optimieren und zu evaluieren. Dies sollte sowohl die Anwendbarkeit für kommunale Zwecke als auch für wissenschaftliche Forschung sicherstellen. Die zentralen Entwicklungen im Projekt umfassten die Erweiterung und Optimierung bestehender Module sowie die Implementierung neuer Komponenten. Insbesondere wurden Fortschritte in den Bereichen Luftchemie und Schadstoffausbreitung, Emissionsmodellierung, Strahlungstransfer und Multiagentenmodellierung gemacht. Neue Modellkomponenten wurden für die Simulation von Sturmschäden an Bäumen (Windwurf), Wolken- und Niederschlagsbildung über die Eisphase sowie für Schnee auf der Landoberfläche hinzugefügt. Die Nachhaltigkeit des Modells wurde durch Optimierungen in der Gebäudeparametrisierung und die Nutzung neuer Rechnerarchitekturen sichergestellt sowie der Einrichtung einer neuen Governance-Struktur vorangetrieben. Die geplanten Arbeiten wurden zum Großteil mit Erfolg durchgeführt. Einzelne Meilensteine konnten nicht erreicht werden oder mussten durch begründete Änderungen im Projektplan durch andere Entwicklungen ersetzt werden.

Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Teilprojekt 1 (TP1) wurden wesentliche Entwicklungs- und Evaluierungsarbeiten durchgeführt. Zu den Arbeitspaketen gehörten:

- **WP-S1:** Koordination und Internationalisierung – Trotz pandemiebedingter Einschränkungen wurden internationale PALM-Seminare erfolgreich durchgeführt und die Zusammenarbeit mit internationalen Forschungseinrichtungen intensiviert.
- **WP-S2:** Entwicklung einer Community Modellstruktur und Leitung der PALM-4U Nachwuchsgruppe – Hier wurde eine strukturierte Community-Modellstruktur entwickelt.
- **WP-S3:** Modellevaluierung und Anwendersupport – Umfangreiche Evaluierungsrechnungen wurden durchgeführt, um das Modell weiter zu validieren und zu optimieren.
- **WP-S4:** Modelloptimierung und -nachhaltigkeit – Implementierungen wie die "immersed boundary condition" und Konzeptionierung eines kompressiblen Gleichungssystems wurden vorgenommen, um die Modellgenauigkeit und Rechenleistung zu verbessern.

- **WP-S5.1:** Unsicherheit von Modellergebnissen in Abhängigkeit von Eingangsdaten – Sensitivitätsanalysen wurden durchgeführt, um die Auswirkungen unsicherer Eingangsdaten auf die Modellergebnisse zu bestimmen.
- **WP-P1:** Gefrorenes Wasser in Atmosphäre und auf dem Boden – Erweiterungen im Bereich der Mischphasenmikrophysik und Schneemodellierung wurden erfolgreich integriert.
- **WP-I3:** Weiterentwicklung des Multiagentenmodells – Modelle zur intelligenten Wegfindung und zur Simulation von Emissionen und Evakuierungen wurden entwickelt.
- **WP-I6:** Windwurfmodellierung für Sturmschäden an Stadtbäumen – Ein detailliertes Modell zur Simulation von Sturmschäden an Bäumen wurde implementiert.

Bewertung des Projekterfolges

Die folgenden Erfolge konnten im Rahmen von MOSAIK-2 erreicht werden:

1. Praxisnahe Stadtplanung: Das weiterentwickelte PALM-4U Modell ermöglicht es Kommunen, präzise und realistische mikroklimatische Simulationen im Rahmen der Stadtplanung durchzuführen, was zur Verbesserung der Lebensqualität in städtischen Gebieten beiträgt.
2. Wissenschaftliche Forschung: Die Erweiterungen und Optimierungen des Modells unterstützen die Forschung in den Bereichen urbane Mikrometeorologie, Luftchemie und Luftreinhaltung, was zu einer besseren wissenschaftlichen Grundlage für Folgevorhaben und die Nutzung des Modells in der Praxis bietet.
3. Nachhaltigkeit: Durch die Integration neuer technischer und methodischer Ansätze wird die langfristige Nutzung und Weiterentwicklung des Modells sichergestellt.
4. Internationalisierung: Die durch das Projekt gestärkte internationale Zusammenarbeit fördert den Wissenstransfer und die Innovationskraft in der Klimamodellierung.

Das Projekt MOSAIK-2 hat somit entscheidend dazu beigetragen, die Stadtklimaforschung und -planung auf ein neues Level zu heben und wichtige Grundlagen für zukünftige Entwicklungen im Bereich der urbanen Klimamodellierung gelegt.

Teil II - Eingehende Darstellung

1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

1.1 Ziele

Ziel der Fördermaßnahme war das, in der ersten Phase entwickelte, Stadtklimamodell PALM-4U zu einem Produkt weiterzuentwickeln, das praxistauglich für den Einsatz in Kommunen und anderen Anwendern ist, aber auch für wissenschaftliche Forschung eingesetzt werden kann.

In Modul A (Verbundprojekt MOSAIK-2) der Fördermaßnahme sollte das in der 1. Phase aufgebaute Modell PALM-4U erweitert, optimiert und evaluiert werden. Dazu sollten bestehende Module weiterentwickelt und neue Komponenten implementiert werden. Weiterhin war der Aspekt Nachhaltigkeit und Verstetigung der Modellentwicklung ein zentraler Aspekt von MOSAIK-2. Weiterentwicklungen waren vor allem hinsichtlich Luftchemie/Schadstoffausbreitung und Emissionsmodellierung, Strahlungstransfer und Multiagentenmodell geplant. Neue Modellkomponenten umfassten die Aspekte von Sturmschäden an Bäumen (Windwurf), Wolken und Niederschlägen, sowie Effekte von gefrorenem Wasser in Form von Schnee und Eis. Modelloptimierungen hinsichtlich Parametrisierung von Gebäuden, neue Rechnerarchitekturen, Etablierung einer Community-Modellstruktur sollten die Nachhaltigkeit des Modells über die Förderperiode hinaus sicherstellen. Der Modellevaluation kam besondere Bedeutung zu und beinhaltete auch die Überprüfung der Modellunsicherheiten bzgl. Eingangsdaten sowie deren Bereitstellung.

Teilprojekt 1 (TP1) umfasste einen wesentlichen Teil der oben genannten Aspekte (Entwicklung neuer Komponenten, Weiterentwicklung bestehender Komponenten, Evaluierung und Nachhaltigkeit/Verstetigung). Ein Teil dieser Arbeiten sollte im Rahmen der in der ersten Phase etablierten Nachwuchsgruppe von Dr. Maronga durchgeführt werden.

1.2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Das Teilprojekt TP1 war Bestandteil des Verbundprojekts MOSAIK-2 und umfasste folgende Arbeitspakete:

- WP-S1: Koordination und Internationalisierung (Leitung: Maronga)
- WP-S2: Entwicklung einer Community Modellstruktur, Leitung der PALM-4U Nachwuchsgruppe (Leitung: Maronga)
- WP-S3: Modellevaluierung und Anwendersupport (Leitung: Raasch)
- WP-S4: Modelloptimierung und -nachhaltigkeit (Leitung: Sühning, Raasch)
- WP-S5.1: Unsicherheit von Modellergebnissen in Abhängigkeit von Eingangsdaten (Leitung: Groß)
- WP-P1: Gefrorenes Wasser in Atmosphäre und auf dem Boden (Leitung: Maronga)

- WP-I3: Weiterentwicklung des Multiagentenmodells: intelligente Wegfindung und Verhalten von Fußgängern, Evakuierungssimulationen, und agentenbasierte Fahrzeugemissionen (Schnittstelle zu MATSim) (Leitung: Maronga, Raasch)
- WP-I6: Windwurfmodellierung für Sturmschäden an Stadtbäumen (Leitung: Groß)

Im Folgenden sind die durchgeführten Arbeiten in den Arbeitspaketen im gesamten Förderzeitraum dargelegt.

1.2.1 WP-S1: Koordination und Internationalisierung

Die Aufgaben in S1 beinhalteten vor allem die laufende Koordination des Verbundvorhabens MOSAIK-2 sowie die Kommunikation mit den anderen beiden Modulen B+C der Fördermaßnahme. Aufgrund der Pandemiesituation konnten Auslandsaufenthalte nicht wie geplant durchgeführt werden. Dennoch wurde die Internationalisierung des PALM Modellsystems durch mehrere einwöchige (mindestens einmal pro Jahr) internationale PALM-Seminare mit jeweils 30-40 TeilnehmerInnen vorangetrieben. Die internationale Zusammenarbeit wurde weiter forciert. Hier wurde insbesondere eine intensive Zusammenarbeit mit Prof. Dan Li von der Boston University weiterverfolgt. Im Rahmen dieser Kooperation war Prof. Li zweimal als Humboldt Fellow an der Leibniz Universität Hannover zu Gast. Bisher sind aus der Kooperation drei Artikel in Fachzeitschriften entstanden, davon einer in *Science Advances* (Maronga et al., 2022; Akinlabi et al., 2022; Li et al., 2024). Die etablierte Kooperation mit Dr. Resler, Dr. Krc (beide Tschechische Akademie der Wissenschaften, Prag) sowie mit Dr. Hellsten und Dr. Auvinen (beide Finnisches Meteorologisches Institut, Helsinki) wurden weiter verfolgt (siehe Publikationsliste am Ende des Berichtes).

Das Urban Microscale Model Intercomparison Project (UMMIP) wurde erfolgreich konzipiert. Als Grundlage dafür dient das im Windkanal vermessene Michelstadt Modell (siehe Abb. 1). Es wurden mehrere Stufen des Modellvergleichs definiert mit steigendem Komplexitätsgrad, damit möglichst viele Modelle am Vergleich teilnehmen können. Für die erste Stufe wurde eine PALM-Simulation mit „best practice“ Set-up durchgeführt. Abbildung 2 (schwarze Linie) zeigt die hervorragende Übereinstimmung von PALM mit den Windkanaldaten. Für den Modellvergleich wurde ein vereinfachtes Setup gewählt, dass von allen teilnehmenden Modellen gerechnet werden kann (blaue Linie). Im Simulationsgebiet sind mehrere virtuelle Messpunkte definiert worden, für die Windkanaldaten vorliegen und an denen die Modelle verglichen werden sollen. Durch die deutlich verlängerte Bearbeitungs- und Konzeptionierungszeit konnte der Modellvergleich noch nicht durchgeführt werden. Das Setup für die erste Stufe wurde in einem ersten Schritt an Frau Ziemann und Herrn Goldberg von der TU Dresden übergeben, die zunächst überprüfen, ob das Setup mit herkömmlichen Modellen wie ENVI-met gerechnet werden kann. Im Anschluss soll das UMMIP in der Community angekündigt werden, so dass der Modellvergleich in der ersten Stufe Ende 2024 abgeschlossen wird. Die weiteren Stufen folgen dann sukzessive in den kommenden Jahren, da erfahrungsgemäß ausreichend Bearbeitungszeit der teilnehmenden Gruppen erforderlich ist.

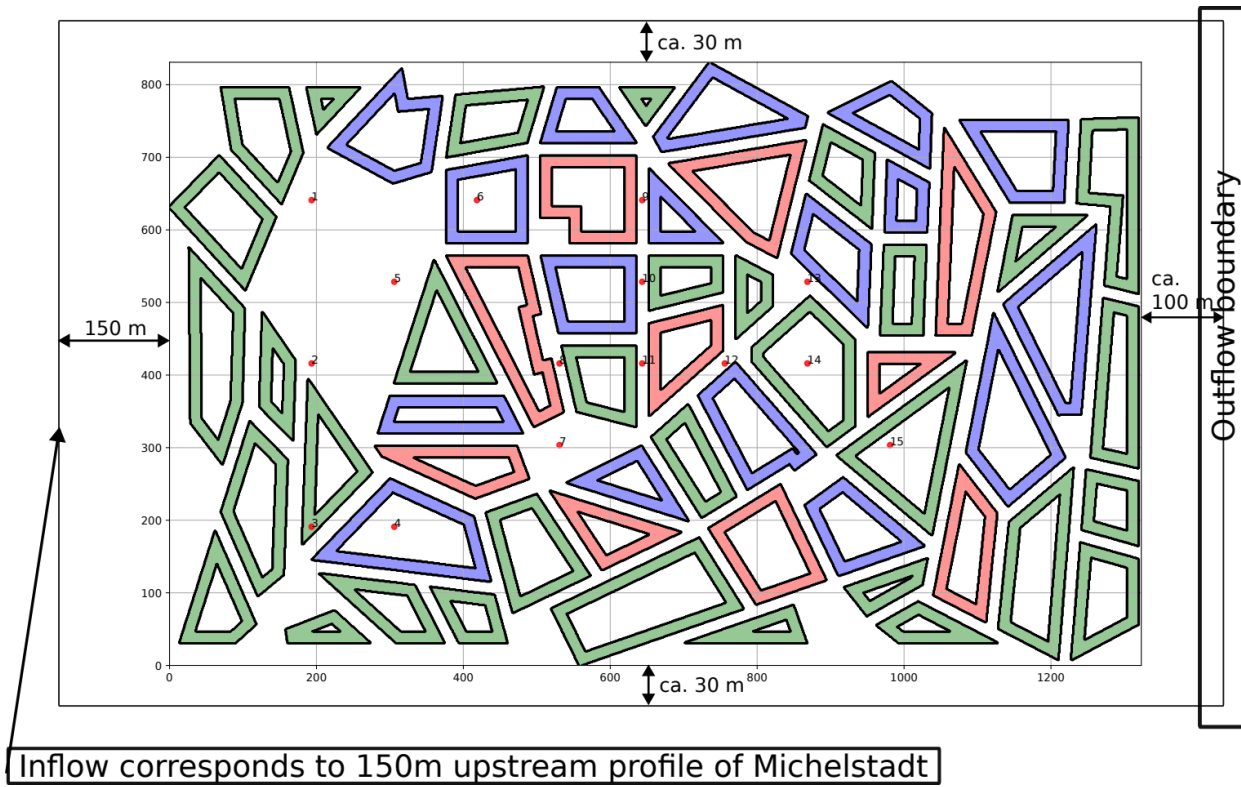


Abb. 1: Michelstadt Modellgebiet

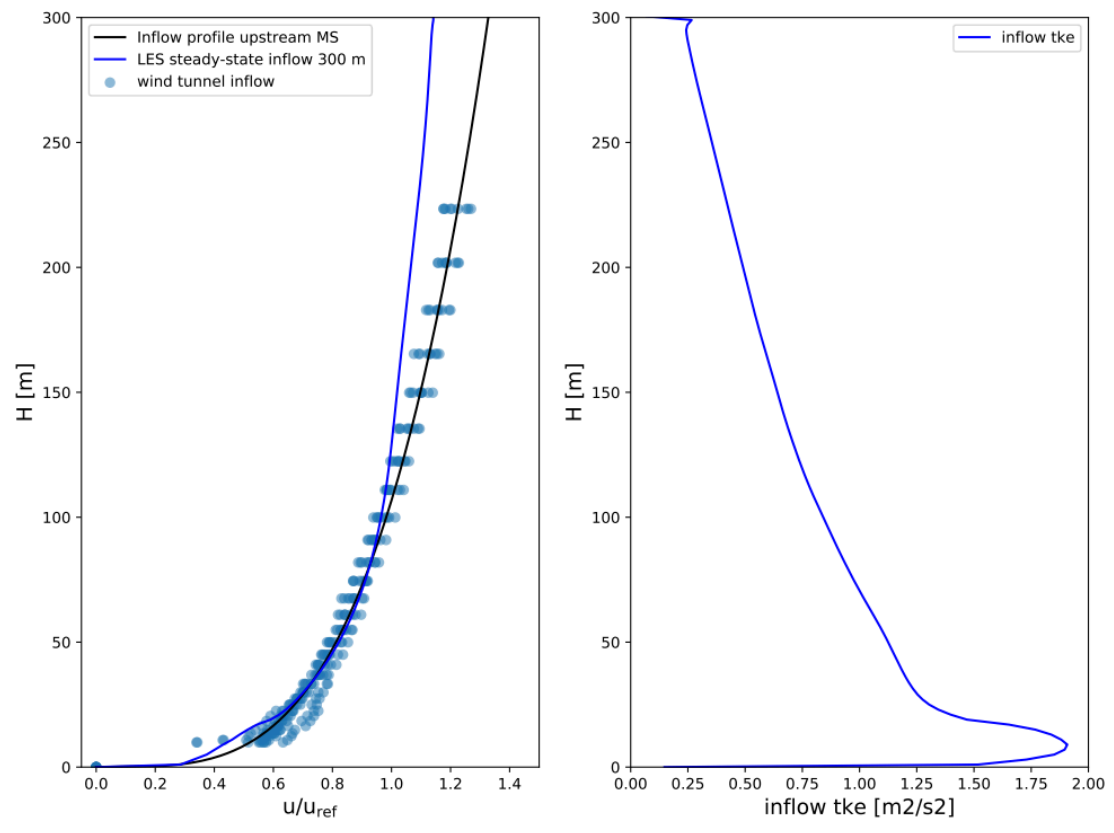


Abb. 2: Einströmprofile für die erste Stufe von UMMIP (links: Windgeschwindigkeit, rechts: turbulente kinetische Energie)

1.2.2 WP-S2: Entwicklung einer Community Modellstruktur, Leitung der PALM-4U Nachwuchsgruppe

Aufgrund der immer weiter voranschreitenden Komplexität des Modells besteht die Notwendigkeit, die Begutachtung neuer Code-Bestandteile sowie die Pflege bereits bestehender Modellteile auf eine größere Anzahl von Personen / Institutionen zu verteilen. Dafür wurde in diesem Arbeitspaket eine Community-Modellstruktur entwickelt, die mit den Entwicklern mehrfach diskutiert und iteriert wurde. Es wurde sich final darauf geeinigt, dass eine strikte und unabhängige Begutachtung neuer Code-Bestandteile notwendig ist, um langfristig einen hohen Code-Standard in Bezug auf Performanz, Lesbarkeit und Modularität aufrechtzuerhalten. Weiterhin wurde vereinbart, dass sich Personen / Institutionen, die signifikante Code-Bestandteile entwickeln, bereit erklären, Support für diese Modellteile zu geben. Dies umfasst Bugfixes, ggf. Überarbeitung des Codes im Fall von schlechter Performanz, Bearbeitung von Tickets, etc.. Jede Entwicklerin bzw. jeder Entwickler soll dazu mindestens einen Stellvertreter haben, der im Fall von Ausfällen die notwendigen Aufgaben übernehmen kann. Des Weiteren wurde vereinbart, dass Code-Entwicklungen möglichst transparent und sichtbar für alle PALM-Entwickler sein sollen. Code-Bestandteile sollten dazu bereits während der Konzeptionsphase mit anderen Entwicklern in *issues* auf dem *gitlab-Server* (siehe Kap. 1.2.4.3) diskutiert werden. Dies dient dazu, unnötige Parallelentwicklungen und Code-Redundanzen zu vermeiden sowie Aspekte und Fehlkonzeptionen, die nicht mit der PALM Modellstruktur harmonieren, zu identifizieren. Um die Begutachtung weniger zeitintensiv zu gestalten, werden zudem die Code-Regeln erweitert.

