

Schlagregenerberechnung für Gebäudedefassaden

Exemplarische Anwendung der Simulationssoftware COMLEAM

T 3340

T 3340

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2016

ISBN 978-3-8167-9794-4

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

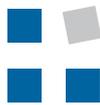
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



HSR

HOCHSCHULE FÜR TECHNIK
RAPPERSWIL

FHO Fachhochschule Ostschweiz

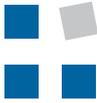
Schlagregenerberechnung für Gebäudefassaden

Exemplarische Anwendung der Simulationssoftware COMLEAM

Florian Hochstrasser
Prof. Dr. Michael Burkhardt
Prof. Dr. Olaf Tietje

HSR Hochschule für Technik Rapperswil
Oberseestrasse 10
8640 Rapperswil, Schweiz

Rapperswil, 28.4.2016

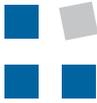


Zusammenfassung

Als Grundlage für die Entwicklung von Emissionsszenarien für berechnete Bauteile wurden die geometrischen Einflussfaktoren auf den Schlagregen an Fassaden untersucht. Zwei Simulationsszenarien mit unterschiedlich hohen Gebäuden (2.5 und 7 m Höhe) wurden dazu mit identischen Wetterdaten berechnet. Die Simulationsdauer betrug 20 Jahre, wobei die Wetterdaten den Standort Hamburg repräsentieren. Die Schlagregenberechnung wurde anhand der Norm ISO 15927-3 vorgenommen. Die HSR-Software COMLEAM (COstruction Materials LEAching Modell) wurde für die Simulation eingesetzt.

Die Resultate zeigen, dass sowohl die Gebäudehöhe als auch die Exposition der Fassaden einen wesentlichen Einfluss auf den anfallenden Schlagregen haben. Für das niedrige Gebäude resultiert unabhängig von der Fassadenexposition eine um 25 % grössere Schlagregenmenge als für das höhere Gebäude. Die Fassaden in Hauptwetterrichtung erhielten fünf Mal mehr Schlagregen als die wetterabgewandten Fassaden. Ausserdem sind die Fassaden in Hauptwetterrichtung Starkregenereignissen ausgesetzt, welche auf den wetterabgewandten Fassaden nicht auftreten. Hinsichtlich Ablaufwasser ist für das höhere Gebäude rund die doppelte Menge zu erwarten, obwohl die Schlagregenmenge beim kleineren Gebäude grösser ist und die Gebäudehöhen um mehr als einen Faktor zwei verschieden sind. Der Unterschied zwischen Schlagregen- und Fassadenablaufmenge ist auf die unterschiedlichen Bezugsflächen zurückzuführen. Der Schlagregen ist eine spezifische Grösse (L/m^2), während sich der Ablauf auf die Gebäudehöhe bezieht und als Laufmeter Abtropfkante betrachtet wird (L/m).

Die Ergebnisse der Berechnung erscheinen verglichen mit Erfahrungswerten aus Feldversuchen plausibel, sowohl für den Schlagregen als auch für den Fassadenabfluss. Für die Abschätzung des Umweltrisikos durch ausgewaschene Schadstoffe ist die Menge an Ablaufwasser an der Fassaden- Abtropfkante massgebend, weil sie die Fläche eines Bauteils berücksichtigt und so eine Aussage zur Stofffracht ermöglicht. Wird im Modell das Ablaufwasser mit der Stoffauswaschung gekoppelt, lassen sich Aussagen zur Umweltexposition treffen.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Randbedingungen der Szenarien.....	4
2.1	Gebäudegeometrie.....	4
2.2	Schlagregen- und Fassadenabflussberechnung	5
2.3	Wetterdaten.....	6
3	Ergebnisse.....	8
3.1	Niederschlag	8
3.2	Schlagregen	9
3.3	Fassadenabfluss	12
4	Schlussfolgerungen	14
5	Literaturverzeichnis.....	15
6	Abbildungsverzeichnis	16
7	Tabellenverzeichnis	17
8	Anhang	18
8.1	Flussdiagramme der verwendeten Algorithmen	18
8.2	Ergänzende Abbildungen.....	20

1 Einleitung

Zur Entwicklung von Emissionsszenarien für die Stoffauswaschung und den Eintrag in die Umwelt aus berechneten Fassaden ist es notwendig, geeignete Annahmen zum anfallenden Ablaufwasser treffen zu können (Abbildung 1). Im Falle vertikaler Bauteile ist der Schlagregen ein relevanter Faktor. Als Schlagregen wird der Anteil des vertikalen Niederschlags bezeichnet, welcher durch den Wind aus der Falllinie ausgelenkt wird und auf vertikalen Flächen auftrifft.

Weil die experimentellen Grundlagen zur Bedeutung von Schlagregen sehr lückenhaft sind, sollte das Ablaufwasser für verschiedene Gebäudegeometrien nach ISO 15927-3 (International Standards Organisation, 2009) abgeschätzt werden. Unter Berücksichtigung der Fassadenhöhe sowie Ausrichtung wurde mit der Modellierung für den Standort Hamburg aufgezeigt, welche Menge Ablaufwasser an den Fassaden unter Berücksichtigung realer langjähriger Wetterdaten entsteht. Für die Simulationen wurde die Modellierungs-Software COMLEAM (CONstruction Materials LEAching Model) der HSR genutzt.

Mit der modellgestützten Abschätzung lassen sich einerseits Kosten für aufwändige Feldstudien einsparen und andererseits die Sensitivität bestimmter Randparameter herausarbeiten.

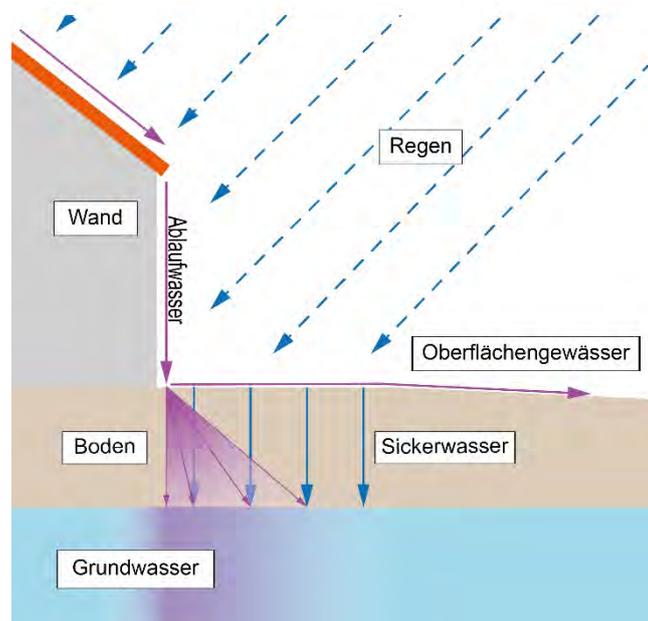


Abbildung 1: Systemübersicht. Schlagregengetriebene Stoffauswaschung aus vertikalen berechneten Bauteilen.

2 Randbedingungen der Szenarien

Um den Einfluss der Fassadenexposition und -höhe auf den Schlagregen zu untersuchen, wurden zwei Szenarien festgelegt. Jedes Szenario berücksichtigt die Abmessungen und Expositionsrichtungen eines Gebäudes mit den zugehörigen Schlagregenparametern an einem bestimmten Standort. Von den meteorologischen Daten sind Windrichtung, -geschwindigkeit und Niederschlag benötigt worden.

Das Szenario *OECD2.5* basiert auf der Geometrie eines Einzelgebäudes, welches in den Emissionsszenarien der Biozidprodukteverordnung für die Produktarten 7, 8 und 10 beschrieben ist und als sogenanntes „OECD-Haus“ bekannt ist. Das Szenario *OECD7* repräsentiert demgegenüber ein Gebäude der Klassen 1 bis 3 der deutschen Musterbauordnung.

2.1 Gebäudegeometrie

Die beiden Gebäude haben identische Grundrisse von 17.5 m Länge x 7.5 m Breite (Abbildung 2). Die Fassadenhöhe ist für *OECD2.5* analog zum OECD-Haus mit 2.5 m gewählt, während das Gebäude *OECD7* eine Fassadenhöhe von 7 m aufweist. Die aus den vier Teilflächen resultierenden Fassadenflächen umfassen 125 m² für *OECD2.5* und 350 m² für *OECD7* (Tabelle 1).

