Urban forest: Potential of trees to reduce storm water runoff in urban areas

Masterarbeit

Freiburg im Breisgau, 31. Oktober 2012 — Petra Gabelmann
Referent: — Prof. Dr. Weiler
Koreferent: — Prof. Dr. Koch

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Institut für Hydrologie

Institut für Hydrologie
Albert-Ludwigs Universität Freiburg im Breisgau

Petra Gabelmann, 3119939

Urban forest: Potential of trees to reduce storm water runoff in urban areas

Referent: Prof. Dr. Weiler
Koreferent: Prof. Dr. Koch

Masterarbeit

Freiburg im Breisgau, 31. Oktober 2012

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **3**
1.1 Interzeption 4

2 Gebietsbeschreibung **9**

3 Materialien und Methoden **11**
3.1 GIS-Modell 11
3.1.1 Datengrundlage 11
3.1.2 Vorgehensweise 12
3.2 Validierung des GIS-Modells 15
3.2.1 Orthophotomethode 15
3.2.2 h-r-Methode 16
3.3 Klimadaten Vauban 19
3.3.1 Datengrundlage 19
3.3.2 Vorgehensweise 21

4 Ergebnisse und Diskussion **23**
4.1 GIS-Modell 23
4.2 Validierung des GIS-Modells 26
4.2.1 Orthophotomethode 26
4.2.2 h-r-Methode 32
4.2.3 Abschließender Vergleich 33
4.3 Klimadaten Vauban 35
4.3.1 Überblick über den Untersuchungszeitraum 35
4.3.2 Auswirkungen der Vegetation auf den Niederschlag 37
4.3.3 Interzeptionsverlust 52

5 Fazit **63**

Literatur **67**

A Abbildungen **71**

B Tabellen **73**

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1 ‚Natürliche' Wasserbilanz in Städten. 4
Abb. 1.2 Qualitativer Verlauf des Interzeptionsprozesses bei einem Niederschlagsereignis konstanter Intensität ohne Berücksichtigung der Verdunstung. 6

Abb. 2.1 Untersuchungsgebiet der Stadt Freiburg im Breisgau. 10

Abb. 3.1 First Pulse Points und Last Pulse Points der Laserscanbefliegungen . 12
Abb. 3.2 Fließdiagramm der Analyse in ArcGIS. 13
Abb. 3.3 Betrachtete Stadtteile der Stadt Freiburg. 16
Abb. 3.4 Validierungsbereiche für das GIS-Modell innerhalb der Stadt Freiburg. 17
Abb. 3.5 Validierung des GIS-Modells mithilfe von Radius r und Abstand h. . 20

Abb. 4.1 Von Vegetation beeinflusste versiegelte Flächen im Stadtteil Herdern (Ausschnitt). 23
Abb. 4.2 Anteile der versiegelten Flächen in den untersuchten Bezirken. 25
Abb. 4.3 Anteile der Versiegelungsflächen der Bezirke, die von Vegetation beeinflusst sind. 26
Abb. 4.4 Per Hand digitalisierte und GIS-Modell-Vegetationsflächen im Bereich val020. 27
Abb. 4.5 Unterschiede des GIS-Modells und der Orthophotomethode für die 100 %-Versiegelungsflächen (Straßen und Rechtecke). 29
Abb. 4.6 Mittelwerte der Validierung und der dazugehörenden GIS-Modell-Flächen (Straßen und Rechtecke). 32
Abb. 4.7 Unterschiede des GIS-Modells und der h-r-Methode für die untersuchten Straßen. 33
Abb. 4.8 Vergleich des GIS-Modells mit den Validierungsdaten. 34
Abb. 4.9 Monatssummen vom Niederschlag und Monatsmitteltemperaturen im Stadtteil Vauban über den Untersuchungszeitraum. 35
Abb. 4.10 a) Niederschlagssummen, b) durchschnittliche Niederschlagsintensitäten und c) Dauer der Niederschlagsereignisse während des Untersuchungszeitraums. 36
Abb. 4.11 Niederschlagssummen, durchschnittliche Niederschlagsintensitäten und Dauer der Niederschlagsereignisse während des Untersuchungszeitraums aufgeteilt in Sommer (a-c) und Winter (d-f). 38
Abb. 4.12 Intensitäten von Freilandniederschlag und Bestandsniederschlag der Niederschlagsereignisse; a) Mittelwert aus den verschiedenen Baumarten, b) Tanne, c) Platane, d) Linde. 39

Abb. 4.13 Intensitäten des Bestandsniederschlags als eine Funktion der Intensitäten des Freilandniederschlags; a) Mittelwert, b) Tanne, c) Platane, d) Linde. 41
Abb. 4.14 Intensitäten des Bestandsniederschlags als eine Funktion der Intensitäten des Freilandniederschlags für die Sommermonate; a) Mittelwert, b) Tanne, c) Platane, d) Linde. 42
Abb. 4.15 Intensitäten des Bestandsniederschlags als eine Funktion der Intensitäten des Freilandniederschlags für die Wintermonate; a) Mittelwert, b) Tanne, c) Platane, d) Linde. 43
Abb. 4.16 Niederschlagssummen von Freilandniederschlag und Bestandsniederschlag der Ereignisse; a) Mittelwert der verschiedenen Baumarten, b) Tanne, c) Platane, d) Linde. 45
Abb. 4.17 Niederschlagssumme des Bestandsniederschlags als eine Funktion der Niederschlagssumme des Freilandniederschlags; a) Mittelwert, b) Tanne, c) Platane, d) Linde. 46
Abb. 4.18 Niederschlagssumme des Bestandsniederschlags als eine Funktion der Niederschlagssumme des Freilandniederschlags für die Sommermonate; a) Mittelwert, b) Tanne, c) Platane, d) Linde. 47
Abb. 4.19 Niederschlagssumme des Bestandsniederschlags als eine Funktion der Niederschlagssumme des Freilandniederschlags für die Wintermonate; a) Mittelwert, b) Tanne, c) Platane, d) Linde. 48
Abb. 4.20 Prozentuale Anteile der Intensitäten von BNS an denen von P_G als eine Funktion der Intensitäten von P_G. 49
Abb. 4.21 Prozentuale Anteile der Niederschlagssummen von BNS an denen von P_G als eine Funktionr der Niederschlagssummen von P_G. 50
Abb. 4.22 Stündliche Niederschlagssummen für a) das Niederschlagsereignis Nr. 13, b) das Niederschlagsereignis Nr. 37 und c) das Niederschlagsereignis Nr. 45. 53
Abb. 4.23 a) Monatliche Interzeptionsverluste und b) Anteile der monatlichen Interzeptionsverluste an den monatlichen Summen des Freilandniederschlags. 54
Abb. 4.24 Bestandsniederschlag als eine Funktion von Freilandniederschlag. . . 56
Abb. 4.25 Bestandsniederschlag als eine Funktion von Freilandniederschlag, a) Sommer, b) Winter. 57
Abb. 4.26 Tägliche Niederschlagsdaten der Station Vaub02, Mittelwert der drei Baumsorten und Unterschied zwischen beiden. 58
Abb. 4.27 Tägliche Niederschlagsdaten der Station Vaub02, Mittelwert der drei Baumsorten und Unterschied zwischen beiden für (a) Dezember 2011/Januar 2012 und (b) Mai/Juni 2012. 59
Abb. 4.28 Täglicher Interzeptionsverlust und Niederschlagssummen, sowie tägliche mittlere Temperaturen für den Untersuchungszeitraum. 61

Abb. A.1 Unterschiede des GIS-Modells und der Orthophotomethode für die 100-, 80-, 60- und 50 %-Versiegelungsflächen. 71

Abb. A.2 Unterschiede des GIS-Modells und der Orthophotomethode für die 40-, 30-, 20- und 10 %-Versiegelungsflächen. 72

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1 Hauptzahlen der Dreisam am Pegel Ebnet für das Zeitintervall vom 1.11.1940 bis 2.1.2012 9

Tab. 3.1 Untersuchte Stadtteile der Stadt Freiburg; wenn mehr als eine amtliche Nummer angegeben ist, wurden die Bezirke in der Analyse zusammen gelegt 15
Tab. 3.2 Auflistung der Validierungsabschnitte (Straßen) 18
Tab. 3.3 Auflistung der Validierungsabschnitte (Rechtecke) 19
Tab. 3.4 Module der Wetterstation Vaub02 20
Tab. 3.5 Klasseneinteilung für Summe, Dauer und Intensität der Niederschlagsereignisse 21

Tab. 4.1 Anteile der versiegelten Flächen in den untersuchten Straßen (mit dem GIS-Modell berechnet und mit den Orthophotos validiert) . . . 28
Tab. 4.2 Anteile der von Vegetation beeinflussten Flächen der verschiedenen Versiegelungsstufen in den Validierungsgebieten (Orthophotovalidierungsdaten) 30
Tab. 4.3 Anteile der von Vegetation beeinflussten Flächen der verschiedenen Versiegelungsstufen in den Validierungsgebieten (GIS-Modelldaten) . 31
Tab. 4.4 Mittlere prozentuale Anteile der Intensitäten des Bestandsniederschlags $z_{i_{BNS_x}}$ an den Intensitäten des Freilandniederschlags 49
Tab. 4.5 Mittlere prozentuale Anteile der Bestandsniederschlagssummen z_{BNS_x} an den Niederschlagssummen des Freilandniederschlags 50
Tab. 4.6 Zeitlicher Abstand zwischen Beginn von P_G und Beginn BNS für ausgewählte Ereignisse 51
Tab. 4.7 Monatliche Interzeptionsverluste I_{C_x} und prozentuale Anteile der monatlichen Interzeptionsverluste am Freilandniederschlag $z_{I_{C_x}}$ (2011-2012) 55
Tab. 4.8 Niederschlagssummen und Interzeptionsverluste für Tanne, Platane, Linde und deren Mittelwerte 60
Tab. 4.9 Niederschlagssummen und Interzeptionsverluste für Tanne, Platane, Linde und deren Mittelwert aufgeteilt in Sommer und Winter 60

Tab. B.1 Literaturwerte zu Interzeptionsverlusten 74
Tab. B.2 Versiegelte Flächen der untersuchten Bezirke 77

Tab. B.3 Gemessene und daraus berechnete Größen zur Validierung mit der h-r-Methode 80
Tab. B.4 Niederschlagsintensitäten der Ereignisse während des Untersuchungszeitraums 86
Tab. B.5 Niederschlagssummen der Ereignisse während des Untersuchungszeitraums 90

Glossar

Abkürzungen

DGM	: Digitales Geländemodell
GIS	: Geoinformationssystem
LAI	: Leaf area index, Blattflächenindex
$LiDAR$	: Light detection and ranging, Radarmessungen
R	: Programmiersprache für statistisches Rechnen und statistische Grafiken
R^2	: Bestimmtheitsmaß

Symbole

BNS	: Bestandsniederschlag $[mm]$
$diff$	: Unterschied zwischen P_G und BNS
C_{max}	: Maximale Speicherkapazität $[mm]$
F_{Veg}	: Größe der Versiegelungsfläche, von Vegetation beeinflusst $[m^2]$ o. $[km^2]$
F_{Vers}	: Größe der Versiegelungsfläche $[m^2]$ o. $[km^2]$
h	: Abstand vom Mittelpunkt zur α gehörenden Sehne $[m]$
i_{BNS}	: Intensität des Bestandsniederschlags $[mm/h]$
I_C	: Interzeptionsverlust innerhalb der Baumkrone $[mm]$
i_{P_G}	: Intensität des Freilandniederschlags $[mm/h]$
n	: Anzahl von Bäumen $[-]$
P_G	: Freilandniederschlag $[mm]$
r	: Radius $[m]$
S	: Benetzungskapazität $[mm]$
S_F	: Stammabfluss $[mm]$
T_F	: Kronendurchlass $[mm]$
x	: Breite der Versiegelungsfläche $[m]$
y	: Länge der Versiegelungsfläche $[m]$
$z_{i_{BNS}}$	: prozentualer Anteil der Niederschlagsintensität unterhalb Vegetation an der Intensität von P_G [%]
z_{Veg}	: proz. Anteil von F_{Veg} an F_{Vers} [%]
z_{I_C}	: prozentualer Anteil von I_C an der Niederschlagssumme von P_G [%]
α	: Mittelpunktswinkel [°]
σ	: Standardabweichung $[-]$

Indizes

$_{GIS}$	: GIS-Modell
$_{hr}$	: Validierungsmethode durch Baumradien und Abstand zu der Versiegelungsfläche
$_{L}$	: Linde
$_{MW}$	: Mittelwert der drei Vegetationsarten
$_{orth}$	: Validierungsmethode durch Orthophotos
$_{P}$	: Platane
$_{T}$	: Tanne

Zusammenfassung

Immer mehr Menschen leben in Städten. Momentan sind es fast 50 %, bis zum Jahr 2030 soll sich diese Zahl auf 60 % erhöhen. Dies setzt mehr Lebensraum für die Menschen in den Städten voraus und somit auch eine Erhöhung des Anteils an Versiegelungsflächen. Durch die Vermehrung der Versiegelungsflächen kommt es zu einer Abnahme der Grundwasserneubildung und zu einer Zunahme an oberflächlichem Abfluss und an Kanalisationsabfluss. Dies kann besonders bei Niederschlagsereignissen problematisch werden, da der Abfluss weniger schnell in Vorfluter fortgeführt werden kann. Aus diesem Grund beschäftigten sich einige Studien damit, wie sich Vegetation auf den Abfluss auswirkt.

In dieser Arbeit wird der Einfluss der Vegetation auf den Niederschlag am Beispiel der Stadt Freiburg im Breisgau untersucht. Hierfür wurde zunächst ein Vegetationsmodell mit Hilfe von ArcGIS auf Basis von LiDAR-Daten, digitalen Geländemodellen und mit Angaben zur Versiegelung und Bebauung erstellt und validiert. Dies geschah, um in Erfahrung zu bringen, wie groß der Anteil der Vegetation in der Stadt ist. Im Anschluss wurden Niederschlagsinterzeptionsdaten aus dem Freiburger Stadtteil Vauban ausgewertet, um herauszufinden, wie stark die Auswirkungen der Vegetation durch Interzeption auf die Niederschlagsmenge sind.

Anhand des GIS-Modells konnte festgestellt werden, dass 12,125 % der untersuchten Flächen der Stadt von Vegetation beeinflusst werden. Allerdings ist diese Vegetation nicht in einem regelmäßigen Muster über die Stadt verteilt. Im Westen der Stadt finden sich vor allem Bezirke, in denen der Vegetationsanteil zwischen 5 und 15 % liegt, während im Osten vor allem Bezirke mit einem Anteil von mehr als 15 % vorherrschen.

Die Validierung des GIS-Modells ergab, dass das GIS-Modell die Realität im Mittel überschätzt. Durch die Validierung mit dem Digitalisieren der Vegetation anhand von Orthophotos konnte eine Überschätzung um 1,203 Prozentpunkte festgestellt werden, bei der Validierung für die der Durchmesser der Kronen und der Abstand des Baumstamms zum Beginn der Versiegelung gemessen wurden, wurde eine Überschätzung von 6,519 Prozentpunkten berechnet.

Die Auswertungen der Niederschlagsdaten ergaben, dass im Mittel (aus Daten für Tannen, Platanen und Linden) 55,822 % des Niederschlags durch Interzeption verloren gehen. Allerdings wirken sich die Vegetationsformen unterschiedlich auf die Interzeption aus. Im Allgemeinen geht durch Nadelbäume mehr Niederschlagswasser verloren als durch Laubbäume. Für die Sommermonate (April - Oktober) konnte ein Interzeptionsverlust von 58,260 % ermittelt werden, für die Wintermonate (November - März) einer von 47,971 %, da die Interzeption der Laubbäume deutlich geringer ausfällt.

Kapitel 1

Einleitung

Fast jeder zweite Mensch dieser Welt lebt inzwischen in einem städtischen Gebiet und es wird erwartet, dass bis zum Jahr 2030 der Anteil auf 60 % ansteigt [BVM+05]. Aus diesem Grund wird für die Menschen in und um Städten immer mehr Platz geschaffen und Einzugsgebiete verändern sich im Laufe der Zeit. Urbanisierung sorgt für die Ausbreitung von immer mehr versiegelten Flächen und die Konstruktion von künstlichen Transportwegen für das Wasser. Des Weiteren sorgen die zunehmende Bevölkerung und die Veränderungen der Landoberfläche für eine signifikante Beeinflussung hydrologischer Prozesse und die Wasserqualität in urbanen Ökosystemen [BB00].

Wasserundurchlässige Oberflächen sorgen für eine lokale Reduzierung der Infiltration, Perkolation, des Bodenfeuchtespeichers und der natürlichen Interzeption. Des Weiteren kommt es zu einer Absenkung des Grundwasserspeichers und zu einer Zunahme des Abflusses [BB00]. Die Effekte von vorstädtischer Entwicklung auf die Abflusscharakteristiken sind weithin bekannt: 1) Abnahme der Grundwasserneubildung, 2) Zunahme des jährlichen Oberflächenabflusses in Vorflutern, 3) Zunahme der Höhe von Hochwassern, 4) Abnahme der Verzögerung zwischen dem Beginn eines Niederschlagsereignisses und der Reaktion des Abflusses [BVM+05]. Versiegelte Flächen, wie zum Beispiel Pflasterstraßen und Dächer sorgen für einen Anstieg des Oberflächenabflusses durch die Abwasserkanäle und führen damit zu einer Abnahme der Grundwasserneubildung [BVM+05]. Allerdings sorgen auch einigee städtische Landschaftsmerkmale für eine Erhöhung der Grundwasserneubildungsrate. Hierzu gehören Grünflächen, Parks, Golfplätze und kleine Waldgebiete [BVM+05].

In Abbildung 1.1 sind die wichtigsten Komponenten des urbanen Wasserkreislaufs zu erkennen.

Niederschlag fällt auf die Oberfläche. Ein Teil davon geht in den Boden durch die ungesättigte Zone bis ins Grundwasser. Ein anderer Teil fließt oberflächenna bzw. durch Abwasserkanäleh in Richtung der Vorfluter ab und wiederum ein anderer Teil geht nicht in den Boden über und fließt als Oberflächenabfluss in die Flüsse. Auch die Hausdächer haben einen Einfluss auf den urbanen Abfluss. Von ihnen verdunstet ein Teil des Niederschlagswassers und wird so an die Atmosphäre zurückgegeben und ein anderer Teil läuft von den Dächern ab in die Kanalisation. Des Weiteren gelangt Niederschlagswasser über

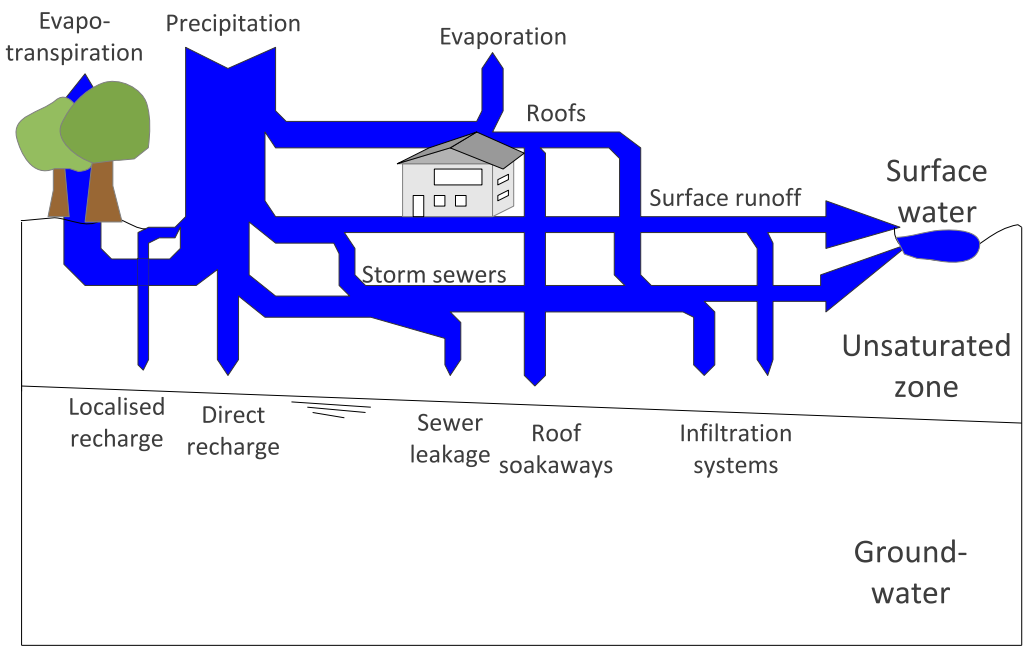

Abb. 1.1: *‚Natürliche' Wasserbilanz in Städten [Lan10].*

Evapotranspiration von der Vegetation aus ebenfalls zurück in die Atmosphäre.

1.1 Interzeption

Urbane Wälder sind kleine grüne Flecken in einer sonst grauen Landschaft [MNH+97]. Sie sind ein wichtiger Aspekt in der Stadthydrologie, da sie Niederschlagswasser speichern und erst später dem urbanen Wasserkreislauf hinzufügen können. Baumkronen modulieren die Wege des Niederschlags vom Himmel bis zum Boden. Sie modifizieren die Wege der fallenden Regentropfen, indem sie den fallenden Niederschlag in mehrere Gruppen aufteilen [Don97].Von entscheidender Bedeutung ist hierbei die Interzeption. Mit Interzeption ist das temporäre Speichern des Niederschlags innerhalb der Vegetationskrone und das darauffolgende Abgeben dieses Wassers an den Boden bzw. an die Atmosphäre gemeint. Hier ist anzumerken, dass es Unterschiede zwischen größerer (Bäume) und kleinerer Vegetation (z.B. Büsche) gibt, da die Evapotranspirationsrate bei Bäumen wegen des höheren aerodynamischen Leitvermögens um einiges relevanter ist [MLV+09]. In Gleichung 1.1 findet sich die Formel zur Berechnung des Interzeptionsverlustes innerhalb des Blätterdachs.

$$I_C = P_G - T_F - S_F \tag{1.1}$$

Mit:

I_C : Interzeptionsverlust innerhalb der Baumkrone $[mm]$
P_G : Freilandniederschlag $[mm]$
T_F : Kronendurchlass $[mm]$
S_F : Stammabfluss $[mm]$

Der Freilandniederschlag wird entweder oberhalb der Vegetation oder auf offener Fläche in der Nähe der Vegetation gemessen. Bei dem Kronendurchlass handelt es sich um den durchfallenden Niederschlag, der ohne Interzeption zum Boden gelangt, und den abtropfenden Niederschlag, der nach Interzeption auf den Boden fällt. Wasser, das an Baumstämmen und Pflanzenstengeln abfließend auf den Boden gelangt, wird als Stammabfluss bezeichnet [SDP+].

In Gleichung 1.2 findet sich die Formel zur Berechnung des Bestandsniederschlags.

$$BNS = T_F + S_F \tag{1.2}$$

Mit:

BNS : Bestandsniederschlag $[mm]$
T_F : Kronendurchlass $[mm]$
S_F : Stammabfluss $[mm]$

In Abbildung 1.2 ist der Verlauf des Interzeptionsprozesses zu erkennen. In der Auffüllphase erfolgt eine Benetzung und Aufsättigung der Pflanzenoberfläche. Sobald die maximale Speicherkapazität C_{max} erreicht ist, wird der Speicher geleert und das Wasser gelangt durch Abtropfen oder Abrinnen zur Bodenoberfläche. Zudem verdunstet Wasser von der Pflanzenoberfläche und wird dem Boden nicht mehr hinzugefügt [SDP+].

Interzeption und Interzeptionsverluste sind stark von den Standorten abhängig, Einflussgrößen sind hierbei die Größe und Beschaffenheit der benetzbaren Oberfläche (Benetzungskapazität S), die Dauer und Intensität des Niederschlagsereignisses (Benetzungsmenge) und meteorologische Größen (z.B. Temperatur und Windgeschwindigkeit) [SDP+, CR00, NS04, XM02, XMUG00]. Verschiedene Vegetationsarten sorgen für unterschiedlich große Interzeptionsverluste.

Verschiedene Studien befassten sich mit diesem Thema. Jetten befasste sich 1996 mit der Interzeption in den Tropen [Jet96], weitere Studien wurden in Laubwäldern in den

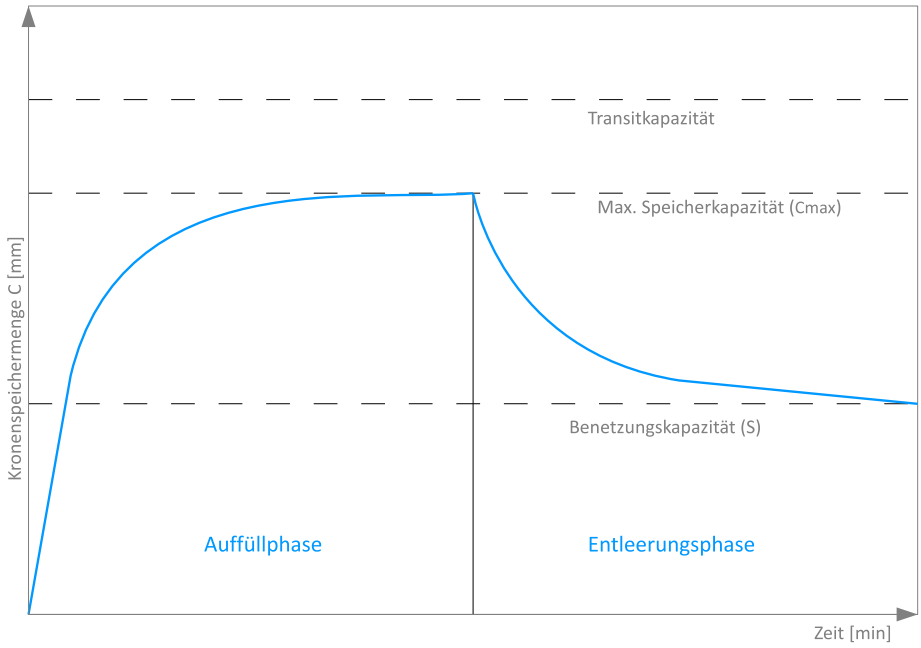

Abb. 1.2: *Qualitativer Verlauf des Interzeptionsprozesses bei einem Niederschlagsereignis konstanter Intensität ohne Berücksichtigung der Verdunstung [SDP$^+$].*

gemäßigten Klimaten und in Nadelwäldern durchgeführt [LUM04, RMR75, TO05]. In Tabelle B.1 sind Literaturwerte für den Interzeptionsverlust I_C aus anderen Arbeiten zu finden.

Die Werte für den Interzeptionsverlust unterscheiden sich. Hierfür ist u.a. die Standortwahl ein Grund. Eine größere Menge an Vegetation und somit eine größere Abfangfläche und weniger Zwischenräume durch die der Niederschlag auf den Boden gelangt, sorgen dafür, dass verhältnismäßig mehr Niederschlag in die Atmosphäre verloren geht.

Ein weiterer Grund für die unterschiedlichen Werte ist der Unterschied zwischen Laub- und Nadelbäumen. Nadelbäume tragen das ganze Jahr über ihre Nadeln, während die Belaubung in den Wintermonaten bei den Laubbäumen verschwindet. Die Laubbäume fangen im Winter also nicht mehr so viel Niederschlag ab, der dadurch verloren geht. Zusätzlich geht durch die Nadelbäume mehr Niederschlag verloren, da im Gegensatz zu Laubbäumen ihre Belaubung aus vielen kleinen Blättern besteht, die einen größeren LAI haben, und auf denen sich weniger Niederschlag zu größeren Tropfen ansammeln kann, die letztendlich auf den Boden tropfen [FD78, IH02].

Meteorologische Komponenten, die sich stärker auf den Interzeptionsverlust auswirken, sind u.a. die Gesamtniederschlagssumme eines Niederschlagsereignisses, die Intensitäten während der Ereignisse, wie oft es zu Niederschlagsereignissen kommt und die Dauer von

diesen Ereignissen [Hor19, AJvGF98]. Zum Beispiel können Niederschlagsereignisse mit hohen Intensitäten aber einer kurzen Dauer für andere Interzeptionsverluste sorgen als langandauernde Ereignisse mit geringeren Intensitäten [Asa07].

Viele der Studien über die Interzeption wurden zumeist in ländlichen Gebieten durchgeführt aber auch in Städten ist die Interzeption von zunehmend wichtiger Bedeutung. Ein Unterschied von der Interzeption in Wäldern zu der in der Stadt ist die Tatsache, dass die Vegetation in Städten geringer ist und die einzelnen Individuen weiter auseinander stehen und so isoliert sind. Des Weiteren spielen auch noch das Alter der Bäume (in Städten oft jünger als auf dem Land), die Vielfältigkeit und Mikroklimate eine Rolle [XM02].

Kapitel 2

Gebietsbeschreibung

Bei dem Gebiet auf das das Versiegelung-Vegetations-Modell in ArcGIS angepasst wird, handelt es sich um das Stadtgebiet Freiburg im Breisgau. Freiburg ist im Süden Baden-Württembergs zu finden und ist etwa 50 km von Basel und 65 km von Straßburg entfernt. Die Stadt befindet sich am südöstlichen Rand des Oberrheingrabens und westlichen Rand des Schwarzwaldes.

Das zu untersuchende Gebiet ist ein Teil des in Abbildung 2.1 zu erkennenden Gebiets. Es hat eine Größe von 52,219 km^2.

Durch das Stadtgebiet fließt die Dreisam. Die Dreisam besitzt ein Einzugsgebiet, das der oberen Mesoskale zuzuordnen ist. Sie ist in ihrem heutigen Zustand gekennzeichnet durch einen geraden Verlauf und ein vorwiegend vorliegendes Doppeltrapezprofil mit seitlichen Hochwasserschutzdeichen. Abflussmessungen finden am Pegel Ebnet statt, welcher sich wenige Kilometer südöstlich von Freiburg befindet.

In Tabelle 2.1 sind die hydrologischen Kennzahlen der Dreisam am Pegel Ebnet für den Zeitraum vom 1. November 1940 bis zum 2. Januar 2012 zu erkennen.

Tab. 2.1: *Hauptzahlen der Dreisam am Pegel Ebnet für das Zeitintervall vom 1.11.1940 bis 2.1.2012*

	Dreisam (Pegel Ebnet)
NNQ $[m^3/s]$	0,000 (2003)
MNQ $[m^3/s]$	0,509
MQ $[m^3/s]$	5,756
MHQ $[m^3/s]$	44,442
HHQ $[m^3/s]$	119,030 (1991)

Abb. 2.1: *Untersuchungsgebiet der Stadt Freiburg im Breisgau.*

Kapitel 3

Materialien und Methoden

3.1 GIS-Modell

3.1.1 Datengrundlage

Bei den für die Analyse verwendeten Daten handelt es sich um GIS-Daten, welche entweder im Rasterformat oder im Polygonformat vorlagen. Im Rasterdatenformat lagen u.a. die Angaben zur Versiegelung vor. Des Weiteren gab es das digitale Geländemodell, bei dem es sich ebenfalls um eine Rasterdatei handelte und die Hochpixeldaten, die ebenfalls im Rasterformat vorlagen.

Digitale Geländemodelle (DGM) beschreiben die Form der Geländeoberfläche ohne Vegetation und Gebäude. In den Jahren 2000 bis 2005 wurden Laserscanbefliegungen über Baden-Württemberg durchgeführt aus denen das DGM Baden-Württemberg entstand, welches nun flächendeckend in einer 1 m-Auflösung zur Verfügung steht. Hierbei wurden unregelmäßig verteilte Bodenpunkte durch die Laserscans aufgenommen, welche durch Interpolation in ein regelmäßiges Gitter abgeleitet wurden [fGuL].

Bei den Hochpixeldaten handelt es sich um ein digitales Oberflächenmodell, welches die zum Zeitpunkt der Befliegung tatsächlich vorhandene Landschaft widerspiegelt. Das digitale Oberflächenmodell beinhaltet zusätzlich zu der vorhandenen Landschaft feste oder bewegliche Objekte wie Häuser, Verkehr, Brücken, Vegetation und Schilder, die nicht zur Geländeoberfläche gehören [fGuL]. Abgeleitet wurde die Oberfläche von den First Pulse Points der Laserscanbefliegungen, also den ersten Punkten, die bei der Überfliegung aufgenommen wurden (vgl. Abbildung 3.1). Auch hier wurde aus den unregelmäßig verteilten Daten automatisch ein regelmäßiges Gitter abgeleitet [fGuL].

Die Daten zur Versiegelung lagen ebenfalls im Rasterformat in einer 1 m-Auflösung vor. Sie beinhalten Angaben zur Versiegelung von 0 bis 100 %-Versiegelung in 10 %-Abständen. Allerdings sollte erwähnt werden, dass der Datensatz keine Versiegelungsstufen von 70 und 90 % aufwies.

Als Shapedateien lagen die Angaben zu den Gebäuden (wo sich Gebäude befinden) vor. Zusätzlich zu den bereits erwähnten Daten gab es 1x1 km-Orthophotos, die in ArcMap

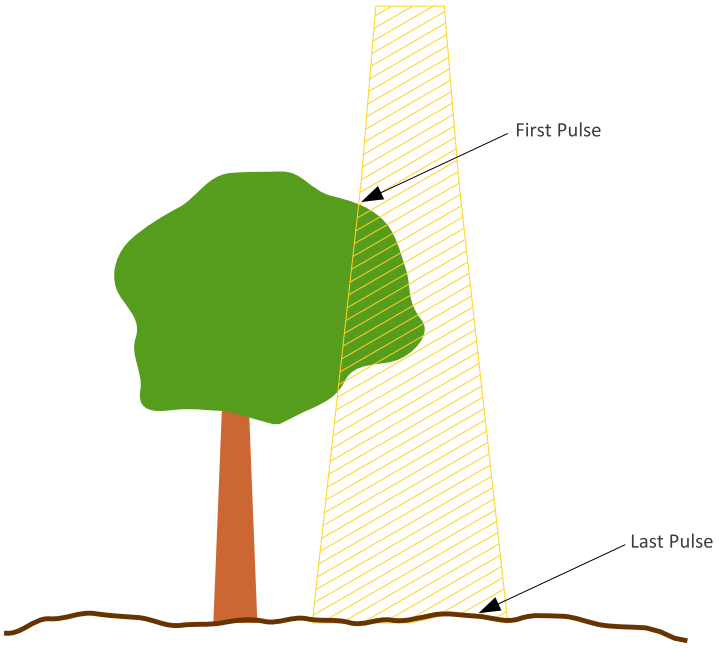

Abb. 3.1: *First Pulse Points und Last Pulse Points der Laserscanbefliegungen (nach [fGuL]).*

eingeladen werden konnten. Bei Orthophotos handelt es sich um entzerrte Luftbilder, die die Landschaft lagerichtig abbilden und in einem mindestens dreijährigen Turnus aufgenommen werden [fGuL].

3.1.2 Vorgehensweise

Die Analyse der GIS-Daten erfolgte nach den in Abbildung 3.2 dargestellten Schritten.

