

Einfluss von Agroforst- Systemen auf die Bodenfeuchte

Agroforstsysteme und konventionelle Landnutzungssysteme im
Vergleich. Eine Metaanalyse.

Impact of agroforestry systems on soil moisture compared
to conventional farming systems. A meta-analysis.

Masterarbeit
vorgelegt von Simon Dieckmann

Matrikelnummer 21338408

Abgabedatum 11.03.2024

Betreuer

Prof. Dr. Norbert Lamersdorf
Georg-August-Universität Göttingen

Dr. Guntars Martinson
Georg-August-Universität Göttingen

Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie
Georg-August-Universität Göttingen

Kurzfassung

Agroforstsysteme werden zunehmend als nachhaltige Landnutzungsform anerkannt. Diese haben das Potenzial die Bodenfruchtbarkeit zu verbessern, die Biodiversität zu fördern und zum Klimaschutz beizutragen. Eine Schlüsselkomponente für die Nachhaltigkeit dieser Systeme ist ihr Einfluss auf den Bodenwasserhaushalt. Diese Metaanalyse untersucht den Einfluss von Agroforstsystemen auf die Bodenfeuchte im Vergleich zu konventionellen Landnutzungssystemen, basierend auf einer systematischen Literaturrecherche sowie der Analyse von Studien aus verschiedenen Klimazonen und unterschiedlichen Agroforsttypen. Ziel war es, den Einfluss von Baumalter und Agroforsttyp auf die Bodenfeuchte zu bestimmen.

Die Metaanalyse von 57 Studien mit 98 kontrollierten Untersuchungsflächen ergab, dass das Baumalter allein nicht ausreicht, um die Variabilität der Bodenfeuchte in Agroforstsystemen zu erklären. Stattdessen zeigte sich, dass die Klimazone einen signifikanten Einfluss auf die Bodenfeuchte ausübt. Von den sechs Klimazonen Arid, Humid, Semihumid (Randtropen) sowie Semihumid (subtropische Winterregenzone) und der Zone Vollhumid (Tropen) waren in dieser Untersuchung nur die Ergebnisse der ariden Zone signifikant. Die fehlenden signifikanten Ergebnisse der Metaanalyse wurden auf das geringe Durchschnittsalter der in den Studien untersuchten Agroforstsysteme zurückgeführt. Es zeigte sich, dass bisherige Forschungen vorwiegend jüngere Agroforstsysteme mit niedrigem Altersdurchschnitt betrachtet haben. 94 % der untersuchten Studien wiesen ein Baumalter von unter 30 Jahren auf; das mittlere Baumalter betrug sieben Jahre. Die Qualität der Analyse wurde beeinträchtigt, da es in der Literatur oft an wichtigen statistischen Angaben wie Standardabweichung (SD) und Standardfehler (SE) mangelte. Diese fehlenden Informationen erschwerten eine qualitative Interpretation der Daten. Die Ergebnisse einer rekursiven Feature-Eliminierung mittels einer Varianzanalyse ergaben keine Hinweise darauf, dass unterschiedliche Agroforsttypen einen individuellen Einfluss auf die Bodenfeuchte ausüben. Die Ergebnisse zeigen, dass Agroforstsysteme das Potenzial bieten den Bodenwasserhaushalt positiv zu beeinflussen, jedoch eine differenzierte Betrachtung erfordern, die eine Vielzahl von Faktoren und Wechselwirkungen berücksichtigt. Zuletzt konnten aus der Arbeit auch methodische Empfehlungen für zukünftige Forschungen formuliert werden; wie tiefenbezogene Analysen der Bodenfeuchte und die Berücksichtigung des Brusthöhendurchmessers als präziserer Einflussfaktor auf die Bodenfeuchte; für robustere und differenziertere Ergebnisse. Diese Arbeit trägt zum Verständnis der komplexen Wechselwirkungen zwischen Agroforstsystemen und Bodenfeuchte bei und zeigt, dass die Beziehung zwischen Agroforstsystemen und Bodenfeuchte komplex ist und einer hohen Variabilität und Dynamik in Zeit und Raum unterliegt.

Abstract

Agroforestry systems are increasingly recognized as a sustainable form of land use. They have the potential to improve soil fertility, promote biodiversity, and contribute to climate protection. A key component for the sustainability of these systems is their impact on soil water balance. This meta-analysis examines the influence of agroforestry systems on soil moisture in comparison to conventional land use systems, based on a systematic literature review and the analysis of studies from various climate zones and different types of agroforestry. The aim was to determine the influence of tree age and agroforestry type on soil moisture.

The meta-analysis of 57 studies with 98 controlled experimental sites showed that tree age alone is not sufficient to explain the variability of soil moisture in agroforestry systems. Instead, it was found that the climate zone has a significant impact on soil moisture. Of the six climate zones—arid, humid, semi-humid (marginal tropics), semi-humid (subtropical winter rainfall zone), and fully humid (tropics)—only the results from the arid zone were significant. The lack of significant results from the meta-analysis was attributed to the low average age of the agroforestry systems studied. It was found that previous research has predominantly focused on younger agroforestry systems with a low average age. 94% of the studies examined had a tree age of under 30 years; the average tree age was seven years. The quality of the analysis was compromised because the literature often lacks important statistical data such as standard deviation (SD) and standard error (SE). These missing pieces of information made a qualitative interpretation of the data difficult. The results of a recursive feature elimination using variance analysis revealed no evidence that different agroforestry types exert an individual influence on soil moisture. The findings indicate that agroforestry systems have the potential to positively affect the soil water balance, but require a differentiated consideration that takes into account a variety of factors and interactions. Finally, methodological recommendations for future research were formulated from the work, such as depth-related analyses of soil moisture and the consideration of breast height diameter as a more precise influencing factor on soil moisture for more robust and differentiated results. This work contributes to the understanding of the complex interactions between agroforestry systems and soil moisture, showing that the relationship between agroforestry systems and soil moisture is complex and subject to high variability and dynamics in time and space.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	II
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	XI
Formelverzeichnis	XII
Abkürzungsverzeichnis.....	XII
Vorwort	XIV
1. Einleitung.....	1
1.1. Hypothesen dieser Arbeit	5
1.2. Bedeutung des Bodenwasserhaushaltes	6
1.2.1. Wasserbindung im Boden	8
1.2.2. Bestimmung des Bodenwassergehalts.....	10
1.2.3. Wasserversorgung der Pflanzen.....	12
1.2.4. Wasserbewegungen durch Pflanzenwurzeln	13
1.2.5. Wasserverbrauch und Pflanzenertrag.....	15
1.3. Landnutzungssystem Agroforst.....	15
1.3.1. Definition.....	16
1.3.2. Klassifikation von Agroforstsystemen	16
1.3.3. Agroforstsysteme und Praktiken.....	18
1.3.4. Mehrzweckbäume in Agroforstsystemen	21
1.3.5. Pflanzeninteraktionen in Agroforstsystemen	22
2. Methodik.....	22
2.1. Formulierung und Modifikation der Forschungsfrage	22
2.2. Identifizierung der Literatur	23
2.2.1. Auswahl der Datenbanken	23
2.2.2. Verknüpfen von Suchbegriffen für die Datenbankrecherche	24
2.2.3. Berücksichtigung grauer Literatur und Internetrecherche	25
2.2.4. Softwarenutzung.....	26
2.2.5. Auswahl relevanter Studien	26
2.2.6. Beschaffung der Volltexte	27
2.2.7. Mehrfachpublikationen.....	27
2.2.8. Systematische Verzerrungen und Publikationsbias	28

2.3.	Bewertung der Literatur.....	29
2.3.1.	Qualitätsbewertung anhand von Leitfäden	29
2.3.2.	Wichtige Biasformen und ihre Überprüfung.....	30
2.4.	Datenextraktion aus den Publikationen.....	31
2.4.1.	Erfasste Variablen.....	31
2.4.2.	Umrechnung in die volumetrische Bodenfeuchte	33
2.5.	Statistische Auswertung.....	33
2.5.1.	Datenvorbereitung und verwendete Schätzer.....	33
2.5.2.	Schätzung fehlender Maßzahlen für die statistische Streuung.....	34
2.5.3.	Quantitative Synthese von Effekten einzelner Studien (Metaanalyse)	37
2.5.4.	Untersuchung der Heterogenität.....	38
2.5.5.	Untersuchung von Publikationsbias.....	39
2.5.6.	Post-hoc Analysen	40
2.5.7.	Modellauswahl für Post-hoc Analysen.....	41
3.	Ergebnisse	42
3.1.	Ergebnisse der Literatursuche.....	42
3.2.	Geographische Verteilung der Studienregionen.....	44
3.3.	Deskriptive statistische Analyse	46
3.3.1.	Untersuchungs- und Kontrollflächen	47
3.3.2.	Klimavariablen.....	49
3.3.3.	Baumvariablen	52
3.3.4.	Bodenvariablen	54
3.3.5.	Untersuchungszeitraum	56
3.3.6.	Verteilung und Spannweite der Daten.....	57
3.4.	Induktive statistische Analyse	59
3.4.1.	Überprüfung der Normalverteilungsannahme	59
3.4.2.	Metaanalyse: Einfluss der Agroforstsysteme auf die Bodenfeuchte	60
3.4.3.	Rekursive Feature Eliminierung mittels Varianzanalyse (ANOVA).....	64
3.4.4.	Metaanalyse für jede Klimazone.....	68
3.5.	Überprüfung von Publikationsbias.....	74
4.	Diskussion.....	76
4.1.	Methodendiskussion	76
4.1.1.	Methodik der Metaanalyse	76
4.1.2.	Fehler bei der Datenaufnahme	78
4.1.3.	Umgang mit fehlenden Daten	79
4.1.4.	Einfluss von Methodikfehlern auf die Ergebnisse	80

4.2.	Ergebnisdiskussion	81
4.2.1.	Zusammenfassung der Ergebnisse	81
4.2.2.	Interpretation der Ergebnisse	84
4.2.3.	Limitationen der Arbeit	91
4.2.4.	Empfehlungen für weiterführende Forschung.....	93
5.	Schlussfolgerungen	93
5.1.	Ausblick: Analogie zum nachhaltigen Waldbau	95
	Literaturverzeichnis.....	XIV
6.	Anhang	XXIX
6.1.	Zusätzliche Daten	XXIX
6.2.	Datenbankrecherche und Suchbegriffe	XXIX
6.3.	Forest-Plots zum Gesamtdatensatz und zu den Klimazonen.....	XXXIII
6.4.	Boxplots zu weiteren erfassten Variablen	XXXIX
6.4.1.	Baumvariablen	XXXIX
6.4.2.	Bodenvariablen	XL
6.4.3.	Untersuchungszeitraum	XLIII
	Selbstständigkeitserklärung	XLV

Abbildungsverzeichnis

ABB. 1 RETENTIONSKURVE DES WASSERS (PF-KURVE). BEZIEHUNG ZWISCHEN MATRIXPOTENTIAL UND WASSERGEHALT. VERLAUF FÜR DIE HAUPTBODENARTEN SAND, SCHLUFF (LÖSS) UND TON. PF = PF WERT (LOGARITHMIERTER WERT DES BETRAGES DES MATRIXPOTENTIALS), PWP = PERMANENTER WELKEPUNKT, LK = LUFTKAPAZITÄT, FK = FELDKAPAZITÄT (DER AM HÄUFIGSTEN VORKOMMENDE PF-WERTE-BEREICH DER FELDKAPAZITÄT IST ALS GRAUER BALKEN DARGESTELLT) (NACH AMELUNG ET AL. 2018).....	10
ABB. 2 HYDRAULIC LIFT ALS SCHEMADARSTELLUNG. TAG: MIT DEM TRANSPIRATIONSSOG WIRD BODENWASSER VON DER WURZEL IN DEN SPROSS UND AUS DEM FEUCHTEN BODEN IN DEN TROCKENEN WURZELRAUM NACHGELIEFERT. NACHT: DIE TRANSPIRATION DER PFLANZE NIMMT AB, ÜBERSCHÜSSIG AUFGENOMMENES WASSER FLIEßT LATERAL VON DEN WURZELN IN DEN TROCKENEREN OBERBODEN UND STEHT AM FOLGETAG WIEDER ZUR VERFÜGBARKEIT (NACH AMELUNG ET AL. 2018).....	14
ABB. 3 ILLUSTRATION DER MANUELLEN EXTRAKTION DER NUMERISCHEN DATEN AUS ABILDUNG FIG. 3 VON NDOLI ET AL. (2017) VIA WEBPLOTDIGITIZER (ROHATGI 2022). VOR DEM MANUELLEN SETZEN DER DATENPUNKTE ERFOLGTE DIE KALIBRIERUNG DER AXEN. DATENPUNKTE, AUS DENEN DIE NUMERISCHEN DATEN EXTRAHIERT WURDEN, SIND HIER ZUR VISUALISIERUNG UNTERSCHIEDLICH EINGEFÄRBT. SOLE MAIZE IST EINE MAISONOKULTUR UND WURDE ALS KONTROLLFLÄCHE BERÜCKSICHTIGT. ALNUS + MAIZE SOWIE MARKHAMIA + MAIZE SIND AGROFORSTFLÄCHEN, WELCHE JEWEILS UNTERSCHIEDLICHE BAUMARTEN MIT EINER MAISKULTUR KOMBINIEREN.	32
ABB. 4 PRISMA FLOW DIAGRAMM ZUR VISUALISIERUNG DER STUDIENAUSWAHLPROZESSE (PRISMA 2009).	43
ABB. 5 VERTEILUNG DER 57 IN DER METAANALYSE EINGESCHLOSSENEN STUDIEN UND DEREN JEWEILIGE EXPERIMENTANZAHL. JEDER BALKEN REPRÄSENTIERT DIE ANZAHL AN STUDIEN MIT (N) EXPERIMENTEN.	44
ABB. 6 GEOGRAPHISCHE VERTEILUNG DER IN DER METAANALYSE BERÜCKSICHTIGTEN STUDIEN. GLOBALE KARTE MIT ANZAHL DER EFFEKTGRÖßEN (UNTERSUCHUNGSFLÄCHEN) PRO LAND.....	45
ABB. 7 HÄUFIGKEIT DER AGROFORSTSYSTEME JE KLIMAZONE	48
ABB. 8 HÄUFIGKEIT DER KONVENTIONELLEN LANDNUTZUNGSSYSTEME DER KONTROLLFLÄCHEN JE KLIMAZONE	49
ABB. 9 VERTEILUNG DES MITTLEREN JAHRESNIEDERSCHLAGS (MM) IN DEN ERFASSTEN KLIMAZONEN ALS BOXPLOT. N = ANZAHL DER UNTERSUCHUNGEN, IN DENEN DIE VARIABLE ANGEZEIGT WAR, IM VERGLEICH ZU ALLEN UNTERSUCHUNGEN IN DIESER KLIMAZONE.....	50
ABB. 10 VERTEILUNG DER MITTLEREN JAHRESTEMPORATUR (°C) IN DEN ERFASSTEN KLIMAZONEN ALS BOXPLOT. N = ANZAHL DER UNTERSUCHUNGEN, FÜR DIE DIE VARIABLE ANGEZEIGT WAR, IM VERGLEICH ZU ALLEN UNTERSUCHUNGEN IN DIESER KLIMAZONE.	52
ABB. 11 VERTEILUNG DES BAUMALTERS IN DEN ERFASSTEN KLIMAZONEN ALS BOXPLOT. N = ANZAHL DER UNTERSUCHUNGEN, FÜR DIE DIESE VARIABLE ANGEZEIGT WAR, IM VERGLEICH ZU ALLEN UNTERSUCHUNGEN IN DIESER KLIMAZONE. WEITERE DATENPUNKTE ALS AUSREIßER (N/HA), WELCHE AUFGRUND EINER GLEICHMÄßIGEN SKALIERUNG FÜR ALLE KLIMAZONEN IN DER ABILDUNG NICHT VISUALISIERT WURDEN ARID: 50; HUMID: 80.	53
ABB. 12 VERTEILUNG DER MAXIMAL ERFASSTEN BODENTIEFE (CM) IN DEN ERFASSTEN KLIMAZONEN ALS BOXPLOT. N = ANZAHL DER UNTERSUCHUNGEN, FÜR DIE DIESE VARIABLE ANGEZEIGT WAR, IM VERGLEICH ZU ALLEN UNTERSUCHUNGEN IN DIESER KLIMAZONE. WEITERE DATENPUNKTE ALS AUSREIßER (N/HA), WELCHE AUFGRUND EINER GLEICHMÄßIGEN SKALIERUNG FÜR ALLE KLIMAZONEN IN DER ABILDUNG NICHT VISUALISIERT WURDEN HUMID: 500 CM; SEMIHUMID: 600 CM; VOLLHUMID: 400 CM.	55
ABB. 13 VERTEILUNG DER DAUER DER UNTERSUCHUNGSZEITRÄUME (MONATE) IN DEN ERFASSTEN KLIMAZONEN ALS BOXPLOT. N = ANZAHL DER UNTERSUCHUNGEN, FÜR DIE DIESE VARIABLE ANGEZEIGT WAR, IM VERGLEICH ZU ALLEN UNTERSUCHUNGEN IN DIESER KLIMAZONE.....	56
ABB. 14 VISUALISIERUNG DER SPANNWEITE DER 98 DATENPUNKTE. EINHEIT SIND DIE ABSOLUTEN WERTE DES VOLUMETRISCHEN BODENWASSERGEHALTES (%). EIN DATENPUNKT VISUALISIERT JEWEILS DEN VOLUMETRISCHEN BODENWASSERGEHALT DER KONTROLLFLÄCHE (X-ACHSE) UND DER DAZUGEHÖRIGEN UNTERSUCHUNGSFLÄCHE AGROFORST (Y-ACHSE).	57
ABB. 15 HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER MITTELWERTS-DIFFERENZ DER VOLUMETRISCHEN BODENFEUCHTE	58
ABB. 16 NORMALVERTEILUNG OHNE UND MIT SCHÄTZUNG DER VARIANZ FÜR FEHLLENDE WERTE DER STANDARDABWEICHUNG (SD). DIE SCHWARZE LINIE ZEIGT DIE VERTEILUNG DES LOGARITHMIERTEN RESPONSE RATIOS (LNRR) VOR DER SCHÄTZUNG DER FEHLLENDE WERTE DER VARIANZ (SD). DIE ROT GESTRICHELTE LINIE ZEIGT DIE NORMALVERTEILUNG FÜR DATENPUNKT MIT EINER GESCHÄTZTEN SD.....	59