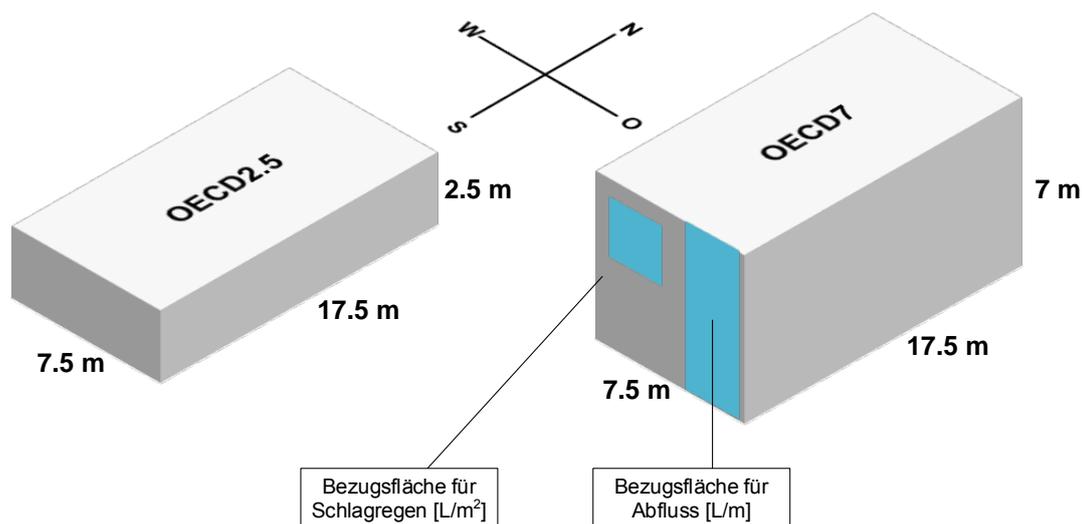


Abbildung 2: Schematische Darstellung der zwei Szenarien. Ebenfalls dargestellt sind die Bezugsflächen für die Berechnung des Schlagregens sowie des Fassadenabflusses.

Zusätzlich wird zur Berechnung des Schlagregens die Exposition der Fassaden benötigt. Für die Szenarien wurden die Haupthimmelsrichtungen als Exposition gemäss Tabelle 1 gewählt. Die Längsseite ist damit der Westwindrichtung ausgesetzt.

Tabelle 1: Spezifikation der Gebäudegeometrien für beide Szenarien.

Fassade	Länge [m]	Exposition [°]	OEC2.5 [m ²]	OECD7 [m ²]
Nord	7.5	0	15	52.5
Ost	17.5	90	35	122.5
Süd	7.5	180	15	52.5
West	17.5	270	35	122.5

2.2 Schlagregen- und Fassadenabflussberechnung

Die Randparameter für die Schlagregenberechnung (L/m²) wurden gemäss der Norm ISO EN 15927-3 (International Standards Organisation, 2009) festgelegt (Tabelle 2).

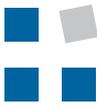
Abweichend von der Norm wurde der Wandfaktor W für das Szenario OECD2.5 mit 0.55 angenommen, denn die Norm macht keine Angaben zu eingeschossigen Gebäuden. Aus früheren Freilandversuchen konnte jedoch eine Annahme für den Wandfaktor bei niedrigen Gebäuden getroffen werden (M. Burkhardt, 2012).

Tabelle 2: Parametrisierung des Schlagregen-Algorithmus für beide Szenarien.

Parameter	Wert	Erläuterung
C _R	0.67 (K _R * ln(z _{min}))	Terrainkategorie IV „urban“ → K _R = 0.24, z _{min} = 16
C _T	1.00	Topographiefaktor: Nicht relevant für flaches Gelände.
O	0.50	Hindernisfaktor
W _{OECD2.5}	0.55	Wandfaktor für Szenario OECD2.5
W _{OECD7}	0.4	Wandfaktor für Szenario OECD7

Der Geländeunebenheitsfaktor C_R wurde für ein urbanes Terrain berechnet. Für urbanes Terrain gilt, dass mindestens 15% der Oberfläche mit Gebäuden von mindestens 15 m bebaut sind. Der Topographiefaktor C_T wurde für ebenes Gelände gewählt. Der Hindernisfaktor O entspricht einem Abstand von 15 bis 25 m zum nächsten Gebäude in Windrichtung. Einzig der Wandfaktor ist direkt vom Gebäude abhängig und somit für die beiden Szenarien OECD2.5 und OECD7 verschieden.

Der Schlagregen wurde anhand Gleichung (1) berechnet, woraus eine stündliche Schlagregenmenge pro Bezugsfläche resultiert (Abbildung 2).



$$I_{WS} = 2/9 * v * r^{8/9} * \cos(D - \theta) * c_R * c_T * O * W \quad (1)$$

Mit: v = Windgeschwindigkeit (Stundenmittel) [m/s]

r = stündliche Gesamtregengebiet [mm]

D = Windrichtung (Stundenmittel) [°]

θ = Exposition der Fassade [°]

sowie den Wandfeldindex- Faktoren laut Tabelle 2.

Zur besseren Vergleichbarkeit der unterschiedlich grossen Fassadenflächen wurde der Abfluss auf einen Laufmeter der Fassade normiert (Abbildung 2).

Für die Berechnung des Fassadenabflusses wurden Evaporation, Verluste durch Spritzer und Diffusion von Wasser an der Fassade nicht berücksichtigt (das heisst der Abflussbeiwert $\psi = 1$). Somit wurde das gesamte als Schlagregen auftreffende Wasser als Fassadenabfluss angenommen. Hinsichtlich der Ergebnisse bedeutet dies, dass die absoluten Mengen überschätzt wurden. Der relative Vergleich der beiden Szenarien ist jedoch trotzdem möglich.

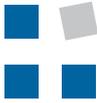
2.3 Wetterdaten

In Anlehnung an die FOCUS-Szenarien, die in der Modellierung von Pestiziden auf landwirtschaftlichen Flächen verwendet werden, wurde der Standort Hamburg gewählt. Die Wetterdaten wurden von der Station Fuhlsbüttel (Flughafen Hamburg) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) bezogen. Der aus Messreihen von Stundenwerten für Wind (Geschwindigkeit und Richtung) sowie für Niederschlag gewonnene Datensatz umfasst einen Zeitraum von rund 20 Jahren (5.9.1995 bis 20.2.2016). Die beiden Datensätze für Niederschlag und Wind wurden mit Hilfe des Statistikprogramms R (The R Foundation, 2016) vereint und aufbereitet.

Die DWD-Wetterdaten sind anhand von Qualitätsniveaus klassiert (Deutscher Wetterdienst, 2016). Die für die Simulation verwendeten Daten liegen in den Qualitätsniveaus 3 und 7 vor (Tabelle 3).

Tabelle 3: Qualitätsniveaus der verwendeten Wetterdaten.

Datensatz	Qualitätsniveau	Beschreibung
Wind	3	Daten, die insbesondere für automatisch gemessene Werte systematisch grob geprüft und ggf. korrigiert sind. Enthalten auch ungeprüfte Werte.
Niederschlag	7	Systematisch geprüft. Alle Werte mit Qualitätsbits versehen. Beanstandete Werte gekennzeichnet, aber i.d.R. noch nicht korrigiert.



HSR

HOCHSCHULE FÜR TECHNIK
RAPPERSWIL

FHO Fachhochschule Ostschweiz

Im vereinigten Datensatz fehlten Messwerte für 14 Stunden komplett. Diese Lücke entspricht 0.01 % des Datensatzes. Teilweise unvollständige Einträge (Niederschlagswerte fehlten bei 188 Einträgen, Werte für Windgeschwindigkeit bei 253 Einträgen und für die Windrichtung bei 249 Einträgen) wurden aus den angrenzenden Daten mit jeweils unterschiedlichen Algorithmen interpoliert (Flussdiagramme im Anhang 8.1).