Zunächst wurden die Daten in ArcMap gesichtet. Um den Vegetationslayer zu erstellen, der Angaben zur Lage und Fläche der Vegetation macht, wurden von den jeweiligen Hochpixeln die Werte des DGM mithilfe des Raster Calculators abgezogen. Es konnte hierbei festgestellt werden, dass es einige Punkte gab, die laut dieser Ebene unter der Erdoberfläche lagen und so nicht stimmen konnten. Nach einer genaueren Betrachtung konnte festgestellt werden, dass es sich hierbei zwar teilweise auch um Vegetationspunkte handelte. Da diese allerdings nur vereinzelt zwischen anderen Bäumen auftraten, wurde angenommen, dass sie durch die Pufferung abgedeckt wurden und aus diesem Grund nicht weiter beachtet werden mussten.

Zur Eingrenzung des Höhenbereichs wurden im Anschluss alle Punkte unterhalb von

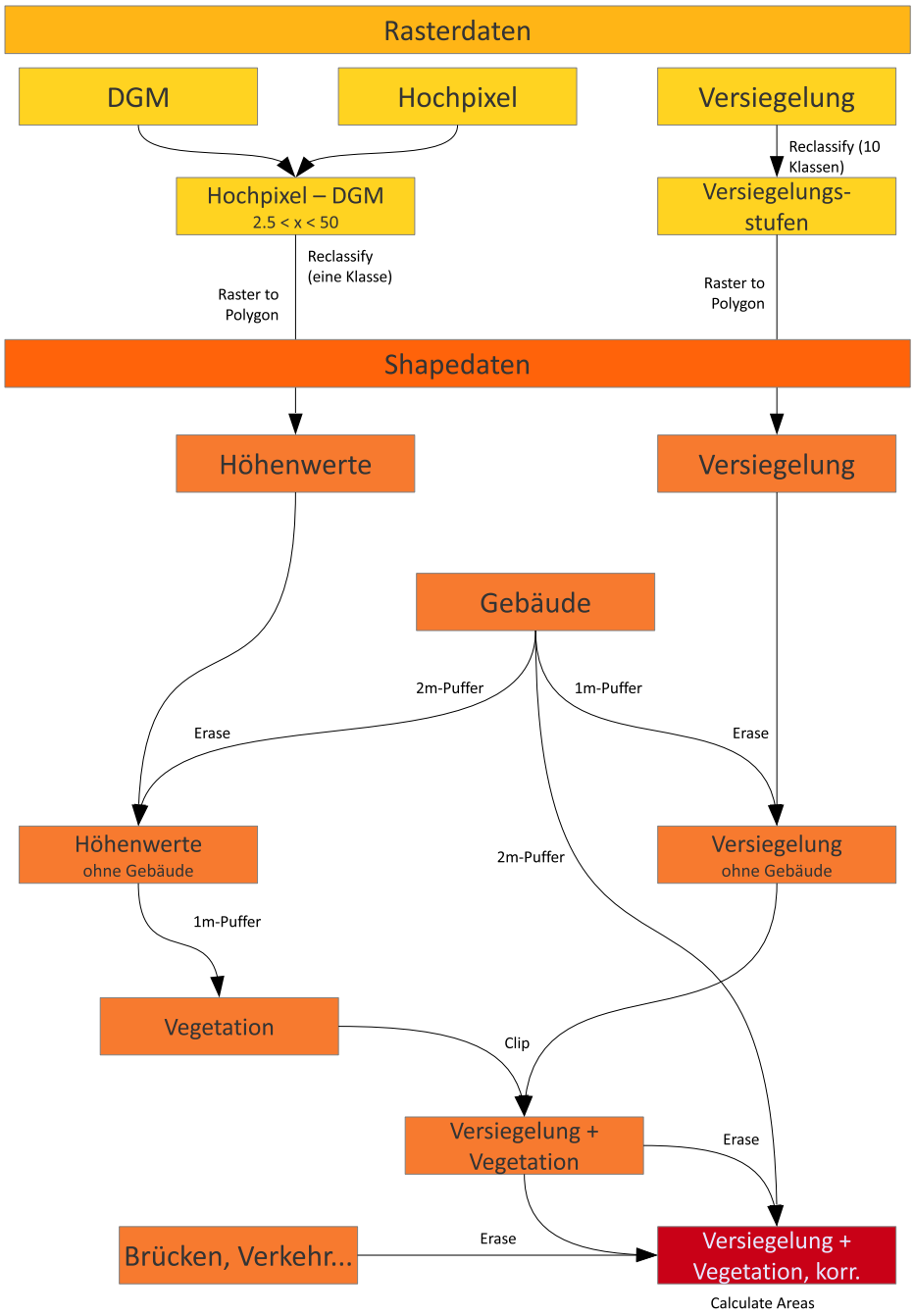

Abb. 3.2: *Fließdiagramm der Analyse in ArcGIS.*

2,5 m und oberhalb von 50 m entfernt, da es sich bei diesen Punkten nicht um Vegetation handelte. In einem weiteren Schritt wurden die Rasterpunkte reklassifiziert (in NoData und eine weitere Klasse, in der sich alle Punkte befanden), um sie schließlich in eine

Shapedatei umwandeln zu können.

Im Anschluss an die Umwandlung wurde dem ArcMap eine weitere Ebene hinzugefügt, die die Lage der Gebäude enthielt. Um diese wurde ein 2 m-Puffer gelegt und letztendlich von den in eine Shapedatei umgewandelten Höhendaten abgezogen, da in ihnen noch die Gebäude vorhanden waren.

Um anstelle der Höhenpunkte, die mit den LiDAR-Flügen während der Wintermonate aufgenommen wurden, baumkronenähnliche Strukturen zu erhalten, wurde die Puffer-Funktion von ArcMap genutzt und ein 1 m-Puffer um die Punkte erstellt.

Bei der Bearbeitung des Versiegelungsdatensatzes wurden gleich zu Beginn die Daten reklassifiziert und in eine Shapedatei umgewandelt. Im Anschluss daran wurden von den Versiegelungsflächen die Gebäude, um die ein Puffer von 1 m gelegt worden war, abgezogen. In einem letzten Schritt wurden die acht verschiedenen Versiegelungsflächen mit der Vegetation verschnitten. Im Anschluss wurden noch einmal die Gebäude herausgenommen, um auch wirklich nur die Versiegelungsflächen ohne die Gebäude zu erhalten.

Da die aus den First Pulse Points abgeleiteten Höhenwerte aber neben der Vegetation nicht nur Gebäude enthielten, sondern z.B. auch Brücken, Verkehrsteilnehmer und Hochspannungsleitungen, wurde eine weitere Shapedatei erstellt und die Stellen, an denen so etwas zu finden war, wurden digitalisiert. Anschließend wurde diese Ebene von der, welche die Versiegelungsflächen die von Vegetation beeinflusst wurden enthielt, abgezogen.

Um nun in Erfahrung zu bringen wie hoch der Anteil an von Vegetation beeinflussten Versiegelungsflächen in den einzelnen Stadtteilen ist, wurden die einzelnen Bezirke Freiburgs in einer Shapedatei digitalisiert. Eine Auflistung der Bezirke ist in Tabelle 3.1 zu finden. In Abbildung 3.3 sind die Bezirke mit den entsprechenden amtlichen Nummern dargestellt. Die Umrisse wurden noch einmal mit der Vegetationsebene verschnitten und die Flächen von reinen Versiegelungsflächen und Versiegelungsflächen, die von Vegetation beeinflusst sind, wurden berechnet.

Die weitere Auswertung der Daten erfolgte in R. Hierfür wurden die Attributtabellen aus dem ArcMap exportiert und anschließend ins R geladen. Die Berechnung des prozentualen Anteils der von Vegetation beeinflussten Versiegelungsflächen an den reinen Versiegelungsflächen erfolgte über einfachen Dreisatz (vgl. Gleichung 3.1).

$$z_{Veg} = \frac{F_{Veg}}{F_{Vers}} \cdot 100\% \tag{3.1}$$

mit:

F_{Vers} : Versiegelungsfläche $[km^2]$

F_{Veg} : Versiegelungsfläche, von Vegetation beeinflusst $[km^2]$

Tab. 3.1: *Untersuchte Stadtteile der Stadt Freiburg; wenn mehr als eine amtliche Nummer angegeben ist, wurden die Bezirke in der Analyse zusammen gelegt*

Stadtteil	Amtliche Nummer
Altstadt	111, 112
Neuburg	120
Herdern	211, 212
Zähringen	220
Brühl	231, 232
Waldsee	310
Littenweiler	320
Oberau	410
Oberwiehre	421
Mittelwiehre	422
Unterwiehre	423, 424
Stühlinger	511, 512, 513
Mooswald	521, 522
Betzenhausen	531, 532
Landwasser	540
Haslach	611, 612, 613, 614
St. Georgen	621, 622
Weingarten	660
Rieselfeld	670
Vauban	680

z_{Veg} : proz. Anteil [%]

3.2 Validierung des GIS-Modells

Um in Erfahrung zu bringen, wie gut das GIS-Modell der Realität entspricht wurde es validiert. Dies erfolgte auf zwei Arten. Zum einen über Orthophotos, zum anderen über Messungen des Abstandes des Baumstammes zum Beginn der Versiegelungsfläche.

3.2.1 Orthophotomethode

Bei der Orthophotomethode wurden die Orthophotos ins ArcMap eingeladen und für ausgewählte Bereiche Straßen und Vegetation digitalisiert. Die Straßen wurden mit den Versiegelungsflächen überschnitten um die so erhaltene Ebene im Anschluss wie in Abschnitt 3.1.2 mit den digitalisierten Vegetationsflächen zu verschneiden und das Ergebnis

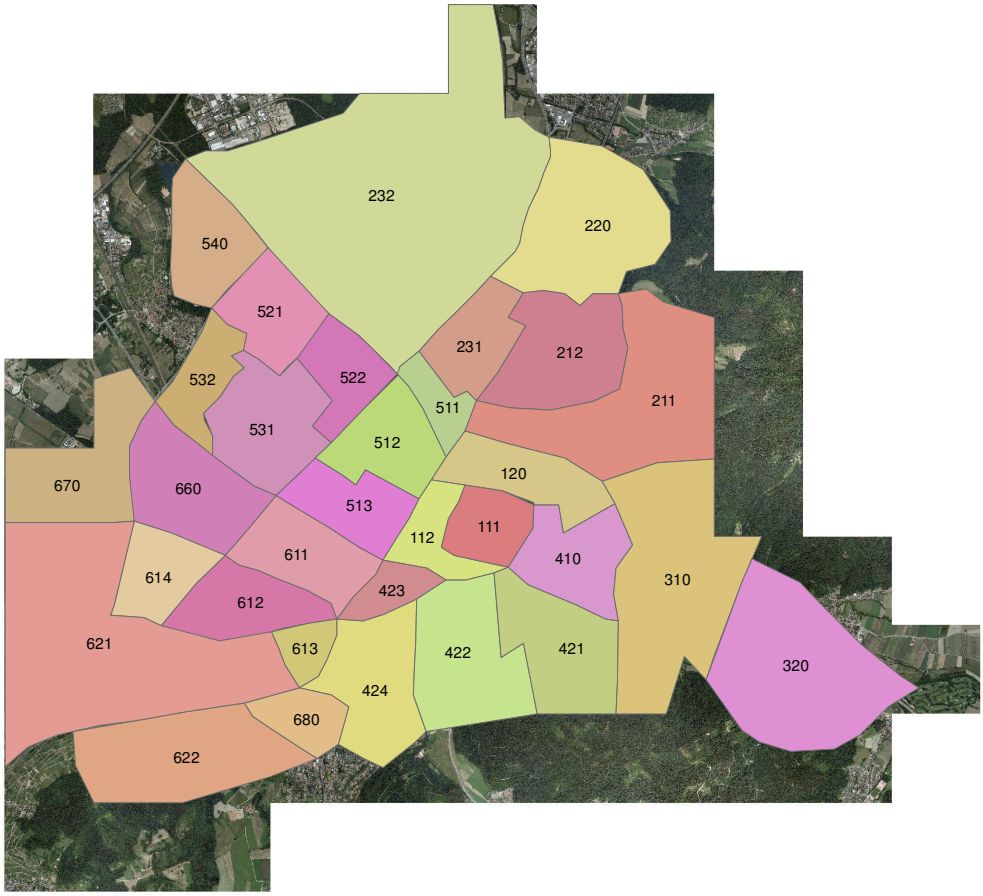

Abb. 3.3: *Betrachtete Stadtteile der Stadt Freiburg.*

auswerten zu können. Im Anschluss wurden die Flächen berechnet und die Attributtabelle für weitere Analysen in R exportiert.

Das gleiche Verfahren wurde auch auf einige rechteckige Gebiete im Stadtgebiet Freiburg angewandt. In Abbildung 3.4 sind die Lagen der rechteckigen Gebiete und der untersuchten Straßen zu erkennen. In Tabelle 3.2 sind die Straßen und deren Abkürzungen aufgeführt. In Tabelle 3.3 finden sich die Flächengrößen der Rechtecke.

3.2.2 h-r-Methode

Bei dieser Art der Validierung wird die Baumkrone idealisiert und davon ausgegangen, dass sie von oben gesehen wie ein Kreis aussieht. Die Messungen erfolgten wie in Abbildung 3.5 dargestellt für einige ausgewählte Straßen.

Bei dieser Methode werden der Abstand h vom Baumstamm zum Beginn der Versiegelungsfläche und der Radius r der Baumkrone gemessen. Mit Hilfe der Gleichung 3.2 kann der Winkel α berechnet werden.

Abb. 3.4: *Validierungsbereiche für das GIS-Modell innerhalb der Stadt Freiburg.*

$$\alpha = 2 \cdot (arccos(\frac{h}{r})) \tag{3.2}$$

mit:

α : Mittelpunktswinkel [°]

h : Abstand vom Mittelpunkt zur α gehörende Sehne [m]

r : Radius [m]

Wurde α errechnet, kann die Fläche des Kreisabschnitts anhand der Gleichung 3.3 berechnet werden.

$$F_{Veg} = \frac{r^2}{2} \cdot (\frac{\pi \cdot \alpha}{180} - sin\alpha) \tag{3.3}$$

Tab. 3.2: *Auflistung der Validierungsabschnitte (Straßen)*

Bezeichnung	Straße
211212RW1	Richard-Wagner-Straße
211212RW2	Richard-Wagner-Straße
211212S1	Schlüsselstraße
211212S2	Schlüsselstraße
211212120W1	Weiherhofstraße
120S1	Stadtstraße
211212O	Okenstraße
211212Hae1	Händelstraße
211212Sa1	Sautierstraße
611612613614Fbs01	Feldberstraße
611612613614Bla01	Blauenstraße
421Hilda01	Hildastraße
421FS01	Falkensteinstraße
422Schef01	Scheffelstraße
421DK01	Dreikönigstraße
532521HA01	Hofackerstraße
680VA01	Vaubanallee
680VA02	Vaubanallee
410OA01	Oberau
410MueS01	Mühlenstraße
410F01	Fabrikstraße
211212HK01	Hinterkirchstraße
220RBW01	Rötebuckweg
220FBS01a	Fillibachstraße

mit:

F_{Veg} : Fläche des Kreisabschnitts $[m^2]$

r : Radius $[m]$

α : Mittelpunktswinkel $[°]$

Anhand der Breite x und der Länge y der zu untersuchenden Fläche kann die Größe dieser Fläche F_{Vers} bestimmt werden und durch Gleichung 3.1 somit der prozentuale Anteil der von der Vegetation beeinflussten Flächen an der gesamten Versiegelungsfläche.

Tab. 3.3: *Auflistung der Validierungsabschnitte (Rechtecke)*

Bezeichnung	**Größe** $[m^2]$
val001	90377,957
val002	53379,093
val003	64979,708
val004	123087,444
val005	222161,902
val006	166714,248
val007	342536,452
val008	302705,832
val009	422004,357
val010	437552,007
val011	454386,800
val012	213605,672
val013	214879,462
val014	107287,542
val015	196384,464
val016	232023,232
val017	163715,592
val018	213832,611
val019	163715,592
val020	163715,592
val021	62739,082
val022	179678,791
val023	134016,619
val024	163715,592
val025	163715,592
val026	213832,611
val027	134016,619

3.3 Klimadaten Vauban

3.3.1 Datengrundlage

Um nun in Erfahrung zu bringen, wie groß die Auswirkungen der Vegetation auf den Regenwasserabfluss sind, wurden Daten einer Klimastation im Stadtteil Vauban ausgewertet. Die Wetterstation Vaub02 steht auf dem Dach der Gerda-Weiler-Straße 38. Eine Auflistung der Module, aus der sie besteht, findet sich in Tabelle 3.4. Des Weiteren gab es Bestandsniederschlagsdaten, die durch Niederschlagswippen mit Rinnen unter drei

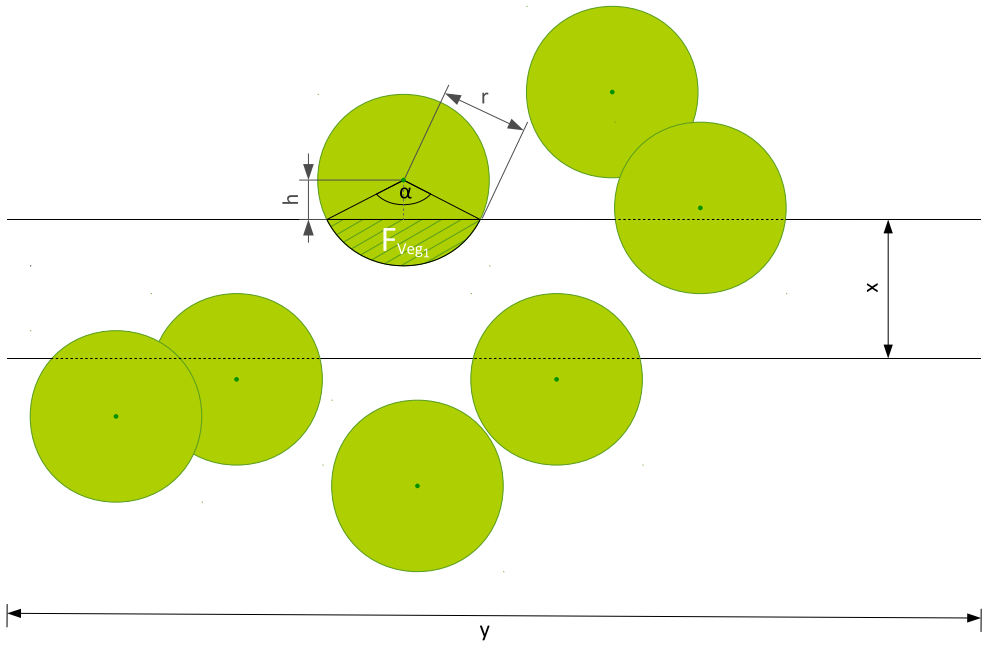

Abb. 3.5: *Validierung des GIS-Modells mithilfe von Radius r und Abstand h.*

Baumarten gemessen wurden. Bei den drei Baumarten handelt es sich um Tanne, Linde und Platane. Die Niederschlagswippe der Wetterstation war im Winter beheizt, sodass auch Niederschlag in Schneeform gut erfasst werden konnte. Die Wippen unter der Vegetation waren allerdings nicht beheizt, was bedeutet, dass der Schnee nicht sinnvoll erfasst werden konnte. Aus diesem Grund wurden Ereignisse, während denen Niederschlag als Schnee gefallen ist, aus der Analyse herausgenommen.

Tab. 3.4: *Module der Wetterstation Vaub02*

Parameter	Einheit	Modul
Niederschlag	$[mm]$	R. M. Young Kippwaagenregenmesser beheizt 0,1 mm Auflösung
Lufttemperatur	$[°C]$	Campbell Scientific CS215 Feuchte-Temperatursensor
relative Luftfeuchte	$[\%]$	
Windrichtung	$[°]$	WindSonic 2-D Ultraschall-Anemometer und Windrichtungsgeber
Windgeschwindigkeit	$[m/s]$	
Globalstrahlung	$[W/m^2]$	CS300 Apogee SI-Fotodioden Pyranometer

Die Werte liegen in minütlicher Auflösung vor. Bei den Niederschlagsdaten handelt es sich um Summen, bei der relativen Luftfeuchte um den Maximalwert, bei der Windrichtung um den Momentwert und bei Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und Global-

strahlung liegt der Mittelwert vor.

Die Zeitreihe beginnt am 08. Juni 2011 und endet am 21. Juli 2012. Die Niederschlagsdaten bis zum 31. Dezember 2011 waren auf Plausibilität geprüft, ab dem 31. Dezember 2011 lagen die Rohdaten vor, welche noch geprüft werden mussten.

3.3.2 Vorgehensweise

Die Daten des Bestandsniederschlags und die Daten der Klimastation wurden zunächst in R eingeladen und einer ersten Sichtung unterzogen. Im Anschluss wurden die monatlichen Niederschlagssummen und die monatlichen Mitteltemperaturen gebildet, um einen ersten Überblick über den Untersuchungszeitraum und dessen klimatische Beschaffenheit zu erhalten.

In einem weiteren Schritt wurden die Daten auf Basis von Niederschlagsereignissen untersucht. Niederschlagsereignisse waren hierbei Niederschläge, die eine Niederschlagssumme von mindestens 1 mm beim Freilandniederschlag aufweisen konnten und die zwischen den Ereignissen einen Zeitraum von mindestens 6 Stunden ohne Niederschlag hatten [Pie80, Har77]. Von den Ereignissen wurden die Niederschlagssummen, die Dauer und die Intensitäten gebildet und in Klassen eingeteilt. Eine Klasseneinteilung findet sich in Tabelle 3.5.

Tab. 3.5: *Klasseneinteilung für Summe, Dauer und Intensität der Niederschlagsereignisse*

Niederschlagssumme [mm]	**Dauer** [h]	**Intensität** [mm/h]
<5	<1	<6
5 - 10	1 - 2	6 - 12
10 - 20	2 - 3	12 - 24
20 - 30	3 - 6	24 - 36
30 - 40	>6	36 - 46
>40		>46

Um nun noch zu untersuchen, was für Unterschiede es in der Niederschlagscharakteristik von Sommer und Winter gibt, wurden die Niederschlagsereignisse auf Wintermonate (November bis März) und Sommermonate (April bis Oktober) aufgeteilt.

In einem weiteren Schritt wurden die Auswirkungen der Vegetation auf die Niederschlagscharakteristik untersucht. Hierfür wurden wieder Niederschlagsereignisse gebildet. Da hier allerdings auch der Bestandsniederschlag Einfluss auf die Ergebnisse hatte, wurden alle Werte herausgenommen, in denen die Temperatur unter 4 $°C$ lag, da zu diesen

Zeiten wahrscheinlich Schnee gefallen war und dieser unter der Vegetation nicht richtig gemessen werden konnte.

In diesem Abschnitt wurden zunächst die Niederschlagsintensitäten der Ereignisse für die drei verschiedenen Baumarten und deren Mittelwert betrachtet. Um zu erfahren, wie sich die Intensitäten unterhalb der Vegetation von denen des Freilandniederschlags unterscheiden, wurden sie gegeneinander aufgetragen und in R eine lineare Regression durchgeführt. Im weiteren Verlauf erfolgte hier eine Aufteilung in Sommer- und Wintermonate. Für die Niederschlagssummen der Ereignisse wurde ebenfalls so verfahren.

In einem letzten Schritt wurde untersucht, wie hoch die prozentualen Anteile der Intensitäten bzw. Niederschlagssummen unterhalb der Vegetation an denen des Freilandniederschlags sind und wie stark die Vegetation die unterschiedlichen Intensitäten bzw. Niederschlagssummen abpuffern kann.

Im letzten Teil der Arbeit wurden die Interzeptionsverluste genauer betrachtet. Hierfür wurden die monatlichen und stündlichen Niederschlagssummen von Freiland- und Bestandsniederschlag untersucht und die prozentualen Anteile des Bestandsniederschlags bzw. des Interzeptionsverlustes I_C am Freilandniederschlag gebildet. Dies geschah über einfachen Dreisatz.

Kapitel 4

Ergebnisse und Diskussion

4.1 GIS-Modell

In Abbildung 4.1 ist exemplarisch für den gesamten Untersuchungsbereich ein Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet zu sehen. Es handelt sich hierbei um ein Gebiet im Bezirk Herdern, im Zentrum des Ausschnitts befindet sich der Botanische Garten, zusätzlich wurde noch die Habsburgerstraße hervorgehoben.

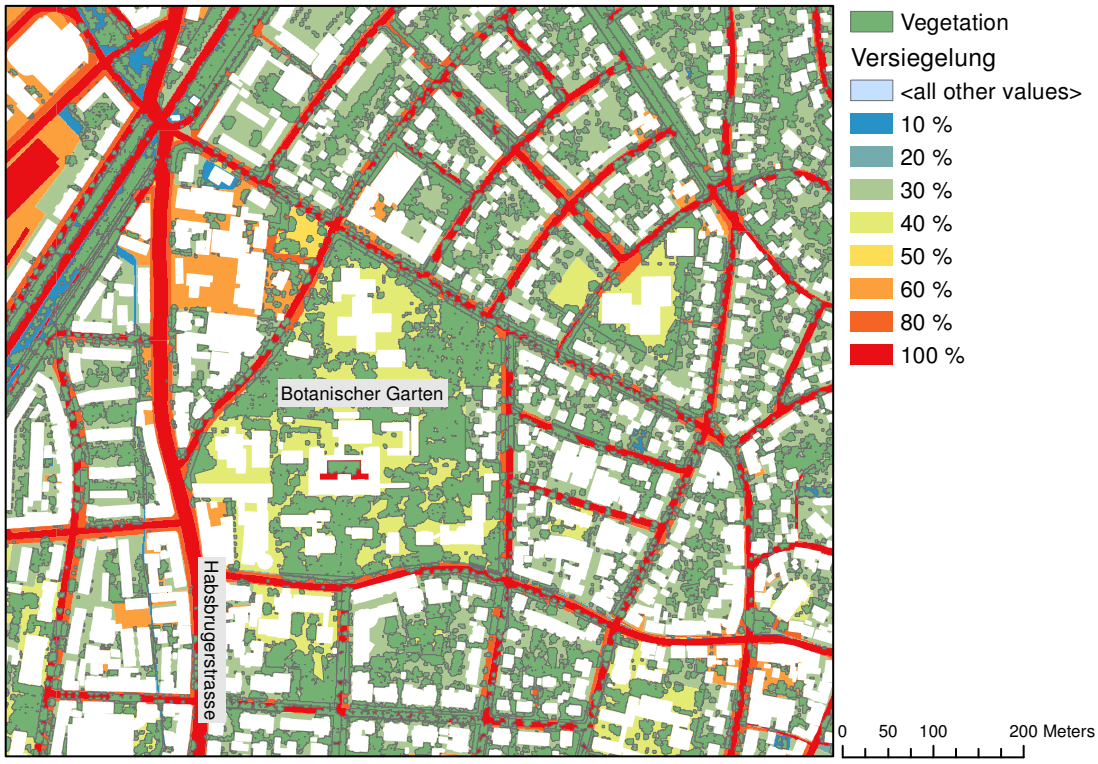

Abb. 4.1: *Von Vegetation beeinflusste versiegelte Flächen im Stadtteil Herdern (Ausschnitt).*

Bei den dunkelgrünen Flächen handelt es sich um die Vegetation, die andersfarbigen Flächen stehen für die unterschiedlichen Versiegelungsstufen.

In Tabelle B.2 sind die anhand des GIS-Modells berechneten Flächen der von der Vegetation beeinflussten Versiegelungsflächen im Stadtgebiet der Stadt Freiburg im Breisgau

zu erkennen. Es sind die verschiedenen Versiegelungsstufen und die jeweiligen Parameter angegeben. Bei F_{Vers} handelt es sich um die gesamte Fläche, welche von der jeweiligen Versiegelungsstufe in dem Bereich eingenommen wird, bei F_{Veg} um die Fläche, die von Vegetation beeinflusst wird und z_{Veg} ist der Anteil von F_{Veg} an F_{Vers}.

In Abbildung 4.2 sind diese Werte dargestellt. Auf der Abszisse sind die einzelnen Versiegelungsstufen von 10 bis 100 % zu erkennen, auf der Ordinate die Anteile der von der Vegetation beeinflussten Versiegelungsfläche an der Gesamtfläche der jeweiligen Versiegelungsstufen.

Grob können die verschiedenen Verläufe in 4 bzw. 5 Gruppen aufgeteilt werden; eine Gruppe mit zwei Hochs (bei 50 und 80 %), welche in Abbildung 4.2a zu erkennen ist, und eine Gruppe mit einem Hoch bei den niedrigeren Versiegelungsstufen und einem Tief bei 80 % (Abbildung 4.2b). Bei einer weiteren Gruppe sieht der Verlauf mit zwei Hochs gleichmäßiger aus (Abbildung 4.2c) und bei der vierten Gruppe findet sich das Hoch bei 80 und das Tief bei 50 %.

Des Weiteren wurden die Verläufe von vier weiteren Bezirken zusammengefasst, da sich deren Verläufe in Vergleich zu den anderen auf einem niedrigeren Niveau befinden und keine charakteristischen Formen aufweisen (Abbildung 4.2e). In Abbildung 4.2f können die Werte für z_{Veg} vom Stadtbezirk Rieselfeld und von Oberwiehre erkannt werden. Diese wurden extra aufgeführt, da die Werte niedrig sind und eine Lücke bei der Versiegelungsstufe von 60 % aufweisen (670) bzw. einen sehr niedrigen Wert bei der Versiegelungsstufe von 20 % (421).

Im letzten Schritt wurden die prozentualen Anteile der von Vegetation beeinflussten Flächen an der Gesamtfläche der jeweiligen Bezirke betrachtet, welche in der letzten Spalte der Tabelle B.2 zu finden sind. In Abbildung 4.3 finden sich diese prozentualen Anteile grafisch dargestellt. Die Farben stehen für verschiedene Klassen, die in der Legende aufgeführt sind.

Anhand der Abbildung kann erkannt werden, wie groß die Spannweite von z_{Veg} ist. Es zeigte sich, dass es im Bezirk Littenweiler prozentual die meiste Vegetation gibt (35,143 %) und in Mooswald den geringsten Anteil an Vegetation (5,193 %). Mit Ausnahme des Altstadtbezirks liegen die Bezirke mit einem prozentualen Vegetationsanteil von kleiner als 10 bzw. zwischen 10 und 15 % im Westen der Stadt, während sich im Osten die Stadtteile befinden, die einen prozentualen Anteil von mehr als 15 % aufweisen.

Abschließend kann gesagt werden, dass 12,125 % der versiegelten Flächen in Freiburg von Vegetation beeinflusst werden.

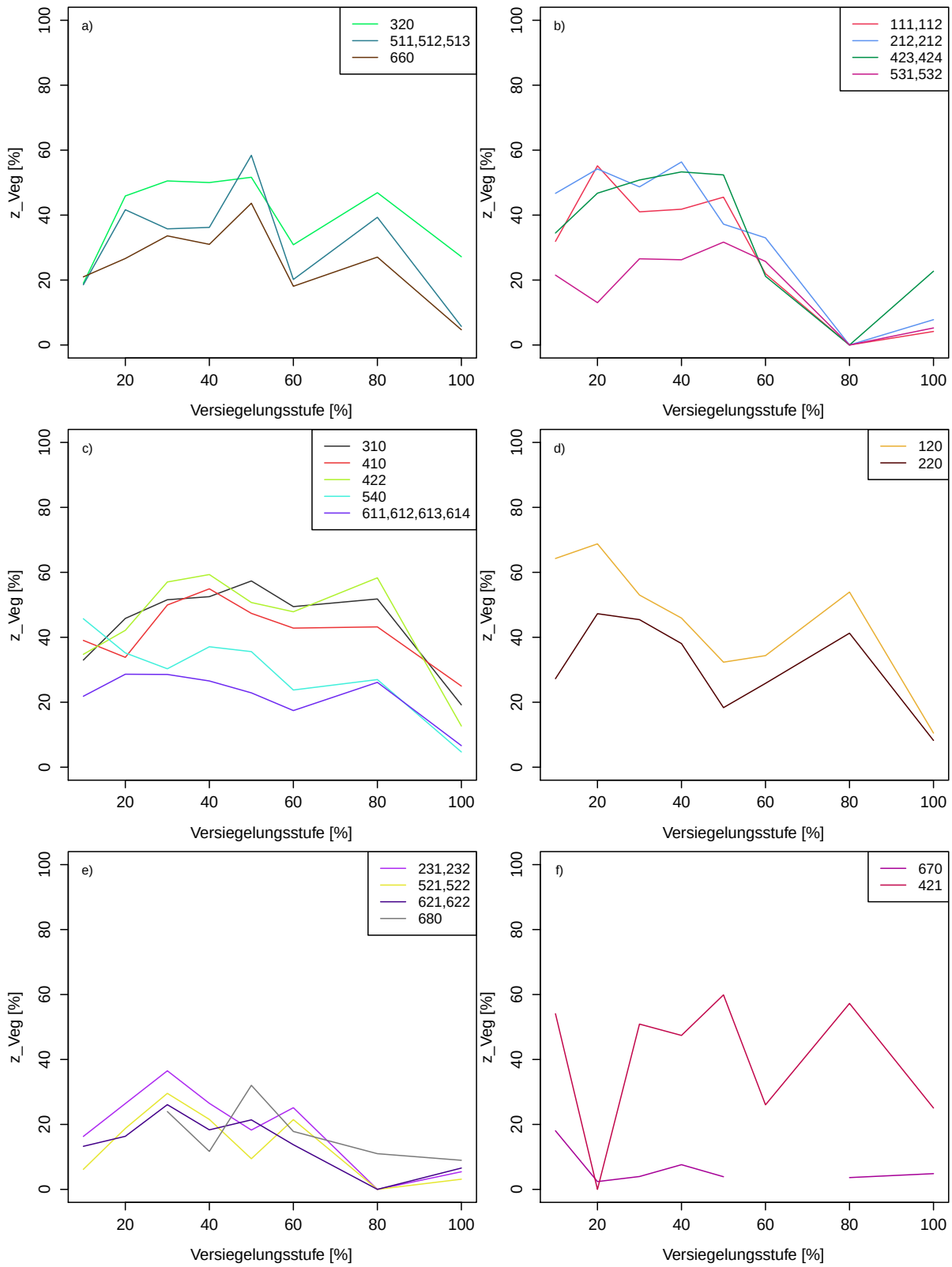

Abb. 4.2: *Anteile der versiegelten Flächen in den untersuchten Bezirken.*

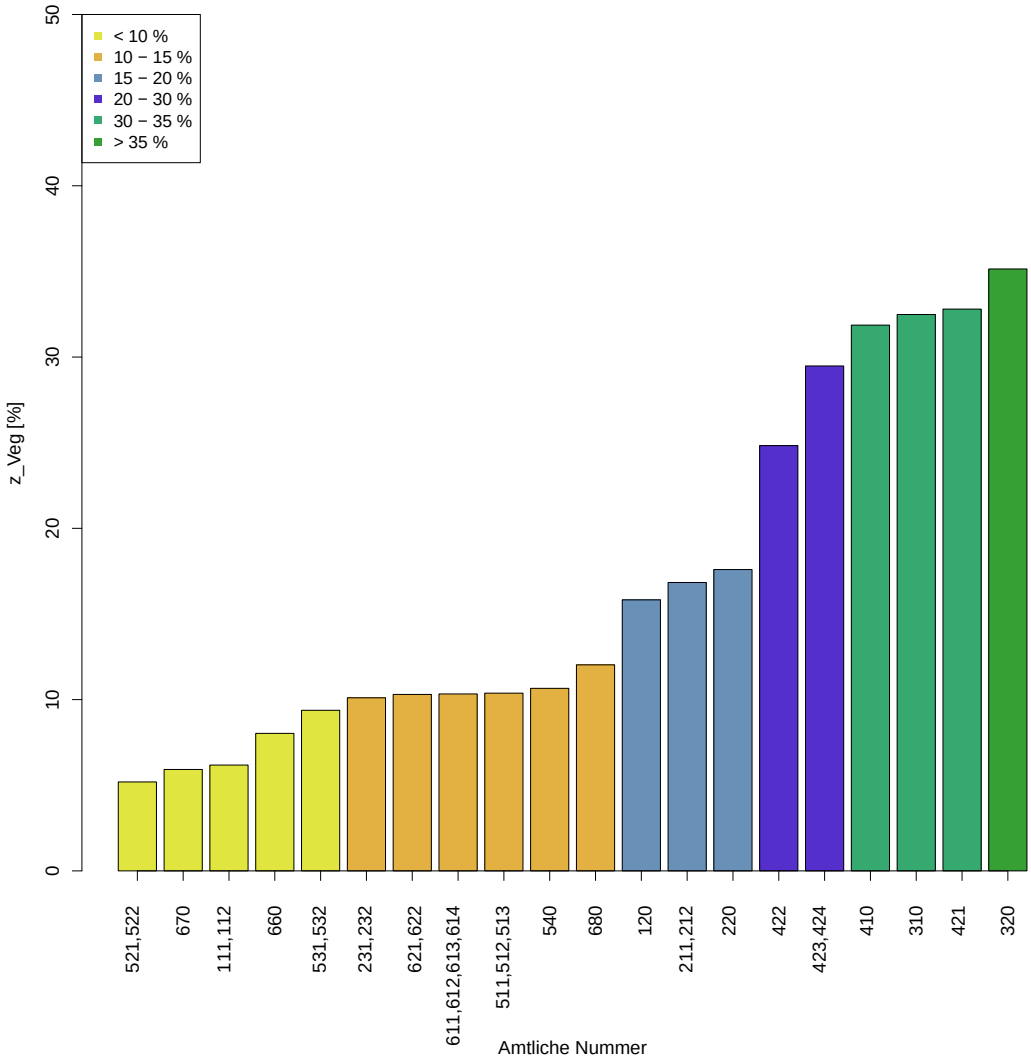

Abb. 4.3: *Anteile der Versiegelungsflächen der Bezirke, die von Vegetation beeinflusst sind.*

4.2 Validierung des GIS-Modells

4.2.1 Orthophotomethode

Für die Validierung mit der Orthophotomethode wurde für die in den Tabellen 3.2 und 3.3 aufgeführten Gebiete die Vegetation digitalisiert. In Abbildung 4.4 ist exemplarisch für diese Bereiche der Abschnitt val020, welcher in den Bezirken Mooswald-Ost (522) und Stühlinger-Eschholz (512) liegt, zu sehen. In dieser Abbildung können die Vegetationsflächen aus dem GIS-Modell erkannt werden. Allerdings wurden zusätzlich die anhand der Orthophotos digitalisierten Vegetationsflächen mit einer Transparenz von 50 % über diese Ebene gelegt, sodass GIS-Modell und Validierung auf optischer Basis verglichen werden

können. Die Vegetationsflächen sind in grün gehalten, bei den andersfarbigen Flächen handelt es sich auch hier um die unterschiedlichen Versiegelungsstufen.