Abb. 17 QUANTIL-QUANTIL (QQ) PLOT ZUR ÜBERPRÜFUNG DER NORMALVERTEILUNG DES LOGARITHMIERTEN RESPONSE RATIO (LNRR). BEI EINER IDEALEN NORMALVERTEILUNG WÄREN DIE DATEN AUF DER ROTEN LINIE GLEICHMÄßIG VERTEILT.	60
Abb. 18 FOREST-PLOT ZUR METAANALYSE ÜBER DEN EINFLUSS DES BAUMALTERS. UNTERSUCHUNGEN SIND ABSTEIGEND NACH BAUMALTER SORTIERT. FÜR JEDE STUDIE WIRD DER EFFEKT, NACH IHRER GEWICHTUNG IN DER METAANALYSE, DURCH EINEN PUNKTSCHÄTZER ALS RECHTECK UNTERSCHIEDLICHER GRÖÖE DARGESTELLT. DER GESAMTEFFEKT IST UNTER DEN EINZELEFFEKTEN ALS RAUTE AUFGETRAGEN. DIE MITTE DER RAUTE PRÄSENTIERT DEN PUNKTSCHÄTZER, DIE BREITE GIBT DAS KONFIDENZINTERVALL AN. NEBENSTEHENDE TABELLE GIBT DAS JEWEILIGE BAUMALTER ZUR UNTERSUCHUNG AN (MEDIAN = 7).....	63
Abb. 19 FOREST-PLOT ZUR METAANALYSE ÜBER DEN EINFLUSS DES BAUMALTERS IN DER ARIDEN ZONE. UNTERSUCHUNGEN SIND ABSTEIGEND NACH BAUMALTER SORTIERT. FÜR JEDE STUDIE WIRD DER EFFEKT, NACH IHRER GEWICHTUNG IN DER METAANALYSE, DURCH EINEN PUNKTSCHÄTZER ALS RECHTECK UNTERSCHIEDLICHER GRÖÖE DARGESTELLT. DER GESAMTEFFEKT IST UNTER DEN EINZELEFFEKTEN ALS RAUTE AUFGETRAGEN. DIE MITTE DER RAUTE PRÄSENTIERT DEN PUNKTSCHÄTZER, DIE BREITE GIBT DAS KONFIDENZINTERVALL AN. NEBENSTEHENDE TABELLE GIBT DAS JEWEILIGE BAUMALTER ZUR UNTERSUCHUNG AN (MEDIAN = 9).....	69
Abb. 20 FOREST-PLOT ZUR METAANALYSE ÜBER DEN EINFLUSS DES BAUMALTERS IN DER HUMIDEN ZONE. UNTERSUCHUNGEN SIND ABSTEIGEND NACH BAUMALTER SORTIERT. FÜR JEDE STUDIE WIRD DER EFFEKT, NACH IHRER GEWICHTUNG IN DER METAANALYSE, DURCH EINEN PUNKTSCHÄTZER ALS RECHTECK UNTERSCHIEDLICHER GRÖÖE DARGESTELLT. DER GESAMTEFFEKT IST UNTER DEN EINZELEFFEKTEN ALS RAUTE AUFGETRAGEN. DIE MITTE DER RAUTE PRÄSENTIERT DEN PUNKTSCHÄTZER, DIE BREITE GIBT DAS KONFIDENZINTERVALL AN. NEBENSTEHENDE TABELLE GIBT DAS JEWEILIGE BAUMALTER ZUR UNTERSUCHUNG AN (MEDIAN = 13,5).....	70
Abb. 21 FOREST-PLOT ZUR METAANALYSE ÜBER DEN EINFLUSS DES BAUMALTERS IN DER SEMIHUMIDEN ZONE (RANDTROPEN). UNTERSUCHUNGEN SIND ABSTEIGEND NACH BAUMALTER SORTIERT. FÜR JEDE STUDIE WIRD DER EFFEKT, NACH IHRER GEWICHTUNG IN DER METAANALYSE, DURCH EINEN PUNKTSCHÄTZER ALS RECHTECK UNTERSCHIEDLICHER GRÖÖE DARGESTELLT. DER GESAMTEFFEKT IST UNTER DEN EINZELEFFEKTEN ALS RAUTE AUFGETRAGEN. DIE MITTE DER RAUTE PRÄSENTIERT DEN PUNKTSCHÄTZER, DIE BREITE GIBT DAS KONFIDENZINTERVALL AN. NEBENSTEHENDE TABELLE GIBT DAS JEWEILIGE BAUMALTER ZUR UNTERSUCHUNG AN (MEDIAN = 4,25).....	71
Abb. 22 FOREST-PLOT ZUR METAANALYSE ÜBER DEN EINFLUSS DES BAUMALTERS IN DER SEMIHUMIDEN ZONE (SUBTROPISCHE WINTERREGENZONE). UNTERSUCHUNGEN SIND ABSTEIGEND NACH BAUMALTER SORTIERT. FÜR JEDE STUDIE WIRD DER EFFEKT, NACH IHRER GEWICHTUNG IN DER METAANALYSE, DURCH EINEN PUNKTSCHÄTZER ALS RECHTECK UNTERSCHIEDLICHER GRÖÖE DARGESTELLT. DER GESAMTEFFEKT IST UNTER DEN EINZELEFFEKTEN ALS RAUTE AUFGETRAGEN. DIE MITTE DER RAUTE PRÄSENTIERT DEN PUNKTSCHÄTZER, DIE BREITE GIBT DAS KONFIDENZINTERVALL AN. NEBENSTEHENDE TABELLE GIBT DAS JEWEILIGE BAUMALTER ZUR UNTERSUCHUNG AN (MEDIAN = 4).....	72
Abb. 23 FOREST-PLOT ZUR METAANALYSE ÜBER DEN EINFLUSS DES BAUMALTERS IN DER VOLLHUMIDEN ZONE. UNTERSUCHUNGEN SIND ABSTEIGEND NACH BAUMALTER SORTIERT. FÜR JEDE STUDIE WIRD DER EFFEKT, NACH IHRER GEWICHTUNG IN DER METAANALYSE, DURCH EINEN PUNKTSCHÄTZER ALS RECHTECK UNTERSCHIEDLICHER GRÖÖE DARGESTELLT. DER GESAMTEFFEKT IST UNTER DEN EINZELEFFEKTEN ALS RAUTE AUFGETRAGEN. DIE MITTE DER RAUTE PRÄSENTIERT DEN PUNKTSCHÄTZER, DIE BREITE GIBT DAS KONFIDENZINTERVALL AN. NEBENSTEHENDE TABELLE GIBT DAS JEWEILIGE BAUMALTER ZUR UNTERSUCHUNG AN (MEDIAN = 3).....	73
Abb. 24 FUNNEL-PLOT ZUR BEURTEILUNG VON PUBLIKATIONSBIAS NACH SCHÄTZUNG FEHLENDER SE-WERTE DURCH DIE FUNKTION ESCALC AUS DEM PAKET METAFOR IN R. IM DIAGRAMM IST JEDE DER 98 UNTERSUCHUNGSFLÄCHEN AUS DEN 57 STUDIEN MIT EINEM PUNKT REPRÄSENTIERT. X-ACHSE: LOGARITHMIERTE RESPONSE-RATIO (LNRR). Y-ACHSE: STANDARDFEHLER (SE) DER UNTERSUCHUNGSFLÄCHEN. VERTIKALE GESTRICHelte LINIE (WERT = -0,04): GEPOOLTER EFFEKTSCHÄTZER (GESAMTEFFEKT) AUS ALLEN STUDIEN.	74
Abb. 25 FUNNEL-PLOT ZUR BEURTEILUNG VON PUBLIKATIONSBIAS NACH SCHÄTZUNG FEHLENDER SE-WERTE MITTELS MEDIAN DER VORHANDENEN SE-WERTE. IM DIAGRAMM IST JEDE DER 98 UNTERSUCHUNGSFLÄCHEN AUS DEN 57 STUDIEN MIT EINEM PUNKT REPRÄSENTIERT. X-ACHSE: LOGARITHMIERTE RESPONSE-RATIO (LNRR). Y-ACHSE: STANDARDFEHLER (SE) DER UNTERSUCHUNGSFLÄCHEN. VERTIKALE GESTRICHelte LINIE (WERT = -0,04): GEPOOLTER EFFEKTSCHÄTZER (GESAMTEFFEKT) AUS ALLEN STUDIEN.	75
Abb. 26 DIE HIERARCHIE DER EVIDENZSTUFEN (LOE), (ENG.: LEVEL-OF-EVIDENCE) ORDNET DIE STUDIENDESIGNS NACH IHRER EVIDENZ. SEHR STARKE EVIDENZ (LOE1) BIS SCHWACHE EVIDENZ (LOE4) MIT INTERNER EINSTUFUNG UNTEREBENEN A, B UND C (NACH MUPEPELE ET AL. 2016).....	XXXI