3 Ergebnisse

3.1 Niederschlag

Der Verlauf der jährlichen Niederschlagssummen ist Abbildung 3 zu entnehmen. Der mittlere Jahresniederschlag betrug in der betrachteten Zeitspanne 750 mm. Besonders regenreiche Jahre traten 1998, 2001/2002 und 2007 auf. Ausgeprägt regenarm waren 1996, 1999/2000 sowie 2003 und 2006. Verglichen mit dem langjährigen Durchschnitt von 770 mm entspricht dies rund 97 %, sodass der Niederschlag in der betrachteten Wetterperiode nicht signifikant vom langjährigen Durchschnitt abweicht.

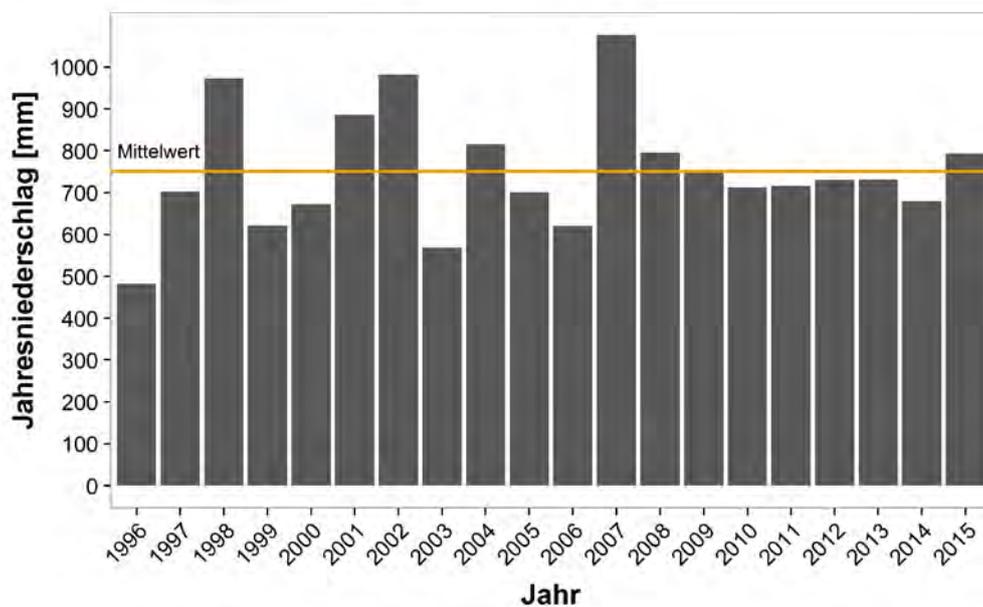


Abbildung 3: Verlauf des Jahresniederschlags für die DWD-Station Hamburg-Fuhlsbüttel zwischen 1996 und 2015.

Wie in Abbildung 4 (links) ersichtlich ist, liegt die Hauptwetterrichtung in West-Südwest. Die West- und Südfassaden sind demnach der Hauptwetterrichtung zugewandt, sodass dort auch die grössten Mengen an Schlagregen und Fassadenabfluss zu erwarten sind. Die prozentuale Angabe bezieht sich auf die Gesamtniederschlagsmenge von 15'300 mm während 20 Jahren.

Die Gegenüberstellung des Niederschlags und des relativen Anteils der Windrichtungen an den Gesamt-Windstunden (Abbildung 4, rechts) zeigt den Zusammenhang von Wind und Niederschlag auf. Niederschlag fällt nicht nur in der Hauptwetterrichtung, sondern auch im Sektor zwischen Nord-Ost und Süd-Ost dort am meisten, wo anteilmässig mehr Windstunden vorherrschen.

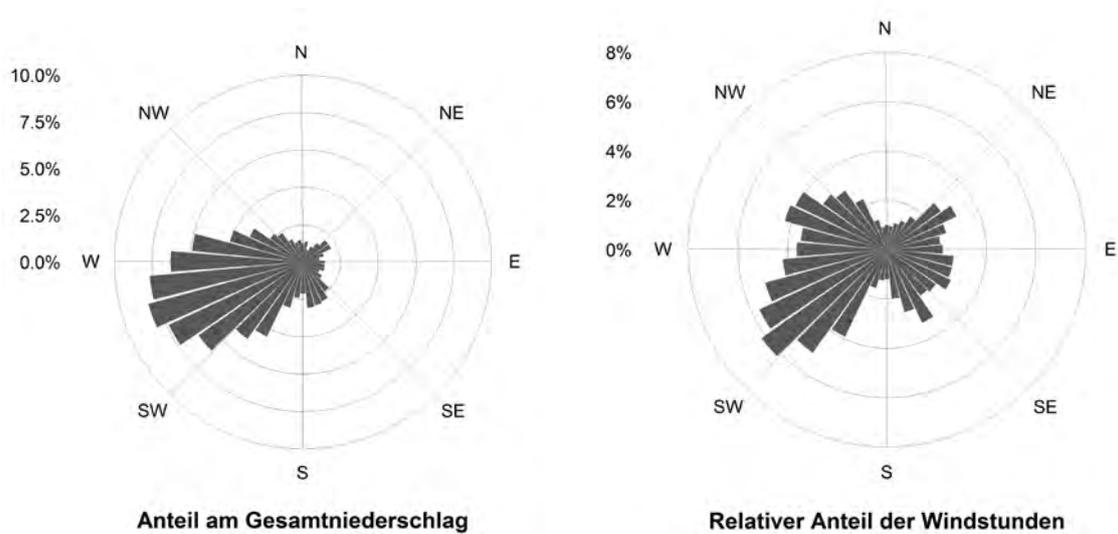


Abbildung 4: Relativer Niederschlag nach Windrichtung (links) und relativer Anteil der Windrichtungen an den Gesamtwindstunden (rechts) die DWD-Station Hamburg Fuhlsbüttel zwischen September 1995 und Februar 2016.

3.2 Schlagregen

Der Schlagregen bezeichnet die Menge Niederschlag, die pro Quadratmeter Fläche auf die Fassade trifft.

Bezogen auf die absolute Schlagregenmenge (L/m^2), welche auf die vier Fassaden von jedem Gebäude trifft, sind zwei Beobachtungen wesentlich:

- Die Fassaden in der Hauptwetterrichtung werden im Vergleich zu den windabgewandten Fassaden weitaus intensiver beregnet (5 Mal mehr).
- Das niedrige Gebäude erhält 25 % mehr Schlagregen als das höhere.

Abbildung 5 zeigt dies für die Ost- und Westfassaden exemplarisch. Eine Abbildung mit allen berechneten Fassaden ist in Anhang 8.2 zu finden.

An der Westfassade, welche in der Hauptwetterrichtung liegt, werden pro Jahr durchschnittlich $53 L/m^2$ (OECD2.5) respektive $40 L/m^2$ (OECD7) Schlagregen erwartet. An der Ostfassade ergibt die Simulation $10 L/m^2$ für OECD2.5 und $7.8 L/m^2$ für OECD7.

Die Gesamtschlagregenmengen über 20 Jahre pro Fassade sind in Abbildung 16, Anhang 8.2, ersichtlich. Für jede Fassade im Szenario OECD2.5 ist die Schlagregenmenge [L/m^2] um 25 % grösser als im Szenario OECD7.

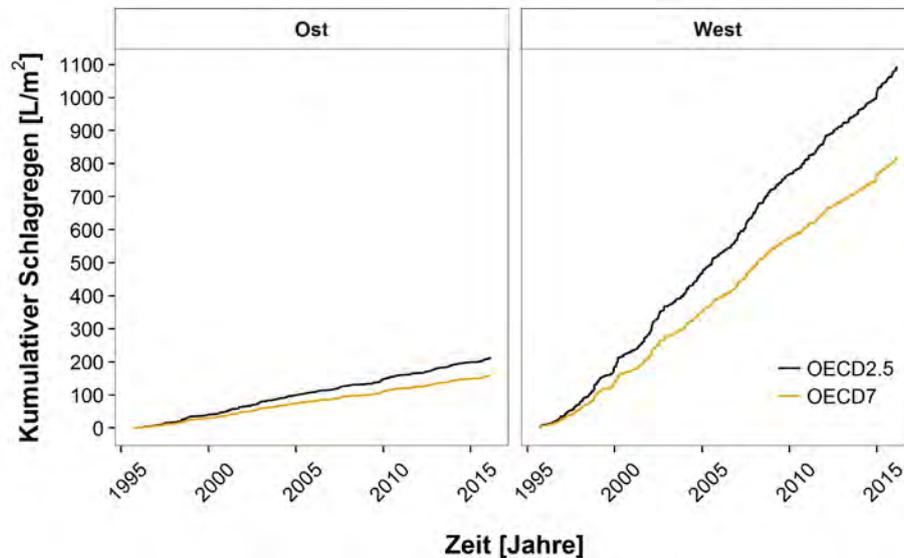


Abbildung 5: Kumulativer Verlauf des Schlagregens für die Szenarien OECD2.5 und OECD7 nach Expositionsrichtung.