Anfänglich wurde eine Community-Modell Struktur vorgeschlagen, welche mehrere Entscheidungsinstanzen und Arbeitsgruppen umfasste. Nach intensiven Diskussionen innerhalb der Entwickler-Community wurde dieser Ansatz allerdings verworfen, da er als zu bürokratisch, zeit- und arbeitsintensiv angesehen wurde und nicht ohne wesentliche Finanzmittel hätte realisiert werden können. Aus diesem Grund wurde sich darauf verständigt, eine möglichst schlanke Community-Modell Struktur zu etablieren. Alle Diskussionen, die Code-Entwicklungen betreffen, sollen in *issues* auf dem *gitlab-server* stattfinden und alle Entwickler können dazu beitragen. Eine Diskussionsplattform als Basis eines Community Modells steht damit bereit. Code-Reviews werden momentan nur von sehr wenigen Personen vorgenommen. Bis Ende 2025 hat sich Siegfried Raasch bereit erklärt, weiterhin Code-Reviews durchzuführen. Die Verantwortlichkeit für Code-Reviews soll allerdings in dieser Zeit schrittweise auf andere Entwickler übertragen werden. Bei der kommenden PALM-Model-Conference im September 2024 soll es ein gemeinsames Treffen aller momentanen PALM-Entwickler geben, bei dem sich formal auf eine finale Struktur geeinigt werden soll und Personen bestimmt werden sollen, die zukünftig verantwortlich für die Koordination von Aufgaben (Zuweisung von Reviews und Tickets) sind. Gleichzeitig wurde im Projektverlauf Herr Björn Maronga 2021 als Professor für Grenzschichtmeteorologie und Stadtklimamodellierung an die Leibniz Universität Hannover berufen und kann mit dem Fortbestand der PALM-Arbeitsgruppe die wissenschaftliche Weiterentwicklung langfristig sicherstellen.

Gemäß dem Arbeitsplan von WP-S2 war geplant, eine neue Vorlesung “Urban climates” zu entwickeln. Mit der Berufung von Herrn Maronga gab es seitens der Leibniz Universität die Bestrebung einen neuen Studiengang “Umweltmeteorologie” zu etablieren, den Herr Maronga innerhalb von einem halben Jahr in Zusammenarbeit mit den Universitäten in Oldenburg und Braunschweig konzipieren sollte. In diesem Rahmen wurde das Thema Stadtklima systematisch in den neuen Studiengang integriert, der erstmals im Wintersemester 22/23 Studierende aufgenommen hat. Im Rahmen des neuen Studiengangs wird ab Wintersemester 24/25 die neue Vorlesung “Stadtklimatologie” als Pflichtvorlesung von Herrn Maronga angeboten. Die geplante Vorlesung “urban microscale modeling” wird im Rahmen des neuen Studiengangskonzeptes ab Wintersemester 25/26 im Masterstudiengang “Umweltingenieurwesen, Schwerpunkt: Umweltmodellierung” von Herrn Maronga angeboten. Die Veranstaltung “Dispersion modeling in urban environments” wurde im Rahmen des Programmierpraktikums zur Schadstoffausbreitung in das Curriculum der Bachelorstudiengänge Meteorologie und Umweltmeteorologie aufgenommen

1.2.3 WP-S3: Modellevaluierung und Anwendersupport

In diesem Arbeitspaket wurden sehr große PALM-4U-Modellläufe zur weiteren Evaluierung durch andere Projektpartner aufgesetzt und gerechnet, sowie Support für PALM-4U-Modellläufe gegeben, die von Teilprojekten aus den [UC]² Modulen B und durchgeführt wurden. Es gliederte sich in 4 Teilpakete, die mit einem zeitlichen Aufwand verbunden waren, der sich zum Teil deutlich von den im Projektantrag veranschlagten Zeiten unterschied. Die Ergebnisse der Teilpakete werden im Folgenden einzeln erläutert und Abweichungen begründet.

1.2.3.1: Abschluss von Evaluierungsrechnungen der 1. Projektphase

Am Ende der 1. Projektphase (MOSAIK-1) war nur ein Einziges der bis dahin geplanten Evaluierungsszenarien (Berlin, Winter-IOP 2017, 17.01.-18.01.) erstmalig vollständig gerechnet, wies aber noch eine Reihe von offensichtlichen Defiziten auf. Dieses Szenario und weitere folgende Szenarien für Berlin und Stuttgart mussten mehrfach wiederholt werden, weil die Ergebnisanalyse immer wieder Defizite im Programmcode und in den Eingabedaten ergab, die korrigiert werden mussten. Grundsätzlich entsprach diese Situation und das damit verbundene iterative Vorgehen der Projektplanung, allerdings erstreckten sich die dazu notwendigen Simulationen nahezu über die gesamte zweite Projektphase und der dafür vorgesehene Arbeitsumfang von 6 PM wurde um 100% überschritten. Die Liste der durchzuführenden Szenarienrechnungen musste deshalb durch die [UC]²-Arbeitsgruppe “Evaluierung” mehrmals revidiert werden. Final konnten folgende Szenarien gerechnet werden:

Referenz-bezeichnung	Start	Ende	Modus	Ort
VALM01	17.01.2017 6:00 UTC	18.01.2017 6:00 UTC	LES	Berlin
VALM02	16.07.2018 6:00 UTC	18.07.2018 6:00 UTC	LES	Berlin

VALM03*	14.02.2017 6:00 UTC	16.02.2017 6:00 UTC	LES	Stuttgart
VALM04	08.07.2018 4:00 UTC	09.07.2018 19:00 UTC	LES	Stuttgart
VALM05, VALR05	Idealfall**		LES	Hamburg

* VALM03 für Stuttgart wurde nicht durchgeführt, Messdaten der IOP sind aber verfügbar.

Der Idealfall mit LES für Hamburg war vorgezogen und bereits in Phase 1 von [UC]2 durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind in Gronemeier et al. (2021) beschrieben. Der dynamische Kern von PALM-4U konnte damit sehr erfolgreich evaluiert werden. Die Gründe für die mehrmalige erneute Rechnung von Szenarien waren vielfältiger Natur. Unter anderem stellte sich bei der Ergebnisanalyse heraus, dass die Auswirkungen von Schatten bei der Photolyse nicht im Code berücksichtigt waren, oder dass als äußere Randbedingungen keine Reanalysedaten, sondern fälschlicherweise Vorhersagedaten des COSMO-Modells verwendet wurden. Ein weiterer Grund war, dass virtuelle Messstationen und Messpfade im Modell aufgrund falscher Koordinatenangaben nicht korrekt positioniert waren und damit ein direkter Vergleich zwischen Modell- und Beobachtungsdaten nicht möglich war. Weitere Verzögerungen entstanden dadurch, dass für die Stuttgart-Simulation (VALM04) keine Verkehrsemissionsdaten vorlagen, und diese im Nachhinein durch Verkehrssimulationen mittels MatSim im Teilprojekt 3 synthetisch erzeugt werden mussten.

Abbildung 3 zeigt einen Vergleich der modellierten 2-m Tempertur an den Messstationen mit den entsprechenden Beobachtungsdaten für VALM02 (links) und VALM01 (rechts) für Berlin. Die Simulation des Sommerszenarios zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Beobachtungsdaten an fast allen betrachteten Stationen und eine geringe Streuung. Die Simulation des Winterszenarios zeigt hingegen, dass das Modell systematisch zu geringe Temperaturen simuliert. Die größten Abweichungen treten dabei während der Nacht- und frühen Morgenstunden auf. Dies ist auf die stark stabile Schichtung in Verbindung mit einer sehr geringen Windgeschwindigkeit in diesem Szenario zurückzuführen, bei dem der bodennahe turbulente Austausch im Modell nicht mehr realistisch wiedergegeben werden kann. Aufgrund der Strahlungskühlung an der Oberfläche verringert sich die Temperatur an den untersten Gitterpunkten dadurch fortlaufend. Eine ähnliche Entkopplung des LES-Modells von dem Oberflächenmodell bei stark stabilen Schichtungen wurde auch schon in anderen Modellen beobachtet. Strategien um diesen Effekt abzuschwächen sind die Verwendung dynamischer SGS-Modelle (Quelle) oder von Detached-Eddy Simulationen (einer Mischung aus LES und RANS), bei denen sobald die Schichtung stabil wird in den untersten Gitterpunkten auf eine RANS-Parametrisierung umgeschaltet wird, wohingegen im Rest des Modellgebiets eine LES gerechnet wird. Aufgrund fehlender dedizierter Personal- und Zeitressourcen konnten diese Lösungsansätze jedoch nicht weiter verfolgt werden. Resler et al. (2024) begegnen diesem Problem hingegen auf eine einfache und effektive Weise, bei dem innerhalb der Gebäudeschicht die SGS-TKE ein vorab definiertes Minimum nicht unterschreiten darf. Abbildung 2 zeigt exemplarisch die simulierten nächtlichen Kaltluftvolumenströme im Nesenbachtal, Stuttgart für VALM04.

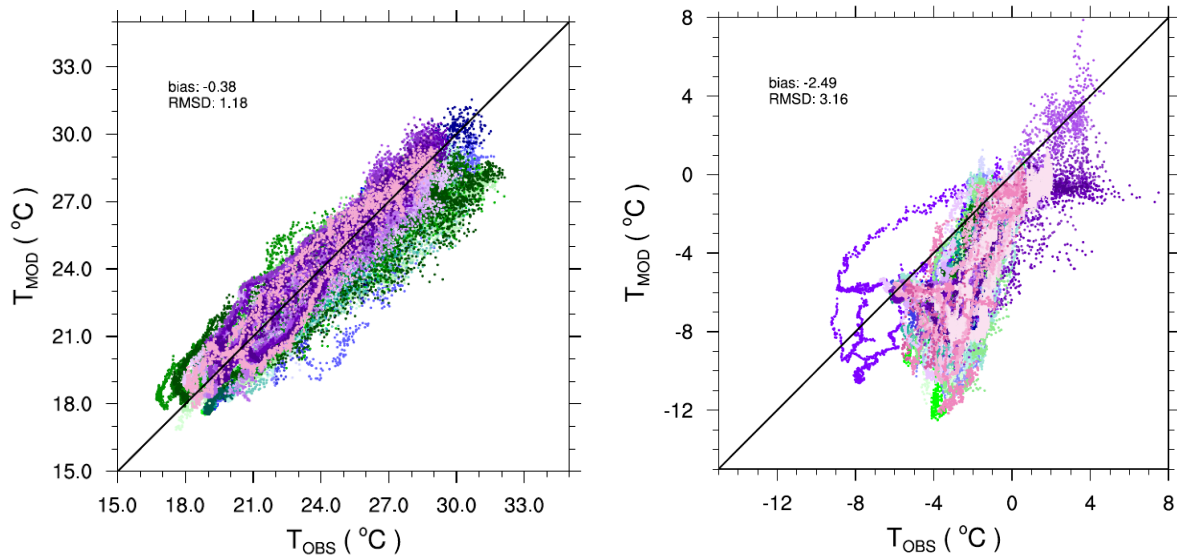


Abb. 3: Modellierte vs. beobachtete 2-m Temperatur an den Messstation für VALM02 (links) und VALM01 (rechts). Die unterschiedlichen Farben zeigen Werte an unterschiedlichen Messstationen aus den Child-Gebieten.

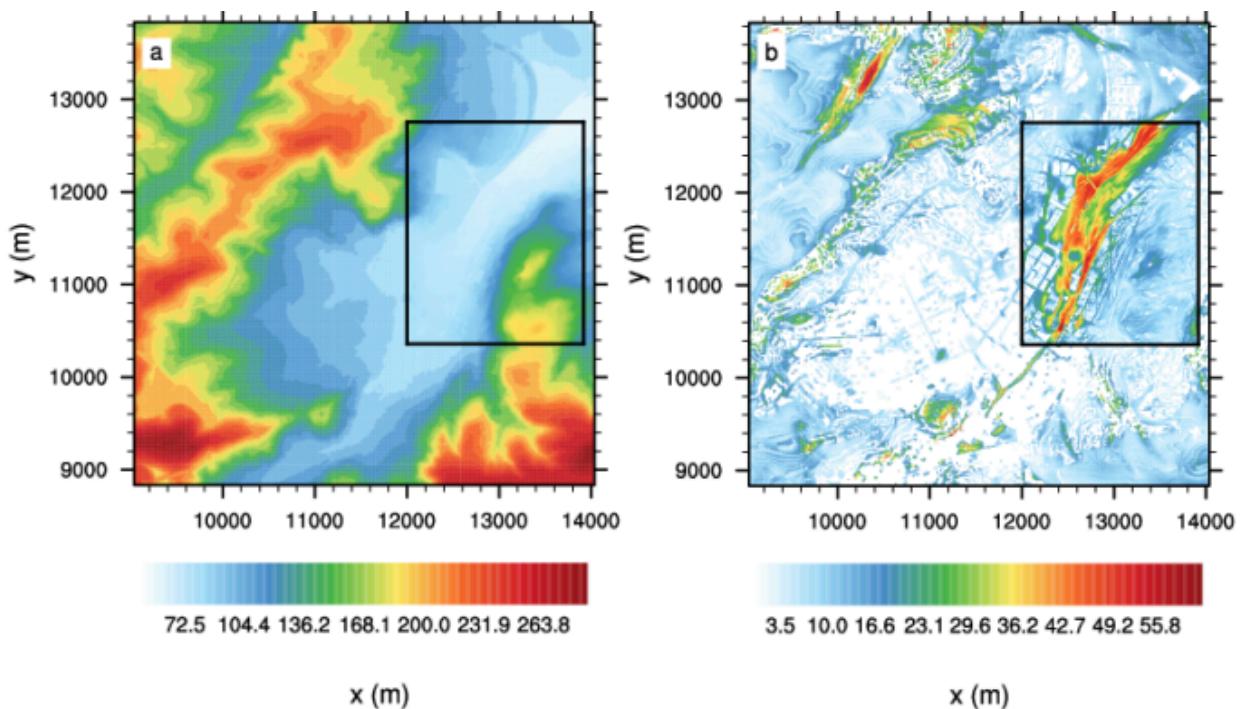


Abb. 2: Kaltluftvolumenstrom (in $m^3 s^{-1}$, rechts) um 04:00 MESZ im Nesenbachtal, Stuttgart für das Evaluierungsszenario VALM04. Gezeigt ist das Child-Gebiet 1 mit einer Gitterauflösung von 10 m (äußerer Bereich), sowie das hochaufgelöste Child-Gebiet 2 mit einer Gitterauflösung von 1m, gekennzeichnet durch die schwarz-umrandete Box. Im linken Bild ist die dazugehörige Geländehöhe in m relativ zum PALM Ursprung (entspricht nicht der Geländehöhe ü.N.N) gezeigt.

1.2.3.2: Evaluierungen für neue Szenarien und Modelleigenschaften

In diesem Teilarbeitspaket sollten während der zweiten Projektphase neu entwickelte Modellkomponenten evaluiert werden. Hierzu zählten das mesoskalige Nesting mit ICON, die

Kopplung mit dem Verkehrsflussmodell MatSim, sowie die Bulk-Wolkenmikrophysik mit Eisphase. Die entsprechenden Evaluierungen konnten aus unterschiedlichen Gründen nicht vorgenommen werden. Durch Verzögerungen im Teilprojekt 4 (DWD) standen bis zum Projektende keine ICON-Daten als Randbedingungen für PALM-4U zur Verfügung. Für die Kopplung mit MatSim (Teilprojekt 3) und die Bulk-Wolkenmikrophysik (Arbeitspaket WP-P1) standen keine geeigneten Beobachtungsdaten zur Evaluierung zur Verfügung. Die Prüfung dieser Module erfolgte daher innerhalb der Arbeitspakete I3 und P1 durch Verifizierung anhand physikalischer Plausibilität und durch Vergleich mit aus der Literatur bekannten Ergebnissen.

1.2.3.3: Erstellung von Test-Szenarien für Entwickler

Um die nachhaltige Entwicklung von PALM-4U zu unterstützen, wurden kleine, schnell rechenbare Test-Setups für die in der zweiten Projektphase neu entwickelten Module generiert. Entsprechende Tests werden bei jeder Code-Änderung und Neuentwicklung vom gitlab-Server auf angebotenen Testservern gerechnet (siehe Abschnitt 1.2.4.3). Falls Tests wegen Nichtübereinstimmung mit hinterlegten Referenzausgaben scheitern, ist eine Einbindung der entsprechenden Änderung/Neuentwicklung in den so genannten *master-branch*, der die Basis für das jeweils nächste PALM-Release bildet, nicht möglich. Dadurch ist eine kontinuierliche und nachhaltige Qualitätskontrolle des Codes möglich. Test-Setups wurden für verschiedene Module wie Bulk-Wolkenmikrophysik, cut-cell Methode, urbane Grenzschicht, oder RANS-Modus eingerichtet.

1.2.3.4: Evaluierungsunterstützung für Module B + C

Die Module B und C wurden in erheblichem Umfang bei der Entwicklung von Setups für Evaluierungsrechnungen und der Interpretation von Modellergebnissen unterstützt. Darüber hinaus erfolgten in der Anfangsphase des Projektes jeweils einwöchige Schulungen in Form des PALM-Seminars (Februar 2020, in Präsenz und September 2020, online). Neben der Diskussion von Setups und Modellergebnissen (in der Regel online) wurde ebenfalls umfangreiche Hilfestellung bei der Installation und beim Betrieb von PALM-4U auf einigen Cluster-Systemen (DKRZ-Levante, sowie Taurus an der TU-Dresden) gegeben. Der dafür vorgesehene Arbeitsumfang von 12 PM wurde um mehr als die Hälfte überschritten. Auf eine detaillierte Aufstellung der einzelnen Unterstützungsmaßnahmen, die oft einen rein technischen Charakter hatten, wird an dieser Stelle verzichtet.