- Abb. 27** FOREST-PLOT ZUR METAANALYSE ÜBER DEN GESAMTEN DATENSATZ (98 UNTERSUCHUNGEN AUS 57 STUDIEN). UNTERSUCHUNGEN SIND ABSTEIGEND NACH EFFEKTGRÖÙE (LNRR) SORTIERT.XXXIII
- Abb. 28** FOREST-PLOT ZUR METAANALYSE (ALLE VERFÜGBAREN DATENPUNKTE) ÜBER DEN EINFLUSS DES BAUMALTERS IN DER ARIDEN ZONE. UNTERSUCHUNGEN SIND ABSTEIGEND NACH EFFEKTGRÖÙE (LNRR) SORTIERT. FÜR JEDE STUDIE WIRD DER EFFEKT, NACH IHRER GEWICHTUNG IN DER METAANALYSE, DURCH EINEN PUNKTSCHÄTZER ALS RECHTECK UNTERSCHIEDLICHER GRÖÙE DARGESTELLT. DER GESAMTEFFEKT IST UNTER DEN EINZELEFFEKTEN ALS RAUTE AUFGETRAGEN. DIE MITTE DER RAUTE PRÄSENTIERT DEN PUNKTSCHÄTZER, DIE BREITE GIBT DAS KONFIDENZINTERVALL AN.XXXIV
- Abb. 29** FOREST-PLOT ZUR METAANALYSE (ALLE VERFÜGBAREN DATENPUNKTE) ÜBER DEN EINFLUSS DES BAUMALTERS IN DER HUMIDEN ZONE. UNTERSUCHUNGEN SIND ABSTEIGEND NACH EFFEKTGRÖÙE (LNRR) SORTIERT. FÜR JEDE STUDIE WIRD DER EFFEKT, NACH IHRER GEWICHTUNG IN DER METAANALYSE, DURCH EINEN PUNKTSCHÄTZER ALS RECHTECK UNTERSCHIEDLICHER GRÖÙE DARGESTELLT. DER GESAMTEFFEKT IST UNTER DEN EINZELEFFEKTEN ALS RAUTE AUFGETRAGEN. DIE MITTE DER RAUTE PRÄSENTIERT DEN PUNKTSCHÄTZER, DIE BREITE GIBT DAS KONFIDENZINTERVALL AN.XXXV
- Abb. 30** FOREST-PLOT ZUR METAANALYSE (ALLE VERFÜGBAREN DATENPUNKTE) ÜBER DEN EINFLUSS DES BAUMALTERS IN DER SEMIHUMIDEN ZONE (RANDTROPEN). UNTERSUCHUNGEN SIND ABSTEIGEND NACH EFFEKTGRÖÙE (LNRR) SORTIERT. FÜR JEDE STUDIE WIRD DER EFFEKT, NACH IHRER GEWICHTUNG IN DER METAANALYSE, DURCH EINEN PUNKTSCHÄTZER ALS RECHTECK UNTERSCHIEDLICHER GRÖÙE DARGESTELLT. DER GESAMTEFFEKT IST UNTER DEN EINZELEFFEKTEN ALS RAUTE AUFGETRAGEN. DIE MITTE DER RAUTE PRÄSENTIERT DEN PUNKTSCHÄTZER, DIE BREITE GIBT DAS KONFIDENZINTERVALL AN.XXXVI
- Abb. 31** FOREST-PLOT ZUR METAANALYSE (ALLE VERFÜGBAREN DATENPUNKTE) ÜBER DEN EINFLUSS DES BAUMALTERS IN DER SEMIHUMIDEN ZONE (SUBTROPISCHE WINTERREGENZONE). UNTERSUCHUNGEN SIND ABSTEIGEND NACH EFFEKTGRÖÙE (LNRR) SORTIERT. FÜR JEDE STUDIE WIRD DER EFFEKT, NACH IHRER GEWICHTUNG IN DER METAANALYSE, DURCH EINEN PUNKTSCHÄTZER ALS RECHTECK UNTERSCHIEDLICHER GRÖÙE DARGESTELLT. DER GESAMTEFFEKT IST UNTER DEN EINZELEFFEKTEN ALS RAUTE AUFGETRAGEN. DIE MITTE DER RAUTE PRÄSENTIERT DEN PUNKTSCHÄTZER, DIE BREITE GIBT DAS KONFIDENZINTERVALL AN.XXXVII
- Abb. 32** FOREST-PLOT ZUR METAANALYSE (ALLE VERFÜGBAREN DATENPUNKTE) ÜBER DEN EINFLUSS DES BAUMALTERS IN DER VOLLHUMIDEN ZONE. UNTERSUCHUNGEN SIND ABSTEIGEND NACH EFFEKTGRÖÙE (LNRR) SORTIERT. FÜR JEDE STUDIE WIRD DER EFFEKT, NACH IHRER GEWICHTUNG IN DER METAANALYSE, DURCH EINEN PUNKTSCHÄTZER ALS RECHTECK UNTERSCHIEDLICHER GRÖÙE DARGESTELLT. DER GESAMTEFFEKT IST UNTER DEN EINZELEFFEKTEN ALS RAUTE AUFGETRAGEN. DIE MITTE DER RAUTE PRÄSENTIERT DEN PUNKTSCHÄTZER, DIE BREITE GIBT DAS KONFIDENZINTERVALL AN.XXXVIII
- Abb. 33** VERTEILUNG DES BRUSTHÖHENDURCHMESSERS (BHD) (CM) IN DEN ERFASSTEN KLIMAZONEN ALS BOXPLOT. N = ANZAHL DER UNTERSUCHUNGEN, FÜR DIE DIE VARIABLE ANGEZEIGT WAR, IM VERGLEICH ZU ALLEN UNTERSUCHUNGEN IN DIESER KLIMAZONE.XXXIX
- Abb. 34** VERTEILUNG DER BAUMDICHTEN (N/HA) IN DEN ERFASSTEN KLIMAZONEN ALS BOXPLOT. N = ANZAHL DER UNTERSUCHUNGEN, FÜR DIE DIE VARIABLE ANGEZEIGT WAR, IM VERGLEICH ZU ALLEN UNTERSUCHUNGEN IN DIESER KLIMAZONE. WEITERE DATENPUNKTE ALS AUSREIßER (N/HA), WELCHE AUFGRUND EINER GLEICHMÄÙIGEN SKALIERUNG FÜR ALLE KLIMAZONEN IN DER ABBILDUNG NICHT VISUALISIERT WURDEN (DURCH TAUSENDERTRENNZEICHEN MIT PUNKT GETRENNT): HUMID: 2.250, 14.000; SEMIHUMID: 10.000, 17.000, 40.000; VOLLHUMID: 12.000.XXXIX
- Abb. 35** VERTEILUNG DER BAUMHÖHEN (M) IN DEN ERFASSTEN KLIMAZONEN ALS BOXPLOT. N = ANZAHL DER UNTERSUCHUNGEN, FÜR DIE DIE VARIABLE ANGEZEIGT WAR, IM VERGLEICH ZU ALLEN UNTERSUCHUNGEN IN DIESER KLIMAZONE.XL
- Abb. 36** VERTEILUNG DER BODENLAGERUNGSDICHTE (G/CM³) IN DEN ERFASSTEN KLIMAZONEN ALS BOXPLOT. N = ANZAHL DER UNTERSUCHUNGEN, FÜR DIE DIE VARIABLE ANGEZEIGT WAR, IM VERGLEICH ZU ALLEN UNTERSUCHUNGEN IN DIESER KLIMAZONE.XL
- Abb. 37** VERTEILUNG DES BODEN-PHS IN DEN ERFASSTEN KLIMAZONEN ALS BOXPLOT. N = ANZAHL DER UNTERSUCHUNGEN, FÜR DIE DIE VARIABLE ANGEZEIGT WAR, IM VERGLEICH ZU ALLEN UNTERSUCHUNGEN IN DIESER KLIMAZONE.XLI
- Abb. 38** VERTEILUNG FÜR DEN TONGEHALT DES BODENS (%) IN DEN ERFASSTEN KLIMAZONEN ALS BOXPLOT. N = ANZAHL DER UNTERSUCHUNGEN, FÜR DIE DIE VARIABLE ANGEZEIGT WAR, IM VERGLEICH ZU ALLEN UNTERSUCHUNGEN IN DIESER KLIMAZONE.XLI

Abb. 39 VERTEILUNG DES SCHLUFFGEHALTS DES BODENS (%) IN DEN ERFASSTEN KLIMAZONEN ALS BOXPLOT. N = ANZAHL DER UNTERSUCHUNGEN, FÜR DIE DIE VARIABLE ANGEZEIGT WURDE, IM VERGLEICH ZU ALLEN UNTERSUCHUNGEN IN DIESER KLIMAZONE.	XLII
Abb. 40 VERTEILUNG DES SANDGEHALTS DES BODENS (%) IN DEN ERFASSTEN KLIMAZONEN ALS BOXPLOT. N = ANZAHL DER UNTERSUCHUNGEN, FÜR DIE DIE VARIABLE ANGEZEIGT WURDE, IM VERGLEICH ZU ALLEN UNTERSUCHUNGEN IN DIESER KLIMAZONE.	XLII
Abb. 41 VERTEILUNG DER GESAMTEN BEOBSACHTUNGSDAUER (MONATE) IN DEN ERFASSTEN KLIMAZONEN ALS BOXPLOT. N = ANZAHL DER UNTERSUCHUNGEN, FÜR DIE DIE VARIABLE ANGEZEIGT WURDE, IM VERGLEICH ZU ALLEN UNTERSUCHUNGEN IN DIESER KLIMAZONE.	XLIII
Abb. 42 VERTEILUNG DER ZEITPUNKTE IM JAHR, IN DEM DIE UNTERSUCHUNGSZEITRÄUME BEGANNEN (MONAT) IN DEN ERFASSTEN KLIMAZONEN ALS BOXPLOT. N = ANZAHL DER UNTERSUCHUNGEN, FÜR DIE DIE VARIABLE ANGEZEIGT WURDE, IM VERGLEICH ZU ALLEN UNTERSUCHUNGEN IN DIESER KLIMAZONE.	XLIII
Abb. 43 VERTEILUNG DER ZEITPUNKTE IM JAHR, IN DEM DIE UNTERSUCHUNGSZEITRÄUME ENDETEN (MONAT) IN DEN ERFASSTEN KLIMAZONEN ALS BOXPLOT. N = ANZAHL DER UNTERSUCHUNGEN, FÜR DIE DIE VARIABLE ANGEZEIGT WURDE, IM VERGLEICH ZU ALLEN UNTERSUCHUNGEN IN DIESER KLIMAZONE.	XLIV

Tabellenverzeichnis

TAB.: 1 KRITERIEN ZUM EINSCHLUSS ODER AUSSCHLUSS DER LITERATUR IN DIE METAANALYSE (NACH KHAN ET AL. 2004)..	26
TAB.: 2 ERLÄUTERUNG VON VIER WICHTIGE BIASFORMEN FÜR DIESES REVIEW UND MAßNAHMEN ZUR DEREN VERMEIDUNG (NACH KHAN ET AL. 2004; SCHMUCKER ET AL. 2020; BMJ 2020).	30
TAB.: 3 GEOGRAPHISCHE VERTEILUNG DER IN DER METAANALYSE BERÜCKSICHTIGTEN UNTERSUCHUNGSFLÄCHEN (EFFEKTGRÖßEN) NACH KLIMAZONEN UND LÄNDERN SOWIE DIE ANZAHL DER STUDIEN DIE AUS JEDER KLIMAZONE BERÜCKSICHTIGT WURDEN. KLIMAKLASSIFIKATION NACH PENK (FLOHN) (SCHÖNWIESE 2020).	45
TAB.: 4 ERGEBNISSE DER REKURSIVEN-FEATURE-ELIMINIERUNG MITTELS EINER ANOVA ZUR PRÜFUNG DES EINFLUSSES VON BAUMALTER UND KLIMA . (DF = FREIHEITSGRADE; AIC = AKAIKE-INFORMATIONSKRITERIUM; BIC = BAYESIANISCHES INFORMATIONSKRITERIUM; LOGLIK = LOG-LIKELIHOOD; TEST = VERGLEICH ZWISCHEN DEN MODELLEN; L.RATIO = LIKELIHOOD RATIO; P-VALUE = P-WERT).	66
TAB.: 5 ERGEBNISSE DER ANOVA FÜR DAS KLIMA ALS PRÄDIKTOR.	66
TAB.: 6 ERGEBNISSE DER REKURSIVEN-FEATURE-ELIMINIERUNG MITTELS EINER ANOVA ZUR PRÜFUNG DES EINFLUSSES VON BAUMALTER UND AGROFORSTSYSTEMTYP . (DF = FREIHEITSGRADE; AIC = AKAIKE-INFORMATIONSKRITERIUM; BIC = BAYESIANISCHES INFORMATIONSKRITERIUM; LOGLIK = LOG-LIKELIHOOD; TEST = VERGLEICH ZWISCHEN DEN MODELLEN; L.RATIO = LIKELIHOOD RATIO; P-VALUE = P-WERT).	68
TAB.: 7 KATEGORIEN VON AGROFORSTSYSTEMEN, IN WELCHE DIE LITERATUR UNTERGLIEDERT WIRD (NACH BEILLOUIN 2022).	XXIX
TAB.: 8 SUCHBEGRIFFE, WELCHE FÜR DIE DATENBANKRECHERCH AUSGEWÄHLT WURDE; SOWIE DIE QUELLEN (METAANALYSEN) ZUM THEMA AGROFORST, IN WELCHEN DIESE SUCHBEGRIFFE BEREITS GENUTZT WURDEN.	XXX
TAB.: 9 MINDESTSTANDARDS FÜR DIE QUALITÄT DER STUDIEN WELCHE IN DIE METAANALYSE EINGESCHLOSSENEN WERDEN SOLLEN (NACH KHAN ET AL. 2004).	XXXI
TAB.: 10 ERFASSTE VARIABLEN AUS DEN VOLLTEXTEN DER EINGESCHLOSSENEN PUBLIKATIONEN. (SIEHE ADDITIONAL_FILE_4 UNTER ADDITIONAL_DATA)	XXXII

Formelverzeichnis

[1] Schätzung des volumetrische Bodenwassergehalts (%) anhand des gravimetrischen Bodenwassergehalt und der Bodenlagerungsdichte	33
[2] Umrechnung des Bodenwassergehaltes (mm) in volumetrischen Bodenwassergehalt (%)	33
[3] Berechnung des Response Ratios (RR)	35
[4] Berechnung des logarithmierten Response Ratios (lnRR)	35
[5] Berechnung der Varianz des logarithmierten Response Ratio (lnRR) nach der Delta-Methode	36

Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
°C	Grad Celsius
AFS	Agroforstsysteme, Agroforstsysteme
AIC	Akaike-Informationskriterium
ANOVA	Varianzanalyse
BHD	Brusthöhendurchmesser
BIC	Bayesianisches Informationskriterium
cm	Zentimeter
CRNP	Neutronensonde
DEZ	Dielektrizitätszahl
EM	elektromagnetische Sensoren
EMI	Elektromagnetische Induktion
ERT	elektrische Widerstandstomographie
FD	Frequenzbereichssensoren
FE-Modell	Fixed Effect Modell
FK	Feldkapazität
GPR	Bodenradar
hPa	Hektopascal
i.d.R.	In der Regel
IQR	Interquartilsspanne
LK	Luftkapazität
log	Logarithmus
m ³	Kubikmeter
mm	Millimeter
nFK	nutzbare Feldkapazität
nFKW _e	nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums
pF-Kurve	Wassergehaltskurve/Retentionskurve
p-Wert	Signifikanzniveau
PWP	Permanenter Welkepunkt
RE-Modell	Random Effekts Modell
RFE	Rekursive Feature Eliminierung

SD	<i>Standardabweichung</i>
SE	<i>Standardfehler</i>
SPS	<i>Silvopastoralsysteme</i>
TDR	<i>Time-Domain-Reflectometry Methode</i>
TDT	<i>Time-Domain-Transmission</i>
WOS	<i>Web of Science</i>
WS	<i>Wassersäule</i>
µm	<i>Mikrometer</i>

Vorwort

Ich Danke

- Gott für das Leben, das er mir geschenkt hat und für alle Bewahrung, Versorgung, Kraft, Ausdauer, Zuversicht, Mut, Inspiration und zahllose andere Dinge, die er mir bis heute und in der Zeit der Erstellung dieser Arbeit geschenkt hat. Er ist der Anfänger und Vollender aller Dinge.
- Prof. Dr. Norbert Lamersdorf für die intensive Betreuung, die fachliche Unterstützung und die Möglichkeit an diesem Thema forschen zu können.
- Dr. Guntars Martinson für die Bereitschaft spontan und kurzfristig die Betreuung zu übernehmen und für die stets gute und schnelle Kommunikation.
- Dr. Franziska Wolpert für die gute Betreuung, die konstruktiven Diskussionen und hilfreichen Anregungen.
- Dr. Manuel Landesfeind für die Beratung in statistischen Fragen.
- meiner teuren und geliebten Frau Katharina, für die unschätzbare Unterstützung - ohne dich wäre ich nicht hier.
- meinem Sohn Konstatin für den Verzicht auf zahllose Spielstunden mit Papa.
- meiner Familie sowie meinen besten Freunden David und Simon für die Unterstützung bis zum Schluss, interessierte Fragen und Anregungen.
- meinem Vater, für Hoffnung und Zuversicht in schwerer Zeit.
- allen nationalen und internationalen Autoren, welche auf meine Anfragen reagiert haben und mir ihre Paper manuell zugeschickt haben wie Frau Prof. Dr. Anne-Christine Mupepele von der Universität in Magdeburg.