Die intensivere Berechnung der Fassaden in OECD2.5 kann mit dem unterschiedlichen Wandfaktor in den beiden Szenarien erklärt werden. Vor einem niedrigen Gebäude staut sich der Wind weniger stark als vor einem hohen Gebäude. Beim hohen Gebäude nimmt die Windgeschwindigkeit direkt vor der Fassade durch den Staudruck ab. Dadurch regnet ein Teil des Niederschlags bereits vor dem Auftreffen auf der Fassade aus, weshalb die Schlagregenintensität auf der Bezugsfläche kleiner wird.

Neben den durch die Gebäudegeometrie bestimmten Einflussfaktoren hat auch das Wetter einen Einfluss auf den anfallenden Schlagregen. Der Anteil des Schlagregens am Gesamtniederschlag wird beeinflusst von der jährlichen Niederschlagsmenge, der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung.

In Abbildung 6 ist ersichtlich, dass der Anteil des Schlagregens am Gesamtniederschlag je nach Windrichtung unterschiedlich ausfällt. Es besteht ein Zusammenhang zwischen dem Anteil an Windstunden pro Richtung und dem Anteil an Schlagregen. Dies erscheint plausibel, da die Wahrscheinlichkeit hoher Windgeschwindigkeiten zunimmt, wenn mehr Windstunden auf eine Richtung entfallen. Auch die Hauptwetterrichtung weist höhere Anteile auf, was ebenfalls mit der höheren Wahrscheinlichkeit von starkem Wind und / oder starkem Niederschlag erklärt werden kann. Eine gute Korrelation (r -Wert = 0.75) besteht ebenfalls zwischen dem Schlagregenanteil und der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit bei Regen (Abbildung 14, Anhang 8.2). Dies belegt, dass Wind für den anfallenden Schlagregen ein entscheidender Faktor ist und höhere Durchschnittswindgeschwindigkeiten zu intensiverem Schlagregen führen. Auch hier wird der Einfluss des Wandfaktors deutlich, indem das Gebäude OECD2.5 durchwegs einen höheren Anteil des Gesamtniederschlags in Form von Schlagregen erhält.

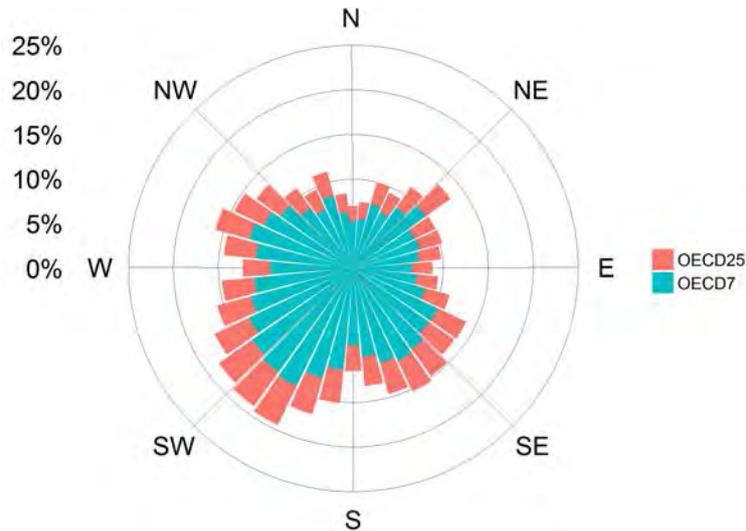


Abbildung 6: Anteil des Schlagregens am Gesamtniederschlag für Gebäude OECD2.5 und OECD7 nach Windrichtung.

Die Anteile des Schlagregens am Jahresniederschlag ergeben für OECD2.5 durchschnittlich 13 %, für OECD7 10 % (Abbildung 7). Die jährlichen Schwankungen korrelieren sehr gut (r-Wert 0.98) mit den jährlichen Niederschlagssummen (Abbildung 3). Wird eine zeitliche Betrachtung des Schlagregenanteils aber auf Ereignisebene (Zeitspanne Stunden bis Tage) vorgenommen, nimmt die Korrelation deutlich ab, weil der Wind (Richtung, Geschwindigkeit) dominierender Faktor wird.

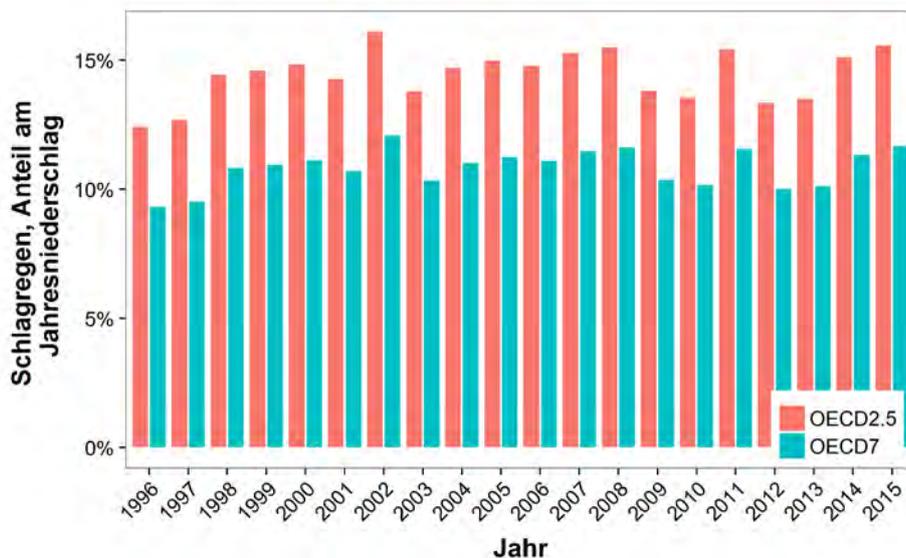


Abbildung 7: Jährlicher Anteil des Schlagregens am Gesamtniederschlag für Gebäude OECD2.5 und OECD7.

Die Intensität des Schlagregens wird durch den Wandfeld-Periodenindex beschrieben. Eine Periode ist nach ISO 15927-3 die Zeitdauer ab Auftreten von Schlagregen bis zu dem Zeitpunkt, wenn während 96 Stunden kein Schlagregen mehr auftritt. Während dieser Zeitspanne wird der auftretende Wandfeldindex kumuliert. Die Häufigkeitsverteilung der Schlagregen- Intensität ist exemplarisch für OECD7 in Abbildung 8 dargestellt.

In Abhängigkeit von der Exposition sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Diese Unterschiede sind auf die Windrichtung bei Niederschlag und die durchschnittliche Windgeschwindigkeit nach Windrichtung (Abbildung 14, Anhang 8.2) zurückzuführen. Die Nord- und Ostfassaden sind insgesamt weniger intensivem Schlagregen ausgesetzt. Auch bei der Süd- und Westfassade fällt ein grosser Teil des Schlagregens in geringer Intensität an, jedoch sind diese Fassaden auch Starkregen ausgesetzt, der an Nord- und Ostfassade nicht auftritt. In der Abbildung sind nur Intensitäten bis 10 L/m² dargestellt. Auf der Südfassade lagen 4 Ereignisse höher, auf der Westfassade 11. Auf 20 Jahre betrachtet resultiert somit weniger als 1 Ereignis mit einer Intensität von mehr als 10 L/m².