1.2.3.5: Ergänzung zum Arbeitspaket

Im Rahmen von MOSAIK-2 wurden große Evaluierungsrechnungen für die Modellstädte Berlin und Stuttgart seitens der Leibniz Universität Hannover durchgeführt und vom Verbund 3D0+M evaluiert (Erbertseder et al. 2024, Scherer et al., 2024). Zusätzlich wurden weitere Analysen von Seiten der Leibniz Universität Hannover durchgeführt. Dabei konnten systematische Abweichungen zwischen PALM-4U und Messungen beobachtet werden (siehe Abb. 3). Es hat sich gezeigt, dass während des Winterszenarios an vielen Messpunkten PALM generell eine 2-4 K zu niedrige 2m-Temperatur simuliert wird. Weiterführende Untersuchungen dieser Abweichungen haben ergeben, dass diese nicht wie vorab vermutet einfach auf einen defizitären Antrieb durch das verwendete mesoskalige Modell COSMO zurückzuführen sind, sondern durch die Entkopplung

der Atmosphäre von den Oberflächenmodelle bei stark stabiler Schichtung bedingt sind (siehe Erläuterung Kap. 1.2.3.1). Für tiefere forensische Analysen zur Ermittlung der Ursachen solcher systematischen Abweichungen bedingt durch das Subskalen-Modell und eine entsprechende Implementierung von Lösungsansätzen standen in MOSAIK-2 nicht mehr genügend, bzw. keine dezidierten Personalressourcen zur Verfügung.

1.2.4 WP-S4: Modelloptimierung und -nachhaltigkeit

WP-S4 gliederte sich in vier Teilpakete, deren Ergebnisse im Folgenden einzeln beschrieben werden.

1.2.4.1: Implementierung einer “immersed boundary condition”

Die Implementierung einer so genannten *cut-cell* Topography (im Weiteren soll dieser in der Literatur verwendete Begriff an Stelle von *immersed boundary condition* verwendet werden) ist motiviert durch die Anforderung einer korrekten Repräsentation der Energiebilanz an Oberflächen. Mit der bisher in PALM-4U verwendeten Methodik, bei der ein Gittervolumen entweder zu 100% vom Fluid oder zu 100% von Gebäude/Topographie ausgefüllt wird, können Oberflächen, die schräg zu den Koordinatenachsen ausgerichtet sind, nur stufenweise repräsentiert werden. Als Konsequenz haben entsprechend schräg liegende Gebäude in der Simulation eine größere Oberfläche, als dies tatsächlich der Fall ist. Durch die größere Gesamtoberfläche und die falsche Ausrichtung der einzelnen Oberflächenelemente ergeben sich systematische Fehler bei der Berechnung der Oberflächenenergiebilanz, wodurch die Energiebilanz ganzer Stadtgebiete beeinflusst sein kann. Der Einfluss stufenförmiger Topographie auf die Dynamik der Strömung ist dagegen relativ gering. Die Oberfläche erscheint gegebenenfalls rauer, als sie eigentlich ist, und kann so zusätzlich Turbulenz produzieren. Entsprechende Auswirkungen sind aber schon in einer Distanz von nur wenigen Gitterpunkten von der Oberfläche entfernt kaum noch wahrzunehmen, da diese kleinskalige Turbulenz schnell dissipiert. Dies konnte ebenfalls in Windkanalexperimenten (siehe Scherer et al., 2024) nachgewiesen werden.

Schräg liegende Oberflächen sind nun in PALM-4U über eine *cut-cell* Methode implementiert, wobei die Oberflächen schräg in den jeweiligen Gittervolumina liegen können (siehe z.B. Good et al., 2014: Performance of the cut-cell method of representing orography in idealized simulations. Atmos. Sci. Letters, 44-49, doi: 10.1002/asl2.465). Die technische Umsetzung erforderte umfangreiche Änderungen der Oberflächenbehandlung im PALM-4U Code. Betroffen war sowohl die Berechnung der turbulenten Flüsse mittels Ähnlichkeitstheorie als auch der eingehenden und reflektierten Strahlung. Komplett neu konzipiert werden musste die Bereitstellung der benötigten Oberflächendaten im statischen Treiber. Zur Generierung entsprechender Treiberdateien wurde ein neues, Python-basiertes Skript entwickelt. Alle technischen Details sind in der neuen PALM-4U-Modelldokumentation unter https://docs.palm-model.org/latest/Reference/LES_Model/Modules/Surface/cutcell/ ausführlich beschrieben. Die Methodik steht alternativ zur kartesischen Topographie zur Verfügung. Eine

Veröffentlichung der technischen Details der cut-cell Implementierung ist momentan in Vorbereitung.

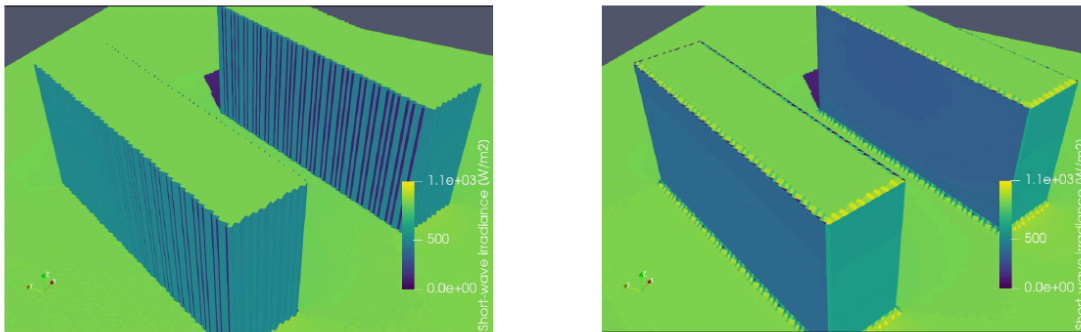


Abb. 5: Einfallende kurzwellige Sonnenstrahlung (W m^{-2}) für die kartesische Topographie (links) und der cut-cell Topographie (rechts). Die Gebäude sind dabei um 45° zum Modellgitter gedreht.

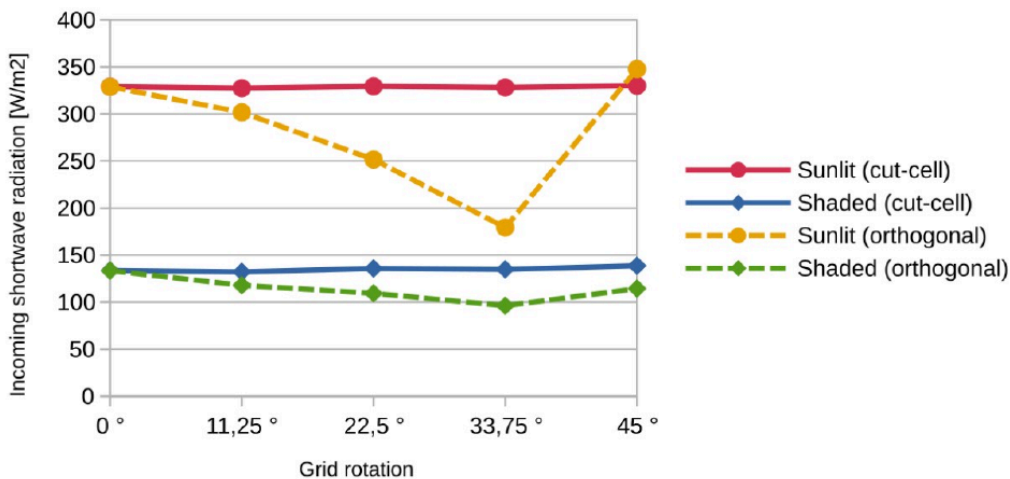


Abb. 6: Einfallende kurzwellige Strahlung an den Gebäudefassaden (siehe Abb. 5) mit der kartesischen Topographie (gestrichelte Linien) und der cut-cell Topographie (durchgezogene Linien) bei unterschiedlichen Drehwinkeln der Gebäude zum numerischen Gitter. Die kurzwellige Strahlung ist über alle Modelloberflächen der entsprechenden Fassadenseite gemittelt. Die Ausrichtung der Fassaden zur Sonnenposition ist für alle Drehwinkel konstant.

Abbildung 5 verdeutlicht, dass mit der kartesischen Topographie vertikale Oberflächen an der sonnenbeschienenen Fassade teilweise verschattet und teilweise sonnenbeschienen werden. Mit der cut-cell Topographie ist die einfallende Strahlung an den Fassaden deutlich homogener verteilt und es sind visuell keine Gittereffekte erkennbar. Aufgrund der Reflektionen der diffusen Strahlung zwischen Oberflächen entstehen bei der kartesischen Topographie systematische Fehler. Abbildung 4 zeigt die einfallende kurzwellige Strahlung an der verschatteten (shaded) und der sonnenbeschienenen (sunlit) Fassade (siehe Abb. 3) in Abhängigkeit von verschiedenen Drehwinkeln zum numerischen Gitter. Insbesondere an der sonnenbeschienenen Fassade wird die einfallende Strahlung im kartesischen Fall systematisch unterschätzt. Die größte Unterschätzung von 45% des Referenzwertes tritt bei $33,75^\circ$ auf. Im Fall der cut-cell Topographie bleibt die einfallende kurzwellige Strahlung bei allen Drehwinkeln nahezu konstant. Dies zeigt dass durch die cut-cell Topographie systematische Fehler in der Oberflächenstrahlungs- und -energiebilanz bedingt durch das numerische Gitter beseitigt werden konnten.

1.2.4.2: Implementierung eines kompressiblen Gleichungssystems

Hintergrund dieses Arbeitspaketes ist die Tatsache, dass in Strömungsmodellen wie PALM-4U, welche die Boussinesq-Approximation oder die anelastische Approximation zur Eliminierung von Dichteschwankungen verwenden, um damit u.a. Schallwellen als mögliche Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen zu eliminieren, eine Poisson-Gleichung für den so genannten Stördruck gelöst werden muss. Die dazu erforderlichen numerischen Verfahren erfordern einen erheblichen Datenaustausch zwischen den Rechenkernen. Die dafür erforderliche Kommunikationszeit nimmt mit der Anzahl der verwendeten Kerne nicht-linear zu, weil der Datenaustausch nicht nur zwischen benachbarten Kernen erfolgt, sondern zwischen allen Kernen entlang des virtuellen Prozessornetzes in x- und in y-Richtung. Mathematische Ursache dafür ist der elliptische Charakter der Poisson-Gleichung. Der entsprechende Datenaustausch erfolgt mittels der MPI-Routine `MPI_ALLTOALL`, die mit zunehmender Prozessorzahl einen immer größeren Flaschenhals bezüglich der Performance des Modells darstellt. Auf Parallelrechnern der nächsten Generation mit mehr als 100.000 Rechenkernen wäre damit PALM-4U bei Verwendung der bisher vorhandenen Drucklöser nicht mehr effizient einsetzbar. Eine mögliche Lösung des Skalierungsproblems besteht darin, dass Boussinesq-approximierte Gleichungssystem durch ein kompressibles Gleichungssystem zu ersetzen. Damit wäre nur noch ein lokaler Datenaustausch zwischen direkt benachbarten Prozessorkernen nötig. Die Implementierung erfordert einerseits die Lösung einer prognostischen Gleichung für den Stördruck, andererseits müssen horizontale sowie vertikale Dichteunterschiede in den Advektionstermen, den subskaligen Transporttermen und als Randbedingung in den Energiebilanzlösern berücksichtigt werden. Dies erfordert Anpassungen in wesentlichen Teilen des Modellkerns. Aufgrund der Kompressibilität werden Schallwellen nicht mehr implizit gefiltert, was aufgrund ihrer hohen Ausbreitungsgeschwindigkeit zu sehr kleinen Modellzeitschritten führt. Dadurch bedingte höhere Rechenzeiten können wiederum durch geeignete Zeitschrittverfahren minimiert werden. Kompressible Gleichungssysteme sind mittlerweile in vielen numerischen Wettervorhersagemodellen in unterschiedlichen Formen implementiert und es gibt außerdem eine Vielzahl von Realisierungen der zur Lösung erforderlichen technischen/numerischen Verfahren.

Zunächst galt es daher, aus der Literatur eine für PALM-4U geeignete Form des kompressiblen Gleichungssatzes auszuwählen. Der damit verbundene Aufwand war wesentlich höher als ursprünglich veranschlagt. Ursache dafür ist, dass in existierenden kompressiblen, nicht-hydrostatischen atmosphärischen Modellen andere Koordinatensysteme verwendet werden, als das in PALM-4U implementierte kartesische System (z.B. Gelände-folgende Koordinaten, oder hydrostatischer Druck als Vertikalkoordinate). Außerdem werden Turbulenzparametrisierungen und numerische Verfahren eingesetzt, die wesentlich für mesoskalige und globale Simulationen aber nicht für LES geeignet sind, oder es werden (im Gegensatz zu PALM-4U) Erhaltungsgleichungen für die Gesamtenergie oder die Entropie benutzt. Beispielhaft sind hierfür die Veröffentlichungen von Doms und Schättler (2002: A description of the nonhydrostatic regional model Im part 1: Dynamics and numerics. Technical Report LM F90 2.18, DWD, Offenbach), Skamarock et al. (2008: A description of the advanced research WRF version 3. Technical Report

NCAR/TN-475+STR, NCAR, Boulder, CO, USA) und Dipankar et al. (2015: Large eddy simulation using the general circulation model icon. J. Adv. Model. Earth Syst., 7(3): 963–986, 2015. doi: 10.1002/2015MS000431) genannt. Es gab daher, anders als von uns angenommen, keine unmittelbare Möglichkeit der direkten Übernahme eines bereits existierenden Gleichungssystems und der zugehörigen numerischen Verfahren in PALM-4U. Nach umfangreichen Überlegungen wurde das folgende Implementierungskonzept für PALM-4U aufgestellt, das zusammenfassend vier wesentlichen Schritte erfordert, die hier nur kurz dargestellt werden können:

1. Verwendung der Euler-Gleichungen in kompressibler Form mit einer prognostischen Gleichung für den Druck (oder die Exner-Funktion) an Stelle der ursprünglichen Kontinuitätsgleichung. Dazu kommen die Erhaltungsgleichungen für die innere Energie (potentielle Temperatur θ) und den Wasserdampf (q_v), sowie die Gasgleichung zur Bestimmung der Dichte aus Druck und Temperatur, sowie weitere Erhaltungsgleichung je nach verwendeten PALM-4U-Modul (z.B. chemische Spezies, wolkenphysikalische Variablen).
2. Bestimmung der Störungsform der Gleichungen, bei der zeitlich und räumlich abhängige Störgrößen (jeweils mit einem Stern markiert) sowie ein rein höhenabhängiger Grundzustand (markiert mit Index 0) eingeführt wird (z.B. Dudhia, 1993: Monthly Weather Review, 121(5):1493–1513, 1993. doi:10.1175/1520-0493(1993)121<1493:ANVOTP>2.0.CO;2). Um den Auftriebsterm in seiner bisher in PALM-4U verwendeten Form beizubehalten, wird die Bewegungsgleichung mit der Exner-Funktion formuliert (π - θ -system).
3. Ableitung des gefilterten Gleichungssystems. Für kompressible Strömungen erfolgt eine Aufteilung der Strömungsvariablen in einen so genannten Favre-gemittelten Anteil und eine Abweichung davon.
4. Ableitung des Subfilter-Skalen (SGS) Turbulenzmodels in Form einer prognostischen Gleichung für die SGS turbulente kinetische Energie. Wesentliche Unterschiede zur bisher verwendeten Gleichung besteht im Produktionsterm durch Auftrieb, wo der turbulente Wärmestrom durch den turbulenten Dichtefluss ersetzt wird. Der deviatorische SGS-Spannungstensor erfordert einen zusätzlichen Term zur Berücksichtigung der Kompressibilität.

Die finalen Gleichungen für Impuls, SGS-Spannungstensor, SGS-TKE, potentielle Temperatur und Exner-Funktion sollen hier nur kurz ohne jegliche weitere Erläuterung genannt werden:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i}{\partial x_j} &= -c_p \tilde{\theta} \frac{\partial \bar{\pi}^*}{\partial x_i} + \frac{\tilde{\theta}^*}{\theta_0} g \delta_{i3} - \epsilon_{ijk} f_j \tilde{u}_k - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \\
-\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\tau}_{ij}}{\partial x_j} &= -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}'_i \tilde{u}'_j}{\partial x_j} = \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{\rho} \left[K_m \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \tilde{e} \delta_{ij} - \frac{2}{3} K_m \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \\
\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{e}}{\partial t} + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{e} &= -\frac{u'_3 \rho^{*''} g}{\bar{\rho}} - \tilde{u}'_i \tilde{u}'_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{\rho} \left[u'_j \left(e + \frac{p^{*''}}{\rho} \right) \right] - \epsilon \\
\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\theta}}{\partial t} + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_k \tilde{\theta}}{\partial x_k} &= \frac{Q_\theta}{c_p \bar{\pi} \bar{\rho}} - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\tau}_{k\theta}}{\partial x_k} \\
c_p \theta_0 \frac{\partial \bar{\pi}^*}{\partial t} - g \tilde{w} + c_{s0}^2 \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} &= -c_p \theta_0 \left[\tilde{u}_k \frac{\partial \bar{\pi}^*}{\partial x_k} + (\gamma - 1) \bar{\pi}^* \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} - \frac{(\gamma - 1) Q_{m,\theta}}{c_p \tilde{\theta}} \right].
\end{aligned}$$

Die sich anschließenden Überlegungen zur numerischen Implementierung dieser Gleichungen ergaben dann einen dafür erforderlichen Zeitaufwand, der in der verbleibenden Projektlaufzeit nicht mehr realisierbar erschien. Die Implementierung des kompressiblen Systems ist aber im Jahr 2025 geplant.

Die Aufgabe dieses Ziels wurde erheblich dadurch erleichtert, dass mit einer optimierten Version des Drucklösers, der im folgenden Abschnitt 1.2.4.3 erläutert wird, nunmehr eine effiziente Nutzung von PALM-4U auf Massivparallelrechnern der aktuellen und nächsten Generation mit 100.000 und mehr Rechenkernen möglich sein wird.

1.2.4.3: Modelloptimierung und professionelle Werkzeuge für Modellentwicklung und -anwendung

Dieses Arbeitspaket beinhaltete die Geschwindigkeitsoptimierung von neu entwickelten Code-Bestandteilen und für neue Rechnerarchitekturen, hier insbesondere Vektorprozessoren und GPUs. Darüber hinaus sollten professionelle Werkzeuge für Modellentwickler und wissenschaftliche PALM-4U-Anwender entwickelt werden, die die zukünftige Entwicklung und Nutzung des Codes nachhaltig unterstützen. Beiderlei Arbeiten wurden in Teilen per Unterauftrag an Industriepartner vergeben. Klaus Ketelsen, als selbstständiger IT-Spezialist, war für die Modelloptimierung verantwortlich, die Firma MeteoSolutions für die Entwicklung von Werkzeugen. Hier stand im Vordergrund die Entwicklung des neuen, auf *python* basierenden Tools `palm-cli` (`cli` für `command line interface`), welches zukünftig die Rolle der bisher zum PALM-Betrieb verwendeten Shellskripte `palmbuild` (zum Übersetzen des PALM-4U-Codes) und `palmrun` (zur Ausführung von PALM-Simulationen im interaktiven Betrieb und im Batch-Modus) übernimmt.