Gender-Hinweis:

Im Folgenden wird die männliche Form von personenbezogenen Substantiven für eine einheitliche Darstellung und einen schnellen Lesefluss verwendet. In diese Bezeichnung sind alle Geschlechter mit einbezogen.

1. Einleitung

Für die Ernährung der Weltbevölkerung ist eine ökologisch nachhaltige und verantwortungsvolle sowie ökonomisch tragbare Landwirtschaft essenziell. Global und somit auch innerhalb europäischer und deutscher Grenzen, wird Landwirtschaft mehrheitlich in einer intensiven und hochmechanisierten Form betrieben (Warren et al. 2008; Stoate et al. 2009; Heißenhuber et al. 2015). Dies führt auf den bewirtschafteten Flächen und darüber hinaus zu Umweltproblemen. Diese äußern sich in der zunehmenden Gefährdung natürlicher Schutzgüter wie Boden, Grundwasser und Luft welche auch Lebensraum zahlreicher Tier- und Pflanzenarten sind (Essl und Rabitsch 2013).

Die **Mehrfachnutzung** von Ackerflächen galt in der deutschen Landwirtschaft vom Mittelalter bis in das 19. Jahrhundert hinein als Grundsatz. Kennzeichnend dafür war das hohe Maß der Verbreitung von **Strukturelementen** (Bäume und Sträucher) und historischer Agroforstsysteme wie Streuobstwiesen, Hutewälder, Mittelwälder, Windschutzhecken und Waldweiden (Spiecker 2009; Nerlich et al. 2012). Kontrastierend zeigt sich aktuell ein historischer Tiefstand der Bäume in der Agrarlandschaft. Von Formen historischer Agroforstsysteme sind überwiegend nur noch Streuobstwiesen und multifunktionale Windschutzhecken erhalten geblieben (Chalmin 2008). Verstärkt wurde dies durch eine klare Trennung von Agrarland und Wald von Seiten der Politik (Bsp.: Flurbereinigungsgesetz von 1953) sowie eine Zunahme der **Industrialisierung**. Größere landwirtschaftliche Maschinen ermöglichen eine effizientere Flächenbearbeitung. Zu Gunsten einer rationellen Befahrung und Bewirtschaftung wurden daher, seit Beginn des 20. Jahrhunderts, Ackerschläge zusammengefasst und Gehölzstrukturen stark reduziert. Die Entwicklung sowie der hohe Einsatz von **Pflanzenschutz- und Düngemitteln** tragen ebenso dazu bei, dass die überwiegend intensive und hochmechanisierte Nutzung von landwirtschaftlichen Flächen zahlreiche **Umweltprobleme** verursacht (Geiger et al. 2010). Dadurch werden allgemeine Schutzgüter wie der Lebensraum von Flora und Fauna sowie Grundwasser, Luft und Boden nachhaltig negativ beeinflusst (Foley et al. 2005; Zhang et al. 2007; Rockström et al. 2009; Unseld et al. 2011) sowie hohe **Kosten für die Gesellschaft** verursacht (Scialabba et al. 2014). Vor diesem Hintergrund ist die Etablierung nachhaltiger Anbaumethoden, welche eine multifunktionale und **zukunftsfähige Landwirtschaft** ermöglichen, essentiell (FAO 2017; Wellner und Theuvsen 2017; Veste und Böhm 2018; BMEL 2019).

Eine mögliche Alternative zu den derzeitigen konventionellen Bewirtschaftungsformen ist die **Agroforstwirtschaft** (Nair und Garrity 2012). Als Agroforstsysteme werden Landnutzungsformen bezeichnet, bei der mehrjährige Gehölze mit Ackerkulturen oder Grünland auf einer

Bewirtschaftungsfläche kombiniert werden (Nair 1993). Agroforstsysteme weisen gegenüber konventionellen Landnutzungssystemen eine positive **Multifunktionalität** auf (Veldkamp et al. 2023). Unter den Faktoren der Multifunktionalität werden in der Literatur u.a. die positiven Effekte hinsichtlich des **Bodenschutzes** (Herzog et al. in Freyer 2016; Muchane et al. 2020), der **Biodiversität** (Palma et al. 2003; Jose 2009; Nair und Garrity 2012; Bärwolf 2015 in Hering et al. 2016), des **Biotopverbundes** (Petzold et al. 2013), der **Kohlenstoffbindung** (Kay et al. 2019; Hübner et al. 2022), des **Gewässerschutzes** (Jose 2009; Unseld et al. 2011; P. K. Ramachandran Nair und Garrity 2012), sowie **landschaftsästhetische und erholungsfunktionelle Vorteile** (Schumann 2006; Reeg et al. 2009; Unseld et al. 2011) erwähnt. Trotz der vielseitigen ökonomischen und ökologischen Potentiale (Etienne 1996; Freyer 2016; Beillouin 2022; Malézieux et al. 2022) sind Agroforstsysteme bisher wenig verbreitet, gesellschaftlich wenig bekannt sowie rechtlich bisher wenig beachtet (Jose 2009).

Vor dem Hintergrund des aktuellen, anthropogen bedingten **Klimawandels** werden langfristige Veränderungen erwartet. Prognostiziert werden eine Kombination aus **Erwärmung**, veränderten **Niederschlägen**, einem veränderten Muster von **Extremwetterereignissen** und einem veränderten abiotischen und biotischen **Störungsregime** (Essl und Rabitsch 2013; IPCC 2014; 2022; Häckel 2021; Schönwiese 2020; DWD o.D.). Räumliche und zeitliche Veränderungen von Niederschlägen sind in **Mitteleuropa** bereits seit den letzten Jahren zu beobachten. Im Sommer, der Hauptwachstumszeit der Vegetation, fällt weniger Niederschlag als im langjährigen Mittel (Häckel 2021). Der Großteil des Jahresniederschlags fällt dann im Winter (Häckel 2021). Verbunden mit überdurchschnittlich hohen Temperaturen und Sonnenstunden in der Sommerzeit, führt dies zu einer starken Austrocknung der Böden und damit zu einer **Dürre**. Im Trockenjahr 2003 verursachte dies europaweit Produktivitätseinbußen der Vegetation von 30 % (Ciais et al. 2005), u.a. auch in der Landwirtschaft. Das **Trockenjahr** 2018 führte in Deutschland und Europa bei diversen Ackerkulturen zu reduzierten Ernteerträgen, Qualitätsverlusten und zu der Notwendigkeit von Bewässerungsmaßnahmen (Meinert und Schube 2018; Beillouin et al. 2020). Die Niederschläge im Jahr 2019 reichten nicht aus, um das Bodenwasserdefizit des Trockenjahres 2018 auszugleichen (Meinert et al. 2019). Daher kam es auch im Jahr 2019 zu **Mindererträgen** und Qualitätsverlusten bei Ackerkulturen und Grünlandschnitt, welche Bewässerungsmaßnahmen notwendig machten (Meinert et al. 2019). Auch im Jahr 2022 gab es wiederholt eine negative klimatische Wasserbilanz mit bedeutenden negativen Auswirkungen im deutschen (Meinert et al. 2022) sowie europäischen (Bissolli et al. 2022) Raum auf Wasserstände und Landwirtschaft. Konapala et al. (2020) weisen vor dem Hintergrund dieser aktuellen Entwicklungen darauf hin,

dass die Zunahme extremer, saisonaler Schwankungen der **Wasserversorgung** als wahrscheinlich gilt. Und dies trotz prognostizierter, global steigender Niederschläge (Konapala et al. 2020).

Bevor das *Internationale Jahr des Bodens* im Jahr 2015 zeigte, dass das Bewusstsein für die Wichtigkeit des Bodens zunimmt (United Nations 2013) wurde die Wichtigkeit und Schutzwürdigkeit der Böden nachrangig behandelt. Der allgemeine positive **Einfluss von Agroforstsystemen** auf diverse Aspekte des Bodens gilt als gesichert. Agroforstsysteme verringern die Bodentemperatur (Ehret et al. 2018), die Bodenlagerungsdichte (Musongora et al. 2023) und die Landdegradierung (Noorduijn et al. 2009). Sie verbessern die Bodenporosität, erhöhen die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit und erhöhen die Wasserspeicherkapazität (Seobi et al. 2005). Diese Faktoren können zu einer verbesserten Wachstumsdynamik und Trockenresistenz führen (Zhao et al. 2022). Werden zudem stickstofffixierende Bäume eingesetzt können der Bodenmineralstickstoff und hierdurch die Erträge von Zwischenkulturen verbessert werden (Sida et al. 2018). Zum Einfluss von Agroforstsystemen auf den **Bodenwasserhaushalt** hingegen, divergieren die Angaben in der Literatur (Jacobs et al. 2022). Von positiven (Siriri et al. 2013) über sowohl positive als auch negative (Rhoades 1995; Köhler 2010; Kuyah et al. 2019; Jacobs et al. 2022) bis hin zum negativen (Ong et al. 1991; Lehmann et al. 1998) Einfluss von Agroforstsystemen auf den Bodenwasserhaushalt, ist das Spektrum an Ergebnissen in der Literatur breit gefächert. Die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung weist mit ihren aktuellen Informationen hinsichtlich der Vor- und Nachteilen zu Agroforstsystemen in Deutschland ebenso auf die mögliche Konkurrenz von Bäumen und Ackerkulturen bezüglich Bodenwasser hin (BLE 2021). Landnutzungssysteme wie Agroforst werden jedoch zunehmend als ein wichtiger Schlüsselfaktor bei der Vermeidung von **Folgen des Klimawandels**, sowie zur langfristigen **Ernährungssicherung** wahrgenommen (Chalmin et al. 2009; Freyer 2016; Stadler-Kaulich 2021). Mit der Umwandlung der Landwirtschaft in marktorientierte kommerzielle Landwirtschaftsbetriebe im 20. Jahrhundert werden Kombinationen von Bäumen und Ackerfrüchten als Möglichkeit zur Steigerung der wirtschaftlichen Rentabilität betrachtet. Seit Beginn des Jahrhunderts ist jedoch das Interesse an AFS mit der Anerkennung ihrer Ökosystemdienstleistungen gestiegen, und die Unterstützung für Agroforstwirtschaft auf Ackerland nimmt zu. **Politikgestalter** in mehreren europäischen Ländern haben die Umweltbedeutung von Agroforstsystemen erkannt (Nair et al. 2021). Daher ist es auch vor dem Hintergrund der qualitativen Absicherung von **Handlungsempfehlungen** für Politik und Praxis essenziell, den Einfluss von Agroforstwirtschaft auf den Bodenwasserhaushalt zu quantifizieren.

Übersichtsarbeiten (**Reviews** oder auch **Metaanalysen**) ermöglichen einen schnellen Überblick über die gesamte Bandbreite der aktuellen Evidenz eines Fachbereichs (Khan et al. 2004). Vor

dem Hintergrund der exponentiell wachsenden Anzahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen, fällt es Forschern zunehmend schwerer, den Überblick über die für ihre Arbeit relevanten Publikationen zu behalten (Parolo et al. 2015; Beillouin 2022; van Norden 2014). Infolgedessen nimmt die Aufmerksamkeit, welche einzelnen Veröffentlichungen gewidmet werden kann, gemessen an der Zitierhäufigkeit, schnell ab (Parolo et al. 2015). Systematisch erstellte Reviews erleichtern an dieser Stelle die Übersicht und berücksichtigen zudem auch Publikationen aus fremden Sprachen, welche sonst eine zusätzliche Hürde darstellen können (Khan et al. 2004).

Da sich auch politische Entscheidungen immer häufiger auf klar strukturierte und umfassende Zusammenfassungen von wissenschaftlichen Informationen stützen, kommt der Qualität eines **systematischen Reviews** hier nochmal eine besondere Bedeutung zu (Khan et al. 2004). Nach Khan et al. (2004) entsprechen zahlreiche Reviews nicht den Standards guter wissenschaftlicher Praxis. Somit besteht die Gefahr, dass nicht systematisch erstellte Reviews irreführende Informationen enthalten, auf deren Wahrheitsgehalt sich der Rezipient jedoch verlässt. Konventionelle Übersichtsarbeiten nehmen nach Khan et al. (2004) zunehmend ab und systematische Reviews zu.

Böden unter konventioneller Landwirtschaft sind allgemein anfällig für Extremereignisse wie Dürre, welche in Zukunft häufig auftreten werden. Ein Agroforstsystem soll den Bodenwasserhaushalt daher mindestens nicht negativer beeinflussen als die bisherige, konventionelle Landwirtschaft. Der Bodenwassergehalt bzw. die Bodenfeuchte ist ein wichtiger Indikator für das pflanzenverfügbare Wasser (Blume et al. 2011; Blum 2012; Blum et al. 2018; Amelung et al. 2018; Stahr et al. 2020; Weihermüller und Bogen 2020).

Nach einer gründlichen Recherche in folgenden Datenbanken: *Web of Science*; *Google Scholar*, *CABI Forest Science Database* und *CABI Nutrition and Food Sciences* und *Science Direct (Elsevier)* liegt bisher nur die Metaanalyse von Kuyah et al. (2019), und auch nur für den afrikanischen Raum Sub-Sahara vor. Kuyah et al. (2019) geben die Ergebnisse im Kapitel *Bodenfeuchte* zudem ausschließlich in Form eines Reviews wieder. Eine statistische Auswertung in Form einer Metaanalyse fehlt. Die Datenbanksuche ergab keine weiteren Ergebnisse zu Metastudien, welche die aktuellen Erkenntnisse zu dem Einfluss von Agroforstsystemen auf den Bodenwasserhaushalt bzw. die Bodenfeuchte zusammenfassen. Die vorliegende Arbeit wird hierfür relevante Untersuchungsergebnisse der Literatur, anhand einer **systematischen Metaanalyse**, zusammenfassen und bewerten. Um eine Vergleichbarkeit von Agroforstwirtschaft und konventioneller Landwirtschaft zu gewährleisten, werden bei der Metaanalyse nur Untersuchungen berücksichtigt, welche beide Landnutzungssysteme analog untersucht haben.