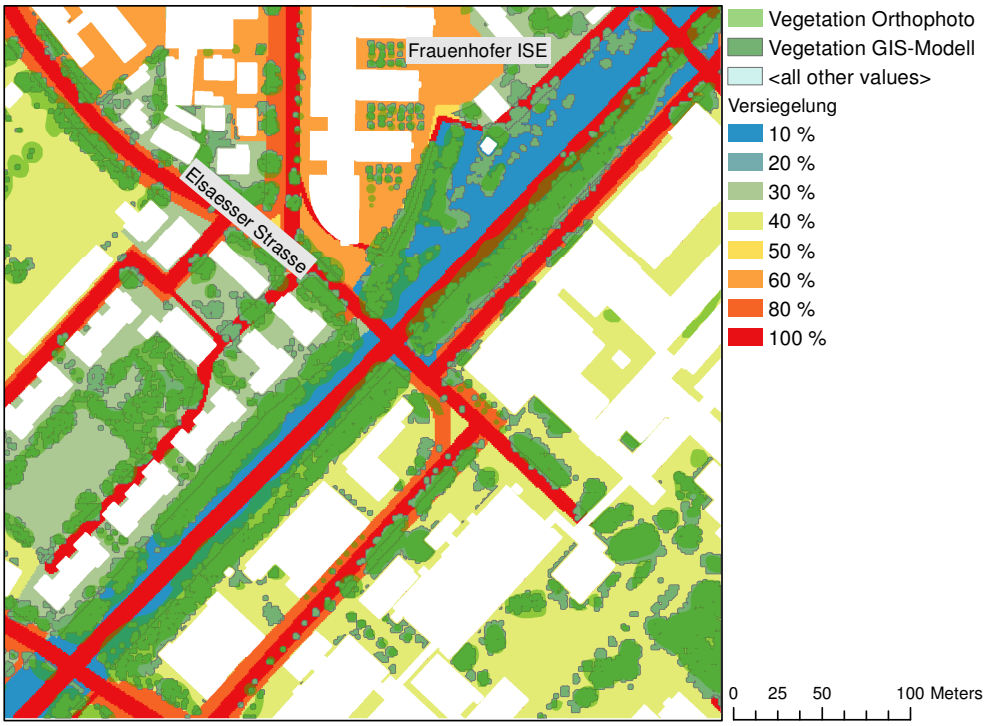

Abb. 4.4: *Per Hand digitalisierte und GIS-Modell-Vegetationsflächen im Bereich val020.*

Es kann hier erkannt werden, dass das GIS-Modell an manchen Stellen Vegetation eingefügt hat, an denen im Vergleich zu den Orthophotos keine vorhanden ist (an manchen Gebäudeecken). Allerdings finden sich auch Flächen, auf denen die Vegetation des GIS-Modells im Vergleich zu den Orthophotos geringer ausfällt (im Nordwesten des Ausschnitts oder auch südlich des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme).

In Tabelle 4.1 sind die anhand der Orthophotomethode berechneten Flächen der von der Vegetation beeinflussten Versiegelungsflächen im Stadtgebiet der Stadt Freiburg im Breisgau zu erkennen. Zum besseren Vergleich sind zusätzlich die Flächengrößen der anhand des GIS-Modells berechneten Flächen für diese Abschnitte aufgeführt. Hervorgehoben wurden hierbei die Straßenabschnitte, bei denen der Unterschied zwischen $z_{Veg_{GIS}}$ und $z_{Veg_{orth}}$ mindestens 15 Prozentpunkte betrug.

Auch anhand dieser Tabelle kann erkannt werden, dass die Vegetation, die vom GIS-Modell berechnet wurde, im Vergleich zu der der Orthophotos in manchen Gebieten über-, in anderen Gebieten aber unterschritten wird. Allerdings liegt eine Überschätzung der Vegetation durch das GIS-Modell häufiger vor als eine Unterschätzung.

Tab. 4.1: *Anteile der versiegelten Flächen in den untersuchten Straßen (mit dem GIS-Modell berechnet und mit den Orthophotos validiert)*

Abschnitt	F_{Vers} $[m^2]$	$F_{Veg_{GIS}}$ $[m^2]$	$z_{Veg_{GIS}}$ [%]	$F_{Veg_{orth}}$ $[m^2]$	$z_{Veg_{orth}}$ [%]
Richard-Wagner-Str. (1)	1953,299	461,401	23,622	507,705	25,992
Richard-Wagner-Str. (2)	5294,199	3783,158	71,459	3578,496	67,593
Schlüsselstr. (1)	2052,877	966,706	**47,090**	648,486	**31,589**
Schlüsselstr. (2)	2028,607	789,734	38,930	841,484	41,481
Weiherhofstr.	1894,863	1607,487	84,834	1371,416	72,375
Stadtstr.	3379,578	1250,057	**36,989**	674,260	**19,951**
Sautierstr.	3542,797	1463,600	41,312	1337,545	37,754
Okenstr.	5845,756	2706,767	46,303	2242,623	38,363
Händelstr.	5640,064	4296,198	76,173	4188,547	74,264
Feldbergstr.	3174,232	919,572	**28,970**	2050,839	**64,609**
Blauenstr.	3231,148	359,310	11,120	431,379	13,351
Hildastr.	1771,661	1424,229	80,389	1234,259	69,667
Falkensteinstr.	1747,150	817,459	46,788	580,015	33,198
Scheffelstr.	1581,339	1057,396	**66,867**	655,700	**41,465**
Dreikönigstr.	828,288	324,712	39,203	206,457	24,926
Hofackerstr.	5481,122	566,930	10,343	763,599	13,931
Im Rehwinkel	3304,021	698,673	21,146	622,651	18,845
Vaubanallee (1)	1942,716	243,759	12,547	315,547	16,243
Vaubanallee (2)	10261,648	296,163	2,886	424,132	4,133
Oberau	3438,495	2466,873	**71,743**	1853,652	**53,909**
Mühlenstr.	602,328	249,122	41,360	208,225	34,570
Fabrikstr.	473,163	292,281	**61,772**	152,092	**32,144**
Hinterkirchstr.	1645,995	203,928	12,389	370,581	22,514
Rötebuckweg	2799,457	465,629	16,633	304,696	10,884
Fillibachstr.	2498,496	268,000	10,726	107,463	4,301

In Abbildung 4.5 ist ein Vergleich des GIS-Modells und der Orthophotomethode für die jeweiligen Untersuchungsabschnitte bei einer Versiegelung von 100 % zu sehen. Die anderen Versiegelungsstufen finden sich in den Abbildungen A.1 und A.2, welche im Anhang zu finden sind. Neben den Werten wurden zusätzlich noch eine Gerade, welche die Punkte am besten beschreibt (blau) und die Linie der perfekten Anpassung (d.h. die Linie, die sich ergeben würde, wenn die Werte des GIS-Modells denen der Validierung entsprächen) in schwarz eingezeichnet. Die Gerade, die den Verlauf der Punkte beschreibt, hat ein Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,7809, mit ihr können also 78,09 % der Punkte erklärt werden.

Die Formel für die Gerade ist in Gleichung 4.1 zu sehen.

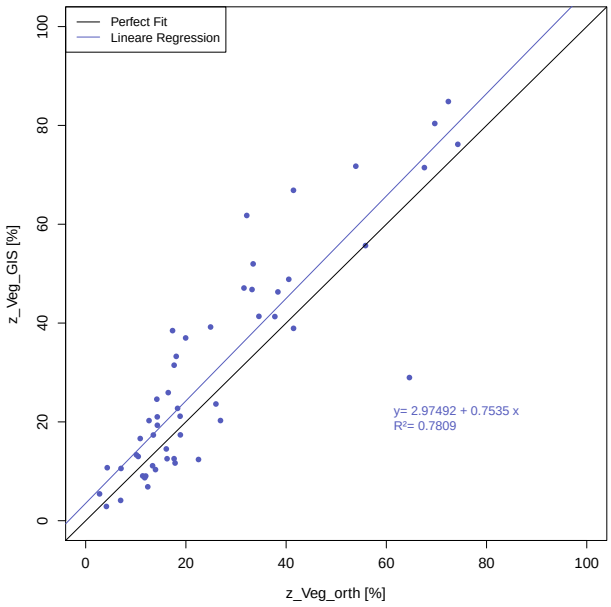

Abb. 4.5: *Unterschiede des GIS-Modells und der Orthophotomethode für die 100 %-Versiegelungsflächen (Straßen und Rechtecke).*

$$y = 0,75350 \cdot x + 2,97492 \tag{4.1}$$

Die Gerade liegt in diesem Abschnitt über der des perfekten Verlaufs und schneidet die y-Achse bei 2,97492 %. Es kann also gesagt werden, dass die anhand des GIS-Modells abgeleitete Vegetation in den untersuchten Bereichen im Durchschnitt überschätzt wird.

In den Tabellen 4.2 und 4.3 können die Anteile der von Vegetation beeinflussten Versiegelungsflächen am gesamten Ausmaß der Versiegelungsflächen in den rechteckigen Validierungsgebieten erkannt werden. In Tabelle 4.2 finden sich die Werte der von Hand digitalisierten Flächen, in Tabelle 4.3 die des GIS-Modells für die jeweiligen Flächen. Wieder wurden Werte, bei denen es eine Abweichung zwischen $z_{Veg_{GIS}}$ und $z_{Veg_{orth}}$ von mehr als 15 Prozentpunkten gibt, hervorgehoben.

Wie bereits im Vergleich von $z_{Veg_{GIS}}$ und $z_{Veg_{orth}}$ anhand der Abbildungen 4.4 und 4.5 und durch die Tabelle 4.1 kann auch hier erkannt werden, dass das GIS-Modell höhere Werte ausgibt als die Validierung durch die Orthophotomethode (im Gebiet val016 liegen die Werte für die Flächen mit 50 %-Versiegelung 72,629 Prozentpunkte auseinander). Allerdings kann auch bemerkt werden, dass es an manchen Stellen die Daten der Validierung unterschreitet (im Gebiet val019 liegt bei 50 %-Versiegelung ein Unterschied von 40,228 Prozentpunkten vor).

Sowohl aus den Daten der Orthophotomethode als auch aus denen des GIS-Modells wurden im weiteren Verlauf der Analyse Mittelwerte der jeweiligen Versiegelungsstufen

Tab. 4.2: *Anteile der von Vegetation beeinflussten Flächen der verschiedenen Versiegelungsstufen in den Validierungsgebieten (Orthophotovalidierungsdaten)*

	Versiegelungsstufe [%]							
Gebiet	100	80	60	50	40	30	20	10
val001	14,199	21,612	**8,107**	**7,280**	31,984	32,444	NA	0,000
val002	40,531	56,871	NA	NA	68,283	59,502	NA	100,000
val003	14,302	17,197	25,446	**31,426**	23,742	36,636	NA	80,399
val004	10,113	35,792	11,911	NA	24,606	21,122	39,010	26,945
val005	17,651	**28,308**	39,612	NA	NA	**31,223**	32,849	18,772
val006	11,378	29,449	**35,972**	91,502	36,809	44,382	NA	40,821
val007	14,284	30,412	20,360	**37,637**	52,504	32,725	63,203	33,222
val008	7,050	25,921	13,766	12,993	NA	**12,529**	NA	4,555
val009	16,473	35,875	34,024	NA	34,764	**33,822**	22,907	19,650
val010	6,976	29,129	11,587	31,250	33,873	19,868	0,000	21,852
val011	17,643	42,693	34,808	12,089	27,302	34,313	**55,958**	**36,924**
val012	26,900	**63,637**	**13,840**	0,000	42,478	41,619	**50,705**	23,622
val013	17,841	36,361	13,030	**88,199**	39,720	44,598	NA	77,159
val014	55,842	58,902	57,840	NA	**48,479**	50,822	NA	74,747
val015	**18,068**	**40,393**	NA	NA	**34,159**	**36,331**	NA	60,989
val016	18,340	23,037	3,305	**20,323**	19,206	23,301	29,362	9,711
val017	12,643	20,163	19,841	48,347	24,573	**17,356**	50,998	29,431
val018	11,982	15,607	17,125	25,839	23,746	31,187	37,409	17,158
val019	**33,418**	53,379	20,462	**72,969**	43,934	**32,207**	46,424	54,274
val020	16,089	31,365	13,900	41,181	31,080	39,268	NA	51,057
val021	13,503	24,945	7,313	NA	42,669	23,911	NA	**18,690**
val022	12,391	**32,816**	12,872	NA	NA	18,714	NA	7,989
val023	11,781	10,484	23,222	57,962	NA	22,577	NA	27,160
val024	18,895	35,362	NA	NA	38,708	26,303	NA	50,237
val025	2,769	33,128	10,592	8,094	0,000	NA	NA	**64,002**
val026	10,488	29,777	9,077	39,659	NA	16,993	NA	21,967
val027	**17,337**	**41,415**	NA	NA	NA	36,237	NA	**54,110**
Mittelwert	17,366	33,483	19,914	36,868	34,410	31,538	38,984	37,979

gebildet. In Abbildung 4.6 finden sich diese Mittelwerte. Des Weiteren kann eine graue Linie erkannt werden, welche die Abweichung des GIS-Modells von der Orthophotomethode widerspiegelt. Werte über 0 % zeigen an, dass der Wert von der Orthophotomethode für die jeweilige Versiegelungsstufe durch das GIS-Modell unterschritten wurde, Werte kleiner als 0 % weisen auf eine Überschreitung hin.

Zum Schluss kann noch gesagt werden, dass der prozentuale Anteil der Fläche, die von

Tab. 4.3: *Anteile der von Vegetation beeinflussten Flächen der verschiedenen Versiegelungsstufen in den Validierungsgebieten (GIS-Modelldaten)*

	Versiegelungsstufe [%]							
Gebiet	100	80	60	50	40	30	20	10
val001	24,592	35,768	**27,280**	**25,335**	32,939	40,368	NA	0,000
val002	48,858	67,226	NA	NA	71,833	66,435	NA	99,924
val003	19,316	25,298	22,605	**54,397**	26,508	43,411	NA	80,476
val004	13,331	33,521	16,658	NA	24,105	27,085	47,527	26,062
val005	31,473	**47,352**	47,681	NA	NA	**49,957**	40,999	23,805
val006	9,067	20,468	**21,224**	47,045	27,464	30,843	NA	34,337
val007	21,015	40,100	26,447	**53,629**	61,639	43,244	64,655	36,703
val008	10,578	35,144	14,412	18,021	NA	**33,081**	NA	2,197
val009	25,924	47,763	42,539	NA	41,620	**48,784**	33,393	23,843
val010	4,110	16,834	9,596	20,830	27,556	24,157	0,000	22,153
val011	12,552	32,196	28,522	8,881	19,725	28,981	**36,056**	**21,994**
val012	20,272	**44,709**	**30,381**	0,000	37,126	33,552	**34,676**	23,765
val013	11,672	28,757	11,747	**48,752**	29,345	31,583	NA	**41,298**
val014	55,676	70,737	68,636	NA	**64,627**	63,351	NA	65,132
val015	**33,259**	**59,285**	NA	NA	**50,751**	**53,639**	NA	69,695
val016	22,739	28,024	3,896	**92,848**	19,187	27,014	35,840	8,970
val017	20,260	28,639	20,140	34,672	34,168	**34,811**	64,490	37,414
val018	9,043	15,032	15,833	21,148	18,755	38,468	27,412	12,282
val019	**51,976**	63,826	25,464	**32,741**	49,729	**50,525**	56,200	51,739
val020	14,526	31,751	12,512	48,604	31,547	39,920	NA	45,793
val021	17,343	33,828	8,804	NA	44,329	28,099	NA	**57,119**
val022	6,860	**14,935**	7,916	NA	NA	17,871	NA	7,819
val023	8,699	12,785	15,732	39,119	NA	22,093	NA	16,870
val024	17,371	29,694	NA	NA	27,988	30,655	NA	36,136
val025	5,429	43,089	12,177	3,429	1,109	NA	NA	**48,656**
val026	12,999	37,311	12,046	36,177	NA	22,112	NA	14,605
val027	**38,469**	**57,659**	NA	NA	NA	49,114	NA	**69,297**
Mittelwert	21,015	37,101	21,837	34,449	35,336	37,660	40,113	36,225

Vegetation beeinflusst wird, an der Gesamtfläche der Validierungsgebiete bei 26,580 % liegt. Das GIS-Modell hat für die gleiche Fläche einen prozentualen Anteil von 27,783 % ausgegeben.

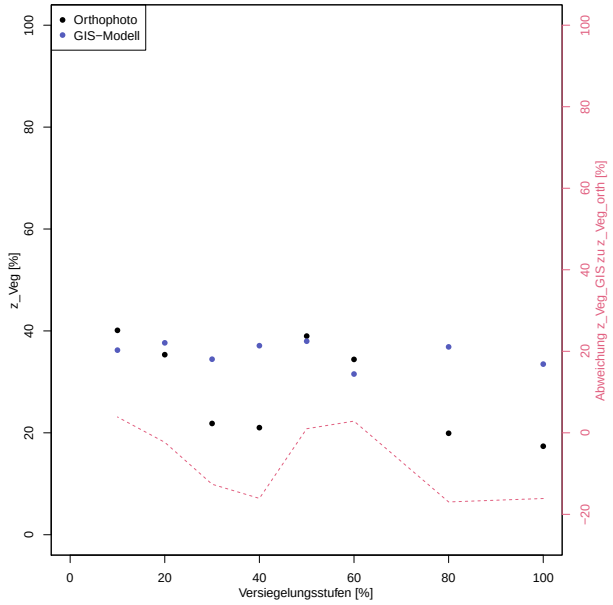

Abb. 4.6: *Mittelwerte der Validierung und der dazugehörenden GIS-Modell-Flächen (Straßen und Rechtecke).*

4.2.2 h-r-Methode

In Tabelle B.3 sind die gemessenen und daraus berechneten Parameter zur Validierung mit der h-r-Methode zu finden. Aus Gründen der Vereinfachung wurden teilweise Bäume, die sich ähnelten zusammengefasst und nur noch jeweils einer dieser Gruppe gemessen. Im weiteren Verlauf wurde der erhaltene Wert für F_{Veg} mit der Anzahl der Bäume n multipliziert.

In Abbildung 4.7 ist, wie auch schon in Abschnitt 4.2.1 für die mit den Orthophotos digitalisierten Vegetationsflächen, ein Vergleich der gemessenen bzw. berechneten Flächen und der Vegetationsflächen des GIS-Modells zu erkennen. Auch hier wurde wieder eine Trendgerade eingezeichnet und eine Linie der perfekten Anpassung, die entstünde, wenn die gemessenen Werte mit denen des GIS-Modells übereinstimmen würden.

Die Gleichung für die Gerade findet sich in Formel 4.2.

$$y = 0,91358 \cdot x + 14,45935 \tag{4.2}$$

Diese Gerade schneidet die y-Achse also bei 14,459 % und liegt auch über der der perfekten Anpassung. Im Vergleich mit der h-r-Methode werden die Werte des GIS-Modells im Mittel überschätzt.

Insgesamt kann gesagt werden, dass diese Validierungsmethode einen prozentualen Anteil an von Vegetation beeinflussten Versiegelungsflächen in den Untersuchungsgebieten

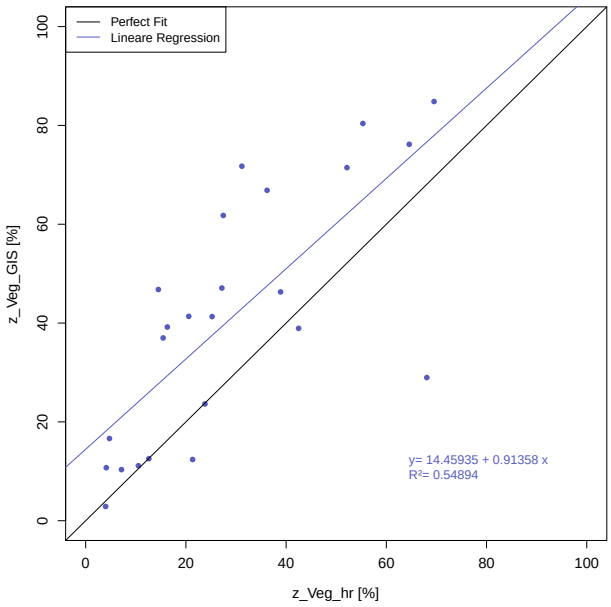

Abb. 4.7: *Unterschiede des GIS-Modells und der h-r-Methode für die untersuchten Straßen.*

von 27,788 % ausgibt, während das GIS-Modell einen Anteil von 34,307 % berechnet hat.

4.2.3 Abschließender Vergleich

In Abbildung 4.8 sind zum Vergleich die Ergebnisse der von Vegetation beeinflussten Straßenabschnitte (vgl. Tabelle 3.2) des GIS-Modells, der Validierung mit den Orthophotos und der Validierung mit den Radien und Abständen zur Versiegelungsfläche zu erkennen. Zusätzlich wurden hier noch die Abweichungen des GIS-Modells zu den jeweiligen Validierungsmethoden und zum Mittelwert der beiden eingezeichnet. Ein Wert, der größer als 0 ist, deutet auf einen geringeren Wert bei $z_{Veg_{GIS}}$ hin, ein Wert, kleiner als 0 auf einen höheren.

Wie auch schon bei den anderen Ergebnissen aus diesem Abschnitt kann erkannt werden, dass das GIS-Modell die Ergebnisse der beiden Validierungsmethoden recht häufig überschreitet, aber auch, dass $z_{Veg_{GIS}}$ für manche Abschnitte geringer ausfällt.

Werden nun die Untersuchungsabschnitte, in denen es zu einer Über- oder Unterschreitung des GIS-Modells im Bezug auf die beiden Validierungsmethoden kam, betrachtet, fällt auf, dass es eine Aufteilung in Ost und West gibt. Im Osten des Stadtgebiets finden sich zum größten Teil Validierungsgebiete, in denen eine Überschreitung des z_{Veg} einer der beiden Validierungsmethoden in einer der Versiegelungsstufen um mindestens 15 Prozentpunkte auftrat. Im Westen hingegen kam es zu Unterschreitungen der Werte

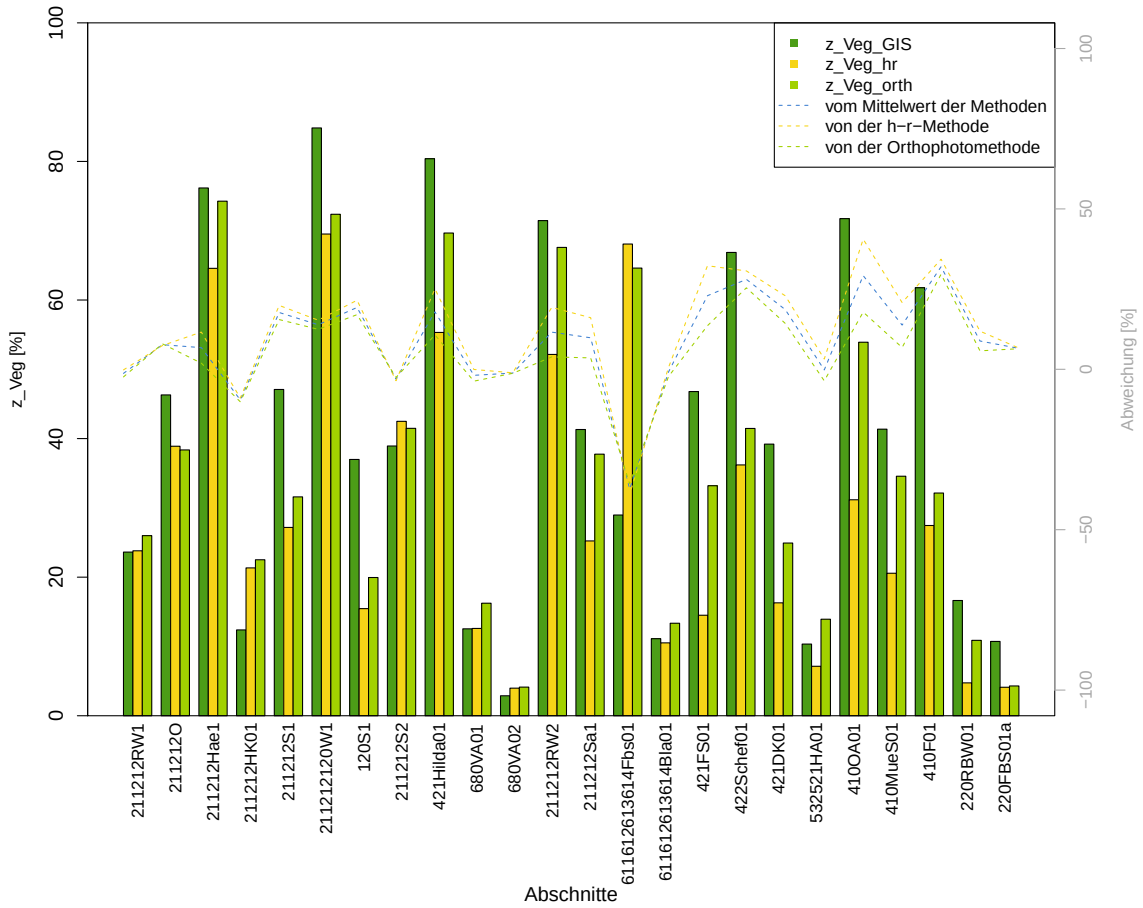

Abb. 4.8: *Vergleich des GIS-Modells mit den Validierungsdaten.*

um mindestens 15 Prozentpunkte. Eine Analyse der prozentualen Anteile an Vegetation in den jeweiligen Gebieten anhand des GIS-Modells hat ergeben, dass der mittlere Anteil in den Gebieten mit Überschreitungen bei 21,344 % mit einer Standardabweichung von ± 10,740 % liegt und in den Gebieten mit Unterschreitungen bei 10,167 % mit einer Standardabweichung von ± 0,551 %.

Letztendlich kann aber gesagt werden, dass das GIS-Modell die Vegetation recht gut beschreiben kann, aber auch dafür sorgt, dass die Vegetation im Mittel zwischen 1,203 und 6,519 Prozentpunkten überschätzt wird.

4.3 Klimadaten Vauban

4.3.1 Überblick über den Untersuchungszeitraum

In Abbildung 4.9 sind die monatlichen Niederschlagssummen und die mittlere Temperatur für die jeweiligen Monate zu sehen. Es kann hierbei ein Jahresgang der Temperatur mit einem Minimum in den Wintermonaten und einen Maximum in den Sommermonaten erkannt werden.

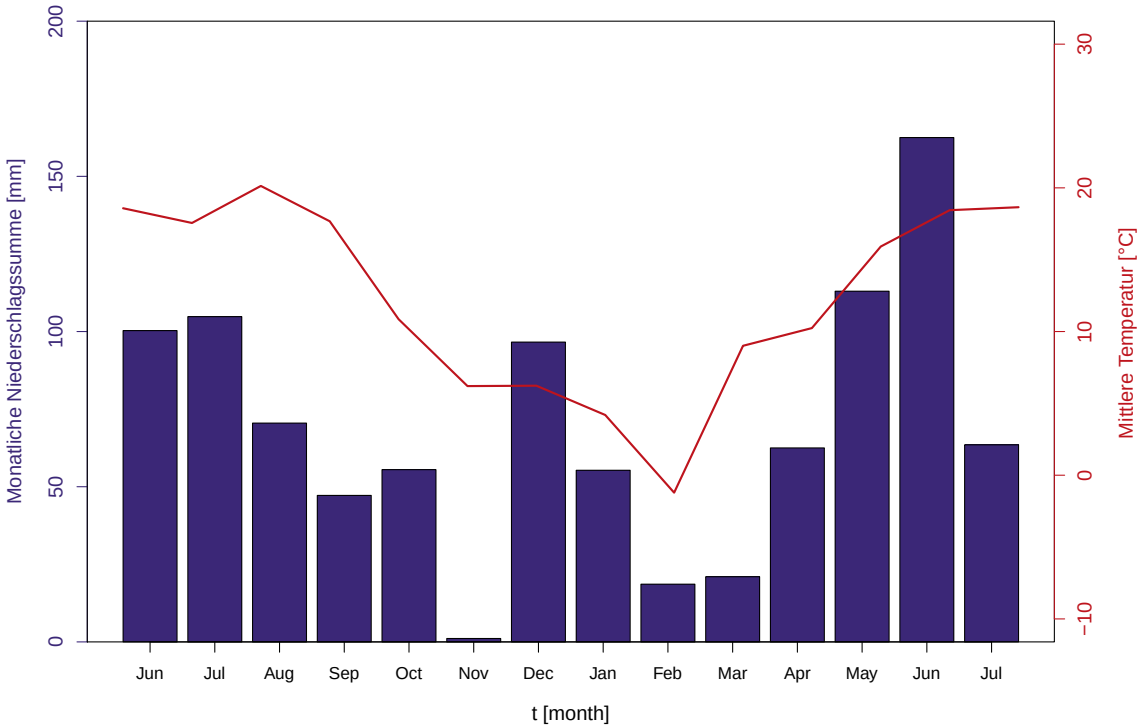

Abb. 4.9: *Monatssummen vom Niederschlag und Monatsmitteltemperaturen im Stadtteil Vauban über den Untersuchungszeitraum.*

Der Monat mit der niedrigsten Monatsmitteltemperatur war im Untersuchungszeitraum der Februar 2012 mit einer Mitteltemperatur von -1,214 $°C$. Der mit der höchsten Temperatur der August 2011 mit 20,133 $°C$. Der trockenste Monat war der November 2011 mit einer Niederschlagssumme von 1,10 mm, der Monat mit der größten Niederschlagssumme war mit 162,50 mm der Juni 2012.

In Abbildung 4.10 wurden die Niederschlagssummen, Niederschlagsintensitäten und Dauern der Niederschlagsereignisse während des Untersuchungszeitraums verzeichnet.