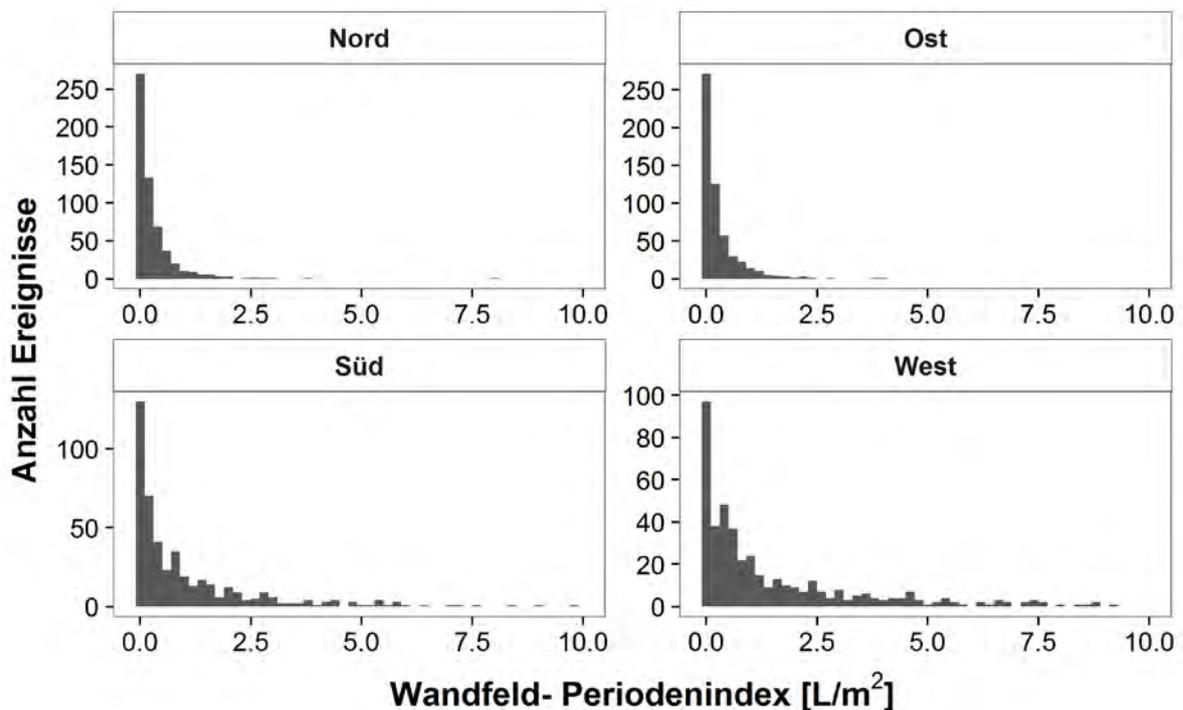


Abbildung 8: Histogramm der Schlagregenintensität für Szenario OECD2.5.

3.3 Fassadenabfluss

Für die Berechnung des Fassadenabflusses wurden Evaporation, Verluste durch Spritzer und Diffusion von Wasser an der Fassade nicht berücksichtigt. Da somit das gesamte als Schlagregen auftreffende Wasser als Fassadenabfluss angenommen wurde (Abflussbeiwert 1), liegen die geschätzten Mengen gegenüber der Realität tendenziell zu

hoch. Der relative Vergleich der beiden Szenarien bleibt davon jedoch unberührt, solange gleiche Materialien miteinander verglichen werden (d.h. gleiche Abflussbeiwerte angenommen werden dürfen).

Der kumulative Verlauf des Fassadenabflusses ist für die Ost- und Westfassaden beider Szenarien in Abbildung 9 dargestellt. Verglichen mit dem Verlauf des Schlagregens in Abbildung 5 ist erkennbar, dass die Menge an Ablaufwasser im Szenario OECD7 höher ist als im Szenario OECD2.5. Obwohl also die Schlagregenmenge für OECD2.5 grösser ausfällt, ist der Fassadenabfluss pro Laufmeter aufgrund der grösseren Gebäudehöhe in OECD7 grösser. Pro Laufmeter Fassade ist die Fläche für OECD7 knapp 3 Mal grösser als für OECD2.5, während die Schlagregenmenge bei OECD2.5 lediglich 25% grösser ist.

Entscheidend für die Unterschiede sind die im Modell festgelegten Wandfaktoren, die die Gebäudehöhen repräsentieren (Gleichung 1). Diese Parameter sind sehr sensitiv auf das Ergebnis. Ob die beiden Faktoren, davon ist einer der Norm direkt entnommen und der zweite empirisch an einem Modellhaus hergeleitet, die realen Verhältnisse hinreichend genau abbilden, lässt sich nur durch zusätzliche empirische Daten klären.

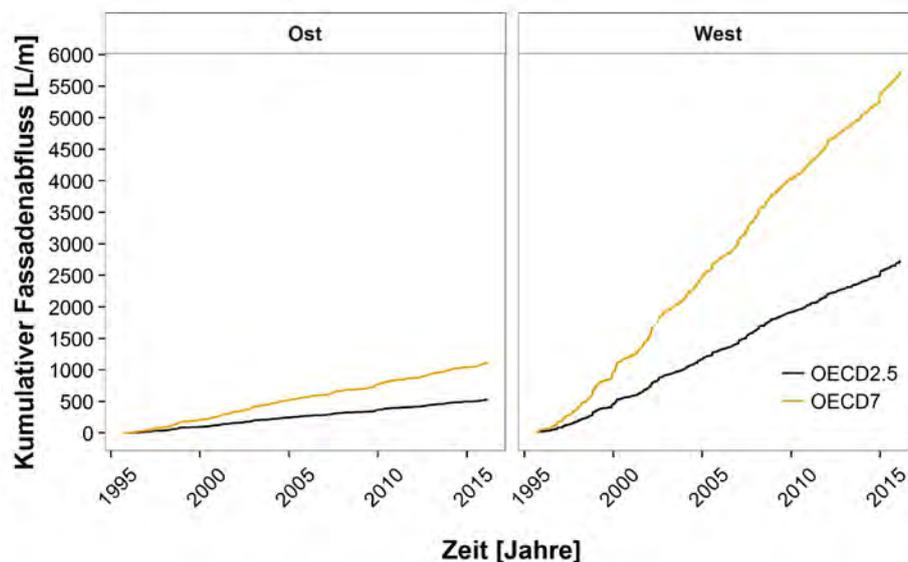
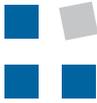


Abbildung 9: Kumulativer Verlauf des Fassadenabflusses für die Szenarien OECD2.5 und OECD7. Dargestellt sind Ost- und Westfassade, welche exemplarisch für eine stark bzw. schwach beregnete Fassade stehen.

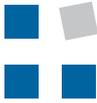
Der resultierende Gesamtabfluss über 20 Jahre für beide Szenarien nach Fassadenexposition ist in Abbildung 18, Anhang 8.2, dargestellt.



4 Schlussfolgerungen

Folgende Schlussfolgerungen lassen sich aus den Simulationsrechnungen für die zwei Gebäudegeometrien mit vier Expositionsrichtungen ziehen:

- Der berechnete Wandfeldindex respektive Schlagregen erscheinen verglichen mit Erfahrungswerten aus Feldversuchen plausibel und widerspiegeln ähnliche Trends. Die Norm ISO 15927-3 ist folglich geeignet zur Berechnung von Schlagregen. Die Validität der Wandfaktoren, die von hoher Bedeutung für das Simulationsergebnis sind, kann durch weitere empirische Daten geprüft werden.
- Der für die Umwelt-Risikoabschätzung massgebende Wert ist der an der Fassadenunterkante anfallende Abfluss, der aus dem über eine Fläche abfliessenden Schlagregen resultiert. Diese Grösse ist für die Abschätzung der Schadstofffracht wesentlich, weil sie die Fläche eines berechneten Bauteils berücksichtigt.
- Höhere Gebäude produzieren trotz kleinerem Wandfeldindex mehr Ablaufwasser, wie ebenfalls Erfahrungswerte aus Feldversuchen zeigen. Der Schlagregen ist aber auf niedrigen Gebäuden stärker ausgeprägt als auf höheren.
- Die berechnete Fassadenabflussmenge vernachlässigt mögliche Verluste durch Spritzwasser und Evaporation. Gegenüber anderen Einflussgrössen (Exposition, Fassadenhöhe, Abschattung etc.) sind diese Verluste dennoch nicht so gravierend, dass die Kernaussagen in Frage gestellt sind.
- Eine Modellrechnung gekoppelt mit der Stoffauswaschung ermöglicht die detaillierte Bilanzierung der Eintragsmengen in die Umwelt in Abhängigkeit zur Exposition (z.B. mit COMLEAM). Neben berechneten Fassaden bieten sich auch Dachflächen an. Dabei kann die Verdünnung des Abflusses vom Bauteil auf dem Weg zum Gewässer durch unbelasteten Flächenabfluss in die Modellierung einbezogen werden.