`palm-cli` wurde erfolgreich entwickelt und getestet und erlaubt insbesondere die Verwendung von Konfigurationsdateien im maschinenlesbaren `yml`-Format.

Eine vollständige Portierung und Optimierung des PALM-4U-Codes für die NEC-Aurora-Vektorarchitektur konnte im Projektzeitraum erfolgreich abgeschlossen werden. Hier waren insbesondere Schleifenumstellungen im Chemie- und Strahlungsmodul (RTM, "ray-tracing") und in den Oberflächenmodellen erforderlich. Auch wurde eine vektorisierte Version der in PALM-4U verfügbaren Temperton-FFT programmiert und implementiert. Damit kann PALM-4U auf dem derzeitigen DWD-Hochleistungsrechner effizient eingesetzt werden.

Darüber hinaus wurde eine Vielzahl von weiteren Optimierungen vorgenommen, von denen hier nur die Wichtigsten in Stichworten genannt werden können:

- Umstellung der Restart-Daten-I/O vom Fortran-Binärformat auf MPI-I/O, wodurch die bei größeren PALM-4U-Anwendungen auftretenden Lustre-Dateisystem-Probleme nachhaltig beseitigt wurden. Dabei wurde `shared-memory MPI` auf den einzelnen Rechenknoten angewendet.
- Beseitigung der Bedingung gleich großer Teilgebiete. Damit werden bisherige Einschränkungen bei der Wahl der Gitterpunktanzahl bzw. der Gebietsgröße aufgehoben, was die Anwendbarkeit von PALM-4U in der Praxis signifikant verbessert.
- Verbesserung der Datentransferrate für die Ein-/Ausgabe von Restartdaten sowie für die Ausgabe von Modellergebnissen im `NetCDF`-Datenformat. Letztere wurde durch eine Transponierung der 3D-Daten vor dem Schreiben erreicht, wodurch die Länge der zusammenhängenden Datenblöcke erheblich vergrößert werden konnte. Datentransferraten liegen jetzt bei bis zu 10 GByte/s.
- Erweiterung des FFT-Lösers für nicht-zyklische Randbedingungen. Damit wird dieser Löser auch bei der Verwendung von `online-` und `offline-Nesting` einsetzbar, wo bisher der `Multigrid-Löser` erforderlich war. Damit verbundene Einschränkungen bei der Wahl der Gitterpunktanzahl entfallen damit, was die Anwendbarkeit des Modells in der Praxis nochmals verbessert.

Eine zusätzliche nachhaltige Optimierung für den PALM-4U-Einsatz auf zukünftigen Rechnersystemen mit Prozessorkernzahlen ≥ 128 pro Knoten konnte mit der Entwicklung eines neuen, auf `MPI-shared-memory` basierenden FFT-Drucklösers erzielt werden. Die wesentliche Idee dieses Lösers besteht darin, die zweite (`y`) Dimension des virtuellen Prozessornetzes bei der Gebietszerlegung so groß zu wählen, dass sie der Anzahl der Rechenkerne auf einem Knoten entspricht. Die 3D-Teilfelder für Stördruck und Geschwindigkeitsdivergenz werden dann unter Ausnutzung des gemeinsamen Speichers (`shared-memory`) der Knoten als ein Feld definiert, das entlang der `y`-Dimension sämtliche Gitterpunkte des Gesamtgebiets enthält. Dieses entspricht einer eindimensionalen Gebietszerlegung entlang `y`. Damit liegen nicht nur in `z`-Richtung, sondern auch in `y`-Richtung alle erforderlichen Daten auf einem Rechenkern, und die FFT in `y`-Richtung sowie die Lösung des tridiagonalen Gleichungssystems in `z`-Richtung kann ohne

MPI-Datenaustausch erfolgen. Statt sechs Transponierungen mittels `MPI_ALLTOALL` sind deshalb nur zwei Transponierungen zur Lösung der Poisson-Gleichung erforderlich, wodurch die Rechenzeit für den Drucklöser bei Rechnungen mit 4320^3 Gitterpunkten auf 6720 Rechenkernen (96 Rechenkerne pro Knoten) um 50% gesenkt werden konnte. Die Gesamtrechenzeit reduziert sich damit um 25%. Für zukünftige Rechnerarchitekturen, in denen CPUs mit noch deutlich mehr Rechenkernen eingesetzt werden, ist PALM-4U mit diesem neuen Drucklöser sehr gut aufgestellt.

Im Projektzeitraum erfolgte ebenfalls der Übergang der Codeverwaltung und Entwicklung von einem auf subversion basierenden System nach gitlab (<https://gitlab.palm-model.org>). Die Code-Entwicklung erfolgt nunmehr auf einem vorgeschriebenen Weg mittels CI/CD-Techniken (*continuous integration, continuous development*). Entwickler beschreiben dabei geplante Arbeiten zunächst in einem neu zu öffnenden *issue*, welches dann von anderen Entwicklern kommentiert werden kann. Die eigentlichen Arbeiten erfolgen in einem so-geannten *merge-request-branch*. Änderungen am Code werden unmittelbar an diversen Test-Anwendungsfällen getestet. Sobald der *merge-request* vom Entwickler als abgeschlossen markiert ist, prüft der PALM-Code-Koordinator den Code nochmals auf Einhaltung von Programmierrichtlinien, Effizienz, und (nicht gewünschter) Redundanz, bevor den entsprechenden *merge-request-branch* in den *master-branch* überführt. Eine zukünftige nachhaltige Entwicklung des PALM-4U-Codes ist damit gewährleistet.

1.2.4.4: Analysewerkzeuge für Kaltluftabflüsse

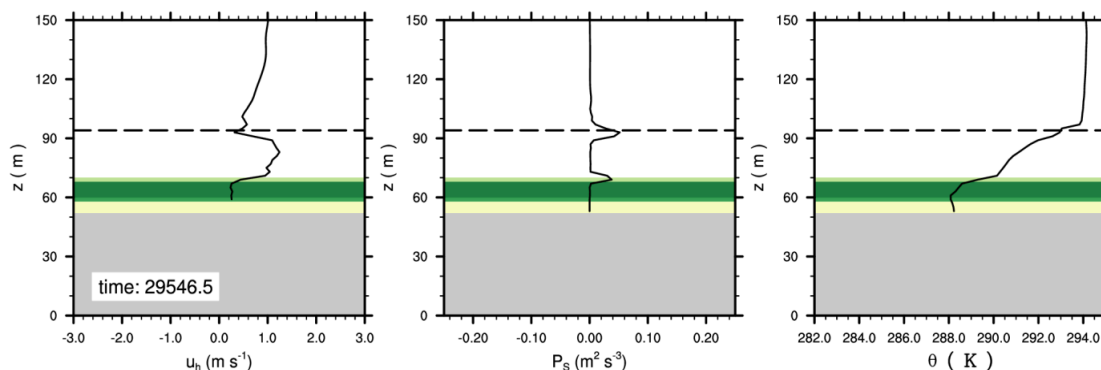


Abb. 7: Vertikalprofile der horizontalen Windgeschwindigkeit, der Scherungsproduktion sowie der potentiellen Temperatur in einer Tallage abgeleitet aus einer idealisierten Simulation. Die horizontal gestrichelte Linie zeigt die detektierte Höhe des Kaltluftstromes an. Die grau schraffierten Flächen bedeuten Gelände, wohingegen die grünen Flächen Baumbestand zeigen. Die Unterschiede in der Blattflächendichte sind über verschiedene Grüntöne abgebildet.

Da die Analyse von Kaltluftabflüssen ein wesentlicher Bestandteil bei der Stadtklimaanalyse ist, wurden in diesem Arbeitspaket spezifische Analysegrößen in PALM implementiert, um die Stärke und die vertikale Mächtigkeit der Kaltluftströme bewerten zu können. Nach Diskussionen zusammen mit GeoNet und dem Deutschen Wetterdienst wurden daraufhin Ausgabegrößen für den Kaltluftvolumenstrom und Kaltluftvolumenstromdichten implementiert. Kaltluftvolumenströme werden für unterschiedliche, in der Praxis oftmals verwendete, fixe Integrationshöhen (25m, 50m, 75m und 100m) ausgegeben. Abbildung 4 zeigt den Kaltluftvolumenstrom integriert bis 50 m über Grund im Nesenbachtal, Stuttgart, für das Evaluierungsszenario VALM04. Entlang der Talachse

des Nesenbachtals ist dabei ein ausgeprägter Kaltluftvolumenstrom erkennbar. Ebenfalls ist ein deutlicher Kaltluftvolumenstrom in dem nördlich davon parallel ausgerichteten Tal erkennbar.

Weiterhin wurde ein Kriterium entwickelt und implementiert, um die vertikale Mächtigkeit von Kaltluftabflüssen automatisiert zu detektieren. Dabei wird angenommen, dass Kaltluftabflüsse durch eine stabile Schichtung und einen bodennahen Jet und charakterisiert sind, wodurch am Oberrand des Kaltluftabflusses signifikante Geschwindigkeits- und Richtungsscherung auftritt. Basierend auf diesem Kriterium kann optional die vertikale Mächtigkeit des Kaltluftabflusses bestimmt und der dazugehörige Kaltluftvolumenstrom ausgegeben werden. Abbildung 5 zeigt Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit, der Scherungsproduktion sowie der potentiellen Temperatur. Oberhalb des Baumbestandes ist ein ausgeprägter Jet zu erkennen, der bis etwa 45 m über der Oberfläche (grau schraffierter Bereich) reicht und mit der stabilen Schichtung korreliert. Sowohl der Oberrand als auch der Unterrand des Jets am Oberrand des Baumbestandes sind durch signifikante Scherungsproduktion gekennzeichnet. Das entwickelte Kriterium ist in der Lage, den Oberrand des Jets zu identifizieren und somit die vertikale Mächtigkeit von Kaltluftabflüssen bestimmen zu können.

1.2.5 WP-S5.1: Unsicherheit von Modellergebnissen in Abhängigkeit von Eingangsdaten

Das Ziel des Arbeitspakets WP-S5.1 ist die Bestimmung der Bandbreite der Modellergebnisse von PALM für unsichere Eingangsdaten mittels systematischer Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen. Empfehlungen für die nötige Genauigkeit bei der Erhebung der Eingangsdaten zur Gewährleistung einer gewünschten Genauigkeit der Ergebnisse sind zu geben, um Aufwand und Kosten, die mit gründlicher Datenerhebung verbunden sind, optimal einzusetzen. Das Projekt teilt sich in drei Teilarbeitspakete, deren Ergebnisse im Folgenden aufgeführt werden. Es sollen Untersuchungen für naturnahe Oberflächen, für städtische Oberflächen und für grüne und blaue Oberflächen durchgeführt werden.

Das Vorhaben wurde erfolgreich abgeschlossen. Eine ausführliche Zusammenfassung von Methodik und Ergebnissen ist in der Dissertation (Pfau, 2024) zu finden, die aus dem Projekt hervorgegangen ist.

Motiviert wurde das Arbeitspaket durch den Aspekt, dass unsichere Eingangsdaten zu unsicheren Ergebnissen führen. Daher wurde zunächst eine einzuhaltende Genauigkeit für die Modellergebnisse bestimmt. Dies geschah auf der Grundlage einer VDI-Richtlinie, die Anforderungen an numerische Modelle zur Gewährleistung der Qualitätssicherung formuliert. Ein Vergleich der Effekte der Eingangsparametervariationen mit dieser erforderlichen Genauigkeit ermöglicht die Auswahl der Eingangsparameter, für die eine intensivere Datenerfassung notwendig ist. Zudem wurde eine Recherche durchgeführt, die zu einer Auflistung der möglichen Eingangsdatenqualität geführt hat, sodass die Frage beantwortet werden kann, ob die erforderliche Genauigkeit der Modellergebnisse mit der gegebenen Eingangsdatenqualität erreicht werden kann.

Für die Bearbeitung des Vorhabens wurden verschiedene repräsentative Setups entwickelt: Modellgebiete mit horizontal homogenen Eigenschaften, wie einer Grünfläche zur Untersuchung der naturnahen Oberfläche, einer versiegelten Fläche als Beitrag zur Untersuchung der urbanen Oberfläche und horizontal homogenem Pflanzenbestand, sowie ein Modellgebiet mit individuellem Baum, letztere zur Untersuchung grüner Elemente, wurden verwendet. Zudem wurde ein repräsentatives urbanes Gebiet mit Gebäuden, Bäumen und kleinen Wasserflächen entwickelt, welches einen Park, einen Platz, Straßenschluchten, Innenhöfe und Gebiete mit einzelnen Häusern und Gärten umfasst. Für das urbane Gebiet wurden gebäudeauflösende Simulationen unter Berücksichtigung von Schattenwurf, Reflexionen und Evapotranspiration durchgeführt. Die Simulationen wurden für einen Breitengrad von 55° an einem Sommertag mit autochthonen Wetterbedingungen durchgeführt.

Die Analyse erforderte die Variation der Eingangsparameter. Hierfür musste aufgrund der je nach Setup teilweise großen Parameterräume und hohen Rechenzeiten zunächst eine geeignete Methode recherchiert beziehungsweise erarbeitet werden. Für die Durchführung der Analyse wurde eine Methode angewandt, die sich in zwei Teile teilt: Es wurden globale Sensitivitätsanalysestudien unter Verwendung der Morris-Methode und eine OAT-Sensitivitätsstudie durchgeführt.

Zunächst wurde die Morris-Methode implementiert. Hierbei handelt es sich um eine globale Sensitivitätsanalysemethode, die es ermöglicht, die Eingabeparameter herauszufiltern, die keinen wesentlichen Beitrag zur Unsicherheit des Modellergebnisses leisten. Sie basiert auf der Idee, dass der Unterschied zwischen Ergebnissen mit nur einem variierten Eingabeparameter ein Maß für die Empfindlichkeit des Ergebnisses bei Variation dieses Parameters ist. Dieses Maß wird als Elementareffekt bezeichnet und berechnet sich über

$$EE_i = \frac{y(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i \Delta x_i) - y(\mathbf{x})}{\Delta q_i}$$

Eine Anzahl r an Trajektorien wird im Parameterraum konstruiert, deren aufeinander folgende Punkte sich in jeweils nur einem Eingabeparameter unterscheiden. Hierüber werden r Elementareffekte für jeden Eingabeparameter berechnet. Ihr Mittelwert μ und der Mittelwert der absoluten Elementareffekte μ^* können verwendet werden, um die Eingabeparameter nach ihrem Einfluss auf die Unsicherheit des Ergebnisses zu ordnen. Die Standardabweichung σ gibt Aufschlüsse über Interaktionen zwischen den Parametern. Die Formeln sind im Folgenden aufgeführt.

$$\mu_i = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r EE_i^j$$

$$\mu_i^* = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r |EE_i^j|$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r (EE_i^j - \mu_i)^2}$$

Zunächst erfolgte die Anwendung der Morris-Methode bei den Modellgebieten mit horizontal homogenen Eigenschaften oder einzelnen Hindernissen, die jeweils von einer Gruppe zusammengehöriger Parameter beschrieben werden.

Hierbei werden die Werte der Eingangsparameter bezüglich der Oberflächeneigenschaften (mit Vegetation oder versiegelt), des Bodentyps und der 3D-Vegetation, also grüner Elemente, variiert und ihr Einfluss auf die Modellergebnisse untersucht.

Nach Implementierung und Anwendung der Morris-Methode wurde zusätzlich für die für einflussreich befundenen Eingangsparameter eine Unsicherheitsanalyse und Methode zur Abschätzung der erforderlichen Genauigkeit der Eingangsparameter verwendet. Hierfür wurde Latin Hypercube Sampling, eine Samplingmethode mit guter Abdeckung des Eingangsparameterraumes bei vertretbarer Anzahl an erforderlichen Modellläufen, implementiert und beispielhaft angewendet.

Für die Untersuchung der Unsicherheiten der Eingabeparameter auf die Unsicherheiten der Modellergebnisse in einem urbanen Gebiet ist aufgrund der hohen erforderlichen Rechenzeit und des großen Parameterraumes die Morris-Methode nicht anwendbar. Daher wird eine geringere Anzahl an Parameterkombinationen verwendet. Parameter bzw. Parametertypen, die in PALM eine Gruppe von Eingabeparametern mit Default-Werte kombinieren, werden separat variiert und die Resultate jeweils mit denen einer Referenzsimulation verglichen. Die Ergebnisse der Morris-Methode können zur Auswertung hinzugezogen werden. Dies ermöglicht Untersuchung und Vergleich der Einflüsse verschiedener Parametergruppen und Parameter, die zur Beschreibung komplexer urbaner Gebiete nötig sind, auf die Modellergebnisse und durch Vergleich mit den erwarteten Genauigkeiten der Modellergebnisse Hinweise auf die benötigte Parametergenauigkeit.

Für die Analyse des urbanen Gebiets erfolgte eine Unterteilung in drei verschiedene Arbeitspakete, in denen Landnutzungsparameter, Parameter zur Beschreibung der 3D-Vegetation und Gebäudeparameter variiert wurden. Hinzu kommt die Durchführung der Referenzsimulation. Bei den untersuchten Ausgangsgrößen handelt es sich um Zeitreihen stündlich und für verschiedene Teiluntersuchungsgebiete räumlich gemittelter Daten, täglich beziehungsweise stündlich gemittelte horizontale Verteilungen der Daten und lokale vertikale Profile täglich gemittelter Daten an repräsentativen Standorten im betrachteten Gebiet bezüglich Windgeschwindigkeit, Temperatur

und biometeorologischer Parameter. Um durch verschiedene Aspekte geprägte urbane bzw. naturnahe Gebiete (inklusive grüner und blauer Elemente) zu untersuchen, wurden hier die bei der Gebietsbeschreibung aufgeführten Teiluntersuchungsgebiete wie der Park oder das Innenhöfe umfassende Gebiet zusätzlich separat untersucht.

Die Durchführung der PALM-Simulationen erfolgte auf den Rechnern des HLRN. Für die Auswertung der Ergebnisse wurden Python-basierte Skripte erstellt.