Insgesamt gab es 113 Niederschlagsereignisse. Anhand der Abbildung wird deutlich, dass am häufigsten Niederschlagsereignisse mit einer Gesamtsumme von weniger als 5 mm

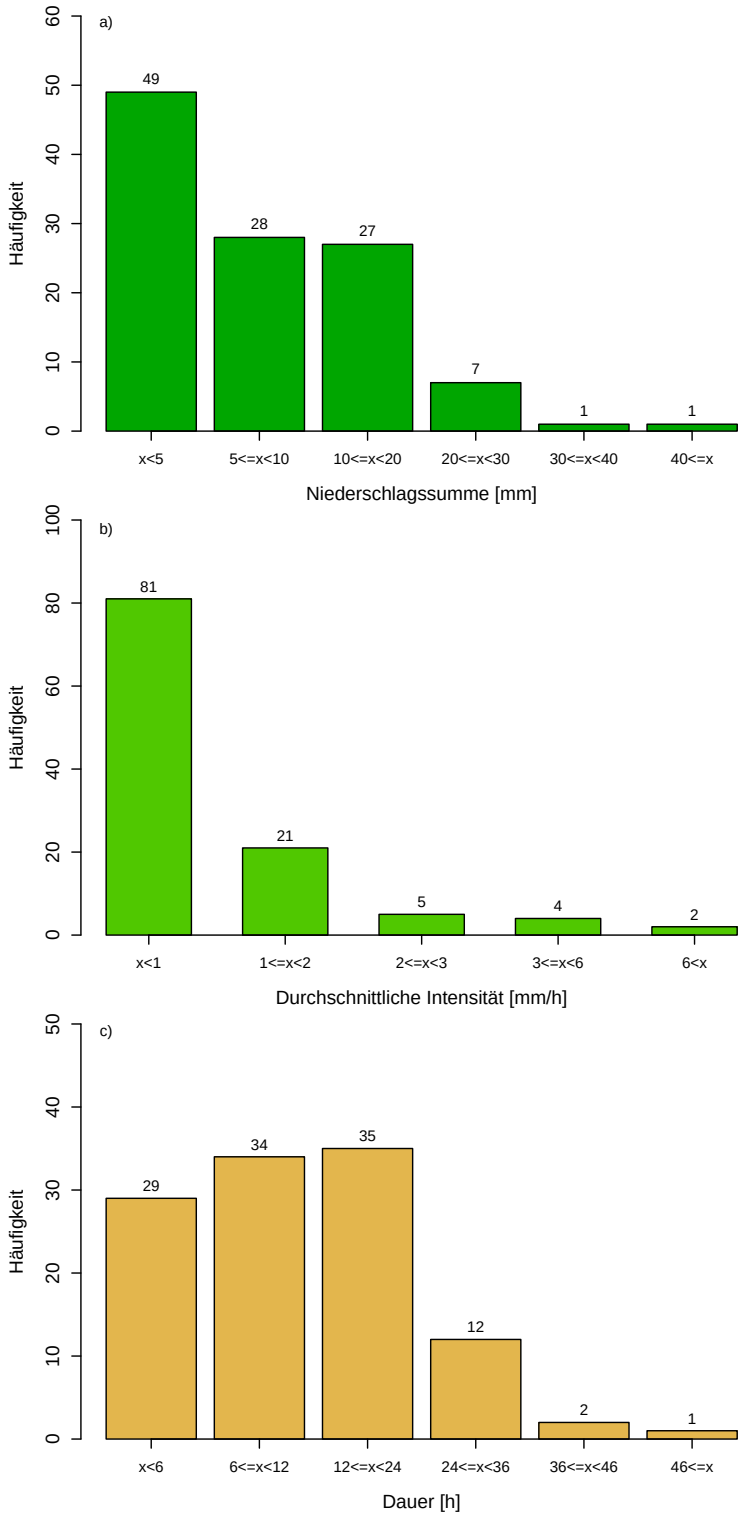

Abb. 4.10: *a) Niederschlagssummen, b) durchschnittliche Niederschlagsintensitäten und c) Dauer der Niederschlagsereignisse während des Untersuchungszeitraums.*

auftraten (49 Ereignisse). Am seltensten waren Niederschlagsereignisse, die viel Niederschlag brachten. Lediglich ein Ereignis konnte in die Klasse zwischen 30 und 40 mm eingeordnet werden und eines mit mehr als 40 mm.

Auch in der niedrigsten Klasse der durchschnittlichen Intensitäten (weniger als 1 mm/h) fanden sich mit einer Summe von 81 die deutlich meisten Niederschlagsereignisse. Nur zwei Ereignisse konnten der Klasse mit den höchsten Intensitäten (größer als 6 mm/h) zugeordnet werden.

Die Länge der Niederschlagsereignisse kann in zwei Gruppen aufgeteilt werden. Zum einen gäbe es die Klassen, in denen die Niederschlagsereignisse bis zu 24 Stunden andauern, in die jeweils zwischen 29 und 35 Ereignisse fallen. Zum anderen wäre da die Gruppe mit Ereignissen von länger als 24 Stunden, in die deutlich weniger Niederschlagsereignisse eingeteilt werden können. Die meisten Niederschlagsereignisse finden sich in der Klasse zwischen 12 und 24 Stunden (35), die wenigsten in der Klasse ab 46 Stunden (1).

Abbildung 4.11 zeigt die Niederschlagsereignisse und die Häufigkeiten der Parameter aufgeteilt in Sommer und Winter. Im Sommer traten 85 der 113 Niederschlagsereignisse auf, im Winter 28.

Sowohl im Sommer als auch im Winter konnten die meisten Niederschlagsereignisse von ihrer Menge her der Klasse mit weniger als 5 mm während des Ereignisses zugeordnet werden (Sommer: 37 Ereignisse, Winter: 12 Ereignisse). Auch die Intensitäten sind im niedrigsten Bereich bei einer durchschnittlichen Intensität von kleiner als 1 mm/h zu finden. Für den Sommer waren es 55 Ereignisse, für den Winter 26.

Lediglich bei der Dauer der Niederschlagsereignisse kann ein Unterschied bei der Verteilung der Ereignisse auf die einzelnen Klassen erkannt werden. Während im Sommer 28 Ereignisse eine Dauer von weniger als 6 Stunden aufweisen konnten, war es im Winter nur ein Ereignis, das kürzer als 6 Stunden war. Im Winter befindet sich das Häufigkeitsmaximum bei einer Dauer zwischen 12 und 24 Stunden (10 Ereignisse).

Bei den Sommermonaten konnten die meisten Niederschlagsereignisse in eine der ersten drei Klassen eingeteilt werden und die letzten drei Klassen sind mit weniger Ereignissen besetzt. Dies zeigt an, dass es im Sommer eher kürzere Ereignisse gibt. Im Winter gibt es hingegen eher Niederschlagsereignisse, die zwischen 6 und 36 Stunden anhalten.

4.3.2 Auswirkungen der Vegetation auf den Niederschlag

Für die Abbildung 4.12 wurden Niederschlagsereignisse untersucht. Da in diesem Teil der Untersuchung auch Bestandsniederschläge eine Rolle spielten und die Niederschlagswippen unter den Beständen nicht beheizbar waren, wurden die Niederschläge, die bei 4 $°C$

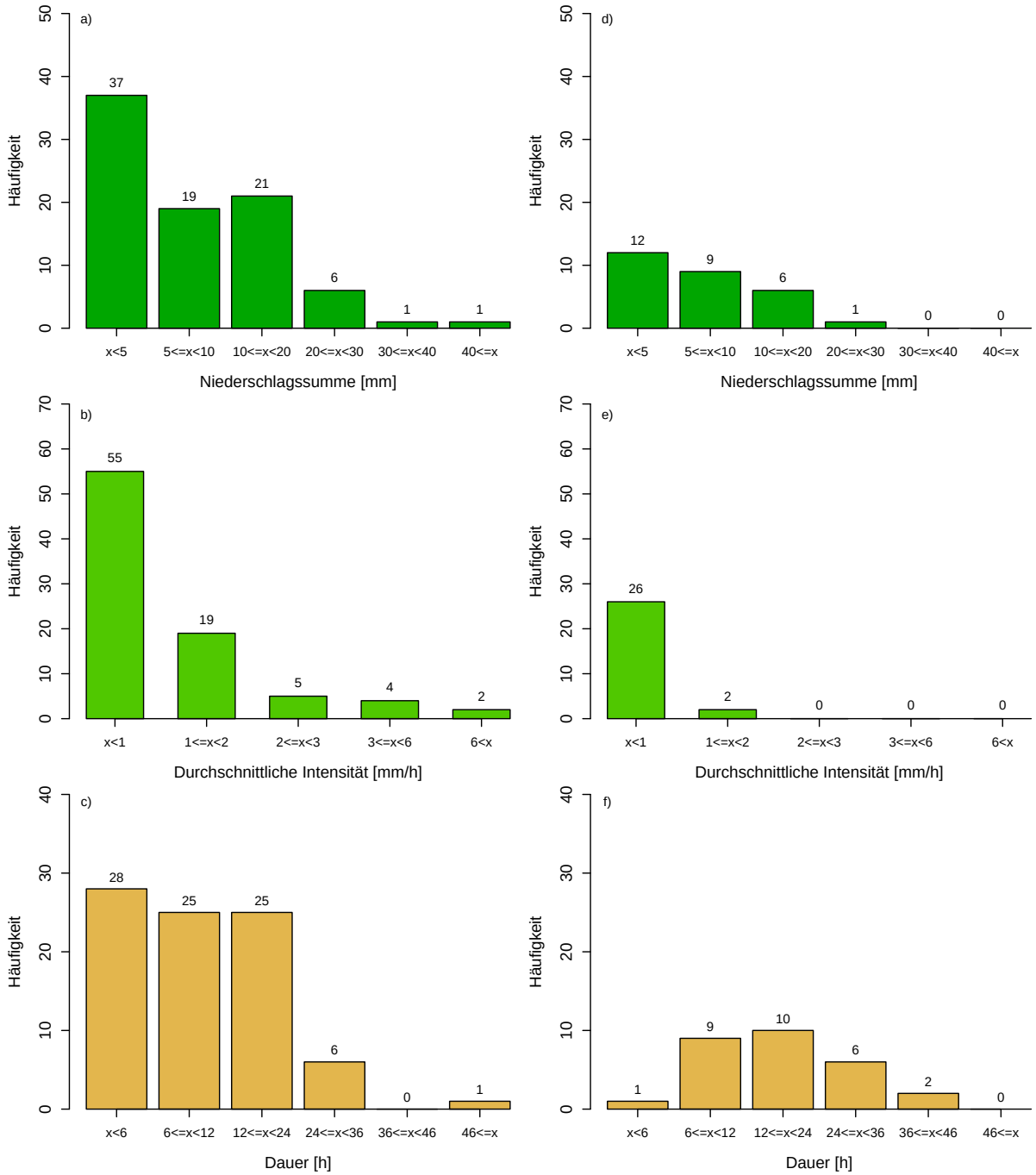

Abb. 4.11: *Niederschlagssummen, durchschnittliche Niederschlagsintensitäten und Dauer der Niederschlagsereignisse während des Untersuchungszeitraums aufgeteilt in Sommer (a-c) und Winter (d-f).*

oder niedriger gefallen sind herausgenommen, da es sich hierbei vermutlich um Schnee handelte, der nicht richtig erfasst wurde. Aus diesem Grund gibt es hier nur noch 108 Niederschlagsereignisse.

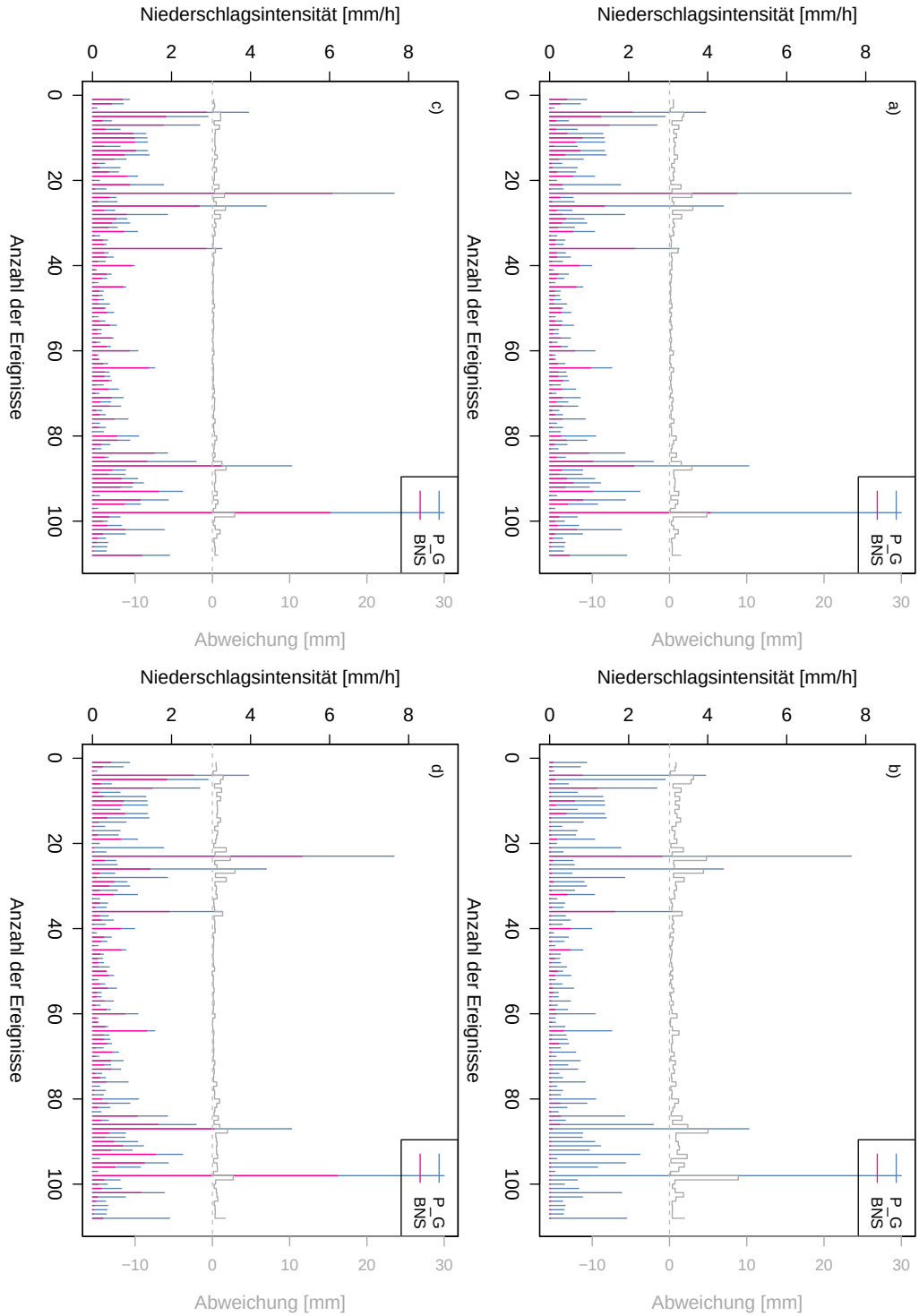

Abb. 4.12: *Intensitäten von Freilandniederschlag und Bestandsniederschlag der Niederschlagsereignisse; a) Mittelwert aus den verschiedenen Baumarten, b) Tanne, c) Platane, d) Linde.*

Auf der Abszisse sind die Nummern der Niederschlagsereignisse in chronologischer Reihenfolge aufgetragen, auf der Ordinate die Intensitäten des Freilandniederschlags i_{P_G} und der Bestandsniederschläge i_{BNS} der jeweiligen Ereignisse. Des Weiteren wurde die Abweichung der Intensitäten von P_G und BNS eingefügt. Eine Auflistung der Niederschlagsereignisse mit der Stunde, in der sie begonnen haben, ihrer Dauer, den Intensitäten von P_G und BNS (Mittelwert der verschiedenen Baumarten und die der jeweiligen Baumarten), sowie den Differenzen zwischen den Intensitäten des Freilandniederschlags und denen der Bestandsniederschläge findet sich in Tabelle B.4 im Anhang.

Die Abbildung zeigt, wie unterschiedlich sich die Baumarten auf Intensitäten des Bestandsniederschlags auswirken. Wird die Abbildung 4.12b, welche den Verlauf unter Tannen beschreibt, mit den Abbildungen 4.12c und d verglichen, kann deutlich erkannt werden, wie er sich von dem der Laubbäume unterscheidet. In vielen Fällen wird die Intensität hier stärker abgemildert als unter Laubbäumen. In lediglich 4 von 108 Ereignissen war die Niederschlagsintensität unter den Tannen höher als 50 % der Intensität des Freilandniederschlags.

Auch die anderen Baumsorten puffern die Intensität ab, im Vergleich zur Tanne fällt diese Abpufferung jedoch gering aus. Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass die Niederschlagsintensitäten während des Ereignisses unterhalb der Tannen im Mittel bei 9,152 % mit einer Standardabweichung von ± 14,895 % des Freilandniederschlags liegen, unter den Platanen bei 55,817 % mit einer Standardabweichung von ± 22,925 % und unter den Linden bei 41,042 % mit einer Standardabweichung von ± 25,403 %, was zu einem Mittelwert von 35,337 % führt, die Standardabweichung beträgt hier ± 18,503 %.

In Abbildung 4.13 sind die Intensitäten der Niederschlagsereignisse noch einmal dargestellt. Auf der Abszisse ist der Freilandniederschlag aufgetragen, auf der Ordinate die jeweiligen Bestandsniederschläge. Wie in bereits gezeigten Abbildungen wurde wieder eine 1:1-Linie (schwarz) und eine Gerade einer linearen Regression (blau) eingefügt.

Auffällig ist wieder die Darstellung der Tanne (Abbildung 4.13b), bei der die blaue Gerade einen sehr flachen Verlauf hat. Sowohl bei geringen Niederschlagsintensitäten im Bereich von 0 bis 2 mm/h als auch bei Intensitäten im höheren Bereich wird die Intensität während des Niederschlagsereignisses stark abgepuffert. Aber auch bei den Laubbäumen kann eine Abschwächung der Niederschlagsintensitäten erkannt werden, wobei die Steigung der Geraden der linearen Regression hier steiler ist als bei den Tannen.

In Abbildung 4.13a sind die Mittelwerte der verschiedenen Baumarten zu sehen, in Gleichung 4.3 steht die Formel zur Beschreibung der Geraden der linearen Regression. Mit dieser Gleichung können 92,45 % der Punkte beschrieben werden.

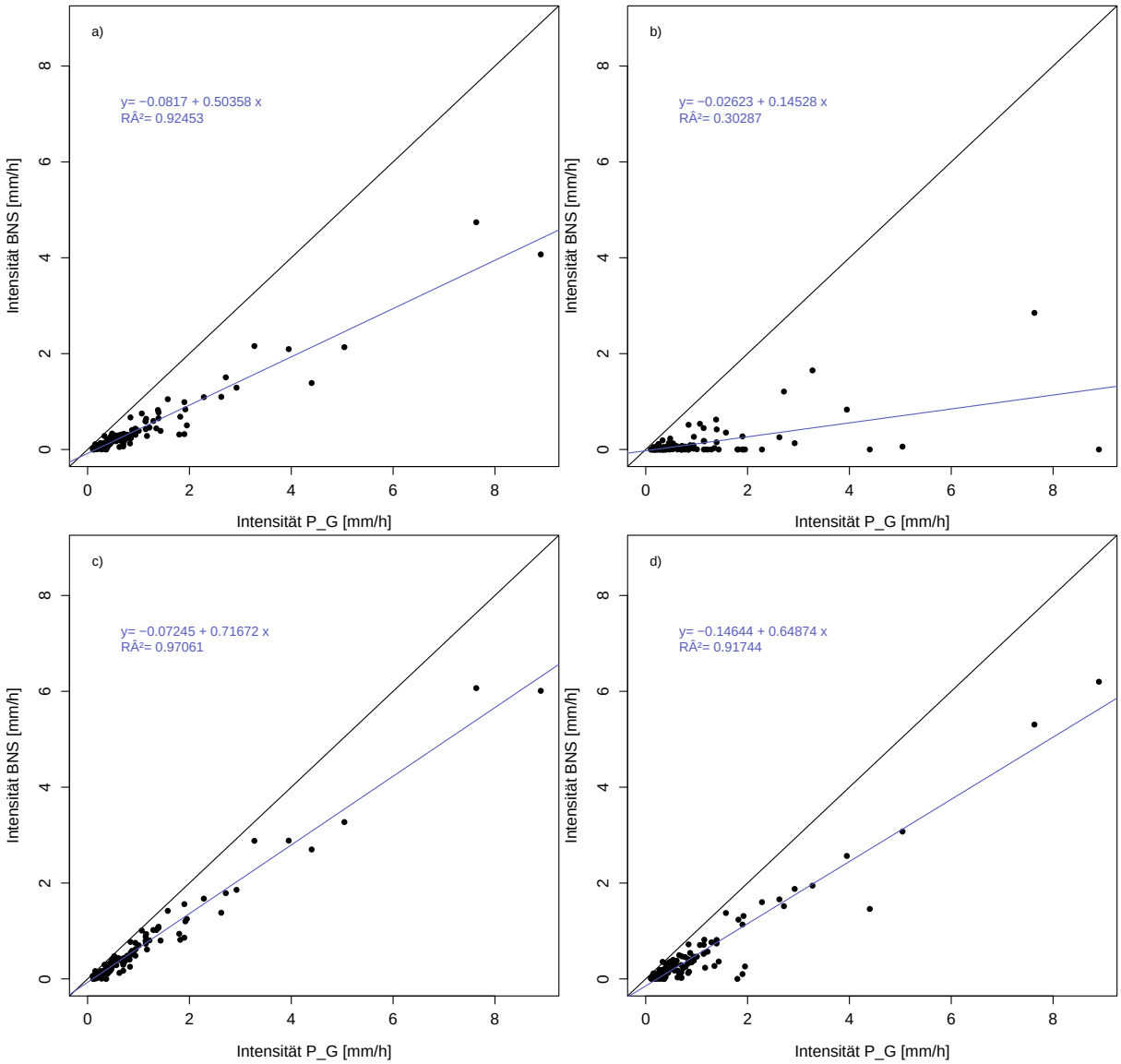

Abb. 4.13: *Intensitäten des Bestandsniederschlags als eine Funktion der Intensitäten des Freilandniederschlags; a) Mittelwert, b) Tanne, c) Platane, d) Linde.*

$$y = 0,50358 \cdot x - 0,08170 \tag{4.3}$$

Auch diese Gerade liegt unter der schwarzen Linie, was bedeutet, dass die Intensitäten unterhalb der Vegetation nicht größer sind als die des Freilandniederschlags. Des Weiteren hat sie einen flacheren Verlauf als den der 1:1-Geraden, was bedeutet, dass auch die höheren Intensitäten des Freilandniederschlags P_G noch gut abgepuffert werden.

Werden die Niederschlagsereignisse nun nach Sommer und Winter aufgeteilt, können Unterschiede erkannt werden. In Abbildung 4.14 sind die Diagramme für die Sommermo-

nate (April bis Oktober) zu sehen.

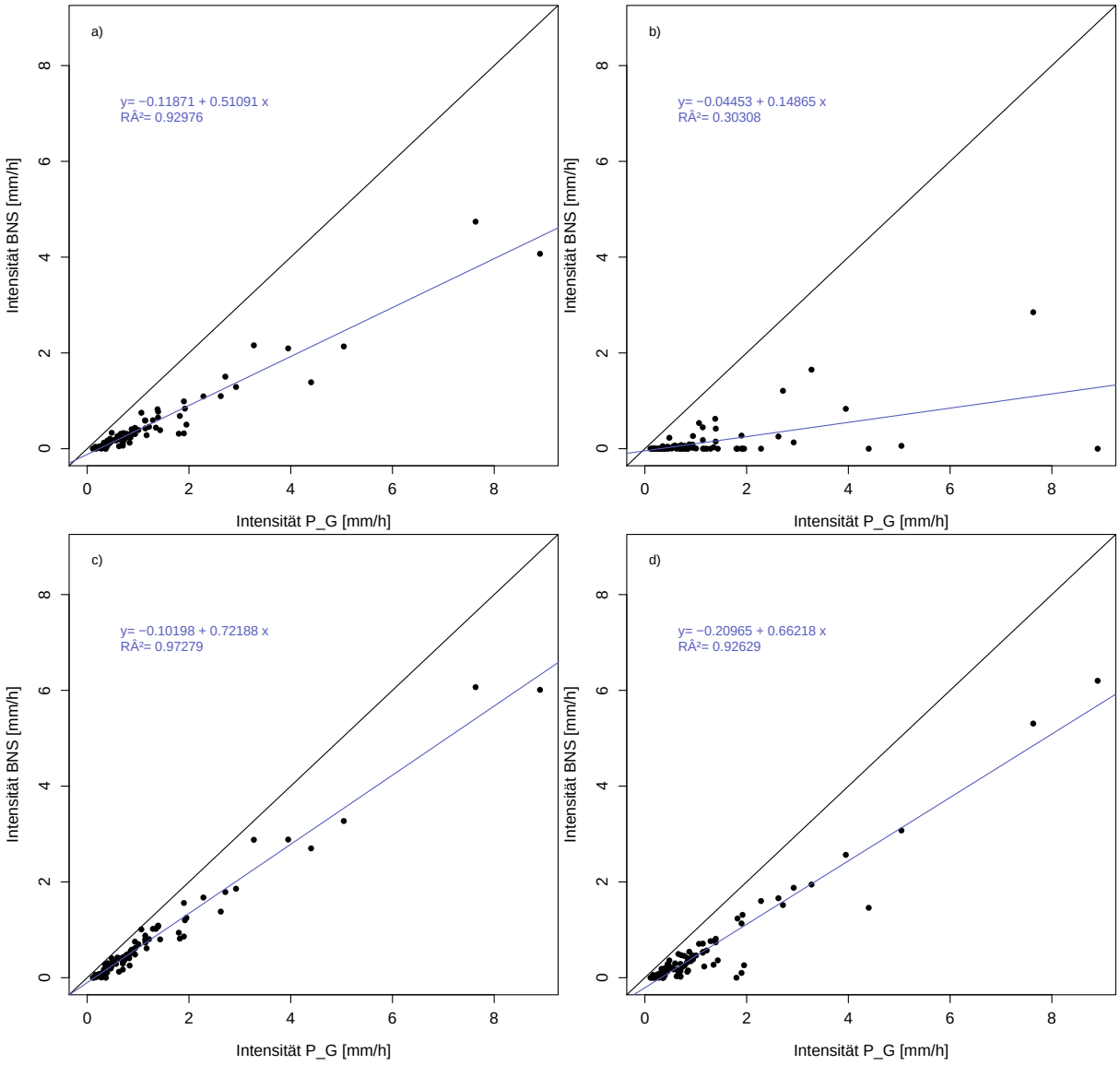

Abb. 4.14: *Intensitäten des Bestandsniederschlags als eine Funktion der Intensitäten des Freilandniederschlags für die Sommermonate; a) Mittelwert, b) Tanne, c) Platane, d) Linde.*

In Abbildung 4.15 sind die Intensitäten der Niederschlagsereignisse während der Wintermonate (November bis März) zu erkennen.

Werden beide Abbildungen verglichen, können einige Unterschiede erkannt werden. Es ist sichtbar, dass die Niederschlagsintensitäten der Wintermonate, wie bereits in Abschnitt 4.3.1 erwähnt wurde, geringer ausfallen als die in den Sommermonaten. Auffällig ist außerdem das Verhalten der Intensitäten unter den Laubbäumen. Während die Intensitäten in den Sommermonaten noch stärker abgepuffert wurden und die Gerade der

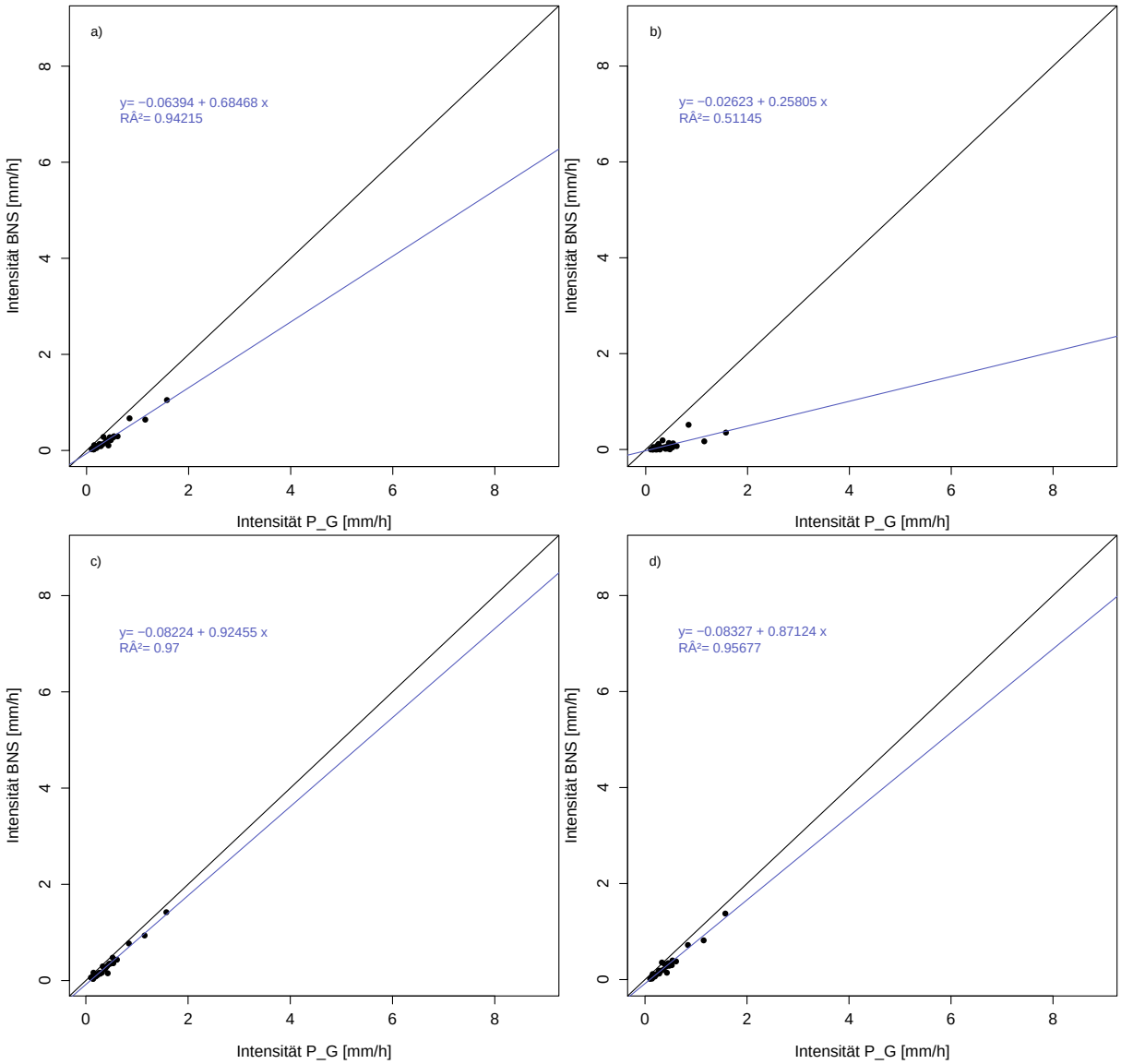

Abb. 4.15: *Intensitäten des Bestandsniederschlags als eine Funktion der Intensitäten des Freilandniederschlags für die Wintermonate; a) Mittelwert, b) Tanne, c) Platane, d) Linde.*

linearen Regression einen flacheren Verlauf als die 1:1-Gerade hatte, haben sich die Intensitäten in den Wintermonaten denen des Freilandniederschlags angenähert, was auch durch die lineare Regression deutlich wird, die in den kleineren Intensitätsbereichen der 1:1-Gerade sehr nahe ist und ihr im Verlauf ähnelt. Dieses Verhalten ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Laubbäume während der Wintermonate eine geringere Abfangfläche für den Niederschlag haben, da sie keine Blätter tragen.

Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass die Intensitäten unterhalb der Vegetation in den Sommermonaten im Mittel bei 31,936 % des Freilandniederschlags P_G liegen

(Standardabweichung: ± 17,363 %) und in den Wintermonaten bei 46,628 % mit einer Standardabweichung von ± 17,988 %, was vor allem auf die Tannen zurückzuführen ist.

In der Abbildung 4.16 sind wieder die jeweiligen Niederschlagsereignisse in chronologischer Reihenfolge auf der Abszisse aufgetragen. Auf der Ordinate sind die Summen von Freiland- und Bestandsniederschlag der jeweiligen Ereignisse zu erkennen. Zusätzlich wurden die Differenzen der Niederschlagssummen eingefügt.

Eine Auflistung mit Beginn und Dauer der Ereignisse, der Niederschlagssummen von Freiland- und den drei Bestandsniederschlägen sowie dem Mittelwert und den Differenzen der Niederschlagssummen findet sich in Tabelle B.5 im Anhang.

Auch anhand dieser Abbildung kann erkannt werden, wie unterschiedlich sich die Baumarten auf den Niederschlag auswirken. Auffällig ist wieder das Verhalten der Tanne, welche sogar bei Niederschlagsereignissen mit größeren Niederschlagssummen viel vom Niederschlag abfängt, sodass weniger auf den Boden gelangt. Als Beispiel kann das Ereignis am 30. Mai 2012 aufgeführt werden. Das Ereignis dauerte 7 Stunden und es konnte eine Niederschlagssumme des Freilandniederschlags von 35,30 mm festgestellt werden. Unter den Tannen wurden lediglich 0,42 mm gemessen, was 1,19 % von P_G für dieses Niederschlagsereignis waren. Auch unter den anderen Baumarten kann eine Verminderung der Niederschlagssumme erkannt werden, die allerdings geringer ausfällt als bei der Tanne.

In Abbildung 4.17 sind die Niederschlagssummen der Niederschlagsereignisse von P_G und BNS gegeneinander aufgetragen. Zusätzlich wurden eine Gerade mit der perfekten Anpassung (schwarz) und eine Gerade einer linearen Regression (blau) eingefügt.

Sowohl bei den Laubbäumen als auch bei der Tanne ist eine Abschwächung der Niederschlagssummen zu erkennen. In Abbildung 4.17a sind die Mittelwerte der Niederschlagssummen der Bestandsniederschläge zu sehen. In Gleichung 4.4 ist die Formel zur Berechnung der Geraden noch einmal angegeben. Das R^2 wurde mit 0,90203 angegeben, was bedeutet, dass 90,20 % der Punkte mit dieser Gleichung beschrieben werden können.

$$y = 0,51481 \cdot x - 0,67064 \tag{4.4}$$

Die Gerade liegt hier ebenfalls unter der schwarzen Linie, was bedeutet, dass die Niederschlagssummen unter der Vegetation nicht größer sind als die vom Freilandniederschlag. Des Weiteren hat sie einen flacheren Verlauf, was darauf hinweist, dass auch die höheren Niederschlagssummen noch gut abgefangen werden.

In Abbildung 4.18 sind die Niederschlagssummen der Sommermonate (April bis Oktober), in Abbildung 4.19 die der Wintermonate (November bis März) dargestellt.