5 Literaturverzeichnis

Burkhardt, M. (2012). *Verkapselte Biozide*.

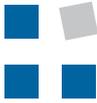
Deutscher Wetterdienst. (2016). *Qualitätsniveau der Klimadaten bei der Qualitätskontrolle*.
Abgerufen am 29. 03 2016 von
<https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/qualitaetsniveau.html>

ECHA. (2016). *Emission Scenario Documents - ECHA*. Abgerufen am 30. 03 2016 von
<http://echa.europa.eu/guidance-documents/guidance-on-biocides-legislation/emission-scenario-documents>

International Standards Organisation. (2009). *ISO 15927-3*. Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data.

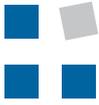
M. Burkhardt, S. Z. (2012). Leaching of Biocides from Façades under Natural Weather Conditions. *Environmental Science & Technology*, 46(10), 5497-5503. doi:DOI: 10.1021/es2040009

The R Foundation. (2016). Abgerufen am 12. 04 2016 von The R Project for Statistical Computing: <https://www.r-project.org/>



6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Systemübersicht. Schlagregengetriebene Stoffauswaschung aus vertikalen beregneten Bauteilen.....	3
Abbildung 2: Schematische Darstellung der zwei Szenarien. Ebenfalls dargestellt sind die Bezugsflächen für die Berechnung des Schlagregens sowie des Fassadenabflusses.	4
Abbildung 3: Verlauf des Jahresniederschlags für die DWD-Station Hamburg-Fuhlsbüttel zwischen 1996 und 2015.	8
Abbildung 4: Relativer Niederschlag nach Windrichtung (links) und relativer Anteil der Windrichtungen an den Gesamtwindstunden (rechts) die DWD-Station Hamburg Fuhlsbüttel zwischen September 1995 und Februar 2016.	9
Abbildung 5: Kumulativer Verlauf des Schlagregens für die Szenarien OECD2.5 und OECD7 nach Expositionsrichtung.....	10
Abbildung 6: Anteil des Schlagregens am Gesamtniederschlag für Gebäude OECD2.5 und OECD7 nach Windrichtung.....	11
Abbildung 7: Jährlicher Anteil des Schlagregens am Gesamtniederschlag für Gebäude OECD2.5 und OECD7.	11
Abbildung 8: Histogramm der Schlagregenintensität für Szenario OECD2.5.	12
Abbildung 9: Kumulativer Verlauf des Fassadenabflusses für die Szenarien OECD2.5 und OECD7. Dargestellt sind Ost- und Westfassade, welche exemplarisch für eine stark bzw. schwach beregnete Fassade stehen.	13
Abbildung 10: Algorithmus zur Bestimmung fehlender Niederschlagswerte.	18
Abbildung 11: Algorithmus zur Bestimmung fehlender Werte für die Windgeschwindigkeit.	18
Abbildung 12: Algorithmus zur Bestimmung fehlender Werte für die Windrichtung.	19
Abbildung 13: Algorithmus für die Berechnung von Wandfeld- Periodenindizes.....	19
Abbildung 14: Mittlere Windgeschwindigkeit bei Niederschlag, nach Windrichtung über 20 Jahre.	20
Abbildung 15: Kumulierter Schlagregen für beide Szenarien nach Expositionsrichtung.	21
Abbildung 16: Gesamtschlagregen über 20 Jahre für die Gebäude OECD2.5 und OECD7, nach Fassade.	22
Abbildung 17: Kumulierter Fassadenabfluss für beide Szenarien nach Expositionsrichtung.	23
Abbildung 18: Gesamt- Fassadenabfluss über 20 Jahre für beide Szenarien nach Expositionsrichtung.....	24



HSR

HOCHSCHULE FÜR TECHNIK
RAPPERSWIL

FHO Fachhochschule Ostschweiz

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spezifikation der Gebäudegeometrien für beide Szenarien.	5
Tabelle 2: Parametrisierung des Schlagregen-Algorithmus für beide Szenarien.	5
Tabelle 3: Qualitätsniveaus der verwendeten Wetterdaten.....	6

8 Anhang

8.1 Flussdiagramme der verwendeten Algorithmen

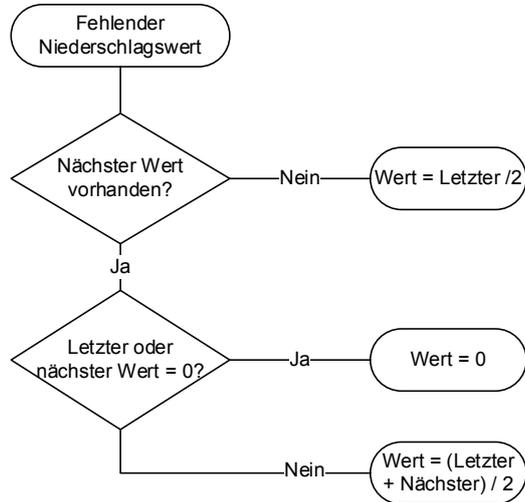


Abbildung 10: Algorithmus zur Bestimmung fehlender Niederschlagswerte.

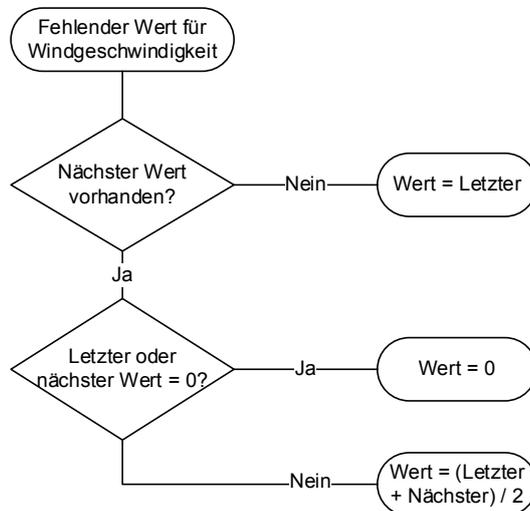


Abbildung 11: Algorithmus zur Bestimmung fehlender Werte für die Windgeschwindigkeit.

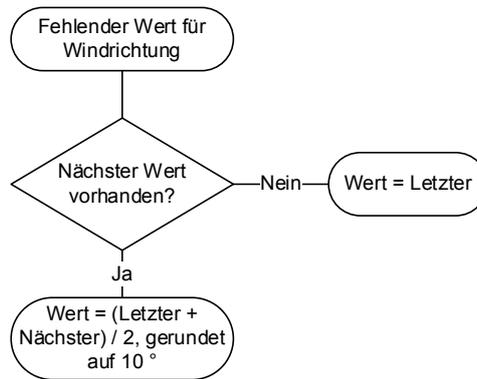


Abbildung 12: Algorithmus zur Bestimmung fehlender Werte für die Windrichtung.