Es lassen sich die folgenden Ergebnisse zusammenfassen:

Die simulierten Abweichungen der Modellergebnisse resultieren aus Veränderungen der Energiebilanz an der Oberfläche und damit der verfügbaren Energie aufgrund der Variationen der Eingangsparameter. Die Untersuchung gibt Empfehlungen, für welche Eingangsparameter, z.B. Bodenparameter und Parameter zur Beschreibung von Kleingewässern, die Verwendung gröberer, aber automatisierbarer, flächendeckend verfügbarer Daten ausreicht, beziehungsweise für welche Parameter die mittels PALM-Parametertyp übergebenen Default-Werte ausreichend genau sind und für welche Eingangsparameter eine intensivere Datenerfassung lohnend und erforderlich ist, um zuverlässige Modellergebnisse mit ausreichender Genauigkeit zu erhalten. Für eine zuverlässige Modellierung der Oberflächen-, Innenraum- und Lufttemperatur sollten z.B. die thermischen Eigenschaften eines Gebäudes zur Verfügung stehen. Ein weiterer Parameter, der bei fehlenden Informationen zu Überschreitungen der zulässigen Abweichungen der Modellergebnisse führt, ist die Albedo, die die Strahlungsbilanz über die einfallende kurzwellige Strahlung modifiziert. Erforderlich ist hierfür, dass genügend kurzwellige Einstrahlung vorhanden ist und keine Abschattung der betrachteten Ebene mit variierter Albedo vorliegt. Baumhöhe und Kronendurchmesser sind weitere Beispiele für Eingangsparameter, die insbesondere durch Modifikation der Verschattungswirkung am Tag zu Überschreitungen der zulässigen Abweichungen der Modellergebnisse führen. Baumtyp und -form beeinflussen lokal die Strahlungsbilanz und damit Temperatur und UTCI. Die Größe der Variation der Modellergebnisse ist abhängig vom Anteil der variierten Eigenschaften im betrachteten Gebiet, von der Position und der Zeit.

Ein Vergleich mit den zuvor bestimmten erwarteten Genauigkeiten der Modellergebnisse lässt Rückschlüsse auf die benötigte Parametergenauigkeit für die jeweils untersuchten Gebiete zu.

Bei der Untersuchung wird festgestellt, dass die gewünschten Genauigkeiten der Modellergebnisse bei der gegebenen Qualität der Eingangsdaten größtenteils erreicht werden können, wobei teilweise intensive Datenerfassung beispielsweise durch Messungen erforderlich ist und insbesondere eine Erfassung der Modernisierungsmaßnahmen an Gebäuden empfohlen wird, da eine Ungenauigkeit der damit verbundenen Eingangsdaten zu Verletzungen der gewünschten Genauigkeit führen kann.

Mit den Erkenntnissen der durchgeführten Studie lassen sich belastbare Modellergebnisse erzeugen.

1.2.6 WP-P1: Gefrorenes Wasser in Atmosphäre und auf dem Boden

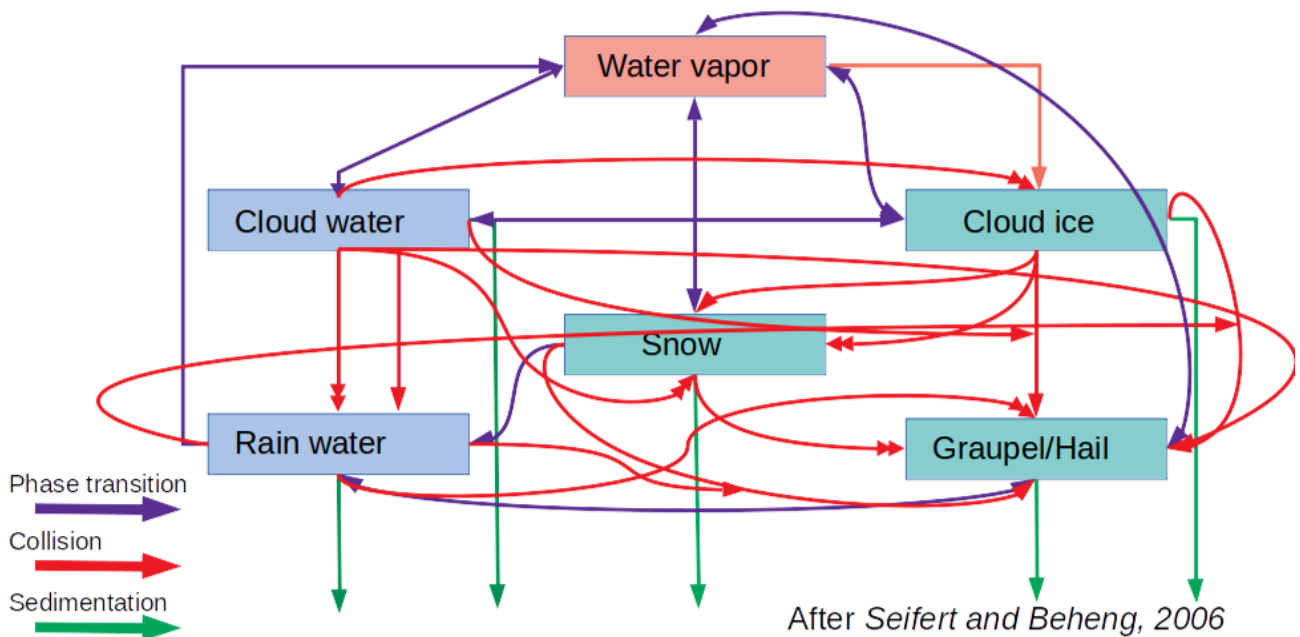


Abb. 8: Schematische Abbildung des in PALM-4U implementierten Mikrophysik-Schematas nach Seifert und Beheng, 2006.

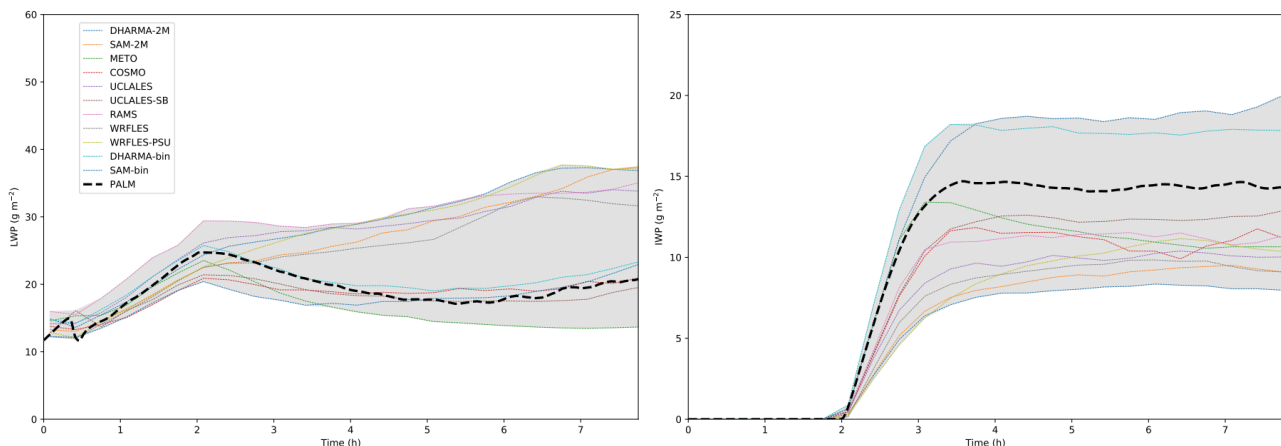


Abb. 9a: Zeitreihen des ISDAC-Modellvergleichs für den Flüssigwasserpfad und den Eiswasserpfad. Die farbigen Linien zeigen die Ergebnisse anderer Modelle, sowie den Ergebnisraum (graue Fläche). Das Ergebnis von PALM-4U ist mit der schwarz gestrichelten Linie gezeigt.

Die Implementierung der Mischphasenmikrophysik nach Seifert und Beheng (2006) mit den prognostischen Spezies von Eis, Schnee und Graupel wurde erfolgreich abgeschlossen. Diese Erweiterung (siehe Abb. 8) umfasst alle atmosphärischen Mikrophysik-Prozesse wie Nukleation, Phasenübergänge, Sedimentation sowie Kollision und Koaleszenz (Aggregation, Self-collection und Riming). Dies bedeutet auch gleichzeitig das Einführen von sechs neuen prognostischen Variablen (je zwei - Mischungsverhältnis und Anzahlkonzentration - für jede Spezies), die je nach Komplexität des ausgewählten Mikrophysik-Schemas hinzugeschaltet werden können. Dadurch

kann PALM-4U nun alle troposphärischen Wolkengattungen simulieren: von hoch reichender Konvektion bis hin zu arktischen Stratocumulus. Zudem ermöglicht diese Implementierung die Kopplung mit mesoskaligen Modellen für nicht-wolkenfreie Situationen.

Anhand idealisierter Modellvergleichsstudien (Ovchinnikov et al., 2014) basierend auf der Indirect and Semi-Direct Aerosol Campaign (ISDAC) wurden die implementierten Prozesse für Wolkeneis validiert. Abbildung 9a zeigt hierbei, dass die durchgeführten Implementierungen dem zu erwartenden Ergebnisraum entsprechen. Eine qualitative Validierung wurde ebenso für die gesamte Mischphasenmikrophysik mithilfe eines Setups hochreichender Konvektion (siehe Abb. 9b) erfolgreich abgeschlossen. Hierbei wurde die Entwicklung einer realistischen Gewitterzelle mit hoher Modellauflösung (20 m Gitterweite in alle Raumrichtungen) für ein Modell mit den Abmessungen 60 km x 45 km x 18 km anhand bekannter Setups gerechnet.

Im folgenden Projektverlauf wurde die Mischphasenmikrophysik mit dem Strahlungstransfermodell gekoppelt. Das bedeutet, dass nun auch das Strahlungsmodell RRTMG Eiswolken bzw. Mischphasenwolken erkennt und ihre optischen Eigenschaften berechnet. Der Eiswasserpfad dient dabei als Eingangsgröße für das RRTMG, auf dessen Basis der cloud ice effective radius berechnet wird.

Ein Testfall für die Mischphasenmikrophysik mit gekoppelter Strahlung wurde dem PALM-Repository hinzugefügt, sodass dieser neu entwickelte Modellzweig automatisch gewartet wird. Niederschlagsraten für jede Niederschlagsart (Wolkentröpfchen, Eiskristalle, Graupel- und Schneeaggregate sowie Regen) wurden im neuen Entwicklungszweig für das Landoberflächenmodell (LSM) implementiert. Diese müssen noch eingehend getestet werden, waren aber notwendig, um die Ablagerung der einzelnen Arten an der Oberfläche zu berechnen und die Massenbilanz für das Schneeschema innerhalb des LSM und USM zu ermitteln. Zuvor wurden alle Niederschlagsarten in einer einzigen Niederschlagsrate zusammengefasst.

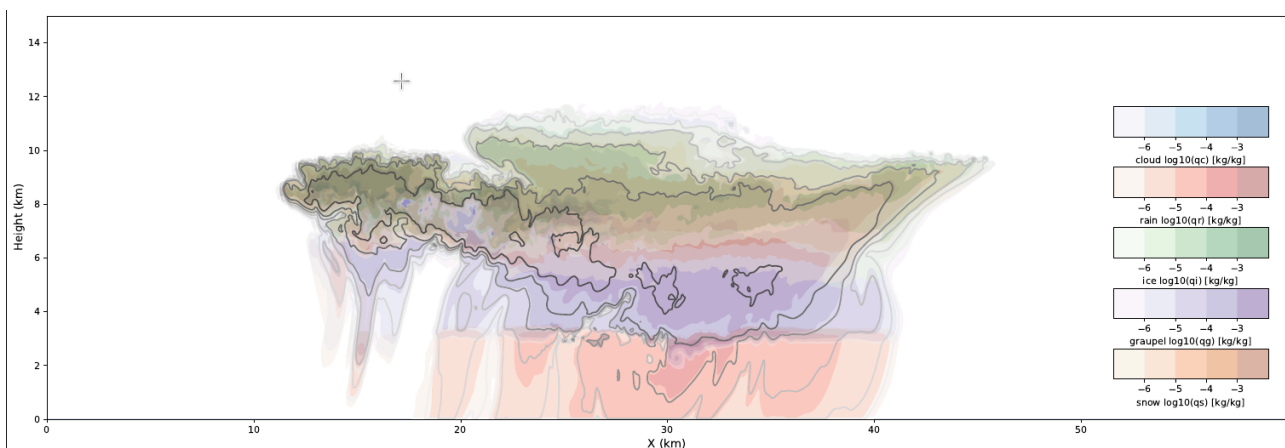


Abb. 9b: XZ-Schnitt eines hochauflösten (20m Gitterpunkt-Abstand in alle Raumrichtungen) Cumulonimbus. Die unterschiedlichen Farben zeigen die Mischungsverhältnisse der verschiedenen Spezies.

Die Implementierung des Schneeschemas in das Landoberflächenmodell (LSM) wurde erfüllt.

Zunächst wurde ein Vergleich der anpassbaren Schneeschemata durchgeführt. Dabei wurden die relativen Fehler des Schneewasseräquivalents (SWE) und/oder des Beckenabflusses, die in SnowMIP2 (Essery et al., 1999; Rutter et al., 2001), PILPS2(d) (Slater et al., 2001; Luo et al., 2002) und ESM-SnowMIP (Krinner et al., 2018) für über 50 Schneeschemata veröffentlicht wurden, verglichen. Die drei Schemata mit den geringsten gemeldeten Fehlern wurden im Detail untersucht. Es wurde das Schema mit der besten Kombination aus einfacher Integration und dargestellten physikalischen Prozessen ausgewählt. Letztendlich wurde das Schneeschema HTESSSEL (Dutra et al., 2010) ausgewählt.

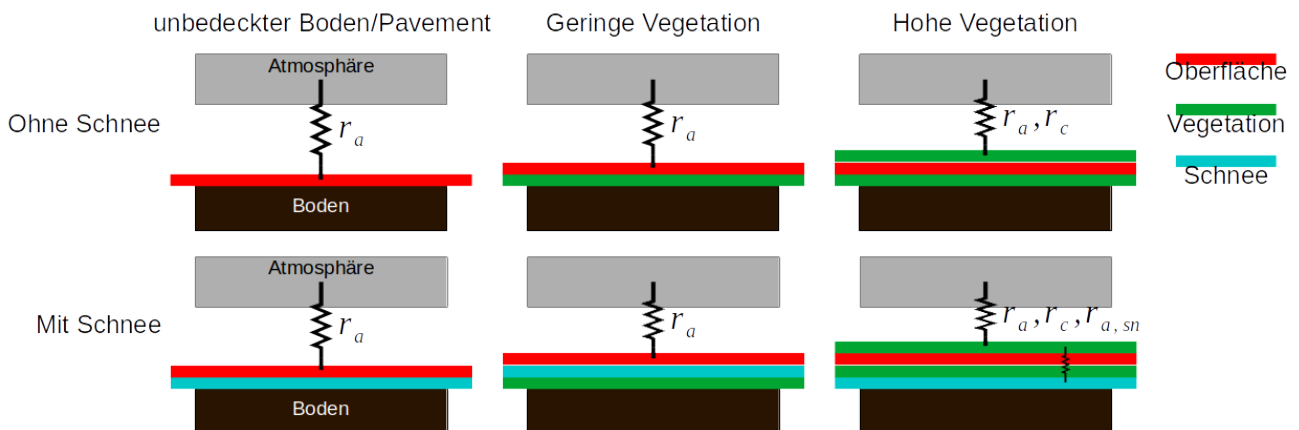


Abb. 8: Schematische Darstellung der Ablagerung von Schnee auf verschiedenen Oberflächentypen. Der Schnee bedeckt sowohl den Boden als auch die niedrig liegende Vegetation, wodurch sich die Leitfähigkeit und die Oberflächenrauigkeit ändern, aber er koppelt sich parallel mit dem Widerstand der Baumkronen, während die Oberflächenrauigkeit der hohen Vegetation erhalten bleibt.

Die Implementierung des Schneeschemas in das bestehende LSM erforderte, dass neue Prognosegleichungen für die Schneetemperatur, die Schneemasse, die Schneedichte, die Schneeschmelze, das flüssige Wasser im Schnee und die Abflussverfolgung von Grund auf in PALM kodiert werden mussten. Darüber hinaus wurde die bestehende Gleichung für die Oberflächentemperaturprognose stark modifiziert, um den Schnee einzubeziehen. Dazu gehörten Änderungen an vielen diagnostischen Variablen (z. B. Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit usw.), damit das atmosphärische Widerstandsschema je nach Art der Oberfläche, auf der sich der Schnee ablagert, realistisch dargestellt werden kann (siehe Abbildung 8).

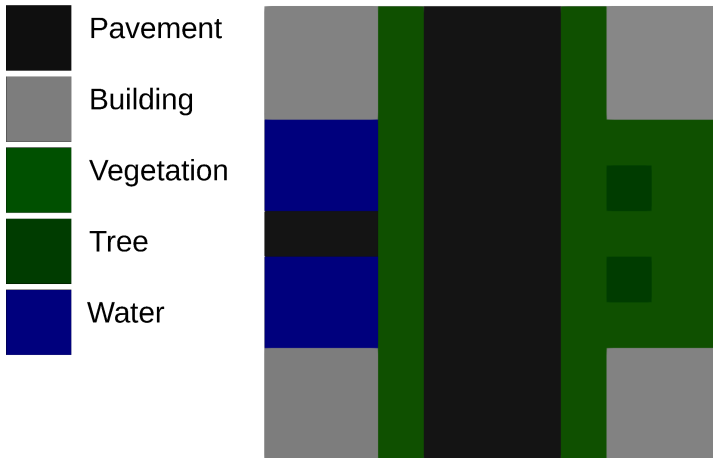


Abb. 11: Städtisches Gebiet und Oberflächentypen für den Testfall Schnee. Das Gebiet ist 40x40 m groß und hat einen Gitterabstand von 2 m. Dieser Testfall ist optimal, um die Interaktion von Schnee mit allen Landoberflächentypen in PALM zu untersuchen.

Zwei Arten von Niederschlag wurden in das LSM integriert: vorgeschriebener und simulierter Niederschlag. Vorgeschriebener Niederschlag ermöglicht dem Benutzer, ein Intervall zu definieren, in dem konstanter Schnee und/oder Regen gleichmäßig auf Landoberflächen niedergeht. Darüber hinaus kann der Benutzer bei der Initialisierung auch eine domänenweite Schneedecke mit einheitlicher Dicke vorgeben. Diese Methoden eignen sich für idealisierte Szenarien, bei denen die Niederschlagsmengen, die Niederschlagsintervalle und die Schneedeckenhöhe bekannt sind oder genau kontrolliert werden müssen. In Abbildung 11 ist ein städtischer Testfall dargestellt, bei dem das volle Potenzial dieses Systems genutzt wird. Abbildungen 12 und 13 zeigen Ergebnisse dieses Testfalls (Diskussion in der Bildbeschreibung).