Auch hier kann wieder erkannt werden, dass sich die Laubbäume in den Sommermonaten deutlich anders auf die Niederschlagssummen auswirken als in den Wintermonaten,

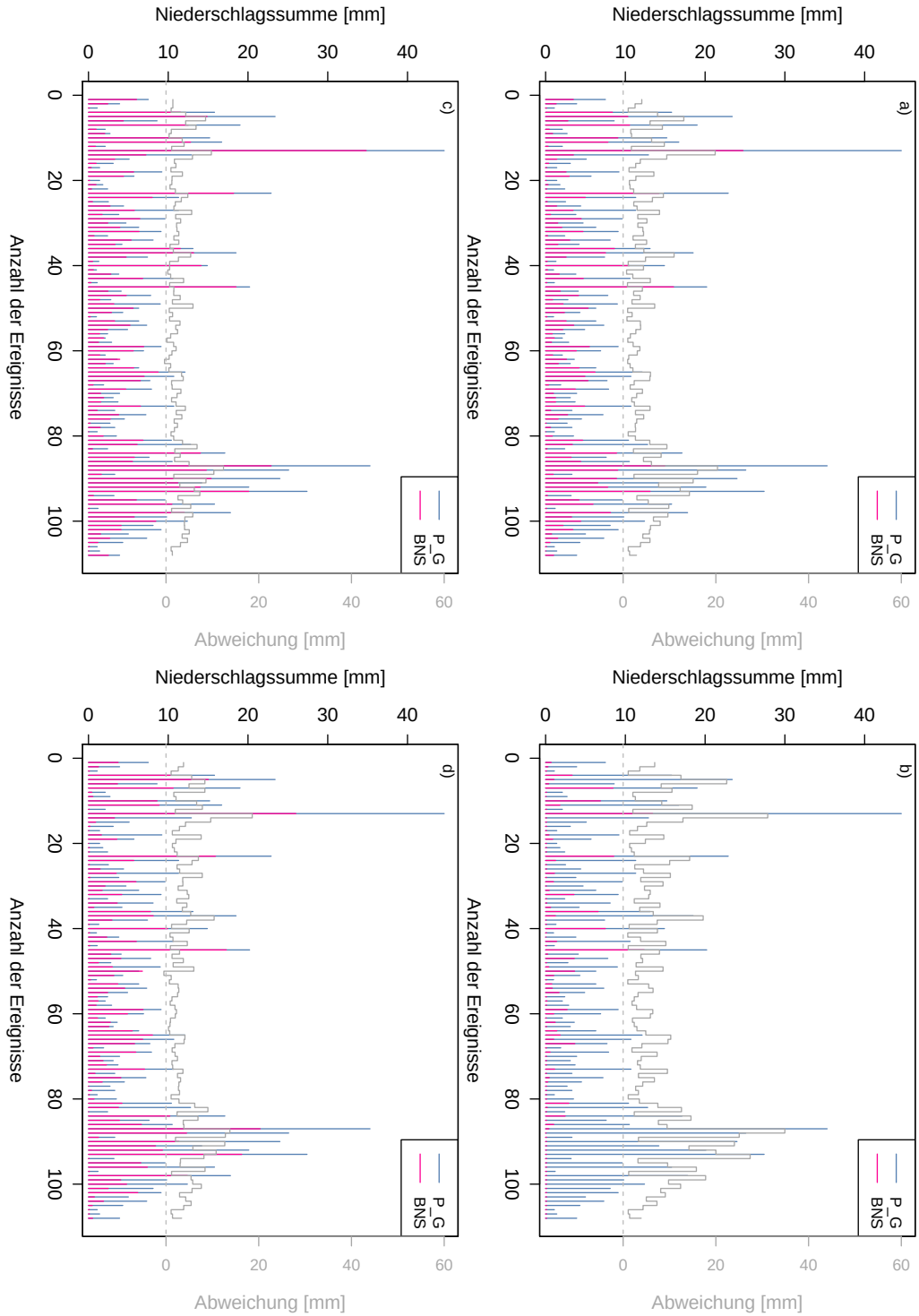

Abb. 4.16: *Niederschlagssummen von Freilandniederschlag und Bestandsniederschlag der Ereignisse; a) Mittelwert der verschiedenen Baumarten, b) Tanne, c) Platane, d) Linde.*

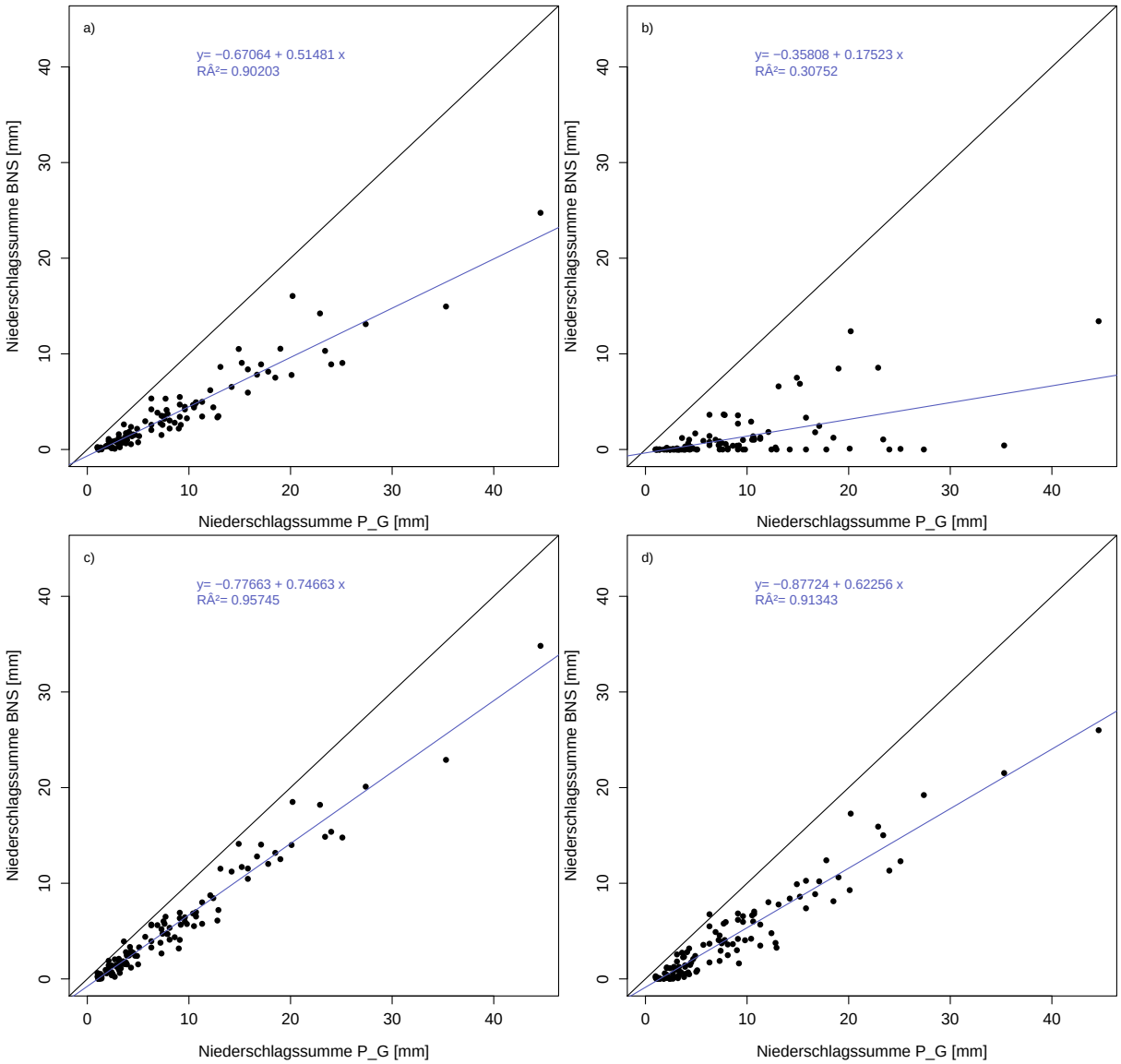

Abb. 4.17: *Niederschlagssumme des Bestandsniederschlags als eine Funktion der Niederschlagssumme des Freilandniederschlags; a) Mittelwert, b) Tanne, c) Platane, d) Linde.*

was neben der veränderten Niederschlagscharakteristik wieder auf die nicht vorhandene Belaubung im Winter zurückzuführen ist.

In Abbildung 4.20 sind die prozentualen Anteile der Intensitäten des Bestandsniederschlags an denen des Freilandniederschlags gegen die Intensitäten des Freilandniederschlags in mm/h für die unterschiedlichen Baumarten und die Niederschlagsereignisse aufgetragen.

Zusätzlich wurden Intensitätsklassen gebildet und für diese die Mittelwerte der prozentualen Anteile bestimmt und in pink für jeden Bestandsniederschlag in der Klassenmitte

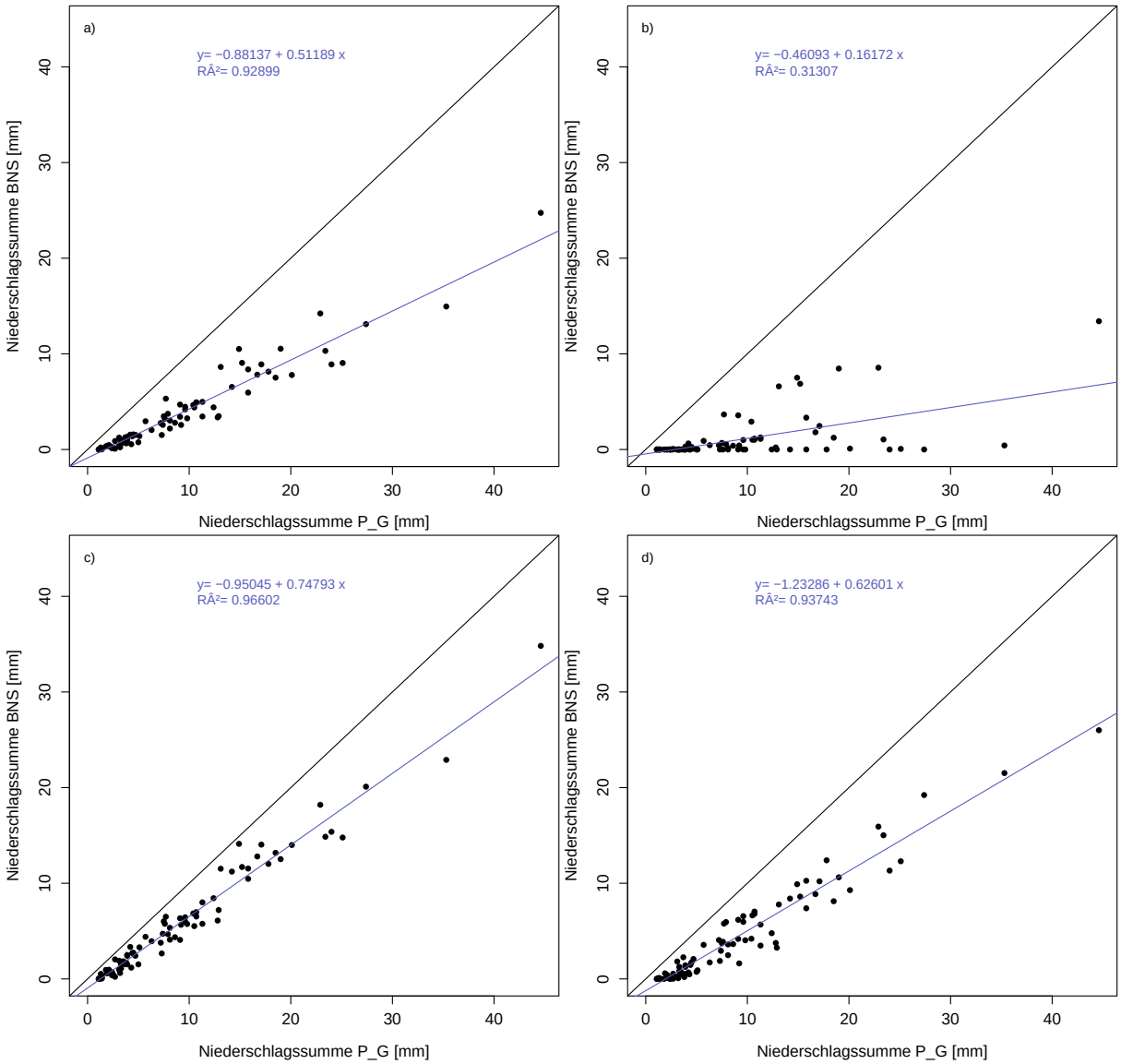

Abb. 4.18: *Niederschlagssumme des Bestandsniederschlags als eine Funktion der Niederschlagssumme des Freilandniederschlags für die Sommermonate; a) Mittelwert, b) Tanne, c) Platane, d) Linde.*

in das Diagramm eingezeichnet. Die Werte sind in Tabelle 4.4 zu sehen.

Wieder zeigt sich ein unterschiedliches Verhalten bei den drei verschiedenen Baumsorten. Bei den Tannen wird bei jeder Intensität gut abgepuffert, bei den Linden und den Platanen geschieht dies ebenfalls, allerdings werden hier höhere Intensitäten unterhalb der Vegetation erreicht als unter den Tannen. Im Mittel liegt der prozentuale Anteil der Intensitäten unterhalb der Vegetation für Intensitäten, die kleiner als 4 mm/h bei 34,945 % mit einer Standardabweichung von ± 18,616 % und oberhalb von 4 mm/h bei 45,425 % mit einer Standardabweichung von ± 12,667 %.

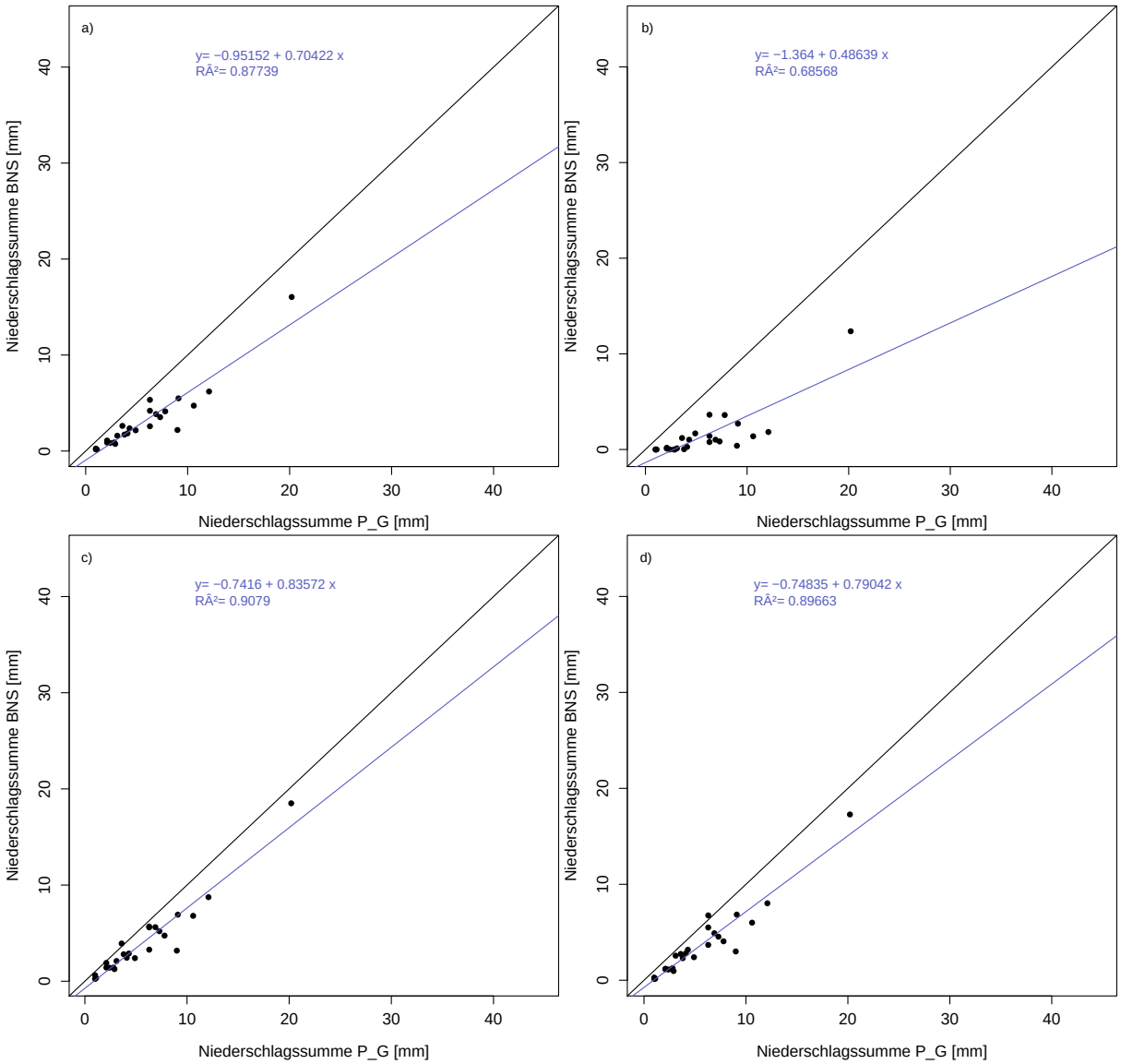

Abb. 4.19: *Niederschlagssumme des Bestandsniederschlags als eine Funktion der Niederschlagssumme des Freilandniederschlags für die Wintermonate; a) Mittelwert, b) Tanne, c) Platane, d) Linde.*

In Abbildung 4.21 ist eine ähnliche Grafik für die Niederschlagssummen der Niederschlagsereignisse zu sehen. Auch hier wurden wieder zusätzlich Klassen für die Niederschlagssummen gebildet und diese anschließend in pink eingezeichnet. Die Werte für die mittleren prozentualen Anteile der Bestandsniederschlagssummen an denen der Freilandniederschlagssummen finden sich in Tabelle 4.5.

Auch diese Abbildung zeigt, wie sich die unterschiedlichen Baumarten auf die Niederschlagssummen eines Ereignisses auswirken. Bei der Tanne kommt es für die Ereignisse selten zu einem höheren prozentualen Anteil an der Niederschlagssumme des Freiland-

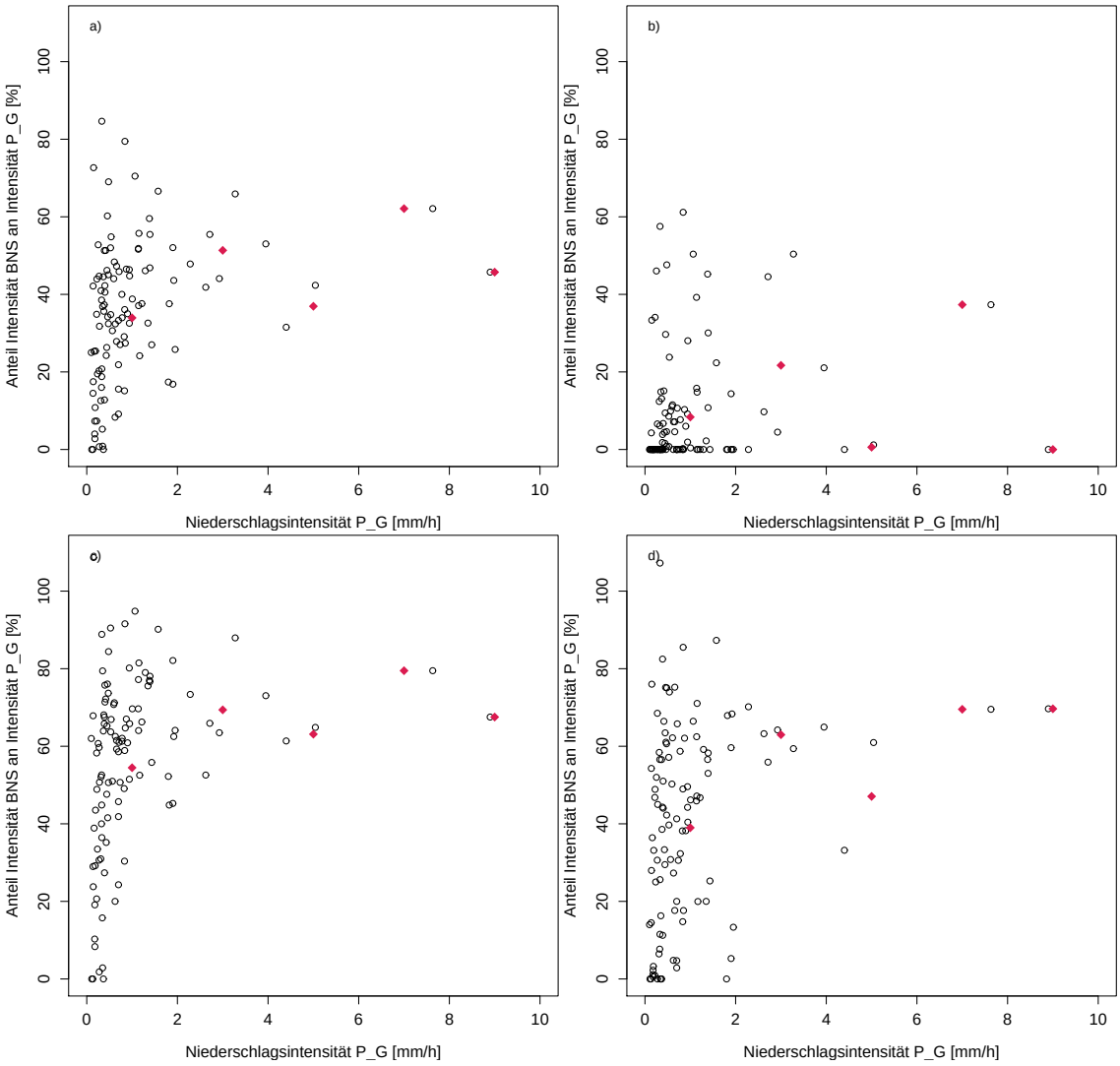

Abb. 4.20: *Prozentuale Anteile der Intensitäten von BNS an denen von P_G als eine Funktion der Intensitäten von P_G.*

Tab. 4.4: *Mittlere prozentuale Anteile der Intensitäten des Bestandsniederschlags $z_{i_{BNS_x}}$ an den Intensitäten des Freilandniederschlags*

Klasse	$z_{i_{BNS_{MW}}}$ [%]	$\sigma_{i_{BNS_{MW}}}$ [%]	$z_{i_{BNS_T}}$ [%]	$\sigma_{i_{BNS_T}}$ [%]	$z_{i_{BNS_P}}$ [%]	$\sigma_{i_{BNS_P}}$ [%]	$z_{i_{BNS_L}}$ [%]	$\sigma_{i_{BNS_L}}$ [%]
0 - 2	33,940	±18,610	8,359	±14,155	54,463	±23,467	38,988	±25,603
2 - 4	51,348	±8,799	21,697	±21,242	69,387	±11,857	62,973	±4,903
4 - 6	36,929	±7,646	0,595	±0,841	63,113	±2,473	47,069	±19,639
6 - 8	62,112	NA	37,338	NA	79,484	NA	69,527	NA
8 - 10	45,730	NA	0,000	NA	67,528	NA	69,663	NA

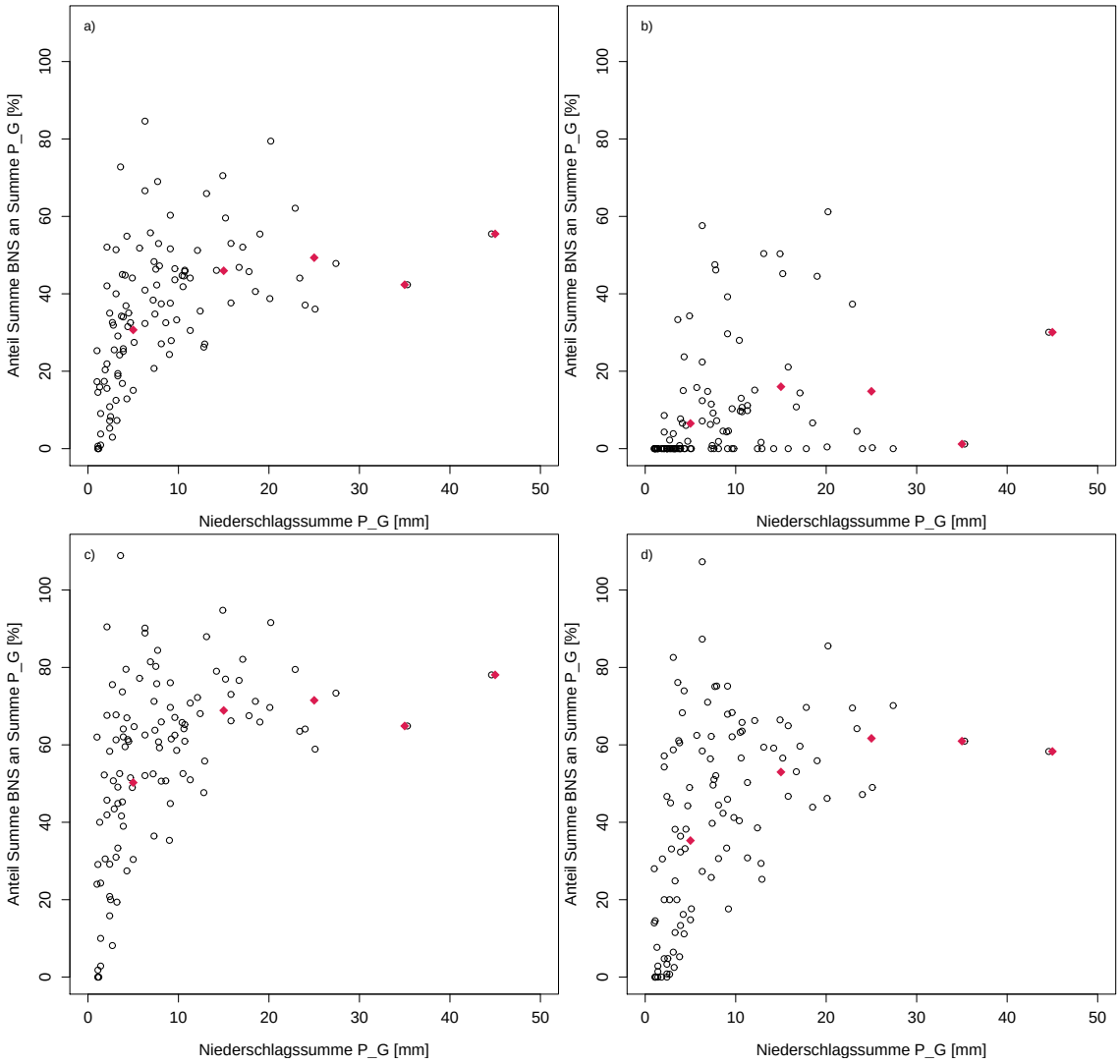

Abb. 4.21: *Prozentuale Anteile der Niederschlagssummen von BNS an denen von P_G als eine Funktionr der Niederschlagssummen von P_G.*

Tab. 4.5: *Mittlere prozentuale Anteile der Bestandsniederschlagssummen z_{BNS_x} an den Niederschlagssummen des Freilandniederschlags*

Klasse	$z_{BNS_{MW}}$ [%]	$\sigma_{BNS_{MW}}$ [%]	z_{BNS_T} [%]	σ_{BNS_T} [%]	z_{BNS_P} [%]	σ_{BNS_P} [%]	z_{BNS_L} [%]	σ_{BNS_L} [%]
0 - 10	30,678	±18,677	6,513	±12,483	50,249	±24,123	35,273	±26,834
10 - 20	45,955	±11,144	15,999	±16,877	68,888	±11,566	52,976	±13,152
20 - 30	49,333	±16,012	14,814	±24,570	71,506	±11,195	61,677	±14,837
30 - 40	42,343	NA	1,190	NA	64,873	NA	60,963	NA
40 - 50	55,478	NA	30,067	NA	78,072	NA	58,296	NA

niederschlags als 60 %, bei den Linden und Platanen werden durchaus Werte, die höher als 80 % sind, erreicht. Im Mittel liegt die Abpufferung durch die Vegetation für Niederschlagssummen unter 20 mm bei 34,073 % mit einer Standardabweichung von ± 18,381 % und über 20 mm bei 49,239 % mit einer Standardabweichung von ± 14,251 %.

Abschließend sollte noch darauf hingewiesen werden, dass nur für die Ereignisse mit niedrigen Niederschlagssummen bzw. niedrigen Niederschlagsintensitäten genügend Messwerte vorliegen um eine relativ verlässliche Angabe dazu zu machen, wie gut der Niederschlag durch die Vegetation abgepuffert wird. In den Klassen mit höheren Werten liegen zu wenige Ereignisse vor (teilweise nur einziger Wert), als dass ein sinnvoller Mittelwert gebildet werden kann. Es ist daher sehr gut möglich, dass die Abpufferung in diesem Bereich deutlich geringer ausfällt als berechnet.

In Tabelle 4.6 sind die zeitlichen Abstände zwischen dem Beginn des Freilandniederschlags P_G und dem Beginn des Bestandsniederschlags BNS für einige ausgewählte Niederschlagsereignisse zu finden. Bei den ersten vier Ereignissen handelt es sich um Ereignisse in den Sommermonaten, bei den letzten sechs um welche, der Wintermonate. Zusätzlichen zum zeitlichen Abstand wurden auch noch die Intensitäten und die Niederschlagssumme des Freilandniederschlags P_G während des Ereignisses und die Anzahl Stunden, in denen das Ereignis stattfand, eingefügt.

Tab. 4.6: *Zeitlicher Abstand zwischen Beginn von P_G und Beginn BNS für ausgewählte Ereignisse*

Event	**zeitlicher Abstand**			**Summe P_G**	**Dauer**	**Intensität P_G**
	Tanne	**Platane**	**Linde**			
	[min]	[min]	[min]	[mm]	[h]	[mm/h]
13	282*	11	12	44,6	32	1,394
21	-	14	-	1,8	1	1,800
37	32	8	8	18,5	46	0,402
98	-	2	2	17,8	2	8,900
41	-	0	2	1,0	10	0,100
44	-	2	2	1,1	8	0,138
45	87	3	2	20,2	24	0,842
47	-	9	9	7,8	31	0,251
57	106	2	2	2,1	4	0,525
64	120	9	7	6,3	4	1,575

**nach erneutem Einsetzen des Niederschlags*

Bei Betrachtung der Tabelle fällt das Verhalten des Bestandsniederschlags unterhalb der Tannen auf. Während der Niederschlag unterhalb der Laubbäume nur wenigen Minu-

ten nach dem Freilandniederschlag auf den Boden trifft (hier max. 14 Minuten später), dauert es unterhalb der Tannen einige Zeit länger oder aber die Tanne fängt während des Ereignisses den Niederschlag komplett ab, sodass er überhaupt nicht auftritt.

In Abbildung 4.22 sind die stündlichen Niederschlagssummen für drei Niederschlagsereignisse abgebildet. Bei den Niederschlagsereignissen in Abbildung 4.22a und b handelt es sich um zwei Sommerereignisse, bei dem in Abbildung 4.22c um ein Winterereignis.

Es kann hierbei erkannt werden, dass von den Bäumen nach dem Ende des Regenereignisses immer noch Wasser tropft, was auf die Interzeption zurückzuführen ist.

Das Niederschlagsereignis Nummer 13 begann am 12. Juli 2011 und ist das Ereignis, bei dem der BNS unterhalb der Tannen erst sehr spät eine Rolle spielt (282 Minuten nach Beginn des Ereignisses). Dies kann auch in der Abbildung erkannt werden, da die stündliche Niederschlagssumme unter den Tannen erst relevant wurde, als es zu höheren Niederschlagssummen beim Freilandniederschlag P_G kam. Des Weiteren kann noch gesagt werden, dass dieses Ereignis länger andauerte (32 Stunden), wobei in dieser Zeit nicht immer Niederschlag gefallen ist und die Intensitäten der Nachtstunden und am Vormittag geringer sind als die in den Abendstunden.

Bei dem Niederschlagsereignis Nummer 37, welches am 7. Oktober 2011 begann, handelt es sich um ein Niederschlagsereignis aus den Sommermonaten. Von den in Tabelle 4.6 aufgeführten Ereignissen dauert es am längsten an (46 Stunden), allerdings hat es nur eine der geringsten Intensitäten (0,402 mm/h), wie auch in der Abbildung erkannt werden kann. Die stündlichen Niederschlagssummen sind nicht so hoch wie die von Ereignis 13.

Das Niederschlagsereignis Nummer 45 weist über einen längeren Zeitraum ähnlich hohe Intensitäten auf. Das Ereignis begann am 13. Dezember 2011 und endete erst am Abend des darauffolgenden Tages. Die Niederschläge sind über einen längeren Zeitraum verteilt und weisen keine Bündelung ihrer maximalen stündlichen Niederschlagssummen auf. Zwar kann schon erkannt werden, dass es zweimal zunächst zu einer Zunahme bis hin zu einem Maximum und anschließender Abnahme kommt, allerdings sind diese Maxima nicht so ausgeprägt wie bei Ereignis Nummer 13.

4.3.3 Interzeptionsverlust

Auch in diesem Teil der Arbeit wurden wieder Niederschlagswerte (sowohl beim Freilandniederschlag als auch beim Bestandsniederschlag) herausgenommen, die bei einer Temperatur von 4 $°C$ oder weniger gefallen sind, da die Niederschlagswippen unterhalb der Vegetation nicht beheizt waren und bei Schneefall keine verlässlichen Daten lieferten.

In Abbildung 4.23 sind die monatlichen Interzeptionsverluste für die drei Baumarten

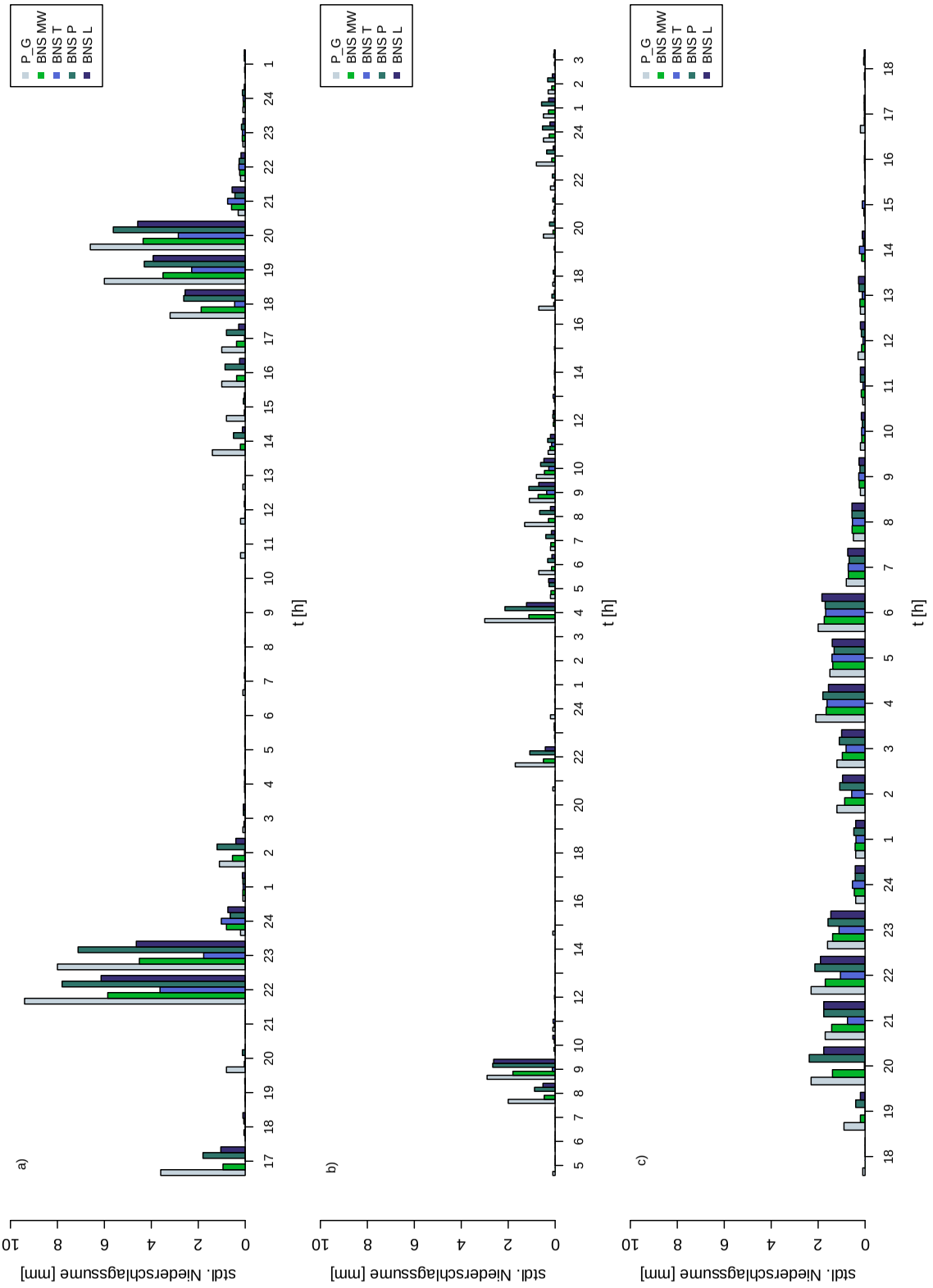

Abb. 4.22: *Stündliche Niederschlagssummen für a) das Niederschlagsereignis Nr. 13, b) das Niederschlagsereignis Nr. 37 und c) das Niederschlagsereignis Nr. 45.*

und deren Mittelwert dargestellt. Des Weiteren enthält die Abbildung die prozentualen Anteile des Interzeptionsverlustes I_C an der monatlichen Niederschlagssumme des Freilandniederschlags P_G.