1.1. Hypothesen dieser Arbeit

Auf Grundlage des aktuellen Forschungsstandes, liegen folgende Arbeitshypothesen vor:

Es wurden **positive** (Siriri et al. 2013), sowohl **positive als auch negative** (Rhoades 1995; Köhler 2010; Kuyah et al. 2019; Jacobs et al. 2022) und **negative** (Ong et al. 1991; Lehmann et al. 1998) **Einflüsse** von Agroforstsystemen auf den Bodenwasserhaushalt in der Literatur belegt. Naturnahe Agroforstsysteme mit vielfältiger und komplexer Struktur (z.B. Waldgärten) sowie intensiv bewirtschaftete Systeme mit vergleichsweise einfachen Strukturen (z.B. Alley Cropping) werden jedoch undifferenziert unter dem Begriff Agroforst zusammengefasst (Beillouin 2022). In der vorliegenden Arbeit wird daher angenommen, dass der negative Einfluss auf den Bodenwasserhaushalt auf die Agroforstsysteme beschränkt ist, welche in Ihrer Struktur mit intensiv und konventionell bewirtschafteten Landnutzungssystemen vergleichbar sind. *Vice versa* wird daher angenommen, dass sich strukturreichere Agroforstsysteme positiver auf den Bodenwasserhaushalt bzw. die Bodenfeuchte auswirken.

Weiterhin gilt, je strukturierter und dichter ein Baumbestand ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit eines Binnenklimas, welches Oberflächenverdunstung (Evaporation) reduziert und damit die Bodenfeuchtigkeit erhält (Böhm et al. 2014; Bartsch et al. 2020). Dies wird in der vorliegenden Arbeit auch für Baumbestände in Agroforstsystemen angenommen. Die Einflussfaktoren Struktur und Dichte oder der Standortkontext (Topographie, Landschaftsvielfalt und Klima) sind jedoch in Publikationen häufig nicht mit dem Bodenwassergehalt zusammen erfasst worden (Jacobs et al. 2022) und lassen sich daher im Rahmen dieser Metastudie nicht quantifizieren. Aus diesem Grund können die Faktoren Struktur und Dichte sowie deren Einflüsse in dieser Untersuchung nicht direkt erfasst werden. Die unterschiedlichen Klassen von Agroforstsysteme nach () sind jedoch durch weitgehend spezifische Strukturen () charakterisiert, welche für die jeweilige Klassen typisch sind. Vor diesem Hintergrund wird vermutet, dass die Faktoren Struktur und Dichte indirekt über die Klassifizierung erfassbar sind. Es wird daher als **erste Hypothese** angenommen, dass die Agroforstsystemklassen einen unterschiedlich positiven Einfluss auf die Bodenfeuchte ausüben.

Der zweiten Hypothese liegen folgende Annahmen zugrunde: Agroforstsysteme mit **alten Bäumen** erhöhen nach Rhoades (1995) die Bodenfeuchte gegenüber einer bewirtschafteten Vergleichsfläche. Agroforstsysteme mit noch **jungen Bäumen** hingegen üben nach Rhoades (1995) einen temporären, negativen Einfluss auf die Bodenfeuchte aus. Da ein gut entwickeltes und tiefreichendes Wurzelsystem maßgeblich durch das Baumalter beeinflusst wird (Köstler et al. 1968), lässt sich daraus schlussfolgern, dass ältere Bäume möglicherweise aufgrund ihres

ausgeprägten und tiefreichenden Wurzelsystems, die Ressource Boden und damit u.a. die Bodenwassermenge in tieferen Bodenschichten sehr gut erschließen können. Da Ackerkulturen i.d.R. nur die oberen Bodenschichten durchwurzeln (Kaul et al. 2022), kommt es so zu einer **komplementären Nutzung** der Ressource Bodenwasser (Schroth 1998). Daraus lässt sich zudem schließen, dass Bäume bei Wassertransportprozessen wie z.B. *hydraulic lift*, ihr maximales Potential erst mit einem voll ausgeprägten Wurzelwerk entfalten können.

Vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse wird daher als **zweite Hypothese** angenommen, dass unter den zahlreichen Einflussfaktoren welche Agroforstsysteme charakterisieren, der Faktor **Baumalter** von besonderer Relevanz für den Einfluss auf die Bodenfeuchte ist. Es wird angenommen, dass die Ergebnisse von Rhoades (1995) allgemein für Agroforstsysteme aller Klassen Gültigkeit haben. Ist in den zu berücksichtigenden Studien kein mittleres Baumalter angegeben, werden angegebene Durchmesser und Höhen der Bäume verwendet. Da diese ebenfalls eine Funktion des Baumalters sind, können hierüber Rückschlüsse auf das Baumalter und die potenzielle Wurzelentwicklung gezogen werden. Nachfolgend werden für das Verständnis der Zusammenhänge, die Begriffe Bodenwasserhaushalt und Agroforst erläutert.

1.2. Bedeutung des Bodenwasserhaushaltes

Die Quantifizierung des Bodenwassergehalts und der Trockenmasse des Bodens wird bei vielen Arten von Bodenuntersuchungen benötigt, z. B. zur Bestimmung des Wasserhaltevermögens, des pflanzenverfügbaren Wassers, der Infiltration, der Porengrößenverteilung sowie der Durchlässigkeit (Margesin und Schinner 2005). **Bodenwasser** (oft auch als Bodenfeuchte bezeichnet) ist die flüssige Komponente des Bodensystems (Blum et al. 2018) und ist räumlich und zeitlich sehr variabel (Weihermüller und Bogena 2020). Wasser vermittelt als Transport-, Lösungs- und Reaktionsmedium zwischen der festen Phase des Bodens, den lebenden Organismen und der Luft (Stahr et al. 2020). Die räumliche und zeitliche Variabilität des Bodenwassergehaltes ist hoch, sie reicht bei den Längenskalen von einigen Zentimetern bis zu mehreren Kilometern und bei den Zeitskalen von Minuten bis zu Jahren (Vereecken et al. 2014).

Unter der Vielzahl von Funktionen, welche Bodenwasser erfüllt, stellen die ökologischen und die bodenkundlichen (pedologische) Funktionen die wichtigsten dar (Blum et al. 2018). In seiner ökologischen Funktion deckt Bodenwasser den Bedarf von Pflanzen und andere Organismen an Wasser und den im Bodenwasser gelösten Nährstoffen. In seiner pedologische Funktion treibt das Bodenwasser bodenbildende Prozesse wie Verwitterung und die Akkumulation organischer Substanzen sowie den Stofftransport an (Blum et al. 2018).

Der Bodenwasserhaushalt wird hauptsächlich durch **Niederschlag** und **Verdunstung** angetrieben (Stahr et al. 2020). Der Niederschlag umfasst alle Formen von Wasser, die aus der Atmosphäre auf den Boden fallen. Ebenso beeinflussen das aufsteigende Grundwasser, fließende Oberflächengewässer und in geringen Mengen kondensierter Wasserdampf der Luft den Bodenwassergehalt (Blum et al. 2018; Amelung et al. 2018). Im Bereich der humiden Klimaten ist die Differenz von Niederschlag und Verdunstung und damit die **klimatische Wasserbilanz**, langfristig positiv (Stahr et al. 2020). Je nach Niederschlagsmenge und -intensität, Hangneigung, Bodenstruktur und -porosität sowie Wasserspeichervermögen des Bodens, kann ein Teil des Niederschlagswassers nicht in den Boden eindringen. Der Niederschlag fließt dann als **Oberflächenwasser** in Gräben, Bäche und Flüsse ab oder verdunstet von der Bodenoberfläche (Blum et al. 2018; Amelung et al. 2018). Oberflächenwasser ist eine der wesentlichen Ursachen für **Erosion** (Amelung et al. 2018).

Ein Teil des Wassers, welches durch Niederschlag in den Boden eindringt, wird gegen die Schwerkraft im Boden zurückgehalten. Dieses wird als **Haftwasser** oder allgemein als **Bodenfeuchte** bezeichnet (Blum et al. 2018). Ein anderer Teil des gebundenen Wassers entweicht durch **Transpiration** der Pflanzen und Verdunstung (**Evaporation**) der Bodenoberfläche (Blum et al. 2018; Amelung et al. 2018). Ein weiterer Teil versickert über die Untergrenze des Wurzelraums hinaus und wird als **Sickerwasserspende** oder auch **Grundwasserneubildung** bezeichnet (Stahr et al. 2020). Durch kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser, kann das Bodenwasser wieder aufgefüllt werden. Das Grundwasser ist ein großer, ständig zusammenhängender Wasserkörper, welcher sich unter und/oder im Boden befindet und als Wasservorkommen das ganze Jahr verfügbar ist (Blum et al. 2018; Amelung et al. 2018). Nicht abfließendes Grundwasser (**Staunässe**) entsteht in Folge von Abflussbehinderungen im Boden und ist in der Regel nur lokal und saisonal, z.B. aufgrund von hohen Niederschlagsmengen innerhalb eines kurzen Zeitraums, vorzufinden (Amelung et al. 2018).

Der **Bodenwassergehalt** wird häufig als **gravimetrischer Wassergehalt** (g_{Wasser} pro g_{Boden}) als relativer Anteil (%) angegeben (Margesin und Schinner 2005; Weihermüller und Bogena 2020), welcher sich als Quotient der Massen, des durch die Trocknung entfernten Wassers, und des getrockneten Bodens definiert (Stahr et al. 2020). Bei Relevanz der **Lagerungsdichte** des Bodens kann diese mit dem gravimetrischen Wassergehalt multipliziert werden (Stahr et al. 2020) und ergibt dann den **volumetrischen Wassergehalt** (m^3_{Wasser} pro m^3_{Boden}) (Margesin und Schinner 2005; Weihermüller und Bogena 2020). Die maximale Menge an gebundenem Wasser, die ein frei abfließender Boden gegen die Schwerkraft halten kann, wird als **Feldkapazität** bezeichnet (Blum et al. 2018; Stahr et al. 2020). Die **Feldkapazität** des Bodens ist abhängig von Faktoren wie

die Größe der Bodenpartikel und deren Verteilung, der Bodenstruktur, dem Gehalt organischer Substanzen, der Art der Bodenkolloide sowie den an den Bodenkolloiden adsorbierte Kationen (Blum et al. 2018). Sie variiert daher für unterschiedliche Bodenarten. Der Boden zieht aufgrund von Adsorptions- und Kapillarkräften Wasser mit einer bestimmten Spannung an. Mit **Adsorptionskraft** wird die Wirkung bezeichnet, welche zwischen der Festsubstanz des Bodens und den Wassermolekülen, aufgrund unterschiedlicher elektrostatischer Bindungsformen und osmotischen Kräfte, vorliegt. Mit abnehmender Korngröße steigt die spezifische Oberfläche der Festsubstanz des Bodens und damit der Wassergehalt, welcher durch Adsorptionskräfte im Boden gebunden ist. Ebenso erhöht sich mit steigendem Wasserdampfdruck die Menge des Adsorptionswassers. Unter **Kapillarkraft** versteht man die auf Molekularkräften (Adhäsion und Kohäsion) basierende Oberflächenspannung, welche das Wasser innerhalb einer Bodenkapillare gegen die Schwerkraft nach oben steigen lässt. Je kleiner der Durchmesser der Bodenkapillare, desto stärker ist die Bindung des Wassers und desto mehr Energie muss daher zur Freisetzung des Wassers aufgebracht werden. Der überwiegende Anteil des Bodenwassers unterliegt sowohl Adsorptions- als auch Kapillarkräften. Dabei gilt, je höher der Wassergehalt des Bodens ist, desto stärker überwiegen die kapillaren Bindungen gegenüber den adsorptiven Bindungen und vice versa (Amelung et al. 2018).

1.2.1. Wasserbindung im Boden

Die Kräfte, welche von der festen Phase im Boden ausgehen, beeinflussen die Bewegungen des Wassers im Boden und seine Aufnahmefähigkeit für Pflanzen. Somit sind diese Kräfte bodenkundlich und ökologisch von großer Bedeutung (Amelung et al. 2018). In einem heterogenen System wie dem Boden, sind diese Kräfte voneinander verschieden und stetig wechselnd, dies erschwert die Definition und Addition dieser Kräfte. Daher wird anstelle der Kräfte die Arbeit betrachtet, welche diese verrichten bzw. die Arbeitsfähigkeit, das **Potenzial** (Amelung et al. 2018). Das **Gesamtpotenzial** des Bodens ist die Summe von Gravitationspotenzial, Matrixpotenzial, osmotischem Potenzial und Gaspotential. Als **Gravitationspotential** wird die potenzielle Energie des Bodenwassers in einer bestimmten Tiefe bezeichnet, in Bezug auf eine Referenztiefe, welche frei gewählt wird (Stahr et al. 2020). Das Gravitationspotential entspricht somit der Arbeit, welche geleistet werden muss, um ein Wasservolumen von der Referenztiefe auf eine bestimmte Bodentiefe anzuheben (Stahr et al. 2020). Das **Matrixpotential** ist ein Maß für alle, durch die Bodenmatrix ausgeübten, Einwirkungen auf das Bodenwasser. Je geringer der Bodenwassergehalt, desto stärker wird dieses Wasser durch die matrixbedingten Kräfte festgehalten und desto schwerer ist es, dieses Wasser dem Boden zu entziehen (Amelung et al. 2018).

Die Wassermenge, welche unter einem bestimmten Matrixpotential an einem Ort im Boden vorliegt, ist von der Porengrößenverteilung und dem Porenvolumen abhängig (Amelung et al. 2018). Die Stärke des Zusammenhangs zwischen Wassergehalt und Matrixpotential ist daher für jeden Horizont und jede Bodenschicht charakteristisch. Diese wird als Matrixpotential-/Wassergehaltskurve - oder auch **Retentionskurve, pF-Kurve** - bezeichnet (Amelung et al. 2018). Diese stellt eine Grundgröße für jegliche Berechnungen von Größen des Wasserhaushaltes dar. Der pF-Wert entspricht dem logarithmierten Wert des Betrages des Matrixpotentials ($pF = \log \frac{h}{h_0}$, hPa). Die pF-Kurve wird i.d.R. für drei Böden unterschiedlicher Körnung (Ton, Schluff, Sand) dargestellt (Amelung et al. 2018), (**Abb. 1**). Dem unterschiedlichen Verlauf der Kurven liegen die verschiedenartigen Porengrößenverteilungen der Böden zugrunde. Die pF-Kurven stellen idealisierte Zusammenhänge zwischen Wassergehalt und Matrixpotential dar (Amelung et al. 2018). Je kleiner die Bodenporen, desto negativer das Matrixpotential und vice versa. Daher wird die, in diesem Bereich relativ einheitliche Bindungsstärke, auf den von Poren relativ einheitlichen Äquivalenzdurchmesser zurückgeführt (Amelung et al. 2018). Aus diesem Grund wird die Skala der pF-Werte in drei Bodenporenklassen unterteilt: pF-Werte bis 1,8: **Grobporen** (Porendurchmesser $> 10 \mu\text{m}$), pF-Werte von 2,5 – 4,2: **Mittelporen** (Porendurchmesser $0,2 - 10 \mu\text{m}$) und pF-Werte $> 4,2$: **Feinporen** (Porendurchmesser $< 0,2 \mu\text{m}$) (Amelung et al. 2018). Neben der Körnung der Bodenart wird der Verlauf der pF-Kurve durch weitere Faktoren wie das Bodengefüge beeinflusst (s.a. Amelung et al. 2018).