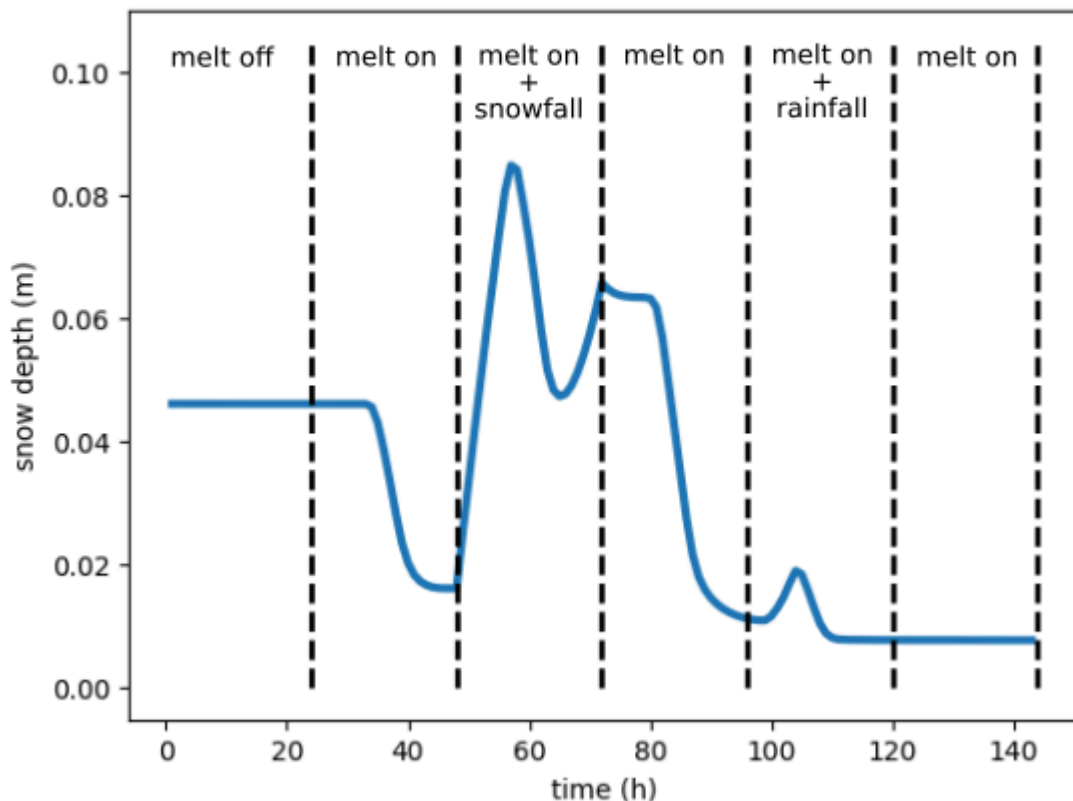


Abb. 10: Gebietsgemittelte Zeitreihe der Schneehöhe für den städtischen Testfall mit vorgegebenem Niederschlag. Die Simulation beginnt mit einer vorgeschriebenen Schneedecke von 0,05 m. Die gestrichelten Linien zeigen 0:00 für jeden Tag an. Tag 1 - das Schneesystem ist eingeschaltet, aber Niederschlag und Schmelzen sind verboten. Tag 2 - die Schneedecke darf schmelzen. Tag 3 - eine Schneefallrate von 2 mm.h⁻¹ ist vorgeschrieben. Tag 4 - der Schneefall stoppt. Tag 5 - eine Niederschlagsmenge von 1 mm.h⁻¹ ist vorgeschrieben. Tag 6 - die Niederschläge hören auf. Die Schneeschmelze wird fortgesetzt, jedoch mit einer deutlich geringeren Geschwindigkeit.

Der simulierte Niederschlag bezieht Schneefall und Niederschlag aus dem oben beschriebenen Mischphasenmikrophysik-Modell. Tests für diese Art von Niederschlag sind bisher begrenzt, da die Grenzschicht vollständig dargestellt werden muss, um Wolken genau zu modellieren. Dies bedeutet, dass hochauflösende Simulationen (z. B. für städtische Anwendungen) extrem teuer sind. Dennoch wurden weniger kostspielige Testfälle untersucht, wobei strengere Tests auf die Zukunft verschoben wurden. Ein Beispiel für die Ergebnisse einer Testsimulation für simulierten Niederschlag auf einer homogenen, kurzen Grasfläche ist in Abbildung 14 dargestellt.

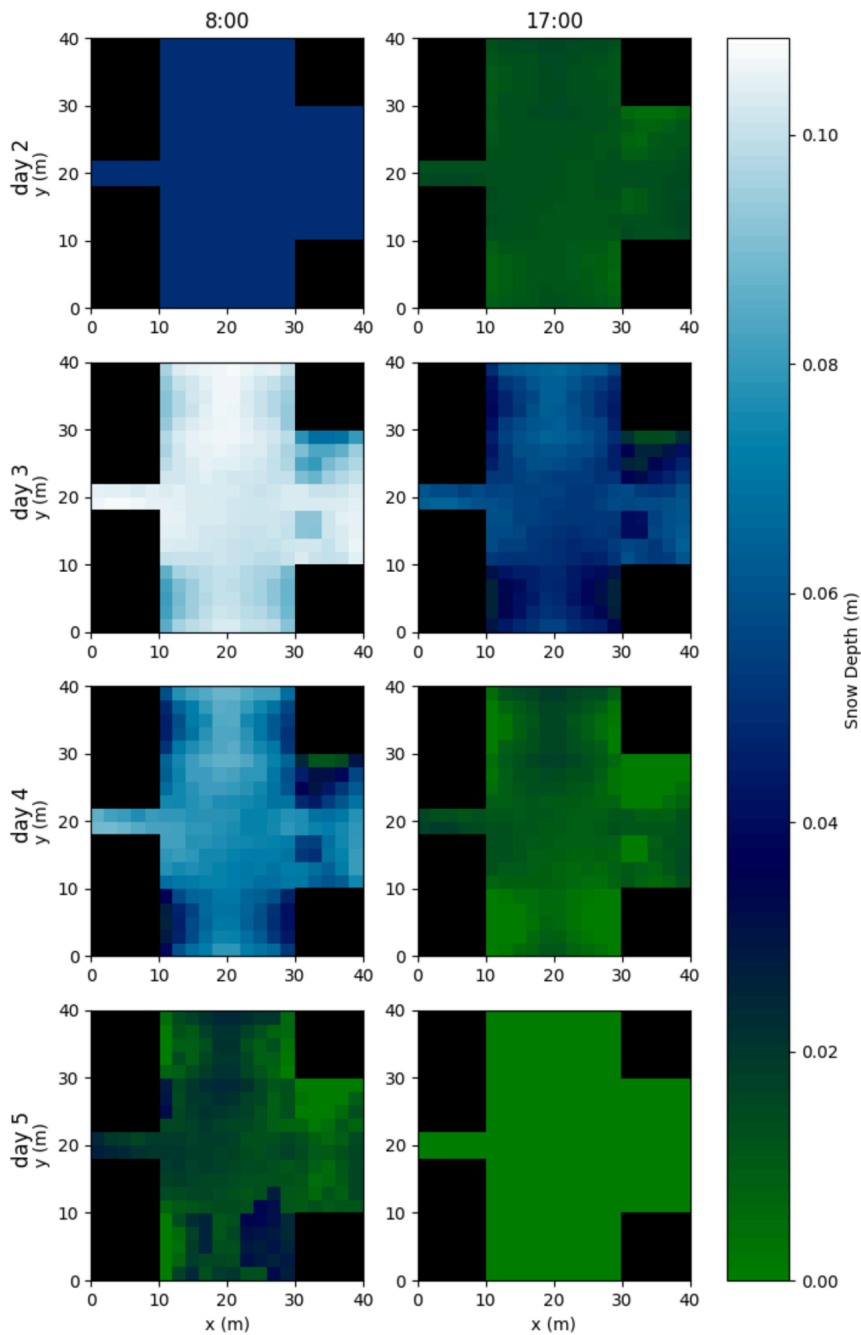


Abb. 13: x-y-Querschnitt der Schneehöhe auf der Oberfläche für den städtischen Testfallbereich (siehe Abbildung 9). Schwarz zeigt ein Gebäude oder eine Wasseroberfläche an, auf der sich kein Schnee ansammeln darf. Die Zeilen entsprechen den Tagen, die linke Spalte entspricht ungefähr dem Sonnenaufgang und die rechte Spalte ungefähr dem Sonnenuntergang. Norden ist am oberen Rand der Abbildung ausgerichtet. Die Schneeschmelze findet vor allem in der Nähe von Gebäuden und unter Bäumen statt, insbesondere an nach Süden ausgerichteten Wänden, die während des Tages mehr direkte Sonneneinstrahlung erhalten. An nach Norden ausgerichteten Wänden, die die meiste Zeit des Tages im Schatten liegen, ist der Schnee im Durchschnitt tiefer. Durch die frühmorgendliche Verschattung kann der Schnee an der nach Westen ausgerichteten Wand des südöstlichen Gebäudes an Tag 5 nach einer Nacht mit mäßigen Niederschlägen bis kurz nach Sonnenaufgang liegen bleiben.

Die Validierung des Schneeschemas und die Re-Simulation von VALM01 sind noch nicht abgeschlossen. Das Schneeschema scheint sehr empfindlich auf die Systemkonfiguration zu

reagieren, obwohl unklar ist, warum. Aus diesem Grund sind groß angelegte Testfälle, die das Schneeschema verwenden, bisher alle fehlgeschlagen. Außerdem sind die darin enthaltenen Fehler nicht reproduzierbar, da jedes System seinen eigenen Fehlersatz produziert. Das macht die Fehlersuche im Code extrem schwierig. Daher läuft das Schneemodell zwar auf einigen Systemen, ist aber noch nicht HPC-fähig. Die Tests laufen noch, und die Fertigstellung wird für Ende 2024 erwartet.

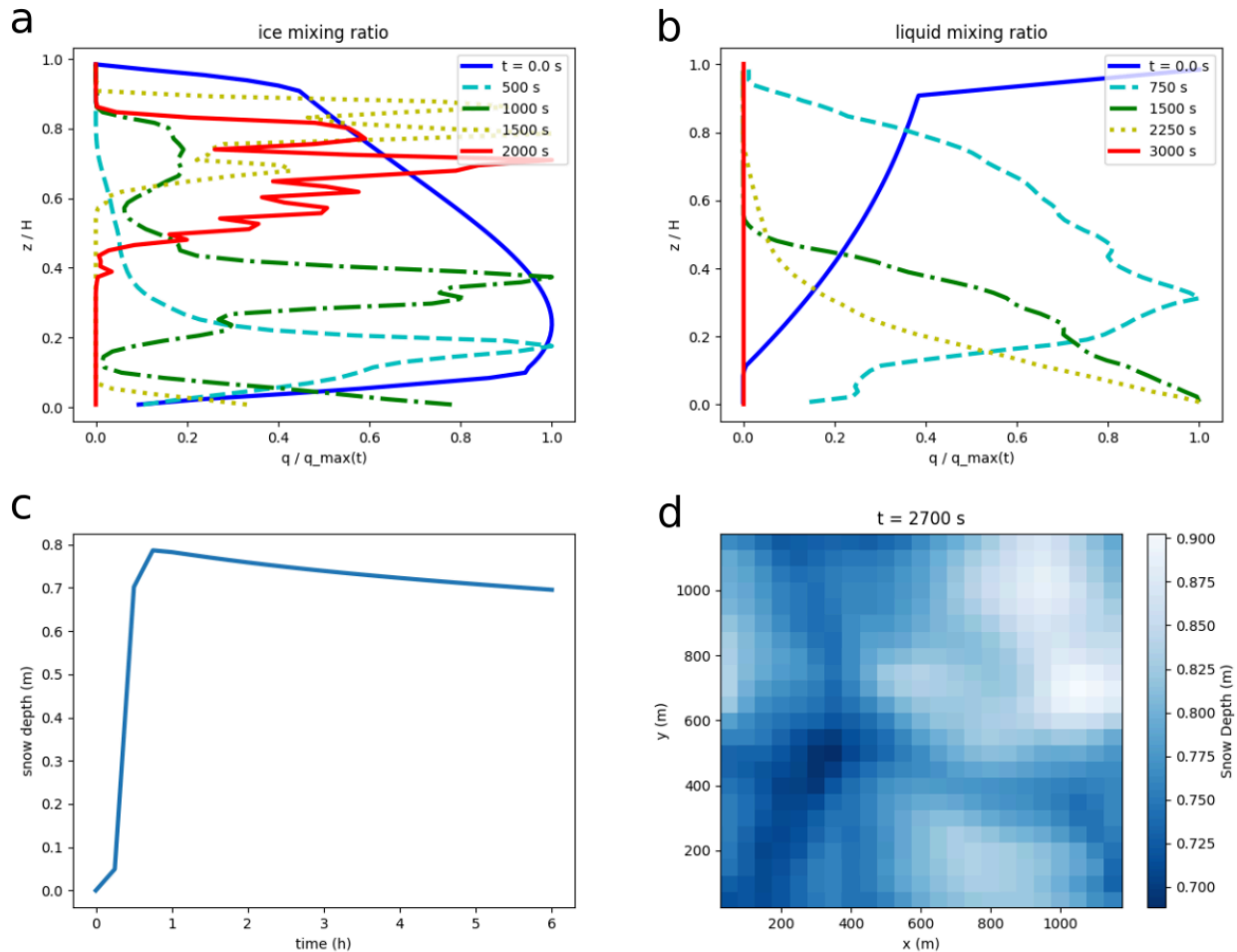


Abb. 12: Ausgabe des simulierten Niederschlags-Testfalls. a) Profile des Eismischungsverhältnisses, normiert auf das Maximum in diesem Zeitschritt. Die absoluten und relativen Werte dieser Größe sind nicht aussagekräftig, aber die Form der Profile gibt Aufschluss über den Zustand der Wolkendecke und darüber, wann die Niederschläge die Oberfläche erreichen. Zu Beginn ist die Wolkendecke relativ niedrig, und es fällt nur eine geringe Menge an Niederschlag an der Oberfläche. Im Laufe der Zeit steigt die Wolkendecke an, und der Niederschlag an der Oberfläche nimmt zu. Feste Niederschläge hören nach etwa 30 Minuten auf. b) Profile des Flüssigwasser-Mischungsverhältnisses, normiert auf das Maximum in diesem Zeitschritt. Anfänglich bilden sich Regenwolken nur sehr hoch oben. Im Laufe der Zeit senkt sich die Wolkendecke und flüssiges Wasser erreicht die Oberfläche. Der flüssige Niederschlag hört nach etwa 50 Minuten auf. c) Zeitreihe der Schneehöhe. Die Schneehöhe nimmt zunächst rasch zu. Die Anstiegsrate nimmt leicht ab, bis sie nach ~45 Minuten ein Maximum erreicht. Der Anstieg der Schneehöhe nach dem Ende des festen Niederschlags (siehe Abbildung 14a) ist darauf zurückzuführen, dass der Flüssigwasser-Niederschlag (siehe Abbildung 14b) den Flüssigwassergehalt des Schnees erhöht. Dadurch erhöht sich die SWE. Eine mikrophysikalische Parametrisierung innerhalb des Schneeschemas kann auch das flüssige Wasser im Schnee wieder einfrieren, was die SWE weiter erhöht. Nachdem der Flüssigwasser-Niederschlag aufhört, kommt es zur Schmelze. d) x-y-Querschnitt der Schneehöhe an der Oberfläche nach 45 Minuten (maximum-Schneeeakkumulation; siehe Abbildung 12c). Aufgrund der einheitlichen Beschaffenheit der Oberfläche und der Atmosphäre können die hier beobachteten Unterschiede in der Schneehöhe nur auf Turbulenzen und

turbulenzbedingte Schwankungen der Schneedecke zurückgeführt werden. Die Turbulenz ist für etwa 20 cm der Schneehöhenschwankungen im gesamten Gebiet verantwortlich.

1.2.7 WP-I3: Weiterentwicklung des Multiagentenmodells: intelligente Wegfindung und Verhalten von Fußgängern, Evakuierungssimulationen, und agentenbasierte Fahrzeugemissionen (Schnittstelle zu MATSim)

In WP-I3 gab es zwei Zielsetzung. Zunächst sollte das bestehende Multiagentenmodell weiterentwickelt werden, so dass die Wegfindung und der Verhalten der Fußgänger-Agenten realistischer abgebildet werden können. Zusätzlich sollte Ein Evakuierungsmodus hingefügt werden. Das zweite Ziel war die Kopplung des Agentenmodells für Fahrzeuge an das Verkehrsagentenmodell MATSim um so realistische Emissionen in PALM zu realisieren.

Das Multiagentenmodell wurde um eine optionale Diversitätsoption erweitert, mit der die freigesetzten Agenten zufällige Eigenschaften erhalten (Alter, Größe, Geschlecht, Gewicht, metabolische Belastung, usw.). Hierfür wurde die Altersverteilung der deutschen Bevölkerung als Wahrscheinlichkeitsfunktion hinterlegt. Entsprechend Alter und zufällig verteiltem Geschlecht werden jedem Agenten nun eine Größe und Gewicht zugeordnet die auf bekannten Statistiken basieren und mit einem Zufallsfaktor kombiniert werden. Ebenso wurde das Agentenmodell an das Luftchemiemodul gekoppelt. Dies kann auf zwei Arten erfolgen. Im Standardmodus "messen" die Agenten die sich jeweils am ihrem Ort vorhandene Schadstoffkonzentration. Im "Atmungsmodus" wird die Atmung der Agenten berücksichtigt, basierend auf Parametern wie Lungenvolumen, Atemhubvolumen und -frequenz. Die Parameter basieren auf den Agenteneigenschaften wie Alter und Geschlecht. Die Agenten messen in diesem Modus nicht mehr die Konzentration sondern inhalieren über die Zeit Schadstoffe, die sich dann "im Agenten" akkumulieren. So können deutlich aussagekräftigere Informationen über die Schadstoffbelastung der Agenten treffen.

Die Wegfindung der Agenten wurde optimiert, so dass die Agenten nicht mehr wahllos über Straßen laufen, sondern sich nur entlang vordefinierten Gehwegen bewegen und Straßen nur an definierten Übergängen (Ampeln, Zebrastreifen) überqueren (siehe Abb. 15). Diese Codeentwicklungen sind derzeit aufgrund von deutlichen Verzögerungen erst im nächsten PALM Release verfügbar.