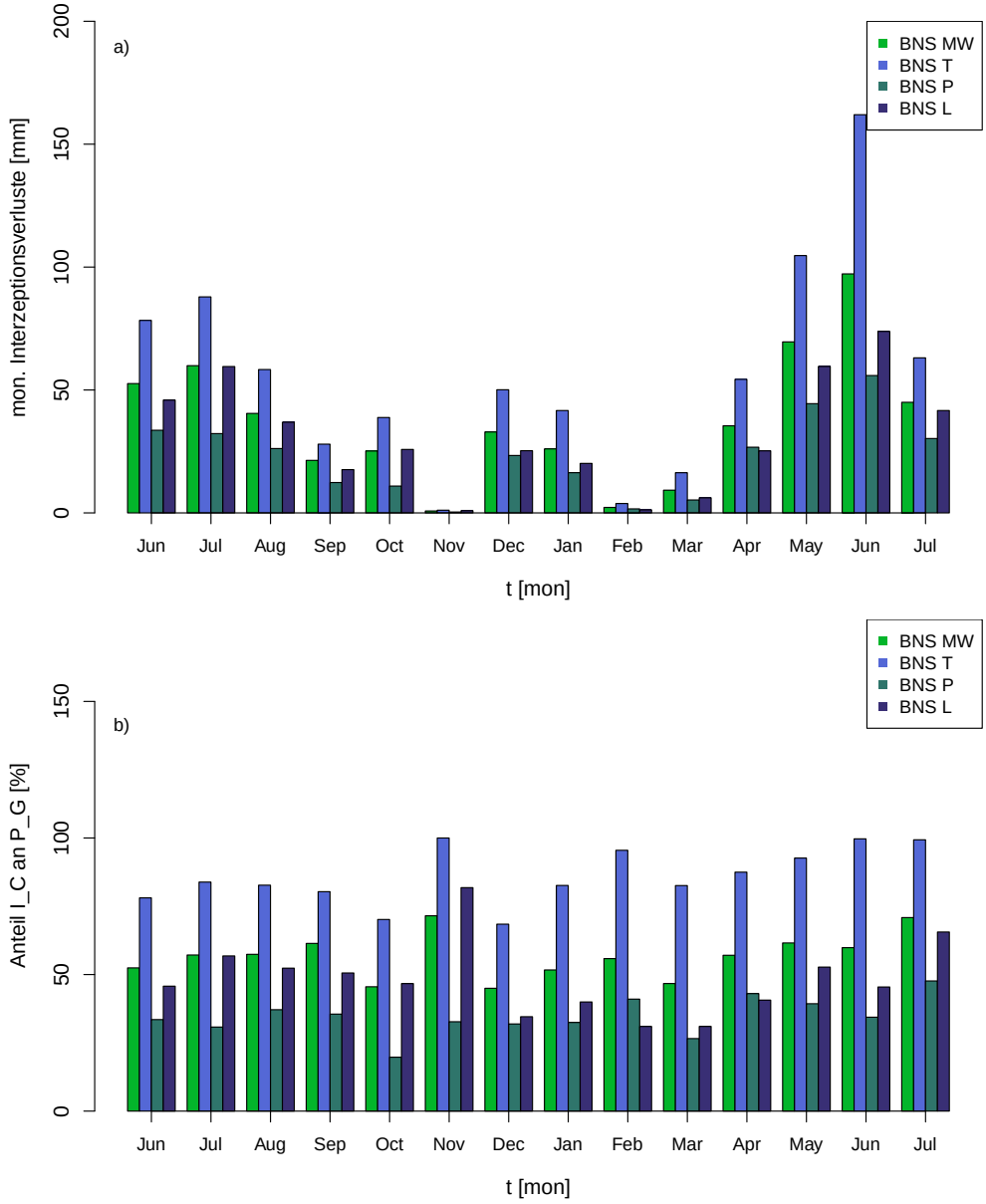

Abb. 4.23: *a) Monatliche Interzeptionsverluste und b) Anteile der monatlichen Interzeptionsverluste an den monatlichen Summen des Freilandniederschlags.*

In Tabelle 4.7 sind die der Abbildung 4.23 entsprechenden Werte noch einmal aufgeführt. $z_{I_{C_x}}$ steht hierbei für den prozentualen Anteil des Interzeptionsverlustes an der Monatssumme des Freilandniederschlags.

Die Monate mit den geringsten Verlusten sind laut der Abbildung 4.23a der Februar 2012 und der November 2011. Im Juni 2012 sind die Interzeptionsverluste am höchsten.

Tab. 4.7: *Monatliche Interzeptionsverluste I_{C_x} und prozentuale Anteile der monatlichen Interzeptionsverluste am Freilandniederschlag $z_{I_{C_x}}$ (2011-2012)*

Monat	$I_{C_{MW}}$ [mm]	$z_{I_{C_{MW}}}$ [%]	I_{C_T} [mm]	$z_{I_{C_T}}$ [%]	I_{C_P} [mm]	$z_{I_{C_P}}$ [%]	I_{C_L} [mm]	$z_{I_{C_L}}$ [%]
Jun	52,603	52,446	78,310	78,076	33,620	33,519	45,880	45,743
Jul	59,893	57,150	87,880	83,855	32,260	30,782	59,540	56,813
Aug	40,467	57,400	58,320	82,723	26,180	37,135	36,900	52,340
Sep	21,367	61,398	27,960	80,345	12,360	35,517	17,600	50,575
Oct	25,180	45,533	38,800	70,163	10,920	19,747	25,820	46,691
Nov	0,787	71,515	1,100	100,000	0,360	32,727	0,900	81,818
Dec	32,920	44,973	50,100	68,443	23,360	31,913	25,300	34,563
Jan	26,047	51,680	41,640	82,619	16,360	32,460	20,140	39,960
Feb	2,233	55,833	3,820	95,500	1,640	41,000	1,240	31,000
Mar	9,250	46,717	16,350	82,576	5,260	26,566	6,140	31,010
Apr	35,430	57,053	54,330	87,488	26,720	43,027	25,240	40,644
May	69,570	61,566	104,690	92,646	44,440	39,327	59,580	52,726
Jun	97,237	59,838	161,990	99,686	55,880	34,388	73,840	45,440
Jul	44,993	70,856	63,080	99,339	30,260	47,654	41,640	65,575

Wird nun allerdings die Abbildung 4.23b betrachtet, kann erkannt werden, dass der November neben dem Juli zu den Monaten mit den höchsten prozentualen Anteilen des Interzeptionsverlustes am Freilandniederschlag zählt. Die niedrigen Summen des Interzeptionsverlustes im November und Februar (und die Verläufe und Höhen der monatlichen Summen allgemein) sind durch die geringen Niederschläge in diesen Monaten zu begründen (vgl. Abbildung 4.9).

Anhand der Tabelle 4.7 kann erkannt werden, dass die monatlichen Interzeptionsverluste des Mittelwerts der Baumarten zwischen 44,973 % (Dezember 2011) und 71,515 % (November 2011) liegen. Der mittlere monatliche Interzeptionsverlust liegt bei 56,711 % mit einer Standardabweichung von ± 8,238 %. Erfolgt eine Unterteilung in Sommer und Winter, kann der mittlere Interzeptionsverlust für den Sommer mit 58,138 % und einer Standardabweichung von ± 6,901 % und für den Winter mit 54,144 % und einer Standardabweichung von ± 10,606 % angegeben werden.

Für die Abbildung 4.24 wurden die stündlichen Niederschlagssummen von P_G und die des Mittelwerts der BNS von Tanne, Platane und Linde ausgewählt und gegeneinander aufgetragen. Zusätzlich wurde eine lineare Regression durchgeführt (blau) und eine Gerade eingezeichnet, die entstünde, wenn der Bestandsniederschlag die gleichen Mengen aufweisen würde wie der Freilandniederschlag.

Die Gerade der linearen Regression wird durch die Gleichung 4.5 beschrieben und

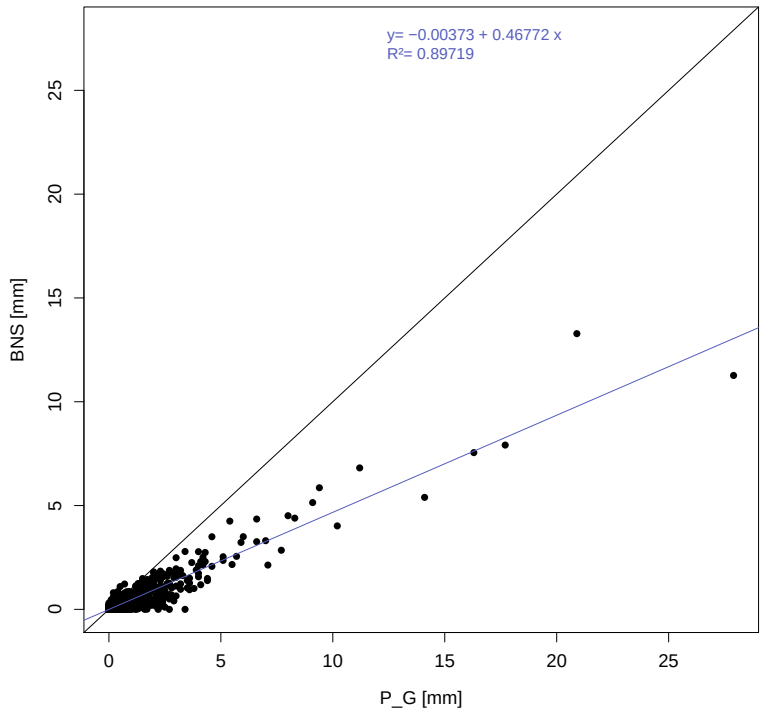

Abb. 4.24: *Bestandsniederschlag als eine Funktion von Freilandniederschlag.*

schneidet die y-Achse bei -0,00373 mm.

$$y = 0,46772 \cdot x - 0,00373 \tag{4.5}$$

Anhand der Abbildung kann erkannt werden, dass der Bestandsniederschlag deutlich geringer ausfällt als der Freilandniederschlag, da die Linie der linearen Regression immer unterhalb der der perfekten Anpassung verläuft.

In Abbildung 4.25 ist noch einmal eine Unterteilung in Sommer und Winter zu sehen. Während es im Sommer auch Stunden gibt, in denen mehr als 75 mm Niederschlag fallen, sind diese im Winter nicht mehr zu erkennen.

In Abbildung 4.26 sind die aufsummierten täglichen Niederschläge der Meteostation Vaub02 und der Mittelwert der drei Messstellen unterhalb der Baumarten (Linde, Tanne, Platane) im Stadtteil Vauban zu erkennen. Zusätzlich wurde die Differenz zwischen des Mittelwerts zu den Niederschlagsdaten eingefügt.

Unter Verwendung der Abbildung wird ersichtlich, dass die Unterschiede zwischen Freiland- und Bestandsniederschlag an Tagen mit größeren täglichen Niederschlägen größer sind als an Tagen mit wenig Niederschlag. Am größten war der Unterschied mit 20,33 mm am 30. Mai 2012.

Des Weiteren können zwei Gruppen unterschieden werden. Zum einen gibt es mehrere

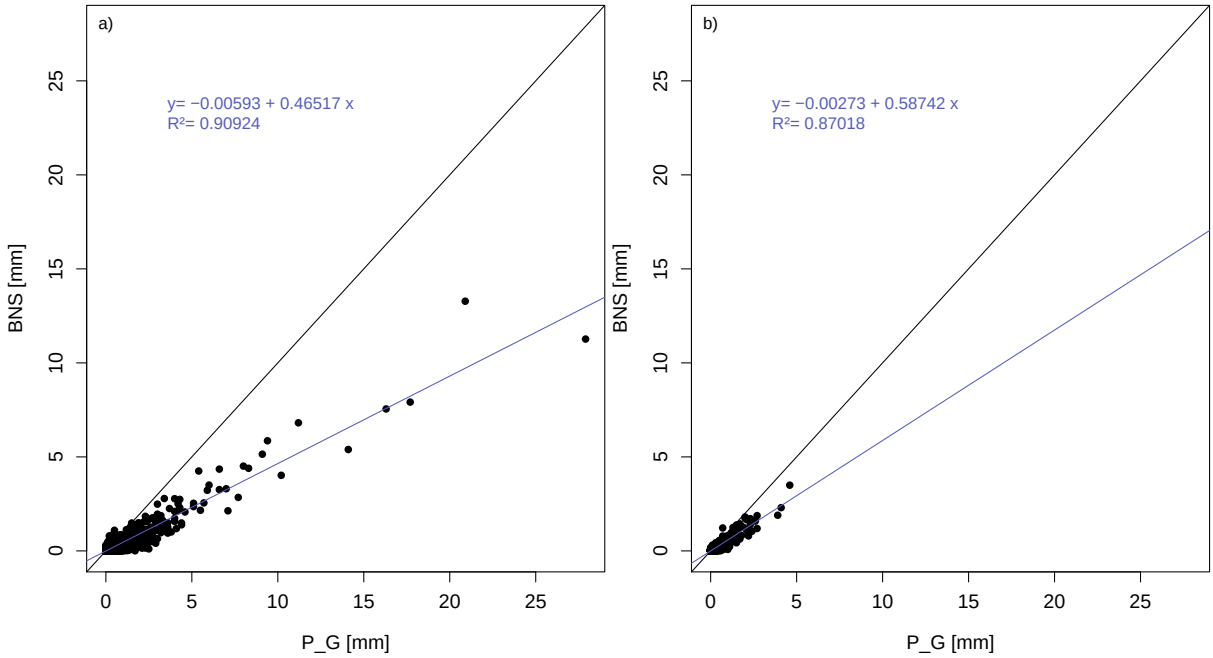

Abb. 4.25: *Bestandsniederschlag als eine Funktion von Freilandniederschlag, a) Sommer, b) Winter.*

Monate mit hohen Niederschlagsintensitäten und höheren Abweichungen (Juni, Juli, z.T. August), zum anderen welche mit niedrigen Intensitäten und niedrigen Abweichungen (November bis März).

Für ein besseres Verständnis wurde die Abbildung 4.27 erstellt, die dies noch einmal verdeutlichen soll. Als Monate mit geringeren Abweichungen wurden der Dezember des Jahres 2011 und der Januar 2012 gewählt, als Monate mit größeren Abweichungen der Mai und Juni aus dem Jahr 2012.

In Tabelle 4.8 finden sich die Summen des Freilandniederschlages und der unterschiedlichen Bestandsniederschläge und die entsprechenden Interzeptionsverluste. Zusätzlich finden sich Angaben, wieviel Prozent des Freilandniederschlags auf den Boden trifft und wie viel verloren geht. Des Weiteren wurde der Mittelwert der Bestandsniederschläge gebildet.

Auch aus der Tabelle wird ersichtlich, dass der Freilandniederschlag P_G größer ausfällt als der Bestandsniederschlag BNS. Allerdings gibt es bei den Baumsorten Unterschiede. Der höchste Interzeptionsverlust findet sich bei der Tanne, bei der lediglich 13,68 % des Niederschlags den Boden erreichen, der niedrigste findet sich bei der Platane mit 64,20 % Niederschlag, der auf den Boden trifft. Bei der Linde kommen im Mittel 51,25 % des Niederschlags auf den Boden.

In Tabelle 4.9 ist eine Aufschlüsselung in Sommer (April bis Oktober) und Winter (November bis März) zu erkennen.

Abb. 4.26: *Tägliche Niederschlagsdaten der Station Vaub02, Mittelwert der drei Baumsorten und Unterschied zwischen beiden.*

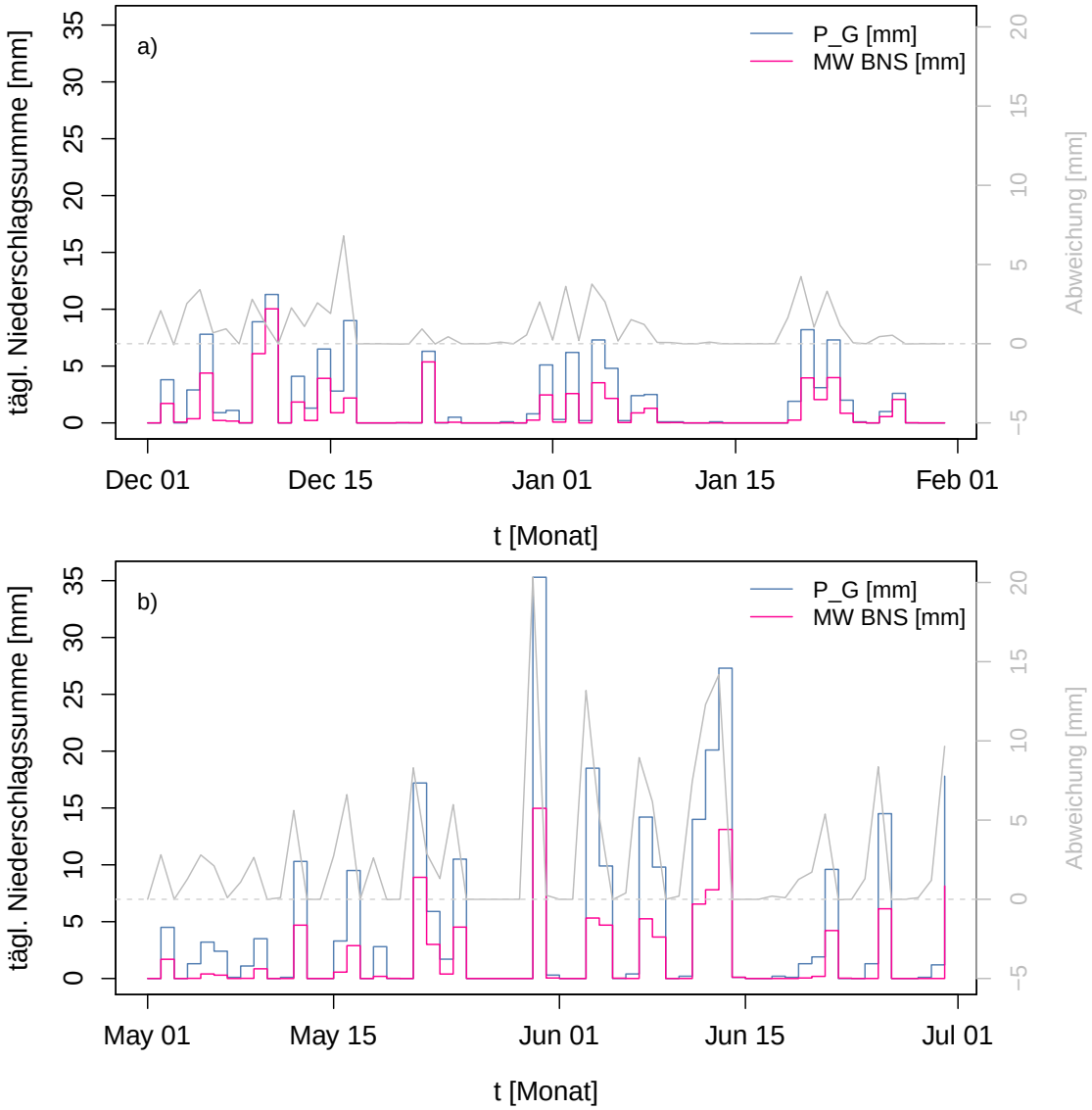

Abb. 4.27: *Tägliche Niederschlagsdaten der Station Vaub02, Mittelwert der drei Baumsorten und Unterschied zwischen beiden für (a) Dezember 2011/Januar 2012 und (b) Mai/Juni 2012.*

Zum einen kann erkannt werden, dass in den Wintermonaten weniger Niederschlag gefallen ist als in den Sommermonaten. Im Winter fielen 148,50 mm, im Sommer der weitaus größere Anteil von 766,80 mm. Zum anderen wird ersichtlich, dass die Interzeptionsverluste I_C unter den verschiedenen Bäumen auch geringer ausfallen. Der Unterschied des Interzeptionsverlustes durch die Tannen liegt bei 12,185 Prozentpunkten, bei den Platanen beträgt er 3,920 Prozentpunkte und der Interzeptionsverlust durch die Linden ist im Winter um 14,764 Prozentpunkte geringer als im Sommer.

In Abbildung 4.28a ist der Interzeptionsverlust I_C unterhalb der Vegetation über den

Tab. 4.8: *Niederschlagssummen und Interzeptionsverluste für Tanne, Platane, Linde und deren Mittelwerte*

Parameter	**Summe** [mm]	**Anteil an** P_G [%]	I_C [mm]	**Anteil** I_C **an** P_G [%]
P_G	927,9000	100,00000	0,0000	0,00000
BNS Tanne	126,9300	13,67928	797,1700	85,91120
BNS Platane	595,6800	64,19657	319,6200	34,44552
BNS Linde	475,5400	51,24906	446,0600	48,07199
BNS (Mittelwert)	397,3233	42,81963	517,9767	55,82247

Tab. 4.9: *Niederschlagssummen und Interzeptionsverluste für Tanne, Platane, Linde und deren Mittelwert aufgeteilt in Sommer und Winter*

Parameter	**Summe** [mm]	**Anteil an** P_G [%]	I_C [mm]	**Anteil** I_C **an** P_G [%]
Sommer				
P_G	766,8000	100,00000	0,00000	0,00000
BNS Tanne	89,8200	11,71362	676,98000	88,28638
BNS Platane	494,1600	64,44444	272,64000	35,55556
BNS Linde	377,2000	49,06103	390,60000	50,93897
BNS (Mittelwert)	320,0600	41,73970	446,74000	58,26030
Winter				
P_G	148,50000	100,00000	0,00000	0,00000
BNS Tanne	35,49000	23,89899	113,01000	76,10101
BNS Platane	101,52000	68,36364	46,98000	31,63636
BNS Linde	94,78000	63,82492	53,72000	36,17508
BNS (Mittelwert)	77,26333	52,02918	71,23667	47,97082

Untersuchungszeitraum zu sehen, in Abbildung 4.28b der entsprechende Freilandniederschlag. Auch hier wird deutlich, dass die Niederschlagsereignisse mit höheren Intensitäten während der Sommermonate zu höheren Interzeptionsverlusten führen. In Abbildung 4.28c ist die mittlere tägliche Temperatur über den Beobachtungszeitraum hinweg zu sehen. Auffällig sind hier einige Tage im Februar, an denen die Temperaturen deutlich unter dem Gefrierpunkt lagen. Diese Tage wurden nicht in die Analyse mit einbezogen.

Insgesamt gehen aufgrund der Interzeption im Jahr zwischen 58,260 % (im Sommer) und 47,971 % (im Winter) des Niederschlags verloren, wobei dies von der Art der Vegetation (vgl. Tabelle 4.8), der Niederschlagsdauer, der Intensität und der Dauer eines Niederschlagsereignisses abhängt.

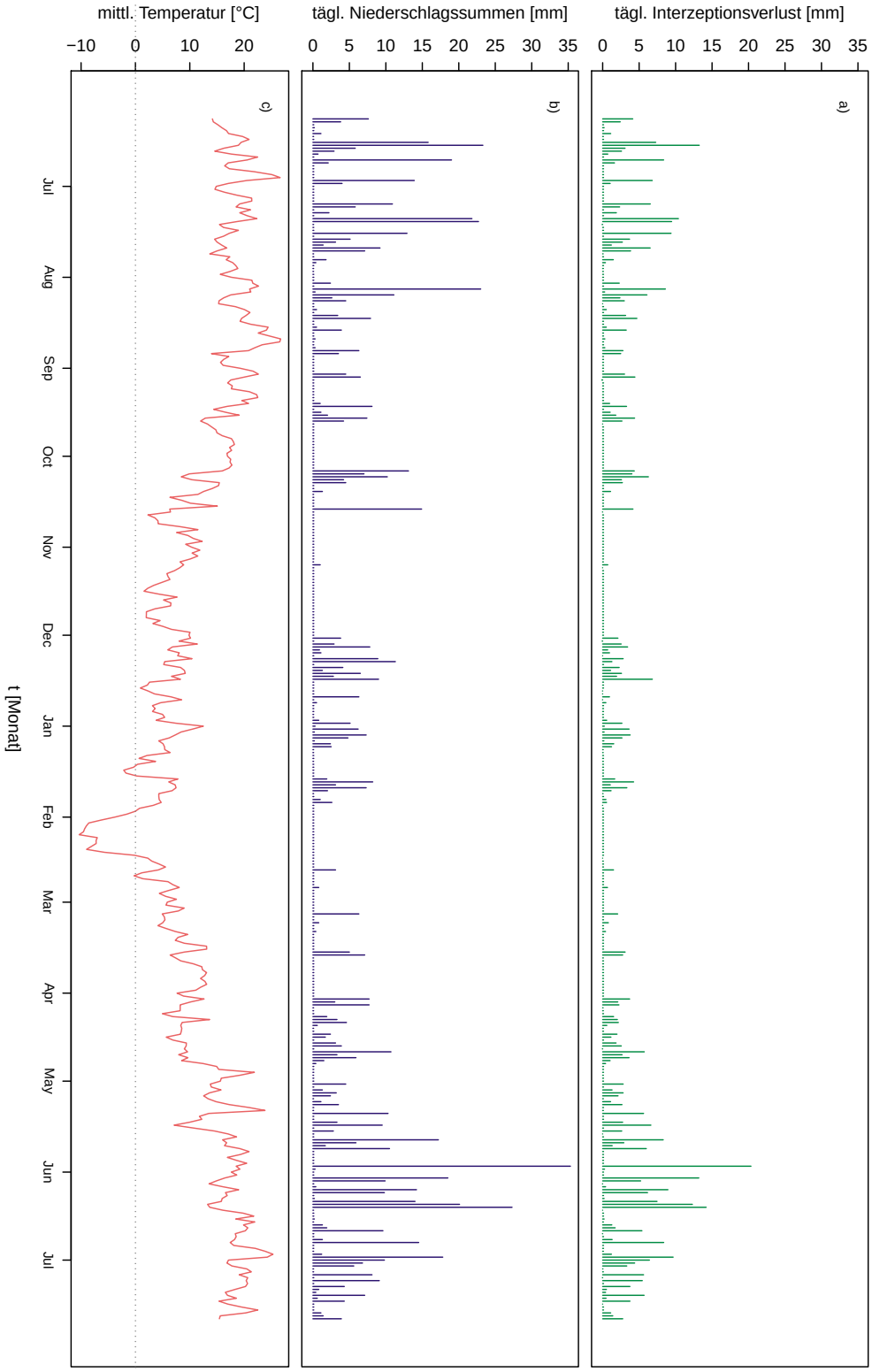

Abb. 4.28: *Täglicher Interzeptionsverlust und Niederschlagssummen, sowie tägliche mittlere Temperaturen für den Untersuchungszeitraum.*

Kapitel 5

Fazit

Aufgrund der durchgeführten Analysen mithilfe von LiDAR-Daten, Höhenmodell und Angaben zur Versiegelung und Bebauung konnte ein Vegetationsmodell für die Stadt Freiburg im Breisgau im Süden Baden-Württembergs erstellt werden. Das Modell enthält Angaben zur Lage von Vegetation über versiegelten Flächen verschiedener Versiegelungsstufen und zur Flächengröße dieser Bereiche. Die Erstellung des GIS-Modells auf die in dieser Arbeit angegebene Art gelingt recht gut, allerdings ist an manchen Stellen noch Nachbearbeitung nötig, da die Hochpixel auch Stromüberlandleitungen, Lampen, Schilder, Busse und andere Verkehrsteilnehmer sein können, die fälschlicherweise als Vegetation erfasst werden und nachträglich entfernt werden müssen.

Durch das Vegetationsmodell können Angaben zum prozentualen Anteil an von Vegetation beeinflussten Versiegelungsflächen in den Bezirken der Stadt gemacht werden, wodurch abgeschätzt werden kann, wie groß der Anteil der Vegetation ist, die Einfluss auf den Regenwasserabfluss während Niederschlagsereignissen hat.

Es konnte festgestellt werden, dass der prozentuale Anteil von Vegetation von 5,193 % in Mooswald bis hin zu 35,143 % in Littenweiler reicht. Des Weiteren gibt es anscheinend eine Zunahme der Vegetation von West nach Ost. Im Westen der Stadt finden sich hauptsächlich Bezirke mit einem prozentualen Vegetationsanteil zwischen 5 und 15 %, während es im Osten der Stadt Bezirke mit einem prozentualen Vegetationsanteil von größer als 15 % gibt. Eine Ausnahme bildet hier allerdings die Altstadt, deren prozentualer Anteil z_{Veg} auch nur 6,178 % beträgt und die zwischen Bezirken mit einem höheren Vegetationsanteil liegt.

Insgesamt kann gesagt werden, dass nach Annahme des GIS-Modells etwa 12,125 % der untersuchten Flächen Freiburgs von Vegetation beeinflusst sind.

Die Validierung des GIS-Modells ergab, dass es die Realität an einigen Stellen gut widerspiegelt, dass es sie an anderen Stellen aber auch über- oder unterschätzt. Durch die Validierung mit der Orthophotomethode konnte festgestellt werden, dass in den untersuchten Validierungsflächen etwa 26,580 % von Vegetation beeinflusst werden. Für die gleichen Flächen gab das GIS-Modell eine Vegetationsbeeinflussung von 27,783 % aus. Anhand der h-r-Methode konnte für die Validierungsflächen, bei denen das GIS-Modell einen prozentualen Vegetationsanteil von 34,307 % ausgab, ein Anteil von 27,788 % be-

rechnet werden.

Es kann also gesagt werden, dass das GIS-Modell die Realität überschätzt: bei der Validierungsmethode mit den Orthophotos um 1,203 Prozentpunkte, bei der Methode mit den Baumkronenradien und dem Abstand zwischen Baumstamm und Beginn der Versiegelung um 6,519 Prozentpunkte.

Um nun herauszufinden, wie stark sich die Vegetation auf den Niederschlag und den damit verbundenen Abfluss durch die Kanalisation und den oberirdischen Abfluss auswirkt, wurden Interzeptionsmessungen aus dem Stadtteil Vauban ausgewertet. Die Analyse beruht auf Messungen, die vom 8. Juni 2011 bis zum 21. Juli 2012 durchgeführt worden waren und in minütlicher Auflösung vorlagen.

Die Analysen ergaben, dass sich die verschiedenen Vegetationsformen, unter denen der Bestandsniederschlag gemessen wurde, unterschiedlich auf die Interzeption auswirken. Es hat sich herausgestellt, dass Tannen während Niederschlagsereignissen den größten Einfluss auf Intensität und Summe des Niederschlags haben und sich dieser auch im Vergleich von Sommer- und Wintermonaten nicht stark ändert. Werden hingegen die Platanen und Linden betrachtet, lässt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Sommer und Winter beobachten. Dies äußert sich in einer Annäherung der Intensitäten und Niederschlagssummen unterhalb des Bestandes an die des Freilandniederschlags. Im Mittel entsprechen die Intensitäten und Niederschlagssummen unterhalb von Vegetation etwa 35 % der des Freilandniederschlags (Sommer: 32 %, Winter: 47 %).

Bei der Analyse der Intensitäten und Niederschlagssummen und der Art, wie sie sich mit zunehmender Stärke der Intensitäten ändern, konnte festgestellt werden, dass sie im Mittel in den niedrigen Intensitätsbereichen mit einem prozentualen Anteil der Intensitäten unterhalb des Bestands an denen des Freilandniederschlags von 33,940 % und einer Standardabweichung von ± 18,610 % den Niederschlag recht gut abdämpfen. Wobei hier wieder darauf geachtet werden sollte, dass diese Berechnungen auf einem Mittelwert der Bestandsniederschläge von Tanne, Linde und Platane beruhen und sich die Bäume unterschiedlich auf den Niederschlag auswirken.

Weitere Beachtung sollte der Tatsache gezollt werden, dass für die Ereignisse mit Intensitätsklassen ab 4 mm/h nur wenige Werte vorlagen und aus diesem Grund nicht davon ausgegangen werden kann, dass es sich bei den entsprechenden Werte für $z_{i_{BNS}}$ wirklich um repräsentative Werte handelt. Dies wird besonders bei den Intensitätsklassen von 6 bis 8 mm/h und 8 bis 10 mm/h deutlich, da in diese Klassen jeweils nur ein Ereignis einsortiert werden konnte.

Die Interzeptionsverluste wurden im Monatszeitraum als Mittel und über den gesamten Zeitraum als Totalwert angegeben. Wurden die Monatssummen der mittleren Inter-

zeptionsverluste (Mittelwert der drei Bestandsarten) betrachtet, konnten unterschiedliche Interzeptionshöhen in den verschiedenen Monaten erkannt werden. Dies ist auf die unterschiedliche Niederschlagscharakteristik in den jeweiligen Monaten zurückzuführen. Bei der Betrachtung der prozentualen Anteile der Interzeptionsverluste am Freilandniederschlag konnten sowohl zwischen den verschiedenen Beständen als auch zwischen den verschiedenen Monaten Unterschiede erkannt werden. Die Interzeptionsverluste unterhalb der Tannen befinden sich immer auf einem hohen Niveau, unterhalb der Laubbäume sind sie deutlich niedriger. Des Weiteren kann auch ein leichter Jahresgang bei den Interzeptionsverlusten der Laubbäume erkannt werden. In den Wintermonaten sind sie bei der Linde mit Ausnahme des Novembers niedriger als in den Sommermonaten. Dies ist auf die Belaubung der Laubbäume zurückzuführen bzw. auf die Tatsache, dass sie während der Wintermonate kein Laub tragen.