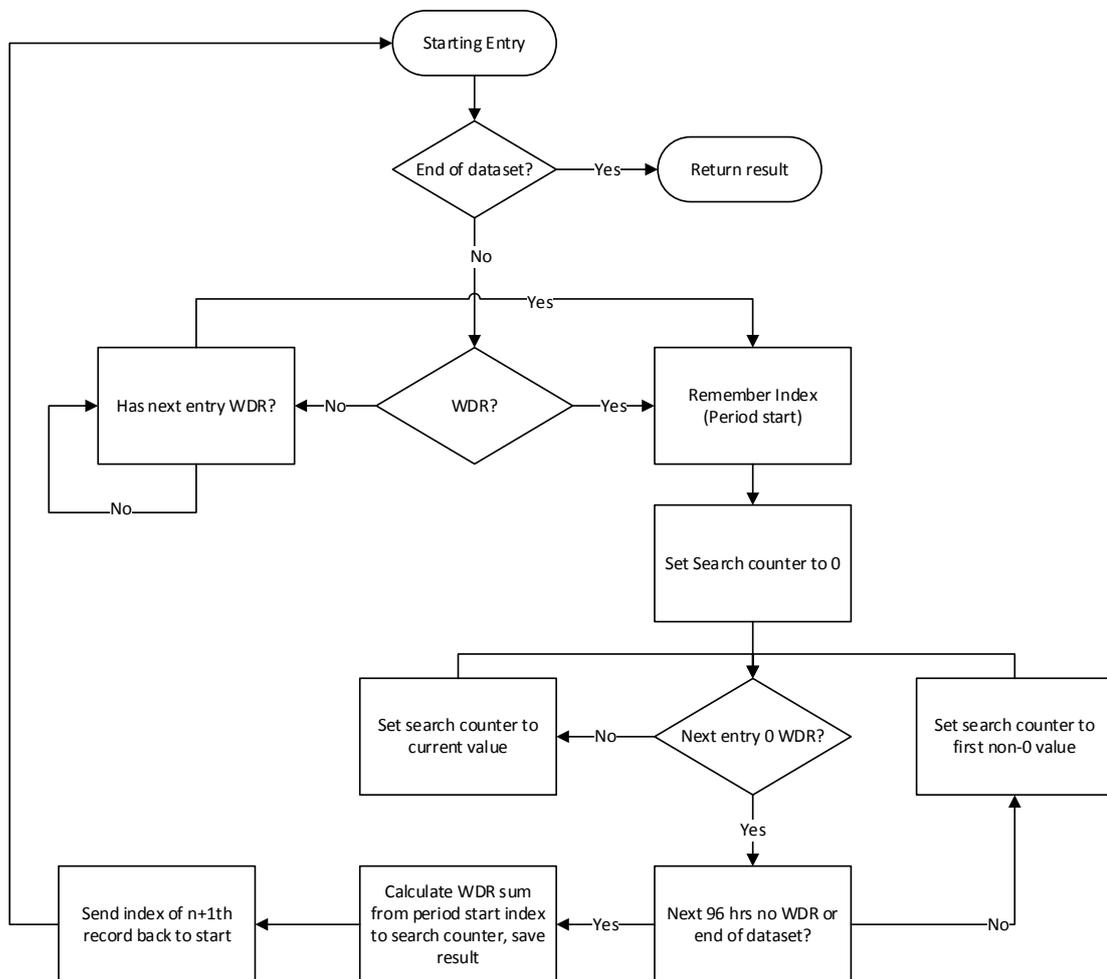


Abbildung 13: Algorithmus für die Berechnung von Wandfeld- Periodenindizes.

8.2 Ergänzende Abbildungen

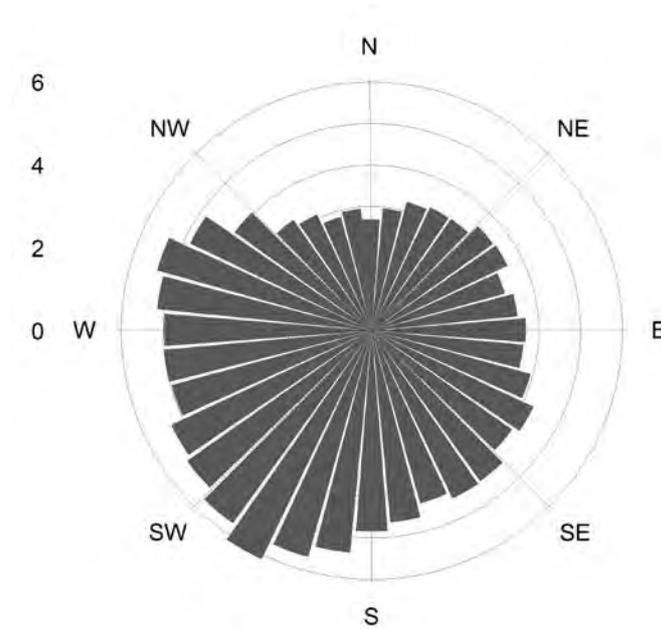


Abbildung 14: Mittlere Windgeschwindigkeit bei Niederschlag, nach Windrichtung über 20 Jahre.

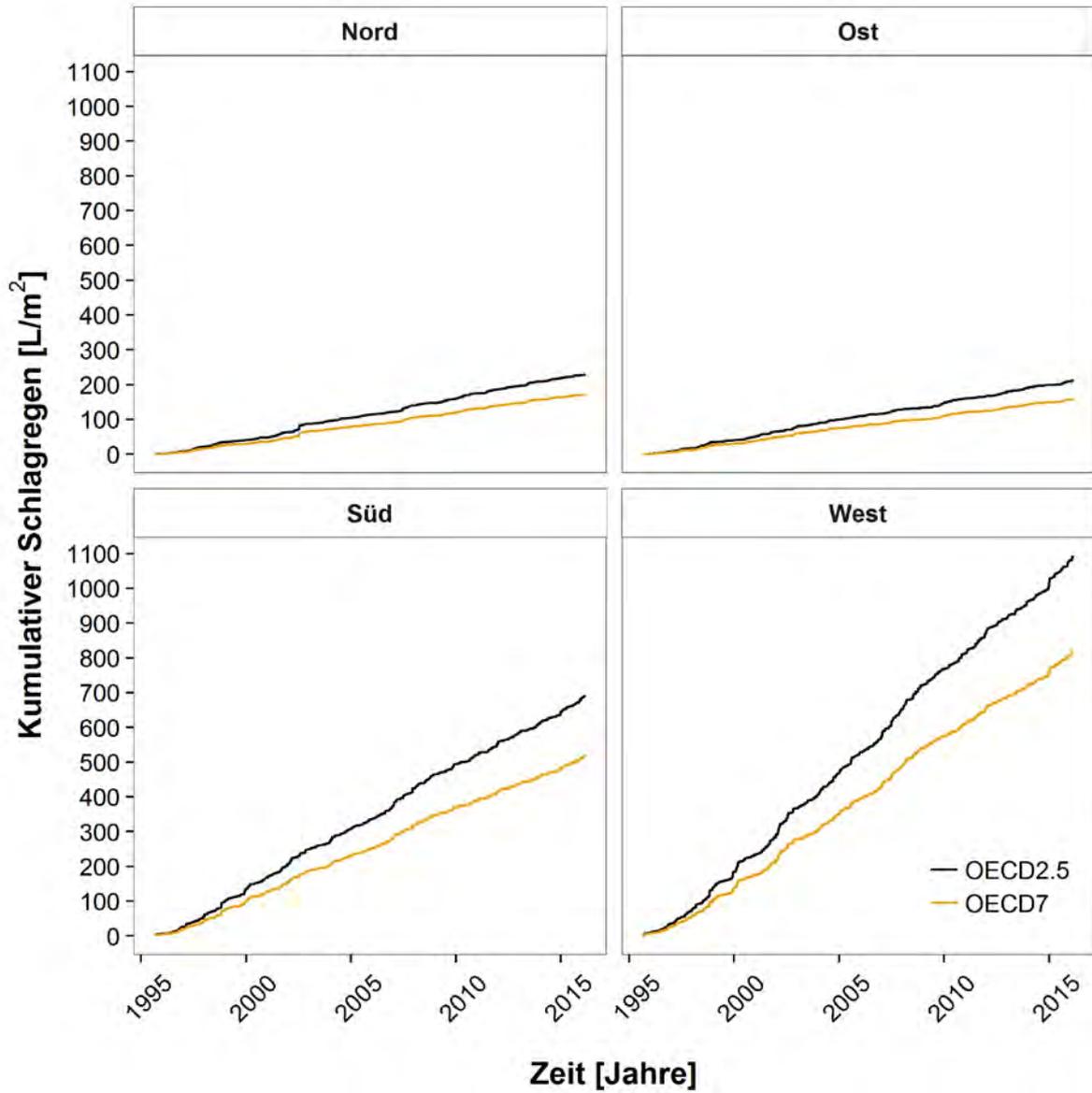


Abbildung 15: Kumulierter Schlagregen für beide Szenarien nach Expositionsrichtung.