Die Realisierung der Kopplung an MATSim wurde im Laufe der Projektlaufzeit testweise über das Multiagentenmodell realisiert, aber letztlich verworfen. Dies wird weiter unten diskutiert. Stattdessen wurde letztlich ein Mechanismus implementiert, um bewegte Emissionen zu berücksichtigen, wodurch Emissionen von Fahrzeugen, Flugzeugen oder auch Schiffen emuliert werden können. Die Emissionen sind dabei nicht an das Multiagentenmodell gebunden, sondern können unabhängig davon über eine speziell für bewegte Emissionen definierte Eingabedatei vorgegeben werden. Die Eingabe ist flexibel gestaltet, so dass einzelne Fahrwege zu unterschiedlichen Zeiten betrachtet werden können, wobei entlang jeder Fahrtrajektorie unterschiedliche Stoffe emittiert werden können. In Zusammenarbeit mit der TU-Berlin wurde ein Python-Skript entwickelt, um eine Schnittstelle zwischen MATSIM und der bewegten

Emissionseingabe in PALM bereitzustellen. Die Methodik wird zur Zeit benutzt, um den Einfluss von bewegten Emissionen entlang von Straßen im Vergleich zu permanenten Linienquellen zu untersuchen.

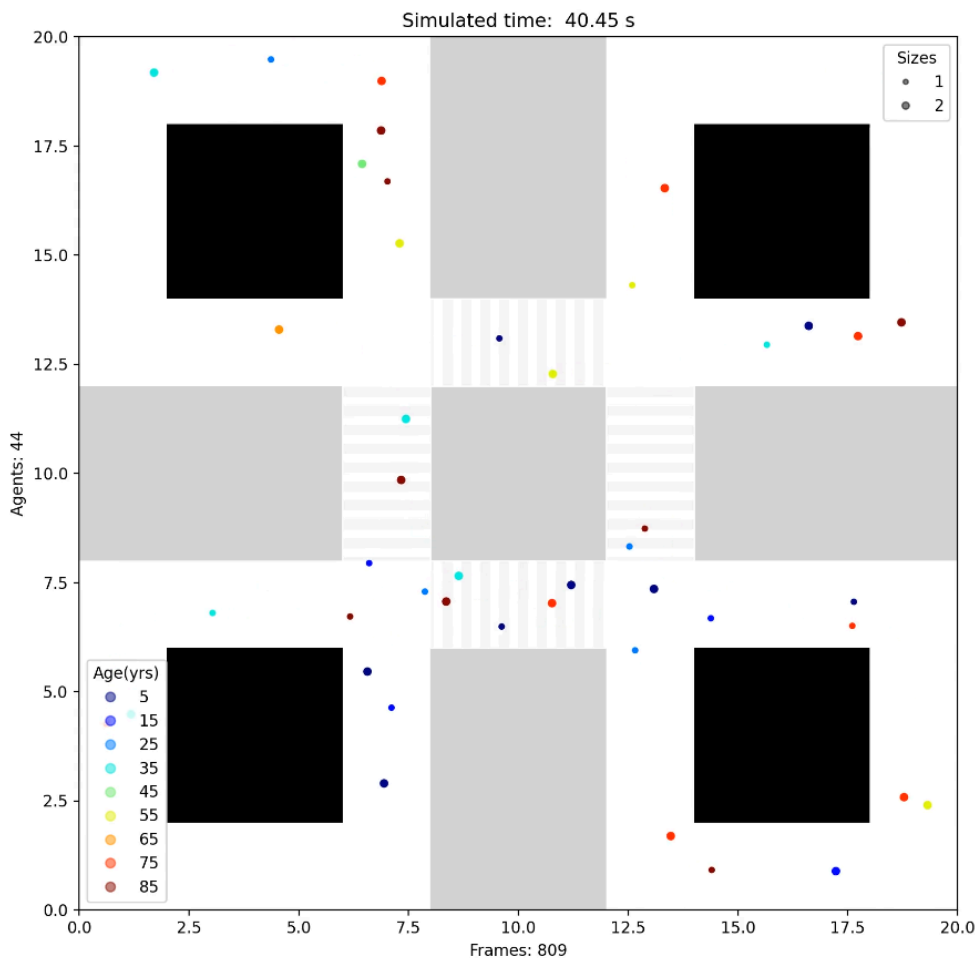


Abb. 13: Agenten mit Altersverteilung bewegen sich entlang von Fußgängerwegen und Zebrastreifen. Straßen werden konsequent gemieden.

Die Verzögerungen und Probleme bei der Fertigstellung der Arbeiten am Multiagentenmodell sind am Ende der Laufzeit entstanden. Details unterliegen dem Datenschutz und sind dem BMBF separat übermittelt worden. In der Folge konnte der geplante Evakuierungsmodus nicht realisiert werden. Trotz der Probleme ist die Kopplung an MATSim realisiert worden und die verbesserte Wegfindung mit einer Diversitäts- und Atmungsoption sind im nächsten PALM Release für die Community verfügbar.

1.2.8 WP-I6: Windwurfmodellierung für Sturmschäden an Stadtbäumen

Dieses Arbeitspaket hatte das Ziel, ein detailliertes und präzises Windwurf Modell für Stadtbäume zu entwickeln und in PALM zu integrieren. PALM bietet schon lange durch das Plant Canopy Modell die Berücksichtigung von dreidimensional aufgelöster Vegetation an, um die Wechselwirkung mit der turbulenten Strömung zu untersuchen. Bisher ging dies allerdings nur passiv (Auswirkung der Vegetation auf die Strömung) durch die Vorgabe der Blattflächendichte. Eine Untersuchung der Auswirkung der Strömung auf die Vegetation war noch nicht möglich.

Zunächst wurden daher bestehende Windwurf Modelle aus der Forstmeteorologie, wie GALES oder HWIND, auf ihre Anwendbarkeit für Stadtbäume überprüft. Diese Modelle, basierend auf Feldversuchen und Windkanalexperimenten an einzelnen Bäumen, werden üblicherweise zur Abschätzung der Sturmgefahr in ausgedehnten Waldflächen verwendet. Die Herausforderung bestand darin, diese Modelle so anzupassen, dass sie die besonderen Bedingungen in städtischen Umgebungen auf kleinstem Raum berücksichtigen können. PALM ist in der Lage, die atmosphärische Strömung in dieser Umgebung hochaufgelöst zu simulieren und das zu implementierende Windwurf Modell muss daher in der Lage sein, diese Daten zu verarbeiten.

Das im Rahmen dieses Arbeitspaketes neu implementierte Windwurf Modell basiert auf dem Ansatz von Peltola und Kellomäki (1993) und Peltola et al. (1999), welcher von Groß (2018) weiter angepasst wurde. Mit dieser Entwicklung ist es nun möglich, innerhalb des Plant Canopy Modell in PALM jeden 3D-Gitterpunkt, der eine Blattflächendichte größer 0 hat, über eine sogenannte „Tree ID“ eindeutig einem bestimmten Baum zuzuordnen. Zu jeder „Tree ID“ ist es möglich, zusätzlich detaillierte Angaben über seine Größe, Form, Standfestigkeit, Bruchfestigkeit, Stammdicke, Elastizität und Masse zu machen. Zu jedem Zeitschritt wird sowohl der dynamische Strömungswiderstand berechnet, als auch die bei horizontaler Auslenkung wirkende Gewichtskraft. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der Luftdichte, der horizontalen Anströmgeschwindigkeit, der Blattflächendichte, der grünen Masse des Baumes und einem empirischen Koeffizienten für den Strömungswiderstand. Der gesamte Drehmoment, der auf Stamm und Wurzel wirkt, wird über das Volumen jedes einzelnen Baumes integriert. Aus diesen Informationen berechnet das Windwurf Modell dann für jeden Baum individuell und zu jedem Zeitschritt die aktuellen Kräfte, die auf den Stamm und das Wurzelwerk wirken. Über einen anschließenden Vergleich mit den maximalen Bruch- und Entwurzelung-Drehmomenten kann nun bestimmt werden, welcher Baum wann fällt. Die wirkende Kraft resultiert sowohl aus dem dynamischen Strömungswiderstand als auch aus der durch die horizontale Auslenkung wirkenden Gewichtskraft. Das Modell berücksichtigt so auch komplexe Wechselwirkung mit der Strömung und zwischen benachbarten Bäumen. Insbesondere der Windschatteneffekt wird berücksichtigt, indem nach einem Windwurf durch den entfallenen Windschatten erhöhte Lasten auf weitere im Lee stehenden Baum wirken.

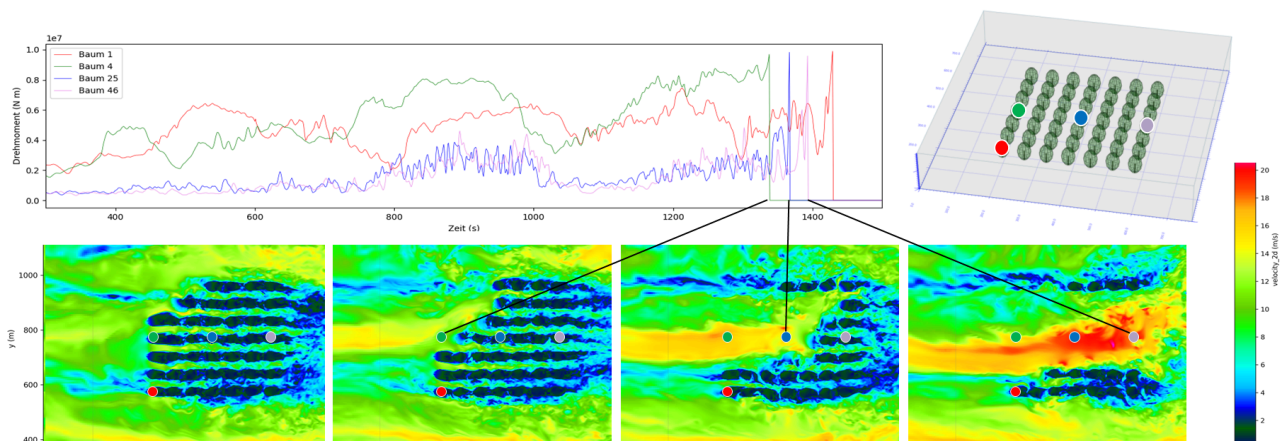


Abb. 16: Daten aus einer Evaluierungs-Simulation, die mit 49 Bäume, die in einem 7x7 Raster angeordnet sind und von Westen (-x) mit linear über die Zeit ansteigender Windgeschwindigkeit angeströmt werden. Die gezeigte Bildsequenz (30s Abstand) ganz unten zeigt den Verlauf einer starken Böe, die hier zum Windwurf von 32 Bäumen in einem kurzen Zeitabstand (90s) führt. Hier haben alle Bäume den gleichen Grenz-Drehmoment von 10^7 Nm. Den Windschatten, den Baum 4 auf die dahinter stehenden Bäume 25 und 46 wirft, ist auch in der Darstellung des individuell an den Bäumen wirkenden Verlaufs des Drehmoments mit der Zeit gut zu erkennen. Sobald der abschirmende Baum 4 (grün) gefallen ist, wächst die Belastung auf Baum 25 (blau) sprunghaft an.

In verschiedenen idealisierten Studien wurde deutlich (siehe auch Abb. 14), dass zur vollwertigen Nutzung des Windwurf Modells eine Vielzahl an baumspezifischen Parametern notwendig ist. Neben offensichtlichen Parameter wie dem Standort, der Baumhöhe, dem Baumkronen-Durchmesser, der Baumkronen-Form und dem Durchmesser des Stammes, sind jedoch auch die Blattflächendichte, die Grüne Masse und die Dichte, Elastizitätskoeffizient und Biegefestigkeit des Stamm-Holzes entscheidend. Darüber hinaus werden zur Quantifizierung der Bruchlast- und Entwurzelungslast-Grenze Informationen über den allgemeinen Gesundheitszustand des Baumes sowie über die Beschaffenheit des durchwurzelt Bodens benötigt. Obwohl einige dieser Informationen aus der Art des Baumes abgeleitet werden können, geht der Umfang der benötigten Informationen leider meist weit über das hinaus, was in bestehenden kommunalen Baumkatastern an baumspezifischen Informationen zur Verfügung steht. Insbesondere die Abschätzung der jeweiligen Grenzlasten ist in der Realität nur sehr ungenau möglich.

Im letzten Teil des Arbeitspaketes war eine Anwendung des fertig implementierten Windwurf Modells auf gut dokumentierte Sturmereignisse aus jüngster Zeit wie beispielsweise dem Sturm „Ela“ 2014 und dem Sturm „Xavier“ im Jahre 2017 geplant. Es gab jedoch zu Beginn der Projektlaufzeit große Schwierigkeiten bei der Besetzung der Projektstelle mit Personal durch eine lange erfolglose Ausschreibung der Projektstelle und daher kam es zu einem deutlich verspäteten Beginn der Arbeiten. Die tatsächliche Besetzung der Projektstelle erfolgte erst zum 01.01.2021 und alle Arbeiten erfolgen daher von Beginn an mit einer Verzögerung von 14 Monaten. Als Folge dieser Verzögerung war es dem Projektmitarbeiter nicht mehr möglich, bis zum Projektende im August 2023 die Anwendung des erfolgreich implementierten Windwurf Modells auf ein gut dokumentiertes echtes Sturmereignis durchzuführen. Der Projektmitarbeiter arbeitet jedoch weiterhin an seiner Promotion. In diesem Rahmen ist der realistische Einsatz des Windwurf Modells weiterhin vorgesehen.

1.3 Gegenüberstellungen mit Zielen

Die im Projektantrag formulierten Ziele wurden durch Meilensteine und Deliverables genauer definiert. Die untenstehende Tabelle gibt eine Übersicht über die tatsächlich erreichten Ziele. Einige Ziele konnten aufgrund von Verzögerungen nicht erfüllt werden. Details dazu werden in den jeweiligen Unterabschnitten (siehe oben) diskutiert. Einige Ziele wurden durch notwendige Änderungen im Arbeitsplan durch alternative Vorgehensweisen ersetzt oder sind Bestandteil noch laufender Diskussionen innerhalb der Community. Insgesamt konnte das Projektziel aber sehr gut erreicht werden.

Nummer	Monat	Arbeitspaket	Beschreibung	Ziel erfüllt?
M01	12	WP-S2.1	Konzept für Community-Modellstruktur ist erstellt.	Erfüllt.
M02	18	WP-S2.1	Community-Modellstruktur ist entwickelt und realisiert.	Teilweise erfüllt, siehe Kap. 1.2.1
M03	18	WP-S2.3	Vorlesung „urban climates“ ist entwickelt	Nicht erfüllt, siehe Kap. 1.2.2
M04	30	WP-S2.3	Vorlesung „urban microscale modeling“ ist entwickelt	Nicht erfüllt, siehe Kap. 1.2.2
M05	36	WP-S2.3	Praktikum „dispersion modeling in urban environments“ ist entwickelt	Erfüllt.
M06	12	WP-S3.1	Evaluierungsläufe (Fortsetzung Phase 1) sind abgeschlossen und Daten bereitgestellt	Erfüllt.
M07	36	WP-S3.2	Evaluierungsläufe (Neue Modellkomponenten) sind abgeschlossen und Daten bereitgestellt	Nicht erfüllt, siehe Kap. 1.2.3
M08	36	WP-S3.3	Testszenarien für den PALM-4U Testserver sind erstellt und eingepflegt.	Erfüllt.
M09	2	WP-S4.1	Konzept für „immersed boundary method“ ist erstellt	Erfüllt.
M10	9	WP-S4.1	„Immersed boundary method“ ist implementiert und getestet	Erfüllt.
M11	12	WP-S4.2	Konzept zur Implementierung eines kompressiblen Gleichungssystems ist erstellt	Erfüllt.
M12	30	WP-S4.2	Kompressibles Gleichungssystem ist implementiert	Nicht erfüllt, siehe Kap. 1.2.4
M13	36	WP-S4.3	Modelloptimierung wurde durchgeführt und Expertenwerkzeuge erstellt	Erfüllt.
M14	36	WP-S4.4	Modellevaluierung abgeschlossen und Kaltluftabflussanalysen implementiert/getestet	Erfüllt.
M15	3	WP-S5.1.1	Abstimmung der zu erwartenden Genauigkeit der Modellergebnisse	Erfüllt.
M16	12	WP-S5.1.1	Benötigte Genauigkeit für natürliche Oberflächendaten ist bestimmt	Erfüllt.
M17	24	WP-S5.1.2	Benötigte Genauigkeit für urbane Oberflächendaten ist bestimmt	Erfüllt.
M18	28	WP-S5.1.3	Benötigte Genauigkeit für grüne Oberflächendaten ist bestimmt	Erfüllt.
M19	32	WP-S5.1.3	Benötigte Genauigkeit für blaue Oberflächendaten ist bestimmt	Erfüllt.
M20	36	WP-S5.1.3	Zusammenfassung der Modellunsicherheiten bzgl. Unsicherheiten in Eingangsdaten wird für Modellbenutzer bereitgestellt	Erfüllt.

M21	12	WP-P1.1	Eiswolken und Niederschlag sind in PALM-4U verfügbar	Erfüllt.
M22	27	WP-P1.2	Schnee- und Eisparametrisierungsschemata sind implementiert und getestet	Erfüllt.
M23	36	WP-P1.3	Fallstudie für Berlin wurde durchgeführt und gegen Messdaten evaluiert	Nicht erfüllt, siehe Kap. 1.2.6
M24	12	WP-I3.1	Verkehrsentagenmodell ist implementiert und an MATSim gekoppelt	Erfüllt (siehe Kap. 1.2.7)
M25	21	WP-I3.2	Multiagentensystem ist an Straßennetz gekoppelt	Erfüllt.
M26	27	WP-I3.3	Multiagentensystem ist bereit zur Verwendung von Modul C für die Demostädte	Erfüllt.
M27	29	WP-I3.4	Schadstoffbelastung von Agenten ist implementiert	Erfüllt
M28	36	WP-I3.4	Evakuierungssimulationen wurden durchgeführt	Nicht erfüllt, siehe Kap. 1.2.7
M29	3	WP-I6.1	Abstimmung zur Programmcodestruktur und Dateneingabe/-ausgabe	Erfüllt.
M30	12	WP-I6.1	Windwurfmodell ist in PALM-4U implementiert	Erfüllt.
M31	24	WP-I6.2	Genauigkeit der benötigten Eingangsdaten für Stadtbäume ist bestimmt	Erfüllt.
M32	36	WP-I6.3	Werkzeug zur Bestimmung des Windwurftrisikos steht zur Verfügung	Erfüllt.
N-M1	9	WP-S1	UMMIP Modellvergleichsdaten sind final zusammengetragen	Nicht erfüllt, siehe Kap. 1.2.1
N-M2	12	WP-S1	Publikation/Bericht zu UMMIP ist angefertigt.	Nicht erfüllt, siehe
N-M3	12	WP-S2	PALM Community-Struktur ist etabliert und trägt sich selbst.	Teilweise erfüllt, siehe Kap. 1.2.2
N-M4	12	WP-S3	Bericht zur Modellforensik ist angefertigt.	Erfüllt
N-M5	6	WP-S4	Testversion von PALM-4U mit kompressiblem Gleichungssystem ist implementiert.	Nicht erfüllt, siehe Kap. 1.2.4
N-M6	12	WP-S5	Validierung Version von PALM-4U mit kompressiblem Gleichungssystem steht zur Verfügung.	Nicht erfüllt, siehe Kap. 1.2.4

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

In Tabelle 2 sind die Positionen des zahlenmäßigen Nachweises aufgeführt. Der Finanzierungsplan konnte sehr gut eingehalten werden. Es entstand insgesamt eine Minderausgabe von 6.041,46 €. Es folgt eine Erläuterung der wichtigsten Posten.