Im Mittel liegen die prozentualen Anteile der monatlichen Interzeptionsverluste bei 56,711 % mit einer Standardabweichung von ± 8,238 %. Aufgeteilt auf Sommer und Winter liegt der Anteil des Interzeptionsverlustes im Sommer bei 58,138 % von der monatlichen Gesamtsumme des Freilandniederschlags mit einer Standardabweichung von ± 6,901% und im Winter bei 54,144 % mit einer Standardabweichung von ± 10,606 %.

Analysen von Tageswerten zeigten, dass die Interzeptionsverluste an Tagen mit hohen Niederschlagssummen höher ausfallen als an Tagen mit geringen Niederschlagssummen. Insgesamt gingen über den Untersuchungszeitraum für den Mittelwert der verschiedenen Vegetationsformen 55,822 % des Freilandniederschlags durch Interzeption verloren. Für die Sommermonate konnte ein prozentualer Anteil des Interzeptionsverlustes am Freilandniederschlag von 58,260 % ermittelt werden, für die Wintermonate ein Anteil von 47,971 %.

Im Vergleich der hier erhaltenen Werte für den Interzeptionsverlust I_C mit denen aus der Literatur konnte festgestellt werden, dass sie mit einigen recht gut übereinstimmen. Hier kann zum Beispiel die Masterarbeit von Asadian (2007) aufgeführt werden. Für Nadelbäume in urbanen Gebieten wurde hier eine Interzeption von 81,7 % (Sommer) und 71,4 % (Winter) gemessen [Asa07]. In dieser Arbeit liegt sie mit 88,2 % (Sommer) und 76,1 % (Winter) ein wenig höher, was aber daran liegen kann, dass der Untersuchungszeitraum kürzer war und hier Niederschlagswippen und Rinnen genutzt wurden.

Für die Laubbäume konnten auch wieder einige Ähnlichkeiten zu bereits veröffentlichten Studien erkannt werden [Asa07, Hor19], im Schnitt sind die Interzeptionsverluste aus anderen Studien aber geringer.

Allgemein kann zu den Unterschieden gesagt werden, dass sie aufgrund der Art der Messungen (Niederschlagswippen, Rinnen), der Tatsache, dass in manchen der Stammab-

fluss gemessen wurde und in manchen nicht, und natürlich aufgrund anderer meteorologischer Parameter wie Temperatur und Windgeschwindigkeiten an den jeweiligen Standorten entstehen.

In dieser Arbeit wurden ein Vegetationsmodell für die Stadt Freiburg erstellt, anschließend validiert und die Niederschlagsdaten für den Bezirk Vauban ausgewertet. Es konnte auf diesem Weg festgestellt werden, wie stark die Vegetation in dieser Stadt den Niederschlag und die damit verbundene Abfuhr des Niederschlagswassers beeinflusst. Die Frage ist nun, wie es in anderen Städten Baden-Württembergs und Deutschlands aussieht. Um diese Frage zu beantworten, sollten Vegetationsmodelle für andere Städte erstellt werden um zu erfahren, wie hoch z_{Veg} dort ist und ob sich der Wert stark von dem Freiburgs unterscheidet. Wichtig ist hierbei, dass nicht nur Städte von ähnlicher Größe wie Freiburg betrachtet werden sollten, sondern größere (z.B. Stuttgart) und kleinere (z.B. Emmendingen).

Des Weiteren sollte die Analyse der Interzeptionsdaten von Vauban zu einem späteren Zeitpunkt noch einmal wiederholt werden. Es gab zwar schon Ergebnisse, die mit anderen Studien vergleichbar sind, allerdings gab es zu wenige Niederschlagsereignisse mit einer höheren Intensität, sodass keine plausiblen Angaben dazu gemacht werden konnten, wie gut die Bäume den Niederschlag bei hohen Intensitäten abpuffern.

Aufgrund der Tatsache, dass es zwischen Nadel- und Laubbäumen einen deutlichen Unterschied bei den Interzeptionsverlusten gibt, stellt sich außerdem noch die Frage, ob es sinnvoll ist ein Vegetationsmodell allein aufgrund von Hochpixel-Daten zu erstellen in dem die Vegetationsart unberücksichtig bleibt. Sinnvoller wäre vermutlich eine Kombination aus einem GIS-Modell anhand von LiDAR-Daten und eine Klassifizierung der Landnutzung mit z.B. Landsatbildern mit Hilfe der entsprechenden Funktionen im ArcMap (Image Classification). Allerdings ist hier fraglich, ob die Vegetation aufgrund von zu großen Auflösungen der Bilder auch richtig zugeordnet werden können.

Literaturverzeichnis

[AJvGF98] C. Asdak, P.G. Jarvis, P. van Gardingen, and A. Fraser. Rainfall interception loss in unlogged and logged forest areas of central kalimantan, indonesia. *Journal of Hydrology*, 206(3-4):237–244, 1998.

[Asa07] Y. Asadian. Rainfall interception in an urban environment. Master's thesis, The University of British Columbia, 2007.

[BB00] S.E. Brun and L.E. Band. Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24:5–22, 2000.

[BVM+05] D. Burns, T. Vitvar, J. McDonnell, J. Hassett, J. Duncan, and C. Kendall. Effects of suburban development on runoff generation in the croton river basin, new york, usa. *Journal of Hydrology*, 311(1-4):266–281, 2005.

[Cam07] J.L. Cameron. Influence of crown traits and leaf arrangement on rainfall interception, throughfall, and stemflow in five tropical tree species. Master's thesis, The University of Winnipeg, 2007.

[CMP99] D.E. Carlyle-Moses and A.G. Price. An evaluation of the gash interception model in a northern hardwood stand. *Journal of Hydrology*, 214(1):103 – 110, 1999.

[CR00] R.H. Crockford and D.P. Richardson. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes*, 14(16-17):2903 – 2920, 2000.

[Don97] H. Donnelly. Comparison of rainfall-runoff modelling techniques in small forested catchments. Master's thesis, Simon Fraser University, 1997.

[FD78] E.D. Ford and J.D. Deans. The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young sitka spruce plantation. *Journal of Applied Ecology*, pages 905 – 917, 1978.

[fGuL] Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung. Geotopographie. `http://www.lgl-bw.de/lgl-internet/opencms/de/05_Geoinformation/Geotopographie/`. ver. 2012-08-22.

[GLL95] J.H.C. Gash, C.R. Lloyd, and G. Lachaud. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, 170(1):79 – 86, 1995.

[Har77] R.D. Harr. Water flux in soil and subsoil on a steep forested slope. *Journal of Hydrology*, 33:37–58, 1977.

[Hor19] R.E. Horton. Rainfall interception. *Monthly Weather Review*, 47:603, 1919.

[IH02] A. Iroumé and A. Huber. Comparison of interception losses in a broadleaved native forest and a pseudotsuga menziesii (douglas fir) plantation in the andes mountains of southern chile. *Hydrological Processes*, 16(12):2347 – 2361, 2002.

[Jet96] V.G. Jetten. Interception of tropical rain forest: performance of a canopy water balance model. *Hydrological Processes*, 10(5):671 – 685, 1996.

[KdCvD+] J.J. Keizer, H.L. de Coninck, S.J.E. van Dijck, C.O.A. Coelho, and P.M.M. Warmerdam. Interception in pine and eucalypt forest in central. *UNESCO Technical Documents in Hydrology*, 77:53 – 58.

[Lan10] J. Lange. Vorlesung hydrologie und wasserhaushalt: Siedlungswasserwirtschaft / stadthydrologie, 2010.

[LUM04] T.E. Link, M. Unsworth, and D. Marks. The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(3):171 – 191, 2004.

[MK84] M. Mitsudera and Y. Nakane K. Kamata. Effect of fire on a water and major nutrient budgets in forest ecosystems iii. rainfall interception by forest canopy. *Japanese Journal of Ecology*, 34:15–25, 1984.

[MLV+09] A. Muzylo, P. Llorens, F. Valente, J.J. Keizer, F. Domingo, and J.H.C. Gash. A review of rainfall interception modelling. *Journal of Hydrology*, 370(1-4):191 – 206, 2009.

[MNH+97] E.G. McPherson, D.J. Nowak, G. Heisler, S. Grimmond, C. Souch, R. Grant, and R.A. Rowntree. Quantifying urban forest structure, function, and value: The chicago urban forest climate project. *Urban Ecosystems*, 1:49–61, 1997.

[NS04] N.M. Nadkarni and M.M. Sumera. Old-growth forest canopy structure and its relationship to throughfall interception. *Forest Science*, 50(3):290 – 298, 2004.

[Pie80] T.C. Pierson. Piezometric response to rainstorms in forested hillslope drainage depressions. *Journal of Hydrology*, 19:1–10, 1980.

[RKRM72] A.J. Rutter, K.A. Kershaw, P.C. Robins, and A.J. Morton. A predictive model of rainfall interception in forests, 1. derivation of the model from observations in a plantation of corsican pine. *Agricultural Meteorology*, 9:367 – 384, 1972.

[RMR75] A.J. Rutter, A.J. Morton, and P.C. Robins. A predictive model of rainfall interception in forests. ii. generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *Journal of Applied Ecology*, pages 367 – 380, 1975.

[SDP+] M. Schöninger, J. Dietrich, B. Pfützner, P. Hesse, S. Mey, and B. Klöcking. Hydroskript. `http://www.hydroskript.de/html/_index.html`. 2012-09-07.

[TO05] T. Toba and T. Ohta. An observational study of the factors that influence interception loss in boreal and temperate forests. *Journal of Hydrology*, 313(3):208 – 220, 2005.

[XM02] Q. Xiao and E.G. McPherson. Rainfall interception by santa monica's municipal urban forest. *Urban Ecosystems*, 6(4):291 – 302, 2002.

[XMUG00] Q. Xiao, E.G. McPherson, S.L. Ustin, and M.E. Grismer. A new approach to modeling tree rainfall interception. *Journal of Geophysical Research*, 105(D23):29,173–29,188, 2000.

Anhang A

Abbildungen

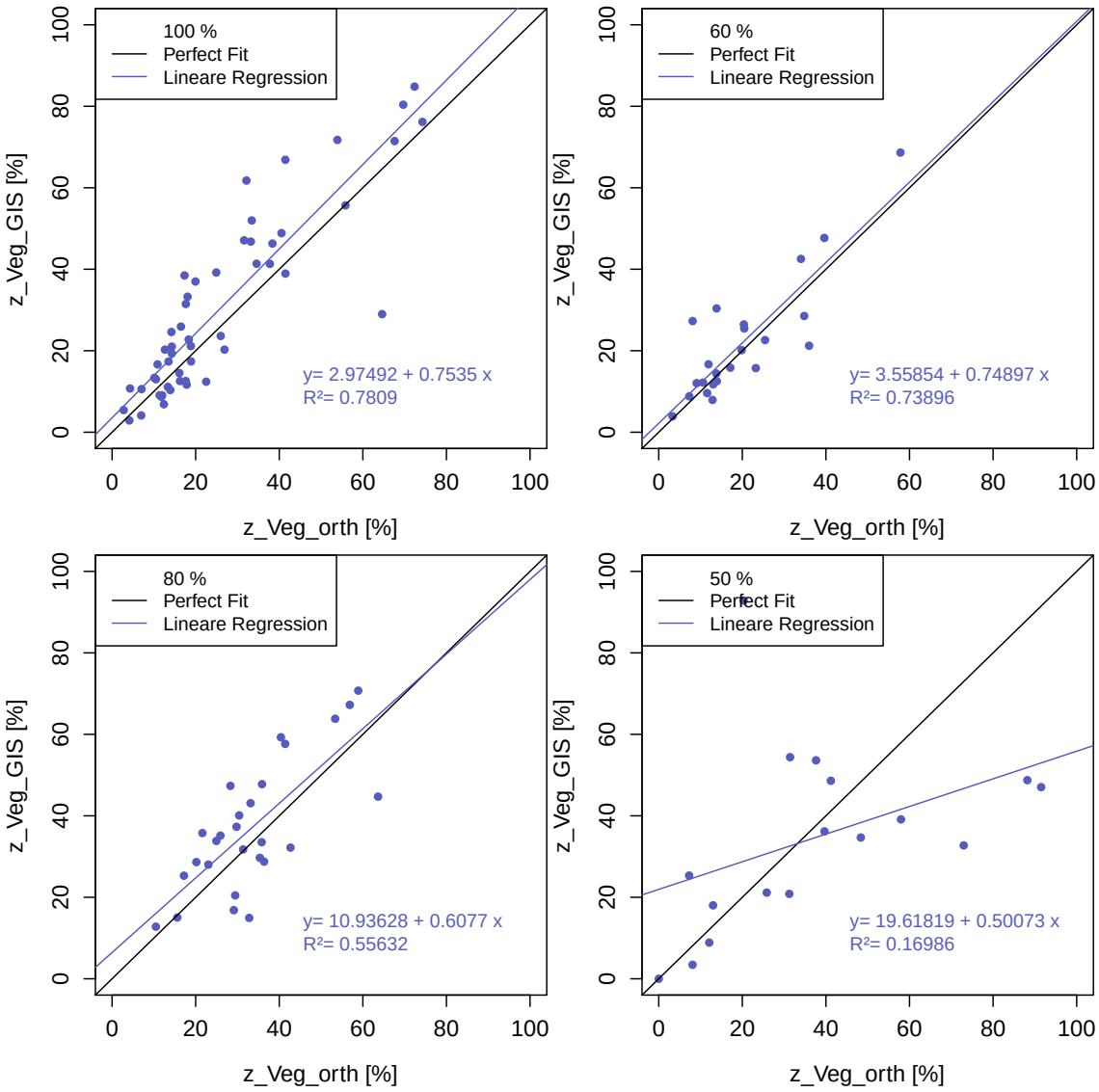

Abb. A.1: *Unterschiede des GIS-Modells und der Orthophotomethode für die 100-, 80-, 60- und 50 %-Versiegelungsflächen.*

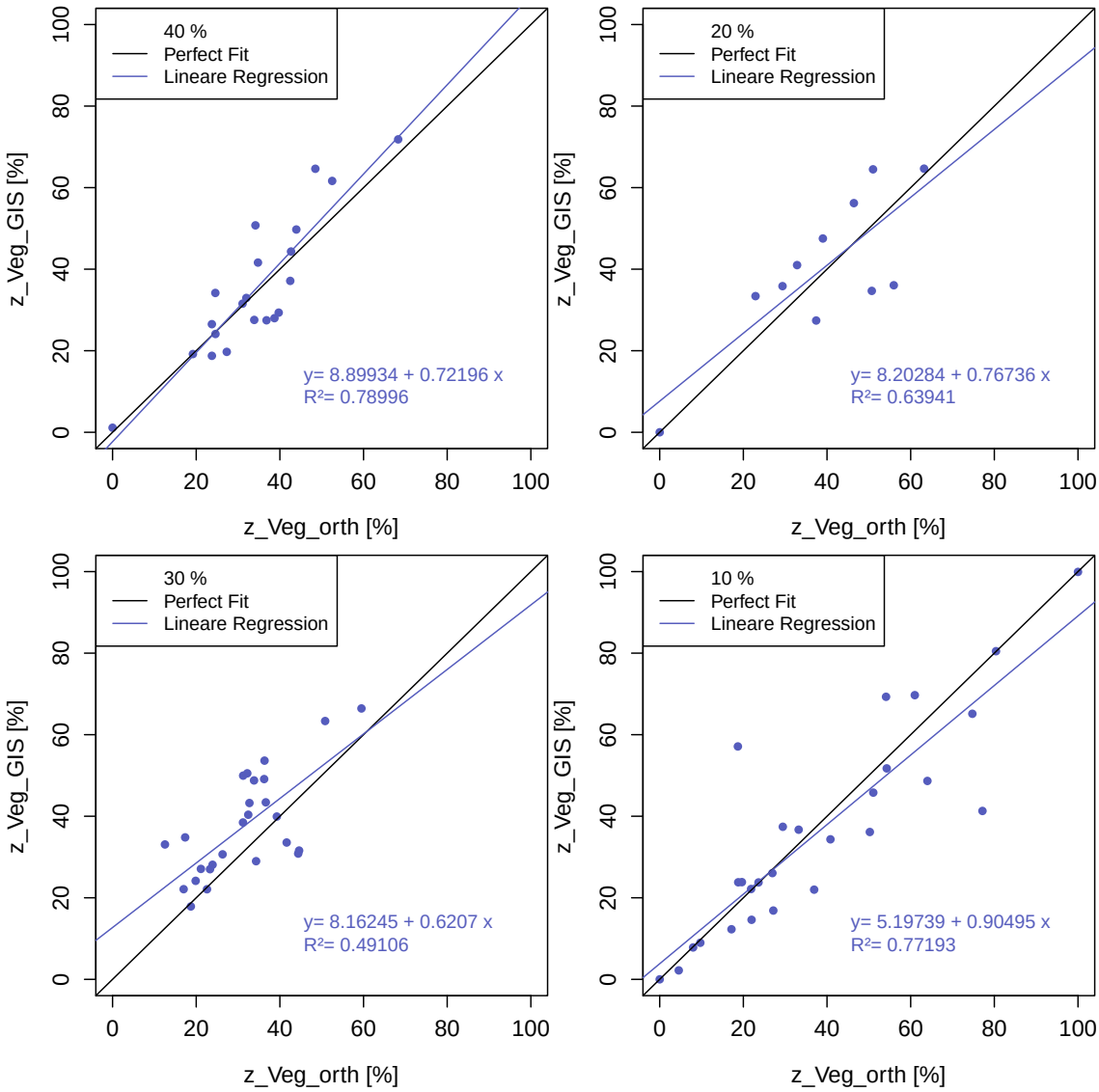

Abb. A.2: *Unterschiede des GIS-Modells und der Orthophotomethode für die 40-, 30-, 20- und 10 %-Versiegelungsflächen.*

Anhang B

Tabellen

Tab. B.1: *Literaturwerte zu Interzeptionsverlusten*

Quelle	I_C [%]	**Vegetationsart**	**Messzeitraum**	P_G [mm]	**Anmerkung**
[RKRM72]	22,425 ±14,051	Schwarzkiefer (Pflanzung)	06/20	10,2 ±2,0	MW von 4 Ereignissen
[IH02]	21,761	Douglasie (Pflanzung)	02/01/1998-03/31/2000	3805,0	T_F, S_F
[Asa07]	78,800	Nadelwald (forest)	01/2007-12/2008		Sommer
[Asa07]	81,700	Nadelwald (urban)	01/2007-12/2008		Sommer
[Asa07]	74,100	Nadelwald (forest)	01/2007-12/2008		Winter
[Asa07]	71,400	Nadelwald (urban)	01/2007-12/2008		Winter
[GLL95]	11,909	See-Kiefer (Pflanzung)	02/09/1986-03/01/1987	613,0	T_F, S_F
[KdCvD$^+$]	18,423	See-Kiefer	11/15/2002-02/21/2003	1243,0	T_F, S_F
[CR00]	15,654 ±11,087	Kiefer (Pflanzung)	03/30/1978-05/22/1981	20,5 ±10,6	MW von 10 Ereignissen
[MK84]	14,000	Japanische Rotkiefer (unburnt)	04/1981-04/1982	1576,0	
[MK84]	3,600	Japanische Rotkiefer (burnt)	04/1981-04/1982	1576,0	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Quelle	I_C [%]	**Vegetationsart**	**Messzeitraum**	P_G [mm]	**Anmerkung**
[Hor19]	15,000	Lärche			Jahresmittel über 12 Jahre, Swiss stations
[Hor19]	20,900	immergrün			Winter, German stations
[Hor19]	26,000	immergrün			Sommer, German stations
[Hor19]	23,000	immergrün			Gesamtjahr, German stations
[Cam07]	26,805	Acacia mangium	07/22/2006-09/19/2006	653,6	T_F
[Cam07]	13,091	Gliricidia sepium	07/22/2006-09/19/2006	632,5	T_F
[Cam07]	10,727	Guazuma ulmifolia	07/22/2006-09/19/2006	688,0	T_F
[Cam07]	16,041	Ochroma pyramidale	07/22/2006-09/19/2006	665,8	T_F
[Cam07]	12,481	Pachira quinata	07/22/2006-09/19/2006	665,8	T_F
[Hor19]	19,600	sommergrün			Winter, German stations
[Hor19]	35,000	sommergrün			Sommer, German stations
[Hor19]	26,000	sommergrün			Gesamtjahr, German stations

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Quelle	I_C [%]	**Vegetationsart**	**Messzeitraum**	P_G [mm]	**Anmerkung**
[CMP99]	19,270	Laubholz	DOY135-DOY270	213,8	
[IH02]	14,218	Laubwald	02/01/1998-03/31/2000	3805,0	T_F, S_F
[Asa07]	55,600	Laubwald (forest)	01/2007-12/2008		Sommer
[Asa07]	67,100	Laufwald (urban)	01/2007-12/2008		Sommer
[Asa07]	36,500	Laubwald (forest)	01/2007-12/2008		Winter
[Asa07]	45,800	Laubwald (urban)	01/2007-12/2008		Winter
[KdCvD$^+$]	9,381	Eukalyptusbaum	11/15/2002-02/21/2003	1002,0	T_F, S_F
[CR00]	7,743 ±10,471	Eukalyptusbaum (Wald)	03/30/1978-05/22/1981	20,8 ±12,0	MW von 10 Ereignissen
[Hor19]	25,000	Mixed			Jahreswert, 16 German stations
[Hor19]	16,990	Mixed			jährliches Mittel 16 Jahre, 3 Swiss stations

Tab. B.2: *Versiegelte Flächen der untersuchten Bezirke*

		Versiegelungsstufe [%]								
Amtliche Nummer	**Parameter**	100	80	60	50	40	30	20	10	full
111, 112	F_{Vers} $[km^2]$	8,659	0,125	0,037	0,022	0,104	0,102	0,061	0,252	9,362
	F_{Veg} $[km^2]$	0,361	0,000	0,008	0,010	0,043	0,042	0,034	0,080	0,578
	z_{Veg} [%]	4,170	0,000	21,956	45,522	41,804	41,009	55,174	31,905	6,178
231, 232	F_{Vers} $[km^2]$	9,972	0,180	1,399	0,182	0,355	0,208	0,135	2,011	14,442
	F_{Veg} $[km^2]$	0,541	0,000	0,352	0,033	0,094	0,076	0,036	0,328	1,459
	z_{Veg} [%]	5,425	0,000	25,145	18,265	26,492	36,512	26,421	16,304	10,105
611, 612, 613, 614	F_{Vers} $[km^2]$	10,155	0,238	0,469	0,049	0,155	1,030	0,075	0,625	12,796
	F_{Veg} $[km^2]$	0,674	0,062	0,082	0,011	0,041	0,294	0,022	0,137	1,322
	z_{Veg} [%]	6,633	26,124	17,434	22,887	26,550	28,555	28,629	21,841	10,331
211, 212	F_{Vers} $[km^2]$	5,978	0,136	0,028	0,003	0,239	1,029	0,068	0,371	7,851
	F_{Veg} $[km^2]$	0,466	0,000	0,009	0,001	0,134	0,501	0,037	0,173	1,322
	z_{Veg} [%]	7,799	0,000	32,994	37,210	56,368	48,689	54,208	46,694	16,838
540	F_{Vers} $[km^2]$	3,974	0,063	0,014	0,004	0,089	0,286	0,042	0,384	4,854
	F_{Veg} $[km^2]$	0,186	0,017	0,003	0,001	0,033	0,087	0,015	0,175	0,517
	z_{Veg} [%]	4,686	26,976	23,770	35,586	37,079	30,300	35,182	45,708	10,658
320	F_{Vers} $[km^2]$	0,826	0,097	0,022	0,022	0,076	0,708	0,182	0,545	2,477
	F_{Veg} $[km^2]$	0,225	0,045	0,007	0,012	0,038	0,358	0,084	0,103	0,871
	z_{Veg} [%]	27,180	46,894	30,869	51,649	50,018	50,514	45,894	18,983	35,143
422	F_{Vers} $[km^2]$	1,842	0,087	0,015	0,005	0,042	0,430	0,020	0,339	2,780
	F_{Veg} $[km^2]$	0,234	0,051	0,007	0,002	0,025	0,245	0,008	0,118	0,690
	z_{Veg} [%]	12,676	58,309	47,855	50,701	59,317	57,023	42,140	34,756	24,829
521, 522	F_{Vers} $[km^2]$	11,929	0,121	0,111	0,006	0,230	0,579	0,231	2,432	15,640
	F_{Veg} $[km^2]$	0,374	0,000	0,024	0,001	0,050	0,171	0,043	0,150	0,812
	z_{Veg} [%]	3,132	0,000	21,477	9,438	21,545	29,563	18,778	6,167	5,193

Fortsetzung auf der nächsten Seite

		Versiegelungsstufe [%]								
Amtliche Nummer	**Parameter**	100	80	60	50	40	30	20	10	full
120	F_{Vers} $[km^2]$	3,814	0,063	0,017	0,004	0,209	0,220	0,046	0,012	4,386
	F_{Veg} $[km^2]$	0,401	0,034	0,006	0,001	0,096	0,117	0,032	0,008	0,694
	z_{Veg} [%]	10,503	53,921	34,357	32,335	45,910	53,010	68,763	64,262	15,822
410	F_{Vers} $[km^2]$	0,828	0,048	0,040	0,006	0,034	0,159	0,015	0,133	1,262
	F_{Veg} $[km^2]$	0,207	0,021	0,017	0,003	0,018	0,080	0,005	0,052	0,402
	z_{Veg} [%]	24,974	43,200	42,825	47,364	54,920	49,934	33,820	39,036	31,865
421	F_{Vers} $[km^2]$	0,825	0,049	0,026	0,001	0,021	0,179	1,152192e-06	0,086	1,187
	F_{Veg} $[km^2]$	0,207	0,028	0,007	0,000	0,010	0,091	0,000	0,046	0,389
	z_{Veg} [%]	25,047	57,251	26,036	59,892	47,403	50,897	0,000	54,086	32,801
670	F_{Vers} $[km^2]$	3,676	0,056	0,000	0,003	0,004	0,185	0,016	0,371	4,310
	F_{Veg} $[km^2]$	0,178	0,002	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,067	0,255
	z_{Veg} [%]	4,844	3,632	NA	3,894	7,603	3,960	2,405	18,040	5,921
621, 622	F_{Vers} $[km^2]$	5,936	0,172	0,477	0,132	0,164	0,855	0,082	1,877	9,693
	F_{Veg} $[km^2]$	0,389	0,000	0,066	0,028	0,030	0,223	0,013	0,249	0,999
	z_{Veg} [%]	6,562	0,000	13,751	21,405	18,326	26,087	16,342	13,260	10,302
511, 512, 513	F_{Vers} $[km^2]$	9,981	0,180	0,026	0,021	0,432	0,399	0,380	0,822	12,241
	F_{Veg} $[km^2]$	0,572	0,071	0,005	0,012	0,157	0,143	0,158	0,152	1,270
	z_{Veg} [%]	5,731	39,318	20,174	58,410	36,212	35,763	41,647	18,546	10,377
423, 424	F_{Vers} $[km^2]$	2,283	0,078	0,125	0,042	0,053	0,546	0,027	0,887	4,041
	F_{Veg} $[km^2]$	0,519	0,000	0,026	0,022	0,028	0,277	0,013	0,306	1,191
	z_{Veg} [%]	22,718	0,000	21,161	52,370	53,304	50,802	46,744	34,490	29,481
680	F_{Vers} $[km^2]$	2,113	0,029	0,040	0,019	0,028	0,198	0,000	0,305	2,732
	F_{Veg} $[km^2]$	0,189	0,003	0,007	0,006	0,003	0,047	0,000	0,072	0,329
	z_{Veg} [%]	8,955	10,992	17,835	32,036	11,690	23,965	NA	23,700	12,029
310	F_{Vers} $[km^2]$	0,826	0,054	0,007	0,005	0,062	0,312	0,164	0,665	2,094
	F_{Veg} $[km^2]$	0,159	0,028	0,003	0,003	0,033	0,161	0,075	0,219	0,680
	z_{Veg} [%]	19,189	51,795	49,444	57,338	52,504	51,556	45,811	32,987	32,484

Fortsetzung auf der nächsten Seite

		Versiegelungsstufe [%]								
Amtliche Nummer	**Parameter**	100	80	60	50	40	30	20	10	full
660	F_{Vers} $[km^2]$	7,399	0,082	0,009	0,001	0,058	0,373	0,282	0,528	8,732
	F_{Veg} $[km^2]$	0,347	0,022	0,002	0,001	0,018	0,125	0,075	0,111	0,701
	z_{Veg} [%]	4,695	27,064	18,087	43,654	30,994	33,608	26,636	20,982	8,028
220	F_{Vers} $[km^2]$	2,989	0,075	0,016	0,056	0,027	0,567	0,073	0,777	4,580
	F_{Veg} $[km^2]$	0,246	0,031	0,004	0,010	0,010	0,258	0,034	0,212	0,806
	z_{Veg} [%]	8,240	41,263	25,811	18,335	38,061	45,433	47,263	27,254	17,593
531, 532	F_{Vers} $[km^2]$	1,987	0,044	0,020	0,006	0,025	0,145	0,182	0,377	2,786
	F_{Veg} $[km^2]$	0,104	0,000	0,005	0,002	0,007	0,039	0,024	0,081	0,261
	z_{Veg} [%]	5,249	0,000	25,718	31,679	26,246	26,539	13,037	21,517	9,376

Tab. B.3: *Gemessene und daraus berechnete Größen zur Validierung mit der h-r-Methode*