Pflanzen entziehen dem Boden kontinuierlich Wasser. Wird das Bodenwasser nicht wieder nachgeliefert, kann das durch Transpiration abgegebene Wasser nicht mehr von der Pflanze aus dem Boden ersetzt werden. Das Erreichen dieses Punktes wird als **permanenter Welkepunkt (PWP)** bezeichnet (Amelung et al. 2018; Stahr et al. 2020). Das Matrixpotential entspricht an diesem Punkt einem pF-Wert von 4,2. Da dies für die Mehrzahl der Kulturpflanzen zutrifft, wird dieser Wert konventionell als allgemeingültig angenommen und bei der Berechnung des pflanzenverfügbaren Wassers in einem Boden als Grundlage genommen (Amelung et al. 2018). Bei einem pF-Wert von 4,2 ist das Wasser überwiegend nur noch in den Feinporen gebunden, daher ist der Wassergehalt beim PWP eng mit dem Tongehalt verknüpft. Der Einfluss des Gefüges auf den PWP ist nach Amelung et al. (2018) geringer als der Einfluss der Körnung.

Die Wassergehaltsdifferenz zwischen der Feldkapazität und dem permanentem Welkepunkt wird als **nutzbare Feldkapazität (nFK)** bezeichnet und entspricht der pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge (Amelung et al. 2018; Stahr et al. 2020).

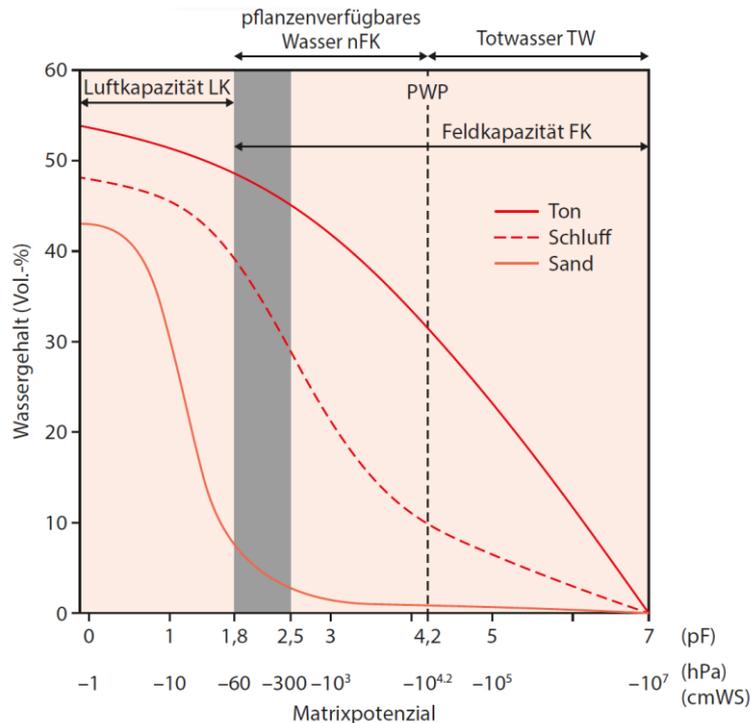


Abb. 1 Retentionskurve des Wassers (pF-Kurve). Beziehung zwischen Matrixpotential und Wassergehalt. Verlauf für die Hauptbodenarten Sand, Schluff (Löss) und Ton. **pF** = pF Wert (*logarithmierter Wert des Betrages des Matrixpotentials*), **PWP** = permanenter Welkepunkt, **LK** = Luftkapazität, **FK** = Feldkapazität (*der am häufigsten vorkommende pF-Werte-Bereich der Feldkapazität ist als grauer Balken dargestellt*) (nach Amelung et al. 2018).

1.2.2. Bestimmung des Bodenwassergehalts

Zur direkten Ermittlung des Bodenwassergehalts einer Bodenprobe, stellt die **Ofentrocknung** bei 105°C für eine Dauer von 16 Stunden einen verbreiteten Standard dar (ISO 1993; Amelung et al. 2018; Margesin und Schinner 2005; Stahr et al. 2020). Weiterhin existieren indirekte Methoden, bei denen mittels elektromagnetischer Sensoren (EM) die Wassergehalte ermittelt werden (Weihermüller und Bogena 2020). Hierzu zählt die **Time-Domain-Reflectometry Methode** (TDR), welche am häufigsten Anwendung findet (Margesin und Schinner 2005; Amelung et al. 2018; Weihermüller und Bogena 2020). Hierbei wird mittels einer Metallsonde ein elektrischer Impuls (Spannungstoß) in die Erde abgegeben. Anhand der unterschiedlich schnellen Reflexion durch das umgebende Medium, wird die vom Wassergehalt des Bodens abhängige **Dielektrizitätszahl** (DEZ) ermittelt. Aus dieser kann der Wassergehalt in Volumenprozent ermittelt werden (Amelung et al. 2018; Stahr et al. 2020). Wasser weist eine weitaus höhere DEZ (≈ 80) auf als andere Bodenbestandteile (≤ 5) (Amelung et al. 2018; Stahr et al. 2020; Weihermüller und Bogena 2020). Zudem besteht zwischen einem absolut trockenen Boden (DEZ = 3) und reinem Wasser eine lineare Beziehung. Daher sind Unterschiede und Veränderungen des volumetrischen Wassergehaltes über die geänderte Reflexionsgeschwindigkeit des elektrischen Spannungstoßes direkt erfassbar (Amelung et al. 2018; Stahr et al. 2020). Weitere

elektromagnetische Messverfahren stellen die **Time-Domain-Transmission** (TDT) sowie die Messung mittels **Frequenzbereichssensoren** (FD) dar. Unter den zwei Arten von FD Sensoren, Kapazitätssensoren und elektrische Impedanzsensoren, weisen Weihermüller und Bogena (2020) auf die geringere Messgenauigkeit der Kapazitätssensoren hin. TDT Messungen weisen eine vergleichbare Genauigkeit wie TDR Messungen und eine höhere Genauigkeit als die Kapazitätssensoren der FD Messweise auf (Weihermüller und Bogena 2020). Je nach Beobachtungsdauer kommen unterschiedliche Sensortypen zum Einsatz (Weihermüller und Bogena 2020). Bei **kontinuierlichen Datenaufzeichnung** werden i.d.R. dauerhaft in das Bodenprofil installierte Sensortypen verwendet. Bei **Einzelbeobachtungen** hingegen, kommen oft Sensorstangen (TDR Messung) zum Einsatz (Weihermüller und Bogena 2020). Aufgrund der kleinräumigen Schwankungen des Bodenwassergehalts, werden mit diesen i.d.R. drei bis fünf **Wiederholungsmessungen** an jedem Probepunkt durchgeführt (Weihermüller und Bogena 2020). Da der Bodenwasservorrat im Jahresverlauf Änderungen durch Witterungsereignisse, Pflanzenentzug und Schwerkraft unterliegt, sind nach Blume et al. (2011) mehrfache Messungen erforderlich.

Da elektromagnetische Bodenwassergehaltssensoren ein jeweils definiertes Bodenvolumen für die Messungen erfassen, wird zur Vermeidung von atmosphärischen Einflüssen ein Mindestabstand zur Bodenoberfläche empfohlen (Weihermüller und Bogena 2020). Bei TDR-Messungen beträgt dieser mindestens 5 cm, bei TDT-, und Kapazitätssensoren ist ein geringerer Abstand zulässig (Weihermüller und Bogena 2020).

Die Beziehung zwischen der scheinbaren **Dielektrizitätskonstante** und dem Wassergehalt des Bodens hängt von den Bodeneigenschaften ab, z. B. von der Bodentextur, dem Gehalt an organischem Kohlenstoff, Schüttdichte und Bodenstruktur (Weihermüller und Bogena 2020). Bei skelettreichen Böden, bzw. Böden mit großen Steinfragmenten, ist ein adäquater Kontakt zwischen Sensor und Boden sicher zu stellen (Weihermüller und Bogena 2020). Einige EM-Bodenwassersensoren wie FD und TDR funktionieren in salzhaltigen Böden ggf. nicht, da die hohe elektrische Leitfähigkeit solcher Böden zu Signalverlusten bei der Messung führt (Nichol et al. 2002). Nach Weihermüller und Bogena (2020) kann ein hoher Skelett-, Gesteins- oder Wurzelanteil in den Böden zu unrealistischen Schätzungen des Bodenwassergehalts führen, da die petrophysikalischen Beziehungen, die zur Umrechnung der gemessenen Signalmenge in den Bodenwassergehalt verwendet werden, in solchen Umgebungen nicht anwendbar sind. Dies gilt auch für Böden, welche reich an organischem Material sind (Weihermüller und Bogena 2020). Weihermüller und Bogena (2020) weisen bei den dielektrischen Messungen darauf hin, dass erst einige Modelle neuerer Sensorelektroniken nicht mehr durch **Temperatureffekte** beeinflusst werden. Messungen älterer Sensoren bedürfen daher ggf. einer Korrektur (Rosenbaum et al.

2011; Weihermüller und Bogena 2020). Blume et al. (2011) hingegen gibt an, dass Unterschiede in Dichte, Salzgehalt, Temperatur, Bodenart, pH-Wert und auch die magnetische Permeabilität nur einen geringen Einfluss auf die Wassergehaltsmessungen haben.

Weitere geophysikalische Methoden zur Bodenfeuchtemessung, wie z.B. Bodenradar (GPR), elektromagnetische Induktion (EMI), elektrische Widerstandstomographie (ERT) sowie die neuere Messmethode über eine Neutronensonde für kosmische Strahlung (CRNP). Weihermüller und Bogena (2020) finden bisher noch keine breite Verwendung. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, werden diese Methoden daher nicht berücksichtigt.

1.2.3. Wasserversorgung der Pflanzen

Eine optimale Wasserversorgung **landwirtschaftlicher Kulturen** ist bei einer Bodenfeuchte von 50 – 100 % nFK gewährleistet (Meinert et al. 2022). Unterhalb von 50 % nFK werden die Ackerkulturen als beregnungsbedürftig angesehen. Unterschreitet die Bodenfeuchte 30 % nFK, besteht durch das Wasserdefizit eine erhebliche Gefahr für die Entwicklung der Kulturen (Meinert et al. 2022).

Pflanzenwurzeln nehmen Wasser überwiegend passiv auf. Dabei wird die Wasseraufnahme über den **Transpirationssog** gesteuert (Amelung et al. 2018). Da in der Bodenlösung zudem geringere **osmotische Kräfte** herrschen als in den Pflanzenwurzelzellen, bewegt sich das Wasser der Bodenlösung zu den äußeren Wurzelzellen hin (Amelung et al. 2018). Die meisten Kulturpflanzen nehmen zumeist nur Bodenwasser aus engen Grobporen oder Mittelporen auf. In noch größeren Poren versickert das Wasser schneller als es aufgenommen werden kann. In den Feinporen (pF-Werte > 4,2) gebundenes Wasser wird auch als **Totwasser** bezeichnet, da es von den Pflanzen nicht genutzt werden kann (Amelung et al. 2018). Die für Pflanzen potenziell nutzbare Bodenwassermenge wird mitunter durch den **effektiven Wurzelraum** bestimmt (Amelung et al. 2018). Der effektive Wurzelraum ist definiert als rechnerisch bestimmte Mächtigkeit einer von Bodenart und Trockenrohdichte abhängigen Bodenzone (Ad-hoc-AG Boden 2005). Wird die nFK auf den effektiven Wurzelraum bezogen, wird sie als **nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums** ($nFKW_e$) angegeben (Amelung et al. 2018). Die nFK und die $nFKW_e$ stellen die Maximalwerte für das pflanzenverfügbare Wasser dar. Diese werden in den gemäßigten-humiden Klimabereichen in der Regel zu Beginn der Vegetationsperiode erreicht. Unter ariden Bedingungen wird hingegen die Feldkapazität aufgrund der zu geringen Niederschläge oft nicht erreicht. Der Grad der Ausnutzung der verfügbaren Bodenwassermenge hängt dann von der Durchwurzelungsintensität und der effektiven Durchwurzelungstiefe am jeweiligen Standort ab. (Amelung et al. 2018). Die $nFKW_e$ liegt für Sandböden meist zwischen 40 und 135 mm. Lehm- und

Schluffböden weisen aufgrund ihres hohen Mittelporenanteils und großen effektiven Wurzelraums besonders hohe Werte auf (140-240 mm). Tonböden nehmen mit 120 mm eine Mittelstellung ein. Diese Kennwerte verändern sich mit der Änderung der Lagerungsdichte der Böden (Amelung et al. 2018). Zusätzlich zu der mineralischen Substanz bindet die organische Substanz des Bodens pflanzenverfügbares Wasser (Amelung et al. 2018). Je nach Gehalt der organischen Substanz und Bodenart erhalten humose Bodenhorizonte daher nFK Zuschläge von 1 – 12 % (Amelung et al. 2018). Amelung et al. (2018) weisen darauf hin, dass Wassermangel auf Böden mit sehr geringer nFKW_e (z.B. Ranker, Rendzina, Podsol) in Trockenjahren zu Ertragsausfällen führt. Während Böden mit hoher nFKW_e (z.B. tiefgründige Schwarzerden aus Löss, Braunerden, Parabraunerden, tiefgründige Kalkmarschen, Kolluvisole) unter mitteleuropäischen Bedingungen wenig Wassermangel zeigen. Unterhalb des effektiven Wurzelraums befindet sich die **horizontale Wasserscheide**. Hier wird das pflanzenverfügbare Bodenwasser ausschließlich über kapillaren Aufstieg nachgeliefert. Daher wird der Wassergehalt in dieser Bodentiefe vor allem durch die Bodentextur aber nicht direkt über das Pflanzenwachstum beeinflusst (Amelung et al. 2018). Klimabedingt unterliegt der Wasserhaushalt im Jahresverlauf Veränderungen. Dies ist bedingt durch die im Jahresverlauf variierende Wasserzufuhr durch Niederschläge sowie durch Wasserverluste, z.B. in der Hauptvegetationszeit der Pflanzen (Amelung et al. 2018).