Position 0812

Die Personalmittel wurden gemäß der Vorhabensbeschreibung zur Finanzierung von wissenschaftlichem Personal verwendet (Björn Maronga, Johannes Schwenkel, Christopher Mount, Simone Pfau, Ion Matei, Matthias Sühling, Alexandra Westbrink, Matthias Labusch, Helge Knoop, Tobias Gronemeier). Dabei sind geringfügige Mehrausgaben im Umfang von 22.053,41 € entstanden.

Position 0835

Diese Position umfasst Aufträge an Dritte (MeteoSolutions GmbH und Klaus Ketelsen). Die Aufträge wurden wie geplant vergeben. Es entstand eine Minderausgabe von 14.040,75 €, da die Entwicklung des Python basierten Skriptes zur Übersetzung des PALM-Codes und zur Generierung von Modellläufen (`palm-cli`) durch MeteoSolutions deutlich weniger Zeit benötigte, als ursprünglich veranschlagt war.

Position 0843

Bei dieser Position gab es eine Minderausgabe von 10.594,52 €.

Position 0846

Diese Position beinhaltet alle über das Vorhaben abgerechnete Dienstreisen im In- und Ausland. Diese konnten weitgehend wie geplant durchgeführt werden, so dass eine geringe Minderausgabe von 3.459,60 € entstanden ist.

Tabelle 2: Übersicht der entstandenen Ausgaben im Bezug auf den Gesamtfinanzierungsplan.

Position	Entstandene Ausgaben	Gesamtfinanzierungsplan	Differenz
0812	1.848.167,79 €	1.826.114,38 €	-22.053,41 €
0835	236.081,55 €	250.122,30 €	14.040,75 €
0843	11.466,76 €	22.061,28 €	10.594,52 €
0846	21.972,40 €	25.432,00 €	3.459,60 €
Σ	2.117.688,50 €	2.123.729,96 €	6.041,46 €

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die getätigte Forschung ist ein wesentlicher Beitrag zur BMBF Fördermaßnahmen "Stadtklima im Wandel", die nicht Gegenstand der Förderung durch ein anderes nationales oder internationales Programm ist. Drittmittel oder eigene Haushaltsmittel standen für die Durchführung des Vorhabens nicht zur Verfügung. Das Projekt hätte daher ohne die Förderung nicht realisiert werden können. Die beantragten Personalmittel waren für die Durchführung unerlässlich. Da es sich um ein anspruchsvolles wissenschaftliches Projekt handelte, das im Projektverlauf fundierte Kenntnisse in der Modellentwicklung benötigt hat, ist der Einsatz von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern mit mehrjähriger Erfahrung (Doktorand*innen, Postdoktoranden) gerechtfertigt. Mit dem Einsatz von nicht erfahrenem Personal wäre der Projekterfolg gefährdet gewesen.

4. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der Nutzen und die Verwertbarkeit der Projektergebnisse lässt sich auf mehreren Ebenen darstellen:

Praktische Anwendungen in der Stadtplanung

Das weiterentwickelte PALM-4U Modell ermöglicht es Kommunen, präzisere und realistischere Simulationen des städtischen Mikroklimas für verschiedene Planungszenarien durchzuführen. Dies trägt zur Verbesserung der Lebensqualität in städtischen Gebieten bei, indem es eine fundierte Grundlage für Entscheidungen im Bereich der Stadtentwicklung und Anpassung an den Klimawandel liefert. Durch die detaillierte Modellierung von Luftchemie, Schadstoffausbreitung und städtischen Mikroklimata können gezielte Maßnahmen zur Luftreinhaltung und zur Reduzierung von Hitzeinseln umgesetzt werden.

Wissenschaftliche Forschung und Innovation

Die umfangreichen Erweiterungen und Optimierungen des Modells unterstützen die wissenschaftliche Forschung in den Bereichen urbane Mikrometeorologie, Umweltchemie und Luftreinhaltung. Durch die verbesserte Modellgenauigkeit und die Integration neuer Komponenten wie Multiagentenmodelle, Windwurfmodellierung, Mischphasenmikrophysik oder der Schneebodenparametrisierung werden neue Forschungsfragen adressierbar, und es eröffnen sich Möglichkeiten für weiterführende Studien zur Wechselwirkung zwischen städtischer Infrastruktur und atmosphärischen Prozessen. Hier bestehen exzellente Möglichkeiten für Anschlussförderanträge, wovon bereits mehrere in Antragstellung sind.

Nachhaltigkeit und langfristige Nutzung

Durch die Implementierung moderner technischer und methodischer Ansätze sowie die Etablierung einer Community-Modellstruktur wird die langfristige Nutzung und kontinuierliche Weiterentwicklung des PALM-4U Modells sichergestellt. Dies garantiert, dass das Modell auch über die Förderperiode hinaus aktuell und anwendungsbereit bleibt. Die Möglichkeit, das Modell auf neuen Rechnerarchitekturen effizient zu betreiben, gewährleistet seine Einsatzfähigkeit auf zukünftigen Hochleistungsrechnern.

5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Seit 2019 wurden im Bereich der Stadtklimamodellierung bedeutende Fortschritte erzielt. Diese Fortschritte lassen sich in mehreren Kategorien einteilen:

Technologische Entwicklungen und Datenverfügbarkeit:

1. **Erhöhte Datenverfügbarkeit:** Der Zugriff auf hochauflösende Satellitenbilder und umfangreiche Sensornetzwerke hat die Datenbasis für Stadtklimamodellierungen erheblich

erweitert. Dies ermöglicht detailliertere und genauere Modelle und die Möglichkeit Modellsimulationen zu validieren.

2. **Verbesserte Rechenleistung:** Fortschritte in der Computertechnologie, einschließlich leistungsfähigerer Prozessoren. GPU-Architekturen und Cloud-Computing, haben es ermöglicht, komplexere und umfangreichere Simulationen durchzuführen.

Modellierungsansätze und Algorithmen:

- **Hochauflösende Modelle:** Die Entwicklung hochauflösender Modelle, die kleinräumige klimatische Variationen innerhalb von Städten besser erfassen können, hat zugenommen. Diese Modelle können auf der Ebene von Stadtvierteln oder sogar einzelnen Gebäuden arbeiten.
- **Integration von maschinellem Lernen und KI:** Der Einsatz von maschinellem Lernen und künstlicher Intelligenz zur Analyse und Prognose von Stadtklimadaten hat an Bedeutung gewonnen. Diese Techniken ermöglichen es, Muster und Zusammenhänge zu erkennen, die mit traditionellen Modellierungsansätzen schwer zu erfassen sind.

Interdisziplinäre Ansätze:

- **Kombination von Klimamodellen mit sozioökonomischen Daten:** Es gibt einen Trend zur Integration von Klimamodellen mit sozioökonomischen Daten, um die Auswirkungen des Stadtklimas auf die Bevölkerung besser zu verstehen. Dies umfasst z.B. die Untersuchung von Hitzewellen in Bezug auf öffentliche Gesundheit und soziale Ungleichheiten.
- **Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Praxis:** Städte und wissenschaftliche Institutionen arbeiten enger zusammen, um praxisrelevante Modelle zu entwickeln, die direkt in der Stadtplanung und -gestaltung eingesetzt werden können (siehe dazu auch aktuelle Ausschreibung zur Klimanpassung mittels Urbaner Digitaler Zwillinge des BMBF).

3. Anwendungsgebiete:

- **Klimaanpassungsstrategien:** Stadtklimamodellierungen werden zunehmend zur Entwicklung und Bewertung von Klimaanpassungsstrategien verwendet. Dies umfasst Maßnahmen wie die Begrünung von Städten, die Gestaltung von Wassermanagementsystemen und die Optimierung der städtischen Infrastruktur.
- **Frühwarnsysteme und Katastrophenmanagement:** Modelle werden auch genutzt, um Frühwarnsysteme für extreme Wetterereignisse wie Hitzewellen, Starkregen und Überschwemmungen zu verbessern (siehe hierzu auch laufendes Forschungsprojekt StadtKlimaNDS von Prof. Maronga).

4. Bewusstsein und politische Unterstützung:

- **Erhöhtes öffentliches Bewusstsein:** Das Bewusstsein für die Bedeutung des Stadtklimas und dessen Einfluss auf Lebensqualität und Gesundheit ist gestiegen,

was zu mehr Unterstützung und Finanzierung für entsprechende Forschungs- und Entwicklungsprojekte geführt hat.

- **Politische Maßnahmen und Regulierungen:** Viele Städte haben begonnen, politische Maßnahmen und Regulierungen einzuführen, die auf den Ergebnissen von Stadtklimamodellen basieren, um den urbanen Klimawandel zu bekämpfen.

Diese Fortschritte tragen dazu bei, dass Städte besser auf die Herausforderungen des Klimawandels vorbereitet sind und nachhaltigere sowie lebenswertere urbane Umgebungen geschaffen werden können.

6. Veröffentlichungen

Die Projektergebnisse wurden in zahlreichen Zeitschriftenbeiträgen und auf Konferenzen präsentiert. Hinweis: die untenstehende Liste unter Kapitel 6.2 beinhaltet auch Beiträge, die während der ersten Förderphase von "Stadtklima im Wandel" erarbeitet worden sind und während der zweiten Förderphase publiziert wurden.

6.1 Konferenzbeiträge

Gehrke, K., M. Sühning und B. Maronga (2022): Das Landoberflächenmodell in PALM: Evaluation und Sensitivität zu Modellparametern. *DACH Tagung 2022, 21.-25. März, 2022, Leipzig, Deutschland.*

Gronemeier, T., M. Sühning, B. Maronga und S. Raasch (2022): LES auf großer Skala - Gesamtstädtische Stadtklimasimulationen mit PALM-4U. *DACH Tagung 2022, 21.-25. März, 2022, Leipzig, Deutschland.*

Knoop, H., B. Maronga und G. Gross (2022): Windwurf-Modellierung von Stadtbäumen eingebettet in das LES-Modell PALM. *DACH Tagung 2022, 21.-25. März, 2022, Leipzig, Deutschland.*

Krč, P., J. Resler, M. Bureš, J. Geletič und M. Sühning (2023): 3-D radiative interactions for non-orthogonal surfaces within a regular grid of a microscale atmospheric model. *International Conference on Urban Climate (ICUC11), 2023, 28. August. - 1. September, 2023, Sydney, Australien.*

Resler, J., P. Krč, J. Geletic, P. Bauerová, J. Keder, A. Šindelářová, O. Vlček, H. Řezníček, M. Bureš, K. Eben, M. Belda, J. Radović, V. Fuka, R. Jares, M. Sühning und I. Esau (2023): Utilisation of the sensor network and remote sensing measurements for validation of the LES

model PALM in urban area. *International Conference on Urban Climate (ICUC11)*, 2023, 28. August. - 1. September, 2023, Sydney, Australien.

Sühning, M., J. Resler und P. Krč (2022): Evaluation of surface processes in the PALM model system 6.0 for a real urban environment: a case study in Dejvice, Prague. *DACH Tagung 2022*, 21.-25. März, 2022, Leipzig, Deutschland.

Sühning, M., B. Seitzer, T. Gronemeier, P. Krč und J. Resler (2023): City-scale large-eddy simulations using the building-resolving model PALM: model evaluation and assessment of potential biases. *International Conference on Urban Climate (ICUC11)*, 2023, 28. August. - 1. September, 2023, Sydney, Australien.

Sühning, M., T. Gronemeier, R. Forkel, S. Banzhaf, J. Laudan, B. Maronga und S. Raasch (2023): On the effect of grid-bounded topography representation on the flow around buildings in the large-eddy simulation model PALM. *International Conference on Urban Climate (ICUC11)*, 2023, 28. August. - 1. September, 2023, Sydney, Australien.

6.2 Zeitschriftenbeiträge

Akinlabi, E., B. Maronga, D. Giometto, and D. Li (2022): Dispersive Fluxes within and over a Real Urban Canopy: A Large-eddy Simulation Study, *Boundary-Layer Meteorol.*, 185, 93–128. DOI: [10.1007/s10546-022-00725-6](https://doi.org/10.1007/s10546-022-00725-6)

Belda M., J. Resler, J. Geletič, P. Krč, B. Maronga, M. Sühning, M. Kurppa, F. Kanani-Sühning, V. Fuka, K. Eben, N. Benešová, and M. Auvinen (2021): Sensitivity analysis of the PALM model system 6.0 in the urban environment, *Geosci. Model Dev.*, 14, 4443–4464. DOI: [10.5194/gmd-14-4443-2021](https://doi.org/10.5194/gmd-14-4443-2021)

Gehrke, K.F., M. Sühning, and B. Maronga (2021): Modeling of land–surface interactions in the PALM model system 6.0: land surface model description, first evaluation, and sensitivity to model parameters, *Geosci. Model Dev.*, 14, 5307–5329. DOI: [10.5194/gmd-14-5307-2021](https://doi.org/10.5194/gmd-14-5307-2021)

Gronemeier, T., K. Surm, F. Harms, B. Leidl, B. Maronga, and S. Raasch (2021): Evaluation of the dynamic core of the PALM model system 6.0 in a neutrally stratified urban environment: comparison between LES and wind-tunnel experiments, *Geosci. Model Dev.*, 14, 3317–3333. DOI: [10.5194/gmd-14-3317-2021](https://doi.org/10.5194/gmd-14-3317-2021)

Heldens, W., C. Burmeister, F. Kanani-Sühning, B. Maronga, D. Pavlik, M. Sühning, J. Zeidler, and T. Esch (2020): Geospatial input data for the PALM model system 6.0: model requirements, data sources, and processing, *Geosci. Model Dev.*, 13, 5833–5873. DOI: [10.5194/gmd-13-5833-2020](https://doi.org/10.5194/gmd-13-5833-2020)

Hellsten, A., K. Ketelsen, M. Sühring, M. Auvinen, B. Maronga, C. Knigge, F. Barmpas, G. Tsegas, N. Moussiopoulos, and S. Raasch (2021): A nested multi-scale system implemented in the Large-Eddy simulation model PALM model system 6.0, *Geosci. Model Dev.*, 14, 3185–3214. DOI: [10.5194/gmd-14-3185-2021](https://doi.org/10.5194/gmd-14-3185-2021)

Kadasch, E., M. Sühring, T. Gronemeier, and S. Raasch (2021): Mesoscale nesting interface of the PALM model system 6.0, *Geosci. Model Dev.*, 14, 5435–5465 DOI: [10.5194/gmd-14-5435-2021](https://doi.org/10.5194/gmd-14-5435-2021)

Khan, B., S. Banzhaf, E.C. Chan, R. Forkel, F. Kanani-Sühring, K. Ketelsen, M. Kurppa, B. Maronga, M. Mauder, S. Raasch, E. Russo, M. Schaap, and M. Sühring (2021): Development of an atmospheric chemistry model coupled to the PALM model system 6.0: Implementation and first applications, *Geosci. Model Dev.*, 14, 1171–1193. DOI: [10.5194/gmd-14-1171-2021](https://doi.org/10.5194/gmd-14-1171-2021)

Krč, P., J. Resler, M. Sühring, S. Schubert, M.H. Salim, and V. Fuka (2021): Radiative Transfer Model 3.0 integrated into the PALM model system 6.0, *Geosci. Model Dev.*, 14, 3095–3120 DOI: [10.5194/gmd-14-3095-2021](https://doi.org/10.5194/gmd-14-3095-2021)

Li, D., L. Wang, W. Liao, T. Sun, G. Katul, E. Bou-Zeid, B. Maronga (2024): Persistent urban heat. *Sci Adv.*, 10. DOI: [10.1126/sciadv.adj7398](https://doi.org/10.1126/sciadv.adj7398)

Maronga, B., M. Winkler, D. Li (2022): Can area-wide building retrofitting affect the urban microclimate? An LES study for Berlin, Germany, *J. Appl. Met. Clim.*, 61, 800–81. DOI: [10.1175/JAMC-D-21-0216.1](https://doi.org/10.1175/JAMC-D-21-0216.1)

Pfafferott, J., S. Rissmann, M. Sühring, F. Kanani-Sühring, and B. Maronga (2021): Building indoor model in PALM model system 6.0: Indoor climate, energy demand, and the interaction between buildings and the urban climate, *Geosci. Model Dev.*, 14, 3511–3519. DOI: [10.5194/gmd-14-3511-2021](https://doi.org/10.5194/gmd-14-3511-2021)

Resler, J., E. Kryštof, J. Geletič, P. Krč, M. Rosecký, M. Sühring, M. Belda, V. Fuka, T. Halenka, P. Huszár, J. Karlický, N. Benešová, J. Ďoubalová, K. Honzáková, J. Keder, Š. Nápravníková, and Ondřej Vlček (2021): Validation of the PALM model system 6.0 in a real urban environment: a case study in Dejvice, Prague, the Czech Republic, *Geosci. Model Dev.*, 14, 4797–4842, DOI: [10.5194/gmd-14-4797-2021](https://doi.org/10.5194/gmd-14-4797-2021)

Resler J., P. Bauerová, M. Belda, M. Bureš, K. Eben, V. Fuka, J. Geletič, R. Jareš, J. Karel, J. Keder, P. Krč, W. Patiño, J. Radović, H. Řezníček, M. Sühring, A. Šindelářová und Ondřej Vlček (2024): Challenges of high-fidelity air quality modeling in urban environments – PALM sensitivity study during stable conditions. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, DOI: [10.5194/egusphere-2024-1231](https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1231)

Salim, M., Schubert, S., Resler, J., Krč, P., Maronga, M., Kanani-Sühring, F., Sühring, M., Schneider, C. (2022): Importance of radiative transfer processes in urban climate models: a study

based on the PALM 6.0 model system, Geosci. Model Dev., 15, 145–171, DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-15-145-2022>

van der Linden, L, P. Hogan, B. Maronga, R. Hagemann, B. Bechtel (2023): Crowdsourcing air temperature data for the evaluation of the urban microscale model PALM – a case study in central Europe, PLOS Climate. DOI: [10.1371/journal.pclm.0000197](https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000197)

6.3 Dissertationen

Pfau, S. (2024): A sensitivity analysis method for evaluating the effect of input parameter uncertainty on the results of the PALM model system, Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Univ., Diss., 2024, xiv, 143 S., DOI: <https://doi.org/10.15488/16941>