Abschnitt	**x** [m]	**y** [m]	F_{Str} [m^2]	**n** [$-$]	**h** [m]	**r** [m]	α [°]	F_{Veg} [m^2]	$F_{Veg_{ges.}}$ [m^2]
211212-RW1	8,0	220,0	1760,0	15	0,550	4,568	166,2	416,369	418,997
				1	2,063	2,283	50,7	0,290	
				2	1,925	2,475	77,9	2,338	
211212O	8,1	668,0	5377,4	33	1,100	6,000	158,9	1432,959	2091,642
				10	1,100	2,475	127,2	43,621	
				27	0,923	3,182	146,3	273,077	
				3	1,100	2,475	127,2	13,086	
				20	1,100	4,000	148,1	328,899	
211212-Hae1	8,0	630,0	5040,0	55	5,800	9,800	107,4	2431,957	3254,352
				1	6,400	9,800	98,5	35,017	
				38	1,383	4,601	145,0	787,378	
211212HK01	8,0	195,0	1560,0	4	0,973	7,923	165,9	332,903	332,903
211212S1	8,5	242,0	2057,0	2	2,825	5,000	111,2	25,209	559,040
				1	4,263	7,150	106,8	23,182	
				1	4,263	4,538	40,1	0,574	
				1	1,343	5,942	153,9	39,637	
				1	0,496	4,847	168,3	32,104	
				1	0,414	5,839	171,9	48,724	
				2	0,444	4,807	169,4	64,068	
				2	0,407	4,996	170,7	70,290	
				2	0,337	4,816	172,0	66,379	
				4	0,332	5,698	173,3	188,872	
211212120W1	8,5	217,0	1844,5	16	0,688	5,617	165,9	669,691	1282,339
				16	0,688	5,393	165,4	612,648	
120S1	7,3	402,0	2914,5	2	0,825	2,750	145,1	14,821	450,576
				7	0,963	2,750	139,0	46,869	
				1	0,828	4,140	156,9	20,113	
				4	0,963	4,140	153,1	76,103	
				1	0,963	3,770	150,4	15,148	
				1	4,153	5,000	67,7	3,202	
				1	1,100	2,557	129,0	4,824	
				1	0,963	2,750	139,0	6,696	
				1	1,100	3,575	144,2	12,337	
				1	1,100	2,750	132,8	5,995	
				1	3,363	6,002	111,8	18,442	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Abschnitt	**x** [m]	**y** [m]	F_{Str} [m^2]	**n** [$-$]	**h** [m]	**r** [m]	α [°]	F_{Veg} [m^2]	$F_{Veg_{ges.}}$ [m^2]
				1	3,363	5,016	95,8	8,518	
				1	4,235	5,492	79,1	6,009	
				2	4,091	8,722	124,1	101,686	
				1	1,386	3,238	129,3	7,776	
				2	2,889	6,275	125,2	53,838	
				1	1,255	6,258	156,9	45,915	
				1	0,981	1,943	119,4	2,287	
211212S2	8,3	235,0	1938,8	21	0,825	4,163	157,1	428,381	823,809
				21	0,688	3,925	159,8	395,429	
421-Hilda01	5,0	225,0	1125,0	1	1,905	4,975	135,0	20,397	622,350
				1	1,274	3,280	134,3	8,757	
				2	1,485	5,292	147,4	56,964	
				9	1,379	6,141	154,0	381,998	
				6	1,372	4,445	144,0	114,212	
				2	0,975	4,237	153,4	40,021	
680VA01	8,5	225,0	1912,5	1	2,553	6,697	135,2	37,102	241,000
				1	2,544	5,907	129,0	25,711	
				1	3,581	6,578	114,0	23,300	
				1	1,618	6,264	150,1	41,592	
				2	2,272	7,134	142,9	96,168	
				1	1,774	4,581	134,4	17,127	
680VA02	18,5	529,0	9781,2	11	1,825	5,731	142,9	341,361	389,583
				1	1,821	3,054	106,8	4,228	
				1	1,824	6,561	147,7	43,995	
211212-RW2	8,0	597,0	4776,0	1	1,636	3,908	130,5	11,587	2490,489
				1	1,307	4,156	143,3	16,449	
				14	1,342	5,615	152,3	484,379	
				10	1,138	5,421	155,8	339,144	
				6	1,378	5,513	151,1	196,244	
				2	1,322	5,607	152,7	69,394	
				2	1,362	5,492	151,3	65,146	
				7	1,514	6,195	151,7	291,998	
				3	1,516	6,658	153,7	148,862	
				9	1,249	5,614	154,3	320,396	
				1	1,542	5,907	149,7	36,801	
				3	1,548	6,534	152,6	141,072	
				9	1,508	6,147	151,6	369,016	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Abschnitt	**x** [m]	**y** [m]	F_{Str} [m^2]	**n** [$-$]	**h** [m]	**r** [m]	α [°]	F_{Veg} [m^2]	$F_{Veg_{ges.}}$ [m^2]
211212Sa1	7,5	414,0	3105,0	1	-2,649	2,649	360,0	22,045	783,416
				1	-1,309	5,583	207,1	63,443	
				1	-1,064	4,236	209,1	37,104	
				1	-1,931	4,359	232,6	46,113	
				1	-2,428	2,428	360,0	18,520	
				1	1,111	5,298	155,8	32,405	
				3	-2,245	5,455	228,6	211,575	
				1	-2,117	3,053	267,8	26,440	
				1	0,449	3,506	165,3	16,169	
				2	0,635	2,428	149,7	12,424	
				4	0,000	1,753	180,0	19,308	
				1	-1,587	4,606	220,3	47,650	
				1	0,952	5,474	160,0	36,699	
				1	0,000	4,490	180,0	31,667	
				1	1,016	4,333	152,9	20,768	
				2	0,709	4,176	160,4	43,000	
				11	2,896	3,981	86,7	44,811	
				1	1,594	4,490	138,4	17,660	
				1	1,195	5,576	155,2	35,615	
611612613-614Fbs01	8,0	365,0	2920,0	3	1,064	2,772	134,9	18,958	1987,904
				1	-1,918	1,918	360,0	11,557	
				3	-1,004	3,337	215,0	72,270	
				3	3,693	5,752	100,1	37,857	
				6	-4,335	8,047	245,2	1007,664	
				3	-3,194	6,247	241,5	298,176	
				1	-1,447	3,268	232,6	25,915	
				5	-2,153	4,069	243,9	213,363	
				1	-3,514	3,514	360,0	38,793	
				4	-2,343	4,923	236,8	240,943	
				1	1,223	3,012	132,1	7,091	
				2	2,627	3,836	93,6	9,341	
				2	1,356	2,418	111,8	5,977	
611612613 -614Bla01	8,0	375,0	3000,0	1	1,352	2,465	113,5	3,230	315,601
				2	1,279	4,218	144,7	34,650	
				1	0,952	4,274	154,3	20,624	
				5	1,004	3,214	143,6	49,394	
				5	0,572	3,419	160,7	72,345	
				1	2,008	4,259	123,7	12,045	
				2	1,122	2,982	135,8	14,876	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Abschnitt	**x** [m]	**y** [m]	F_{Str} [m^2]	**n** [$-$]	**h** [m]	**r** [m]	α [°]	F_{Veg} [m^2]	$F_{Veg_{ges.}}$ [m^2]
				2	0,654	4,222	162,2	44,999	
				2	0,793	2,627	144,9	13,476	
				2	0,854	4,335	157,3	44,326	
				1	1,124	2,712	131,0	5,636	
421FS01	8,0	375,0	3000,0	1	0,000	4,765	180,0	35,665	435,186
				3	0,965	3,861	151,1	48,129	
				3	-0,371	4,654	189,1	112,418	
				4	-0,174	4,813	184,1	152,248	
				1	-0,793	4,298	201,3	35,795	
				2	-0,623	3,651	199,6	50,931	
422Schef01	5,0	210,0	1050,0	1	2,645	6,219	129,7	28,874	380,092
				3	0,804	2,517	142,7	17,922	
				1	0,264	4,499	173,3	29,420	
				3	0,398	3,838	168,1	60,266	
				3	-0,926	4,109	206,0	102,198	
				1	1,322	3,439	134,8	9,714	
				2	1,190	2,120	111,7	4,587	
				3	0,935	2,782	140,7	21,164	
				2	0,000	2,512	180,0	19,824	
				2	-0,545	4,901	192,8	86,123	
421DK01	8,3	106,0	879,8	2	0,709	4,319	161,1	46,409	143,370
				1	-0,317	1,811	200,2	6,294	
				1	0,000	4,551	180,0	32,534	
				1	1,481	7,091	155,9	58,133	
532521-HA01	8,0	619,0	4952,0	3	2,340	5,082	125,2	52,962	353,577
				4	1,593	3,642	128,1	38,453	
				1	0,771	4,125	158,5	20,405	
				1	1,327	4,779	147,8	23,357	
				6	1,614	2,643	104,7	18,035	
				3	2,436	3,083	75,6	5,003	
				2	1,033	2,831	137,2	13,746	
				4	2,091	3,372	103,4	18,895	
				2	1,591	5,519	146,5	61,061	
				2	1,219	4,677	149,8	46,176	
				6	2,993	3,653	70,0	11,275	
				1	1,799	3,836	124,1	9,836	
				1	1,033	4,867	155,5	27,229	
				2	0,000	1,508	180,0	7,144	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Abschnitt	**x** [m]	**y** [m]	F_{Str} [m^2]	**n** [$-$]	**h** [m]	**r** [m]	α [°]	F_{Veg} [m^2]	$F_{Veg_{ges.}}$ [m^2]
410OA01	8,0	619,0	4952,0	3	3,186	5,941	115,1	58,464	1543,638
				1	3,204	6,697	122,8	29,234	
				4	1,673	5,682	145,8	127,919	
				5	2,252	5,651	133,0	127,001	
				3	2,649	6,176	129,2	84,682	
				8	2,133	8,015	149,1	536,995	
				1	1,090	3,594	144,7	12,577	
				2	2,381	7,804	144,5	118,175	
				1	2,116	3,042	91,9	2,793	
				1	3,107	8,036	134,5	52,776	
				1	2,167	5,195	130,7	20,549	
				1	2,120	4,365	121,9	12,177	
				1	2,133	8,240	150,0	71,898	
				1	1,455	9,452	162,3	112,939	
				1	1,479	5,176	146,8	26,984	
				1	1,724	6,829	150,8	49,961	
				1	2,001	7,221	147,8	53,382	
				1	0,793	2,913	148,4	8,767	
				1	0,661	2,381	147,8	5,798	
				2	0,935	2,395	134,0	9,296	
				2	1,856	3,977	124,4	21,274	
410-MeuS01	8,0	73,0	584,0	1	0,000	2,299	180,0	8,302	120,108
				1	0,000	2,808	180,0	12,386	
				1	-1,147	2,553	233,4	15,891	
				1	-0,650	3,271	202,9	21,031	
				1	-0,659	3,211	203,7	20,398	
				1	-1,120	2,523	232,7	15,459	
				1	-1,281	2,805	234,3	19,287	
				1	-1,530	1,530	360,0	7,354	
410F01	8,0	55,0	440,0	1	-1,401	4,104	219,9	37,729	120,816
				1	-1,904	4,115	235,1	41,690	
				1	-0,447	2,123	204,3	8,964	
				1	2,819	4,414	100,6	7,533	
				1	2,604	4,605	111,1	10,675	
				1	0,316	3,217	168,7	14,226	
220-RBW01	8,0	307,0	2456,0	1	0,000	3,183	180,0	15,915	116,537
				1	0,000	3,431	180,0	18,491	
				1	2,540	4,763	115,5	12,641	
				1	1,283	3,047	130,2	7,003	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Abschnitt	**x** [m]	**y** [m]	F_{Str} [m^2]	**n** [$-$]	**h** [m]	**r** [m]	α [°]	F_{Veg} [m^2]	$F_{Veg_{ges.}}$ [m^2]
				1	2,934	4,030	86,6	4,162	
				1	2,225	4,733	123,9	14,930	
				1	1,434	3,054	124,0	6,225	
				1	2,759	4,878	111,1	11,973	
				1	1,591	3,811	130,6	11,049	
				1	2,119	3,598	107,8	6,021	
				2	2,116	3,282	99,7	8,128	
220-FBS01a	8,0	275,0	2200,0	1	4,775	5,751	67,7	4,247	90,485
				3	2,647	3,717	89,2	11,536	
				1	1,183	3,282	137,7	9,326	
				1	2,349	3,260	87,8	2,833	
				1	1,183	2,839	130,7	6,143	
				1	2,176	7,393	145,8	54,151	
				1	-0,846	0,846	360,0	2,248	

Tab. B.4: *Niederschlagsintensitäten der Ereignisse während des Untersuchungszeitraums*

Beginn	**Dauer**	i_{P_G}	$i_{BNS_{MW}}$	$diff_{MW}$	i_{BNS_T}	$diff_T$	i_{BNS_P}	$diff_P$	i_{BNS_L}	$diff_L$
2011-06-08 08	8	0,938	0,435	0,503	0,086	0,851	0,753	0,185	0,465	0,473
2011-06-08 22	5	0,780	0,265	0,515	0,060	0,720	0,484	0,296	0,252	0,528
2011-06-13 01	10	0,110	0,000	0,110	0,000	0,110	0,000	0,110	0,000	0,110
2011-06-16 15	4	3,950	2,094	1,856	0,833	3,118	2,885	1,065	2,565	1,385
2011-06-17 18	8	2,925	1,289	1,636	0,131	2,794	1,858	1,068	1,878	1,048
2011-06-18 15	18	0,478	0,155	0,322	0,022	0,456	0,242	0,236	0,202	0,276
2011-06-22 11	7	2,714	1,505	1,210	1,209	1,506	1,789	0,926	1,517	1,197
2011-06-23 18	3	0,700	0,153	0,547	0,000	0,700	0,320	0,380	0,140	0,560
2011-06-29 09	2	1,350	0,440	0,910	0,030	1,320	1,020	0,330	0,270	1,080
2011-06-29 17	11	1,382	0,823	0,558	0,625	0,757	1,064	0,318	0,782	0,600
2011-07-07 15	12	1,392	0,652	0,740	0,150	1,242	1,067	0,325	0,738	0,653
2011-07-10 12	3	0,700	0,109	0,591	0,000	0,700	0,293	0,407	0,033	0,667
2011-07-12 17	32	1,394	0,773	0,621	0,419	0,975	1,088	0,306	0,813	0,581
2011-07-17 06	9	1,433	0,387	1,046	0,000	1,433	0,800	0,633	0,362	1,071
2011-07-19 14	6	0,850	0,233	0,617	0,000	0,850	0,550	0,300	0,150	0,700
2011-07-20 04	10	0,310	0,039	0,271	0,000	0,310	0,096	0,214	0,020	0,290
2011-07-21 10	2	0,700	0,064	0,637	0,000	0,700	0,170	0,530	0,020	0,680
2011-07-22 06	14	0,657	0,183	0,474	0,030	0,627	0,404	0,253	0,116	0,541
2011-07-23 02	5	1,140	0,591	0,549	0,180	0,960	0,880	0,260	0,712	0,428
2011-07-23 14	8	0,175	0,007	0,168	0,000	0,175	0,018	0,158	0,003	0,173
2011-07-26 18	1	1,800	0,313	1,487	0,000	1,800	0,940	0,860	0,000	1,800
2011-08-03 17	7	0,343	0,018	0,325	0,000	0,343	0,054	0,289	0,000	0,343
2011-08-05 17	3	7,633	4,741	2,892	2,850	4,783	6,067	1,567	5,307	2,327
2011-08-06 20	19	0,595	0,262	0,333	0,066	0,528	0,421	0,174	0,299	0,296
2011-08-08 13	4	0,625	0,052	0,573	0,000	0,625	0,125	0,500	0,030	0,595
2011-08-09 16	1	4,400	1,387	3,013	0,000	4,400	2,700	1,700	1,460	2,940
2011-08-14 16	20	0,565	0,173	0,393	0,056	0,510	0,288	0,277	0,174	0,391

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Beginn	**Dauer**	i_{P_G}	$i_{BNS_{MW}}$	$diff_{MW}$	i_{BNS_T}	$diff_T$	i_{BNS_P}	$diff_P$	i_{BNS_L}	$diff_L$
2011-08-19 02	2	1,900	0,320	1,580	0,000	1,900	0,860	1,040	0,100	1,800
2011-08-26 18	11	0,873	0,406	0,467	0,090	0,783	0,585	0,287	0,542	0,331
2011-09-03 21	5	0,940	0,306	0,634	0,018	0,922	0,484	0,456	0,416	0,524
2011-09-04 14	10	0,630	0,204	0,426	0,045	0,585	0,394	0,236	0,172	0,458
2011-09-13 21	8	1,138	0,587	0,550	0,446	0,691	0,793	0,345	0,523	0,615
2011-09-16 19	13	0,185	0,020	0,165	0,000	0,185	0,054	0,131	0,006	0,178
2011-09-17 15	21	0,386	0,144	0,241	0,007	0,379	0,254	0,131	0,171	0,214
2011-09-19 09	12	0,350	0,129	0,221	0,053	0,298	0,278	0,072	0,057	0,293
2011-10-06 19	4	3,275	2,158	1,117	1,650	1,625	2,880	0,395	1,945	1,330
2011-10-07 05	46	0,402	0,163	0,239	0,027	0,375	0,287	0,116	0,177	0,226
2011-10-09 19	14	0,529	0,184	0,345	0,004	0,524	0,337	0,191	0,210	0,319
2011-10-13 06	4	0,325	0,052	0,273	0,000	0,325	0,130	0,195	0,025	0,300
2011-10-19 01	14	1,064	0,751	0,314	0,536	0,529	1,009	0,056	0,707	0,357
2011-11-07 10	10	0,100	0,025	0,075	0,000	0,100	0,062	0,038	0,014	0,086
2011-12-02 16	8	0,475	0,214	0,261	0,004	0,471	0,350	0,125	0,288	0,188
2011-12-04 04	29	0,366	0,163	0,203	0,048	0,318	0,234	0,131	0,207	0,159
2011-12-07 13	8	0,138	0,020	0,118	0,000	0,138	0,040	0,098	0,020	0,118
2011-12-09 18	24	0,842	0,669	0,173	0,515	0,327	0,771	0,071	0,720	0,122
2011-12-12 06	15	0,273	0,122	0,151	0,018	0,255	0,163	0,111	0,187	0,087
2011-12-13 11	31	0,252	0,133	0,118	0,116	0,135	0,153	0,099	0,131	0,121
2011-12-15 05	10	0,280	0,089	0,191	0,000	0,280	0,142	0,138	0,126	0,154
2011-12-16 00	21	0,429	0,104	0,324	0,019	0,410	0,151	0,277	0,143	0,286
2011-12-22 02	19	0,332	0,281	0,051	0,191	0,141	0,295	0,037	0,356	-0,024
2011-12-31 05	8	0,538	0,295	0,243	0,128	0,410	0,360	0,178	0,398	0,140
2011-12-31 19	7	0,143	0,025	0,118	0,000	0,143	0,034	0,109	0,040	0,103
2012-01-02 07	20	0,315	0,129	0,186	0,039	0,276	0,164	0,151	0,184	0,131
2012-01-04 00	12	0,608	0,294	0,314	0,070	0,538	0,433	0,175	0,378	0,230

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Beginn	**Dauer**	i_{P_G}	$i_{BNS_{MW}}$	$diff_{MW}$	i_{BNS_T}	$diff_T$	i_{BNS_P}	$diff_P$	i_{BNS_L}	$diff_L$
2012-01-05 03	22	0,223	0,098	0,125	0,076	0,146	0,109	0,114	0,109	0,114
2012-01-07 10	11	0,218	0,076	0,142	0,000	0,218	0,127	0,091	0,102	0,116
2012-01-08 17	4	0,525	0,273	0,252	0,045	0,480	0,475	0,050	0,300	0,225
2012-01-19 20	15	0,193	0,049	0,144	0,000	0,193	0,084	0,109	0,064	0,129
2012-01-20 17	20	0,455	0,274	0,181	0,135	0,320	0,346	0,109	0,342	0,113
2012-01-21 21	6	1,150	0,641	0,509	0,170	0,980	0,937	0,213	0,817	0,333
2012-01-23 12	15	0,140	0,059	0,081	0,006	0,134	0,095	0,045	0,076	0,064
2012-01-26 20	24	0,150	0,109	0,041	0,050	0,100	0,163	-0,013	0,114	0,036
2012-02-19 01	8	0,388	0,199	0,188	0,015	0,373	0,263	0,125	0,320	0,068
2012-03-05 01	4	1,575	1,049	0,526	0,353	1,223	1,420	0,155	1,375	0,200
2012-03-18 11	29	0,417	0,214	0,204	0,063	0,354	0,301	0,116	0,277	0,141
2012-04-03 15	24	0,446	0,206	0,240	0,043	0,403	0,291	0,155	0,283	0,163
2012-04-05 03	16	0,481	0,332	0,149	0,229	0,253	0,406	0,075	0,361	0,120
2012-04-09 07	7	0,271	0,055	0,216	0,000	0,271	0,083	0,189	0,083	0,189
2012-04-10 18	12	0,658	0,311	0,348	0,048	0,611	0,390	0,268	0,495	0,163
2012-04-15 10	24	0,163	0,041	0,122	0,000	0,163	0,063	0,099	0,059	0,103
2012-04-18 00	4	0,775	0,310	0,465	0,000	0,775	0,475	0,300	0,455	0,320
2012-04-19 13	8	0,463	0,158	0,304	0,000	0,463	0,193	0,270	0,283	0,180
2012-04-21 05	15	0,713	0,327	0,387	0,076	0,637	0,435	0,279	0,469	0,244
2012-04-22 03	14	0,236	0,046	0,190	0,000	0,236	0,079	0,157	0,059	0,177
2012-04-23 18	22	0,327	0,126	0,202	0,020	0,307	0,172	0,155	0,185	0,143
2012-05-02 01	5	0,900	0,315	0,585	0,054	0,846	0,548	0,352	0,344	0,556
2012-05-04 22	15	0,180	0,005	0,175	0,000	0,180	0,015	0,165	0,001	0,179
2012-05-05 20	10	0,330	0,062	0,268	0,000	0,330	0,148	0,182	0,038	0,292
2012-05-08 17	4	0,275	0,002	0,273	0,000	0,275	0,005	0,270	0,000	0,275
2012-05-09 09	3	1,167	0,282	0,884	0,000	1,167	0,613	0,553	0,233	0,933
2012-05-11 23	11	0,945	0,423	0,523	0,265	0,681	0,622	0,324	0,382	0,564

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Beginn	**Dauer**	i_{P_G}	$i_{BNS_{MW}}$	$diff_{MW}$	i_{BNS_T}	$diff_T$	i_{BNS_P}	$diff_P$	i_{BNS_L}	$diff_L$
2012-05-15 14	29	0,441	0,116	0,326	0,007	0,434	0,210	0,231	0,130	0,312
2012-05-18 12	11	0,218	0,016	0,202	0,000	0,218	0,045	0,173	0,002	0,216
2012-05-21 15	9	1,900	0,989	0,911	0,273	1,627	1,560	0,340	1,133	0,767
2012-05-22 17	19	0,400	0,169	0,231	0,000	0,400	0,303	0,097	0,204	0,196
2012-05-24 13	4	2,625	1,098	1,527	0,255	2,370	1,380	1,245	1,660	0,965
2012-05-30 16	7	5,043	2,135	2,908	0,060	4,983	3,271	1,771	3,074	1,969
2012-06-03 06	30	0,837	0,302	0,535	0,002	0,835	0,493	0,344	0,410	0,427
2012-06-04 20	4	0,825	0,240	0,585	0,000	0,825	0,405	0,420	0,315	0,510
2012-06-07 17	21	1,143	0,424	0,719	0,000	1,143	0,732	0,410	0,539	0,604
2012-06-10 23	11	1,291	0,595	0,696	0,000	1,291	1,020	0,271	0,764	0,527
2012-06-12 03	20	1,005	0,390	0,616	0,005	1,001	0,700	0,305	0,464	0,541
2012-06-13 13	12	2,283	1,092	1,191	0,000	2,283	1,675	0,608	1,602	0,682
2012-06-19 19	18	0,178	0,013	0,165	0,000	0,178	0,034	0,143	0,004	0,173
2012-06-21 17	5	1,920	0,837	1,083	0,000	1,920	1,200	0,720	1,312	0,608
2012-06-24 19	13	1,215	0,457	0,758	0,000	1,215	0,805	0,411	0,568	0,648
2012-06-29 00	9	0,133	0,000	0,133	0,000	0,133	0,000	0,133	0,000	0,133
2012-06-30 22	2	8,900	4,070	4,830	0,000	8,900	6,010	2,890	6,200	2,700
2012-07-01 06	14	0,700	0,233	0,467	0,000	0,700	0,410	0,290	0,289	0,411
2012-07-02 04	33	0,376	0,134	0,242	0,000	0,376	0,256	0,120	0,145	0,231
2012-07-05 23	11	0,736	0,199	0,537	0,000	0,736	0,373	0,364	0,225	0,511
2012-07-08 04	5	1,820	0,684	1,136	0,000	1,820	0,816	1,004	1,236	0,584
2012-07-10 19	6	0,833	0,126	0,708	0,000	0,833	0,253	0,580	0,123	0,710
2012-07-13 04	22	0,332	0,069	0,263	0,000	0,332	0,121	0,211	0,085	0,246
2012-07-15 10	11	0,391	0,050	0,341	0,000	0,391	0,107	0,284	0,044	0,347
2012-07-19 20	3	0,367	0,000	0,367	0,000	0,367	0,000	0,367	0,000	0,367
2012-07-20 16	4	0,350	0,003	0,347	0,000	0,350	0,010	0,340	0,000	0,350
2012-07-21 12	2	1,950	0,504	1,447	0,000	1,950	1,250	0,700	0,260	1,690

Tab. B.5: *Niederschlagssummen der Ereignisse während des Untersuchungszeitraums*

Beginn	**Dauer**	P_G	BNS_{MW}	$diff_{MW}$	BNS_T	$diff_T$	BNS_P	$diff_P$	BNS_L	$diff_L$
2011-06-08 08	8	7,500	3,477	4,023	0,690	6,810	6,020	1,480	3,720	3,780
2011-06-08 22	5	3,900	1,327	2,573	0,300	3,600	2,420	1,480	1,260	2,640
2011-06-13 01	10	1,100	0,000	1,100	0,000	1,100	0,000	1,100	0,000	1,100
2011-06-16 15	4	15,800	8,377	7,423	3,330	12,470	11,540	4,260	10,260	5,540
2011-06-17 18	8	23,400	10,310	13,090	1,050	22,350	14,860	8,540	15,020	8,380
2011-06-18 15	18	8,600	2,797	5,803	0,390	8,210	4,360	4,240	3,640	4,960
2011-06-22 11	7	19,000	10,533	8,467	8,460	10,540	12,520	6,480	10,620	8,380
2011-06-23 18	3	2,100	0,460	1,640	0,000	2,100	0,960	1,140	0,420	1,680
2011-06-29 09	2	2,700	0,880	1,820	0,060	2,640	2,040	0,660	0,540	2,160
2011-06-29 17	11	15,200	9,057	6,143	6,870	8,330	11,700	3,500	8,600	6,600
2011-07-07 15	12	16,700	7,820	8,880	1,800	14,900	12,800	3,900	8,860	7,840
2011-07-10 12	3	2,100	0,327	1,773	0,000	2,100	0,880	1,220	0,100	2,000
2011-07-12 17	32	44,600	24,743	19,857	13,410	31,190	34,820	9,780	26,000	18,600
2011-07-17 06	9	12,900	3,487	9,413	0,000	12,900	7,200	5,700	3,260	9,640
2011-07-19 14	6	5,100	1,400	3,700	0,000	5,100	3,300	1,800	0,900	4,200
2011-07-20 04	10	3,100	0,387	2,713	0,000	3,100	0,960	2,140	0,200	2,900
2011-07-21 10	2	1,400	0,127	1,273	0,000	1,400	0,340	1,060	0,040	1,360
2011-07-22 06	14	9,200	2,567	6,633	0,420	8,780	5,660	3,540	1,620	7,580
2011-07-23 02	5	5,700	2,953	2,747	0,900	4,800	4,400	1,300	3,560	2,140
2011-07-23 14	8	1,400	0,053	1,347	0,000	1,400	0,140	1,260	0,020	1,380
2011-07-26 18	1	1,800	0,313	1,487	0,000	1,800	0,940	0,860	0,000	1,800
2011-08-03 17	7	2,400	0,127	2,273	0,000	2,400	0,380	2,020	0,000	2,400
2011-08-05 17	3	22,900	14,223	8,677	8,550	14,350	18,200	4,700	15,920	6,980
2011-08-06 20	19	11,300	4,980	6,320	1,260	10,040	8,000	3,300	5,680	5,620
2011-08-08 13	4	2,500	0,207	2,293	0,000	2,500	0,500	2,000	0,120	2,380
2011-08-09 16	1	4,400	1,387	3,013	0,000	4,400	2,700	1,700	1,460	2,940
2011-08-14 16	20	11,300	3,450	7,850	1,110	10,190	5,760	5,540	3,480	7,820

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Beginn	**Dauer**	P_G	BNS_{MW}	$diff_{MW}$	BNS_T	$diff_T$	BNS_P	$diff_P$	BNS_L	$diff_L$
2011-08-19 02	2	3,800	0,640	3,160	0,000	3,800	1,720	2,080	0,200	3,600
2011-08-26 18	11	9,600	4,463	5,137	0,990	8,610	6,440	3,160	5,960	3,640
2011-09-03 21	5	4,700	1,530	3,170	0,090	4,610	2,420	2,280	2,080	2,620
2011-09-04 14	10	6,300	2,037	4,263	0,450	5,850	3,940	2,360	1,720	4,580
2011-09-13 21	8	9,100	4,697	4,403	3,570	5,530	6,340	2,760	4,180	4,920
2011-09-16 19	13	2,400	0,260	2,140	0,000	2,400	0,700	1,700	0,080	2,320
2011-09-17 15	21	8,100	3,030	5,070	0,150	7,950	5,340	2,760	3,600	4,500
2011-09-19 09	12	4,200	1,550	2,650	0,630	3,570	3,340	0,860	0,680	3,520
2011-10-06 19	4	13,100	8,633	4,467	6,600	6,500	11,520	1,580	7,780	5,320
2011-10-07 05	46	18,500	7,510	10,990	1,230	17,270	13,180	5,320	8,120	10,380
2011-10-09 19	14	7,400	2,573	4,827	0,060	7,340	4,720	2,680	2,940	4,460
2011-10-13 06	4	1,300	0,207	1,093	0,000	1,300	0,520	0,780	0,100	1,200
2011-10-19 01	14	14,900	10,507	4,393	7,500	7,400	14,120	0,780	9,900	5,000
2011-11-07 10	10	1,000	0,253	0,747	0,000	1,000	0,620	0,380	0,140	0,860
2011-12-02 16	8	3,800	1,710	2,090	0,030	3,770	2,800	1,000	2,300	1,500
2011-12-04 04	29	10,600	4,727	5,873	1,380	9,220	6,800	3,800	6,000	4,600
2011-12-07 13	8	1,100	0,160	0,940	0,000	1,100	0,320	0,780	0,160	0,940
2011-12-09 18	24	20,200	16,047	4,153	12,360	7,840	18,500	1,700	17,280	2,920
2011-12-12 06	15	4,100	1,837	2,263	0,270	3,830	2,440	1,660	2,800	1,300
2011-12-13 11	31	7,800	4,133	3,667	3,600	4,200	4,740	3,060	4,060	3,740
2011-12-15 05	10	2,800	0,893	1,907	0,000	2,800	1,420	1,380	1,260	1,540
2011-12-16 00	21	9,000	2,190	6,810	0,390	8,610	3,180	5,820	3,000	6,000
2011-12-22 02	19	6,300	5,330	0,970	3,630	2,670	5,600	0,700	6,760	-0,460
2011-12-31 05	8	4,300	2,360	1,940	1,020	3,280	2,880	1,420	3,180	1,120
2011-12-31 19	7	1,000	0,173	0,827	0,000	1,000	0,240	0,760	0,280	0,720
2012-01-02 07	20	6,300	2,580	3,720	0,780	5,520	3,280	3,020	3,680	2,620
2012-01-04 00	12	7,300	3,527	3,773	0,840	6,460	5,200	2,100	4,540	2,760

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Beginn	**Dauer**	P_G	BNS_{MW}	$diff_{MW}$	BNS_T	$diff_T$	BNS_P	$diff_P$	BNS_L	$diff_L$
2012-01-05 03	22	4,900	2,160	2,740	1,680	3,220	2,400	2,500	2,400	2,500
2012-01-07 10	11	2,400	0,840	1,560	0,000	2,400	1,400	1,000	1,120	1,280
2012-01-08 17	4	2,100	1,093	1,007	0,180	1,920	1,900	0,200	1,200	0,900
2012-01-19 20	15	2,900	0,740	2,160	0,000	2,900	1,260	1,640	0,960	1,940
2012-01-20 17	20	9,100	5,487	3,613	2,700	6,400	6,920	2,180	6,840	2,260
2012-01-21 21	6	6,900	3,847	3,053	1,020	5,880	5,620	1,280	4,900	2,000
2012-01-23 12	15	2,100	0,883	1,217	0,090	2,010	1,420	0,680	1,140	0,960
2012-01-26 20	24	3,600	2,620	0,980	1,200	2,400	3,920	-0,320	2,740	0,860
2012-02-19 01	8	3,100	1,593	1,507	0,120	2,980	2,100	1,000	2,560	0,540
2012-03-05 01	4	6,300	4,197	2,103	1,410	4,890	5,680	0,620	5,500	0,800
2012-03-18 11	29	12,100	6,197	5,903	1,830	10,270	8,740	3,360	8,020	4,080
2012-04-03 15	24	10,700	4,933	5,767	1,020	9,680	6,980	3,720	6,800	3,900
2012-04-05 03	16	7,700	5,313	2,387	3,660	4,040	6,500	1,200	5,780	1,920
2012-04-09 07	7	1,900	0,387	1,513	0,000	1,900	0,580	1,320	0,580	1,320
2012-04-10 18	12	7,900	3,730	4,170	0,570	7,330	4,680	3,220	5,940	1,960
2012-04-15 10	24	3,900	0,980	2,920	0,000	3,900	1,520	2,380	1,420	2,480
2012-04-18 00	4	3,100	1,240	1,860	0,000	3,100	1,900	1,200	1,820	1,280
2012-04-19 13	8	3,700	1,267	2,433	0,000	3,700	1,540	2,160	2,260	1,440
2012-04-21 05	15	10,700	4,900	5,800	1,140	9,560	6,520	4,180	7,040	3,660
2012-04-22 03	14	3,300	0,640	2,660	0,000	3,300	1,100	2,200	0,820	2,480
2012-04-23 18	22	7,200	2,763	4,437	0,450	6,750	3,780	3,420	4,060	3,140
2012-05-02 01	5	4,500	1,577	2,923	0,270	4,230	2,740	1,760	1,720	2,780
2012-05-04 22	15	2,700	0,080	2,620	0,000	2,700	0,220	2,480	0,020	2,680
2012-05-05 20	10	3,300	0,620	2,680	0,000	3,300	1,480	1,820	0,380	2,920
2012-05-08 17	4	1,100	0,007	1,093	0,000	1,100	0,020	1,080	0,000	1,100
2012-05-09 09	3	3,500	0,847	2,653	0,000	3,500	1,840	1,660	0,700	2,800
2012-05-11 23	11	10,400	4,650	5,750	2,910	7,490	6,840	3,560	4,200	6,200

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Beginn	**Dauer**	P_G	BNS_{MW}	$diff_{MW}$	BNS_T	$diff_T$	BNS_P	$diff_P$	BNS_L	$diff_L$
2012-05-15 14	29	12,800	3,357	9,443	0,210	12,590	6,100	6,700	3,760	9,040
2012-05-18 12	11	2,400	0,173	2,227	0,000	2,400	0,500	1,900	0,020	2,380
2012-05-21 15	9	17,100	8,900	8,200	2,460	14,640	14,040	3,060	10,200	6,900
2012-05-22 17	19	7,600	3,213	4,387	0,000	7,600	5,760	1,840	3,880	3,720
2012-05-24 13	4	10,500	4,393	6,107	1,020	9,480	5,520	4,980	6,640	3,860
2012-05-30 16	7	35,300	14,947	20,353	0,420	34,880	22,900	12,400	21,520	13,780
2012-06-03 06	30	25,100	9,047	16,053	0,060	25,040	14,780	10,320	12,300	12,800
2012-06-04 20	4	3,300	0,960	2,340	0,000	3,300	1,620	1,680	1,260	2,040
2012-06-07 17	21	24,000	8,900	15,100	0,000	24,000	15,380	8,620	11,320	12,680
2012-06-10 23	11	14,200	6,540	7,660	0,000	14,200	11,220	2,980	8,400	5,800
2012-06-12 03	20	20,100	7,790	12,310	0,090	20,010	14,000	6,100	9,280	10,820
2012-06-13 13	12	27,400	13,107	14,293	0,000	27,400	20,100	7,300	19,220	8,180
2012-06-19 19	18	3,200	0,233	2,967	0,000	3,200	0,620	2,580	0,080	3,120
2012-06-21 17	5	9,600	4,187	5,413	0,000	9,600	6,000	3,600	6,560	3,040
2012-06-24 19	13	15,800	5,947	9,853	0,000	15,800	10,460	5,340	7,380	8,420
2012-06-29 00	9	1,200	0,000	1,200	0,000	1,200	0,000	1,200	0,000	1,200
2012-06-30 22	2	17,800	8,140	9,660	0,000	17,800	12,020	5,780	12,400	5,400
2012-07-01 06	14	9,800	3,260	6,540	0,000	9,800	5,740	4,060	4,040	5,760
2012-07-02 04	33	12,400	4,407	7,993	0,000	12,400	8,440	3,960	4,780	7,620
2012-07-05 23	11	8,100	2,193	5,907	0,000	8,100	4,100	4,000	2,480	5,620
2012-07-08 04	5	9,100	3,420	5,680	0,000	9,100	4,080	5,020	6,180	2,920
2012-07-10 19	6	5,000	0,753	4,247	0,000	5,000	1,520	3,480	0,740	4,260
2012-07-13 04	22	7,300	1,513	5,787	0,000	7,300	2,660	4,640	1,880	5,420
2012-07-15 10	11	4,300	0,553	3,747	0,000	4,300	1,180	3,120	0,480	3,820
2012-07-19 20	3	1,100	0,000	1,100	0,000	1,100	0,000	1,100	0,000	1,100
2012-07-20 16	4	1,400	0,013	1,387	0,000	1,400	0,040	1,360	0,000	1,400
2012-07-21 12	2	3,900	1,007	2,893	0,000	3,900	2,500	1,400	0,520	3,380

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle zunächst bei Prof. Dr. Markus Weiler bedanken, der diese Arbeit erst ermöglichte und als Betreuer für alle Fragen zur Verfügung stand. Außerdem möchte ich mich bei Prof. Dr. Koch für die Zweitkorrektur dieser Arbeit bedanken. Mein weiterer Dank geht an Nicole Jackisch, die mir besonders beim Teil über die Interzeption in Vauban mit Rat, hilfreichen Anregungen und Informationen zur Seite stand. Des Weiteren möchte ich mich auch noch bei Andreas Steinbrich für das Bereitstellen der Daten und einige hilfreiche Informationen und bei Emil Blattmann für die Bereitstellung des Entfernungsmessers DLE 70 bedanken.

Ich möchte mich an dieser Stelle auch noch bei Vanessa Buchmüller, der ich mehr als nur einen Kaffee schulde, und Brigitte Gabelmann bedanken, da sie diese Arbeit sorgfältig Korrektur gelesen haben und auch ansonsten immer aufbauend an meiner Seite waren.

Mein letzter Dank an dieser Stelle geht an meine Familie, Tobias Bürgel und meine Freunde, die mich während meines Studiums immer unterstützt, aufgebaut und mir bei Formulierungsproblemen bzw. manchmal leider doch auftretenden R-Quellcode-Problemen geholfen haben.

Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich, Petra Gabelmann, die beiliegende Masterarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Freiburg, 31. Oktober 2012 Petra Gabelmann