1.2.4. Wasserbewegungen durch Pflanzenwurzeln

Durch den **Wasserentzug** der Pflanze wird zuerst in der unmittelbaren Umgebung der Wurzel das Matrixpotential vermindert (Amelung et al. 2018). Der hierdurch entstehende Gradient bewirkt, dass Wasser zur Entnahmestelle aus dem Boden nachgeliefert wird (Amelung et al. 2018). Ton- und Schluffböden hemmen dabei die Wassernachlieferung aus dem trockenen Boden weit- aus weniger als Sandböden (Amelung et al. 2018). Für die Pflanzen hat dies zur Folge, dass sie in Böden geringerer Wasserleitfähigkeit (z.B. Sandböden) das Wasser aus einem kleineren Einzugsbereich nutzen können als in Böden höherer Wasserleitfähigkeit (z.B. Ton- und Schluffböden) (Amelung et al. 2018). In Böden geringerer Wasserleitfähigkeit müssen die Wurzeln dem Wasser nachwachsen, außerdem ist eine dichtere Durchwurzelung des Bodens nötig, um einen gleichbleibenden Anteil des pflanzenverfügbaren Wassers aufzunehmen (Amelung et al. 2018).

Neben dem Wasserentzug erfolgt durch tiefwurzelnde Pflanzen auch ein **Wassertransport** aus tieferen Bodenschichten mit dem Transpirationsstrom in obere Bodenbereiche (*eng.: hydraulic lift*) (Amelung et al. 2018; Bayala und Prieto 2020). Die Pflanze schließt über Nacht die Stomata und verringert so die Transpiration; der Wassertransport über die Hauptwurzeln erfolgt jedoch weiterhin (Amelung et al. 2018). Hierdurch kann das Wasserpotential in der Pflanze und in den

Wurzeln der oberen Bodenhorizonte so weit ansteigen, dass Wasser aus den Wurzeln in den umgebenden, trockenen Boden fließt. Nach Amelung et al. (2018) ist dieser Prozess bisher nur für einige Pflanzenarten bekannt; es wird jedoch von einem weitverbreiteten Phänomen ausgegangen. Wasser, welches passiv an den trockenen Oberboden abgegeben wurde, kann am Folgetag wieder von den Wurzeln aufgenommen werden. Vor der Wiederaufnahme erfolgen im Oberboden biochemische Nährstoffumsätze und eine Hydratisierung der Feinwurzeln, sodass diese wieder verstärkt Nährstoffe aufnehmen können (Amelung et al. 2018). Nach Amelung et al. (2018) ist *hydraulic lift* von ariden, semiariden, mediterranen und temperaten Regionen über boreale Nadelwälder wie auch in Regenwäldern zu finden. Die Wassermenge welche über *hydraulic lift* transportiert wird, kann 14-35 % der Evapotranspiration betragen (Amelung et al. 2018). Es sind auch noch höhere Werte bekannt (Amelung et al. 2018). *Hydraulic lift* hat aufgrund des ausgeprägteren Boden-Wurzel-Kontakts, in texturierten und verdichteten Böden eine höhere Relevanz als in grob texturierten Böden (Amelung et al. 2018). Neben dem *hydraulic lift*, welcher als Hauptwassertransport im Bodenprofil von unten nach oben erfolgt, sind auch umgekehrte oder laterale Transporte möglich. Diese Phänomene werden dann allgemein als **hydraulic redistribution** bezeichnet (Amelung et al. 2018).

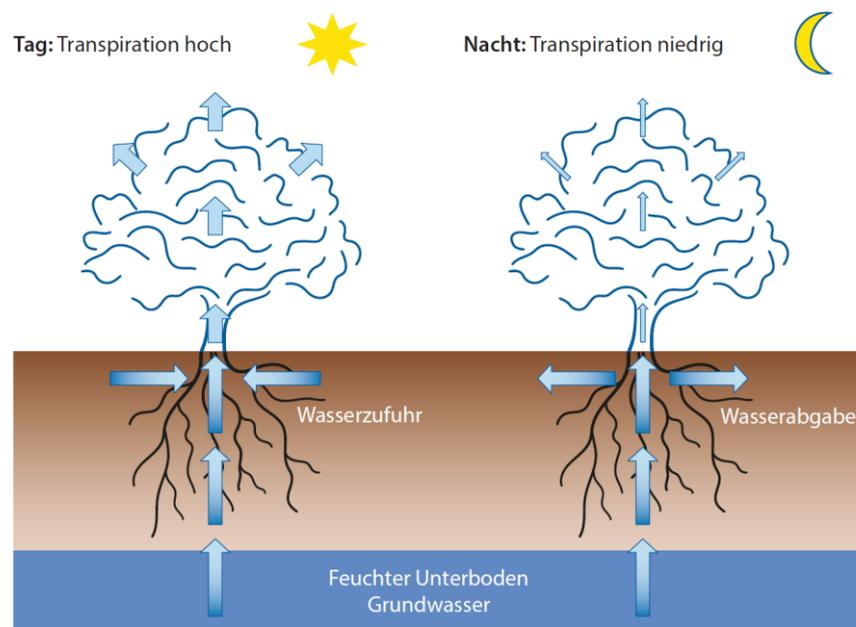


Abb. 2 Hydraulic lift als Schemadarstellung. Tag: Mit dem Transpirationssog wird Bodenwasser von der Wurzel in den Spross und aus dem feuchten Boden in den trockenen Wurzelraum nachgeliefert. **Nacht:** Die Transpiration der Pflanze nimmt ab, überschüssig aufgenommenes Wasser fließt lateral von den Wurzeln in den trockeneren Oberboden und steht am Folgetag wieder zur Verfügung (nach Amelung et al. 2018).

1.2.5. Wasserverbrauch und Pflanzenertrag

Der Wasserbedarf von Pflanzen während der Vegetationsperiode und im Verlauf einzelner Tage ist vor allem von der eingestrahnten Sonnenenergie sowie weiteren meteorologischen Faktoren (Sättigungsdefizit der umgebenden Luft, Windeinfluss, advektive Warmluftzufuhr) abhängig (Amelung et al. 2018). Weitere Faktoren sind Art und Entwicklungszustand des Blattapparates sowie die Wasserverfügbarkeit im Boden (Amelung et al. 2018). Da dieser Verbrauch in Feldversuchen schwer in Evaporation und Transpiration unterschieden werden kann, werden beide Größen meist als **Evapotranspiration** zusammengefasst (Amelung et al. 2018). Ist die Wasserversorgung uneingeschränkt (hohes Matrixpotential), richtet sich die Wasseraufnahme der Pflanze nach der Höhe der potenziellen Evapotranspiration. Mit sinkendem Matrixpotential bleibt die Wasseraufnahme jedoch hinter der potenziellen Evapotranspiration immer weiter zurück. Hintergrund ist die abnehmende Wasserleitfähigkeit und der steigende Fließwiderstand (Amelung et al. 2018). Aufgrund der eingeschränkten Transpiration der Pflanze wird die daraus folgende Gesamtverdunstung als **aktuelle Evapotranspiration** bezeichnet. Die Schließung der Stomata versetzt Pflanzen in die Lage, die stomatare Verdunstung von Wasser an heißen Tagen stark einzuschränken (Amelung et al. 2018). Reichen die mittleren Sommerniederschläge jedoch nicht zur Deckung des Wasserbedarfs der Pflanzen aus, führt dies zu Wuchsdepressionen bzw. Ertragsminderungen (Amelung et al. 2018). Wenn alle Einflussfaktoren für das Wachstum einer bestimmten Pflanzenart konstant sind, nimmt der Ertrag i.d.R. mit steigendem Wasserverbrauch zu (Amelung et al. 2018). Die Höhe der Evapotranspiration hingegen hängt wesentlich von der Länge der Wachstumszeit ab (Amelung et al. 2018).

Unter den für Mitteleuropa prognostizierten Klimaveränderungen wird die **Effizienz der Wassernutzung** in den Sommermonaten an Bedeutung zunehmen (Amelung et al. 2018). Dabei darf für eine optimale Transpiration und Ertragsbildung die Bodenfeuchte im Wurzelraum nicht wesentlich unter 80 % der nFK absinken. Wenn die Böden jedoch über einen längeren Zeitraum weniger als 40 - 50 % der nFK in der Hauptwachstumsphase gespeichert haben, kann es zu deutlichen Mindererträgen kommen (Amelung et al. 2018).

1.3. Landnutzungssystem Agroforst

Die geschätzte globale Fläche von AFS beträgt rund 1,6 Milliarden Hektar, wovon etwa 78 % in den Tropen und 22 % in gemäßigten Regionen liegen (Nair et al. 2021). Diese Fläche macht etwa 32 % bis 33 % der weltweit landwirtschaftlich genutzten Flächen aus, die auf etwa 4,9 bis 5 Milliarden Hektar geschätzt wird (Zomer et al. 2009). Agroforstsysteme sind somit eine bedeutende Landnutzungspraktik.

1.3.1. Definition

Die Wortkombination **Agroforst** entstammt den Wörtern *Agronomie* und *Forst* (Stadler-Kaulich 2021). Definitionen des Begriffs Agroforst weisen in der Literatur leichte Variationen auf (Lundgren und Raintree 1983; Somarriba 1992; Nair 1993; Freyer 2016; Stadler-Kaulich 2021), dies ist möglicherweise auf den im Zeitverlauf zunehmenden Erkenntnisgewinn zurückzuführen. Die wichtigsten Elemente, welche diese Landnutzungsform von anderen unterscheiden, sind jedoch einheitlich definiert. **Agroforstwirtschaft** (*eng.: Agroforestry*) ist ein Oberbegriff für Landnutzungssysteme und -technologien, bei denen mehrjährige Gehölze auf denselben Flächeneinheiten wie landwirtschaftliche Nutzpflanzen und/oder Tiere verwendet werden; in variabler räumlicher Mischung oder Abfolge (Nair 1993). Zudem kennzeichnet Agroforstsysteme eine signifikante (positive und/oder negative) Wechselwirkung zwischen holzigen und nicht holzigen Komponenten des Systems; entweder ökologisch und/oder wirtschaftlich (Lundgren und Raintree 1983; Nair 1993).

Nach Nair (1993) lassen sich aus der Definition von Lundgren und Raintree (1983) **Mindestanforderungen** für AFS ableiten, welche Agroforstsysteme von herkömmlichen Bewirtschaftungsformen abgrenzen. Als Mindestanforderungen müssen AFS mindestens zwei oder mehr Pflanzenarten (oder Pflanzen und Tiere) umfassen, von denen mindestens eine, eine **mehrjährige Holzkultur** ist (Nair 1993). Zudem muss der **Zyklus** eines AFS länger als ein Jahr dauern, mindestens zwei oder mehr nutzbare **Erzeugnisse** hervorbringen und **ökologisch** (strukturell und funktionell) sowie **ökonomisch komplexer** als eine landwirtschaftliche Monokultur sein (Nair 1993). Überdies sind kennzeichnende Ziele eines AFS, die Produktivität (z.B. Steigerung des Flächenertrags) und die Nachhaltigkeit (z.B. Erhalt der Bodenfruchtbarkeit) (Nair 1993).

1.3.2. Klassifikation von Agroforstsystemen

Agroforstsysteme existieren in vielfältigen Formen. Aus den **Faktoren** Baumart, Ackerfrucht, Tierhaltung sowie Aufbau und Umtriebszeit der Kulturen und zahlreichen weiteren Faktoren ergeben sich vielfältige Kombinationsmöglichkeiten. In ihrer Zusammensetzung bestimmen sie die Charakteristika eines Agroforstsystems entscheidend mit. Um die einheitliche Synthese und Analyse von Informationen über bestehende Agroforstsysteme zu gewährleisten, werden Agroforstsysteme klassifiziert (Nair 1993). Als Hauptkriterium für die **Klassifizierung** wird die Struktur des Systems (Art und Anordnung der Komponenten) herangezogen. Auf dieser Grundlage wird in drei Hauptkategorien von Agroforstsystemen unterschieden: Silvoarabel (*en.: Agrisilvicultural*), Silvopastoral, Agrosilvopastoral (Nair et al. 2021). **Silvoarable Systeme** bestehen aus den Komponenten Bäume und Ackerkulturen. Kennzeichnend für **Silvopastorale Systeme** ist die

Kombination von Weiden-, oder Tierbewirtschaftung unter Bäumen. **Agrosilvopastorale Systeme** kennzeichnet neben den Komponenten Bäumen und Ackerkulturen zusätzlich die Weiden- bzw. Tierbewirtschaftung. Zusätzlich können Agroforstsysteme weiter nach Funktion des Systems (Hauptfunktion oder Output), ökologische Parameter (Niederschlag, Höhenlage) oder sozioökonomische Merkmale (Subsistenz-, oder kommerzielle Bewirtschaftung) untergliedert werden (Nair et al. 2021). Ist eine detaillierte Klassifizierung nicht möglich oder notwendig, wird nach den wichtigsten Praktiken der Agroforstsysteme unterschieden.

Die Begriffe *tropisch* und *gemäßigt* werden bei Beschreibung der Landnutzung oft näherungsweise als Synonyme für **Entwicklungsländer** und **industrialisierte Regionen** verwendet (Nair et al. 2021). Im Hinblick auf die Agroforstwirtschaft gelten aride, semiaride, subhumide und humide Gebiete als tropische Entwicklungsregionen, während gemäßigte und mediterrane Regionen als industrialisiert betrachtet werden. Agroforstsysteme (AFS) unterscheiden sich aufgrund klimatischer und sozioökonomischer Merkmale in diesen beiden Hauptregionen.

1.3.3. Agroforstsysteme und Praktiken

Feuchte und subhumide Tropen

In den feuchten und subhumiden Tropen sind verbreitete Systeme der Wanderfeldbau, die Baumzwischenpflanzung (eng.: *tree intercropping*), Hausgärten und schattige mehrjährige Gemeinschaften (Nair et al. 2021).

Bei dem **Wanderfeldbau** (eng.: *shifting cultivation*) wird Land unter natürlicher Vegetation gerodet, für einige Jahre mit Nahrungspflanzen bebaut und dann brach gelassen, um der natürlichen Vegetation die Regeneration zu ermöglichen. Nach einigen Jahren erfolgt erneut die Rodung und die Wiederaufnahme der Bewirtschaftung. Dieser Zyklus wird mehrfach wiederholt. Trotz Bemühungen, diese Praxis zu verdrängen oder zu verbessern, wird sie noch immer auf etwa 300 Millionen Hektar in den Tropen praktiziert. Diese traditionelle Praxis wird oft kritisiert, da sie als ressourcenerschöpfend und umweltschädlich betrachtet wird (Nair et al. 2021).

Taungya ist eine spezielle Form der Landbewirtschaftung, die auf dem deutschen Waldfeldbausystem basiert und im 19. Jahrhundert in Burma (heute Myanmar) entwickelt wurde. Es diente der Förderung von Waldplantagen durch landhungrige Bauern. Diese Praxis wurde so beliebt, dass die meisten Waldplantagen in den Tropen, insbesondere in Asien und Afrika, auf die Taungya-Methode zurückgehen (Nair et al. 2021).