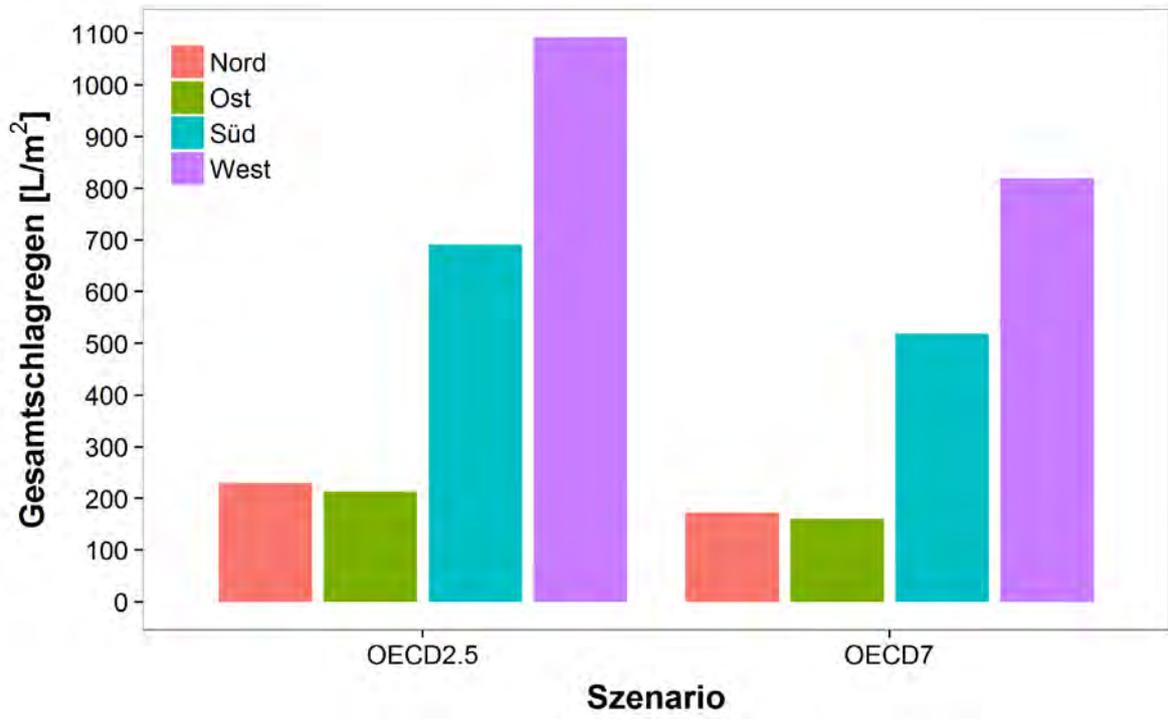


Abbildung 16: Gesamtschlagregen über 20 Jahre für die Gebäude OECD2.5 und OECD7, nach Fassade.

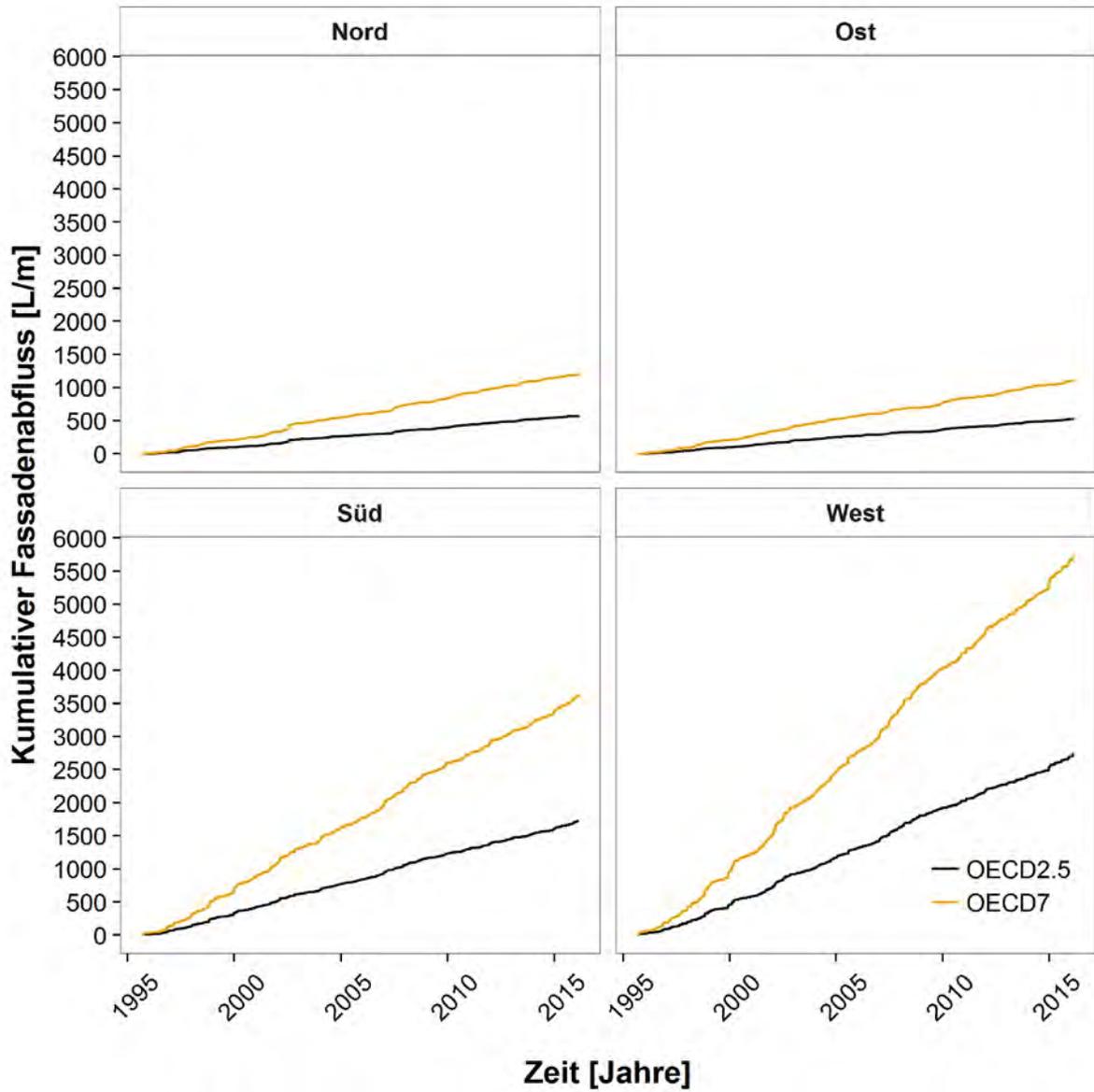


Abbildung 17: Kumulierter Fassadenabfluss für beide Szenarien nach Expositionsrichtung.

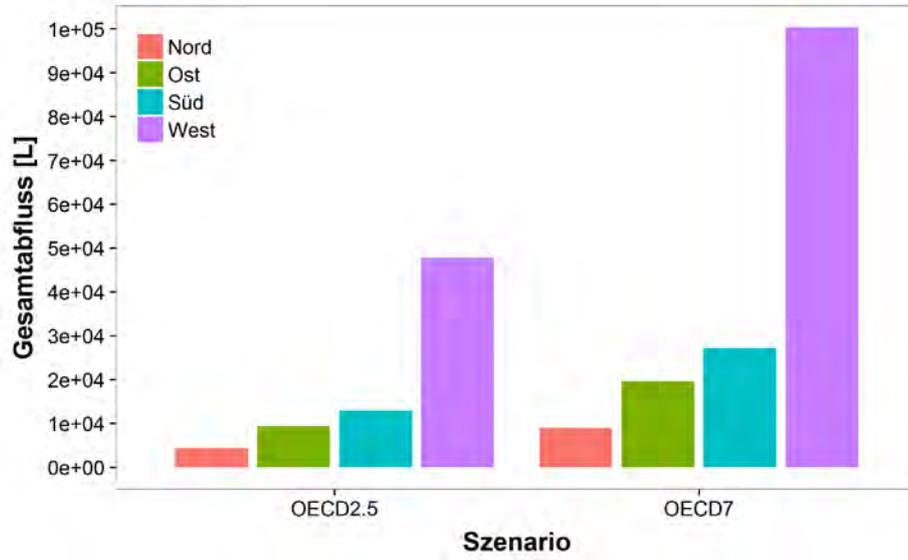


Abbildung 18: Gesamt- Fassadenabfluss über 20 Jahre für beide Szenarien nach Expositionsrichtung.