Agroforstliche **Hausgärten** (eng.: *homegardens*) können aus mehreren Arten von wirtschaftlich nutzbaren Pflanzen bestehen, darunter Bäume, Sträucher, Ranken und krautige Arten, die häufig in Verbindung mit Nutztieren auf kleinen Landparzellen um das Haus herum oder angrenzend an das Haus angebaut werden (Nair et al. 2021). Diese einzigartigen landwirtschaftlichen Systeme, die auf Generationen von Erfahrung und traditionellem Wissen beruhen, stellen für große Teile der Bevölkerung in den feuchten Tropen sowie Subtropen die Ernährungsgrundlage dar. Verschiedene Arten von Hausgärten wurden aufgrund ihrer Unterschiede in Größe (Fläche), Form, Layout, Zonierungsmuster, Artenzusammensetzung, Managementziele und der dominanten Pflanzenart oder dem Grad der Urbanisierung identifiziert (Nair et al. 2021). Einige der bekannten Hausgärten, die nach ihren Standorten bekannt sind, sind diejenigen von Kerala (Indien), Java (Indonesien), Kandy (Sri Lanka), Chagga (Tansania), Zentralamerika und das Amazonasgebiet (Brasilien), von denen jeder seine eigenen historischen sowie zeitgenössischen Merkmale aufweist. Ihre enorme Artenvielfalt, bestehend aus Nahrungspflanzen, Heilpflanzen, Zierpflanzen, Obstbäumen, vielseitig nutzbaren Bäumen und Futterpflanzen, trägt zu einer Vielzahl von Ökosystemdienstleistungen bei. Hausgärten finden sich auch in gemäßigten Regionen,

jedoch nur in begrenztem Maße hinsichtlich Fläche und Komplexität im Vergleich zu den Tropen (Nair et al. 2021).

Beschattete mehrjährige Systeme (eng.: *shaded perennial associations*), auch als Kombination von Plantagen und Feldfrüchten bezeichnet, umfassen gemanagte Mehrschicht-Baum-Feldfrucht-Verbindungen; überwiegend in den Tropen (Nair et al. 2021). Die Hauptkulturen bilden mehrjährige Pflanzen, welche periodisch geerntet werden. Diese sind wirtschaftlich und sozial bedeutend für die Anbauländer. Die wichtigsten tropischen Baumpflanzen sind Kokosnuss (*Cocos nucifera* L.), Kaffee (*Coffea spp.* L.) und Kakao (*Theobroma cacao* L.); Ölpalme (*Elaeis guineensis* JACQ.) und Kautschuk (*Hevea brasiliensis* (WILLD. EX A.JUSS.) MÜLL.ARG.) sind ebenfalls in begrenztem Maße Bestandteile von AFS. Im Gegensatz zum populären Bild von großflächigen Plantagen, die mit diesen Kulturen in Verbindung gebracht werden, werden beträchtliche Flächen von den meisten von ihnen, insbesondere Kokosnuss, Kaffee und einige der lokalen Baumpflanzen, in gemischten (Agroforst) Beständen zusammen mit anderen Arten auf Kleinbauernhöfen kultiviert. Agroforstsysteme, die diese Baumpflanzen einschließen, erhalten heutzutage erhöhte Aufmerksamkeit im Kontext der von ihnen erbrachten Ökosystemdienstleistungen und ihrer potenziellen Rolle bei der Minderung des Klimawandels und dem Schutz der Biodiversität (Nair et al. 2021).

Alleenanbau (eng.: *alley cropping*) ist eine agroforstliche Praxis, bei der eine Ackerfrucht zwischen Reihen von Bäumen oder mehrjährigen Sträuchern angebaut wird (Nair et al. 2021). Beim **tropischen Alleenanbau** werden die mehrjährigen Arten, i.d.R. Leguminose Bäume oder Sträucher, als Hecken in Abständen von weniger als 10 m gepflanzt und gepflegt, während die Frucht in den Zwischenräumen oder Alleen zwischen den Hecken angebaut wird. Die Bäume werden während der Anbauphase regelmäßig beschnitten, die Biomasse aus Blättern und Zweigen wird dann als Gründünger in die Alleen eingebracht. Die bodenverbessernden Eigenschaften wie effizientes Recycling von Nährstoffen und Erosionskontrolle des baumbasierten Systems schaffen Bodenbedingungen, die mit denen der Brache-Phase des Wanderfeldbaus vergleichbar sind (Nair et al. 2021).

Silvopastorale Bewirtschaftung ist ein umfassender Begriff, der verschiedene Formen der Integration von Bäumen, Futterpflanzen und domestizierten Tieren auf derselben Fläche umfasst. Diese Praxis reicht von der traditionellen Beweidung durch Tiere in Baumbeständen und Wäldern bis zu modernen, intensiven Formen der Integration von Bäumen und Tieren (Nair et al. 2021). Diese lassen sich grob in zwei Kategorien einteilen: Beweidungssysteme, bei den Rinder auf Weiden unter vereinzelt oder systematisch gepflanzten Bäumen grasen; und

Futterbaumsysteme, bei denen die Tiere in der Regel mit Futter von Bäumen oder Sträuchern gefüttert werden, welche auf Bauernhöfen und Feldgrenzen wachsen. Die meisten Silvopastoralsysteme (SPS) in Afrika, Südasien und anderen Entwicklungsländern, beinhalten umfangreiche Freilandbeweidung durch frei umherlaufende Tiere unter natürlichen Baumbeständen und Sträuchern. Bedeutende Beispiele finden sich in den sogenannten Parklandschaften Subsahara-Afrikas, den brasilianischen Cerrado- (Feuchtsavanne) und Caatinga- (Trockensavanne) Biomen sowie in den ariden und semiariden Gebieten des indischen Subkontinents (Nair et al. 2021). Das integrierte System von Ackerbau, Viehzucht und Forstwirtschaft ist eine vergleichsweise neue Form der silvopastoralen Agroforstwirtschaft (Nair et al. 2021).

Semiaride und aride Tropen

In den semiariden und ariden Tropen dominieren verschiedene Formen von Weidewäldern (*silvopastoral systems*), extensive Baumzwischenpflanzungen (*extensive tree intercropping*) und Windschutzstreifen (*windbreaks*) die Agroforstlandschaft (Nair et al. 2021).

Gemäßigte Breiten

In den gemäßigten Breiten hat die stärkste Entwicklung von AFS in Nordamerika und Europa stattgefunden. Insgesamt sind AFS in den gemäßigten Breiten in Bezug auf ihre Struktur (Natur und Anordnung der Komponenten) und Funktion (Produkte und Dienstleistungen) weniger vielfältig als in den Tropen (Nair et al. 2021). Der Verein für gemäßigte Agroforstwirtschaft hat in den USA fünf AFS-Praktiken anerkannt: Alleeanbau, Waldfarmwirtschaft, Weidewaldwirtschaft, Uferpufferstreifen und Windschutzstreifen. Diese Klassifizierung aus dem nordamerikanischen Raum hat sich mit leichten Modifikationen auch im europäischen Raum etabliert (Nair et al. 2021).

Alleeanbau (eng.: *alley cropping*) ist eine agroforstliche Praxis, bei der eine Ackerfrucht zwischen Reihen von Bäumen oder mehrjährigen Sträuchern angebaut wird (Nair et al. 2021). Der Alleeanbau der **gemäßigten** Breiten, ist eine Form des Mischkultur-Anbaus zwischen Baumreihen, bei dem die Bäume nicht beschnitten werden und die Baumreihen weiter auseinander liegen. Die Auswahl der Baumarten ist ein wichtiger Faktor, der über den Erfolg oder Misserfolg des Systems entscheidet (Nair et al. 2021).

Waldfarmwirtschaft (eng.: *forest farming*) ist ein Agroforstsystem, bei dem landwirtschaftliche Kulturen unter der Schirmherrschaft eines vorherrschenden Baumbestandes angebaut werden. Dieser Ansatz integriert den Anbau von Nutzpflanzen, wie Heilkräuter, Pilze, Beeren und Zierpflanzen, in bestehende oder angepasste Waldökosysteme, um die Vielfalt und Produktivität

des Landes zu erhöhen. Durch die Nutzung der mehrschichtigen Struktur des Waldes schafft die Waldfarmwirtschaft ein mikroklimatisches Umfeld, das den Anbau diverser Unterholzarten ermöglicht, während gleichzeitig der Wald als ökologisches System erhalten bleibt. Dies fördert die Biodiversität, verbessert den Bodenschutz und unterstützt zyklische Ökosystemdienstleistungen (Nair et al. 2021).

Als **Weidewaldwirtschaft** (eng.: *silvopasture oder forest pasture*) der gemäßigten Breiten sind z.B. die „Dehesas“ in Nordspanien und „Montados“ in Portugal bekannt, wo Eichenhaine als Hutewälder genutzt werden. Natürliche Wälder und Gehölze wurden auch bereits im 17. Jahrhundert in England zur Beweidung genutzt (Nair et al. 2021).

Verbesserte Brachen (eng.: *improved fallows*) definiert die Verwendung von schnellwachsenden stickstofffixierenden Bäumen und Sträuchern auf Ackerland, um das Wachstum und die Produktion von Nahrungspflanzen zu unterstützen, die gleichzeitig oder nacheinander mit ihnen wachsen. Unter Bedingungen ausreichender Wasserverfügbarkeit während der Anbausaisonen sind verbesserte Brachen vorteilhaft; sie sind aber für trockene Gebiete ungeeignet (Nair et al. 2021).

Streuobstwiesen (eng.: *orchard meadow*), sind ein Agroforstsystem, das den Anbau von Obstbäumen mit der Nutzung des darunterliegenden Bodens für Grünland oder Ackerbau kombiniert. Diese traditionelle Bewirtschaftungsform fördert eine hohe Biodiversität, indem sie Lebensraum für verschiedene Tier- und Pflanzenarten bietet. Die vielfältige Struktur aus Obstbäumen und der offenen Fläche unterstützt sowohl die landwirtschaftliche Produktion als auch den Naturschutz. Durch die Integration von Grasland können Tiere weiden oder Heu geerntet werden, während die Bäume Früchte für den direkten Verzehr oder die Verarbeitung liefern. Dieses System vereint so ökonomische mit ökologischen Vorteilen.

Für weitere Agroforstsysteme und ihre Charakteristika siehe (Nair 1993; Nair et al. 2021).

1.3.4. Mehrzweckbäume in Agroforstsystemen

Der Begriff Mehrzweckbaum (eng.: *multipurpose tree*) wird fast ausschließlich in der tropischen Agroforstwirtschaft verwendet (Nair et al. 2021). Mehrzweckbäume sind holzige Arten, die bewusst für mehr als eine bevorzugte Verwendung, ein Produkt oder eine Dienstleistung gehalten und bewirtschaftet werden. Solche Arten, die in der kommerziellen Forstwirtschaft und der konventionellen Landwirtschaft relativ wenig genutzt werden, sind die charakteristischen Bestandteile der meisten AFS in den Tropen. Einige von ihnen werden mit Begriffen wie Futterbäume, Obstbäume, Medizinalbäume, Brennholzarten und andere Spezialbäume bezeichnet, die nur einen einzigen Zweck erfüllen, obwohl sie mehrere Produkte und Dienstleistungen anbieten.

Abseits der tropischen Agroforstwirtschaft ist das Prinzip von Mehrzweckbäumen bisher wenig bekannt und deren Potential bleibt trotz zahlreicher Vorteile bisher nahezu ungenutzt (Nair et al. 2021).

1.3.5. Pflanzeninteraktionen in Agroforstsystemen

Pflanzenkomponenten-Interaktionen beziehen sich auf die Auswirkungen einer Pflanze (Komponente) auf eine andere oder auf das gesamte System. In AFS werden diese Interaktionen aufgrund der dominierenden Gehölzkomponenten in der Regel als **Baum-Kultur-Interaktionen** oder **Baum-Tier-Interaktionen** bezeichnet (Nair et al. 2021). Als Beispiel lassen sich die gemeinsame Nutzung sowie gegenseitige Beeinflussung von **Ressourcen** wie Strahlung, Nährstoffen, Bodenwasser und Raum nennen. Viele Effekte der Interaktionen werden mittlerweile als **Ökosystemdienstleistungen** anerkannt. Zu den wichtigsten gehören die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit, Erosionskontrolle, Regulierung der Menge und Qualität des Bodenwassers, Kohlenstoffbindung und Klimawandel-Minderung, Biodiversitätserhaltung und andere (Nair et al. 2021). Aufgrund der komplexen und vielfältigen Interaktionseffekte sind bisher noch wenige Erkenntnisse vorhanden. Daher empfehlen Nair et al. (2021) weiterhin kontinuierliche und langfristige Forschungen.

2. Methodik

Bei der vorliegenden Arbeit wurden die Leitlinien und Stellungnahmen der **Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis** berücksichtigt und umgesetzt (Deutscher Hochschulverband et al. 2012, Deutsche Forschungsgemeinschaft 2022; ALLEA 2017).

Die vorliegende systematische Metaanalyse wird nach dem **Leitfaden** von Khan et al. (2004) angefertigt. Zudem wurden die Qualitätskriterien der transparenten Berichtserstattung systematischer Reviews und Metaanalysen (PRISMA) berücksichtigt (Page, McKenzie, et al. 2021; Page, Moher, et al. 2021). Ergänzend wurden die Arbeiten von Field und Gillett (2010) sowie Hansen et al. (2022) hinzugezogen. Nach Khan et al. (2004) wird die Metaanalyse in den nachfolgenden fünf Arbeitsschritten erstellt.

2.1. Formulierung und Modifikation der Forschungsfrage

Die Forschungsfrage der vorliegenden Metaanalyse wurde anhand der vier Komponenten Population, Intervention bzw. Exposition, Endpunkte und Studiendesign nach Khan et al. (2004) systematisch formuliert. Unter **Population** wird das zu untersuchende Objekt bzw. die Population verstanden. Die **Interventionen** bzw. **Expositionen** umfassen alle Maßnahmen welche

beobachtet oder experimentell durchgeführt werden sollen. Die **Endpunkte** beschreiben die Änderung eines Zustandes, welcher beobachtet oder gemessen wurde.

Das **Studiendesign** umfasst das systematische Vorgehen von Studien. Da das Studiendesign die Validität der Studienergebnisse bestimmt, wird die Qualität eines Reviews maßgeblich von der Qualität des Designs, eingeschlossener Studien, beeinflusst (Khan et al. 2004). Da unterschiedliche Fragestellungen unterschiedliche Studiendesigns erfordern, sollte erst anhand der Fragestellung bestimmt werden, welcher Studientyp zu deren Beantwortung am geeignetsten erscheint (Khan et al. 2004). Für die vorliegende Metaanalyse wurden ausschließlich kontrollierte, experimentelle Feldstudien berücksichtigt. Davon waren einige wenige Studien zusätzlich randomisiert.

Ebenso wurde die Reviewfrage **a priori formuliert**. Nach Khan et al. (2004) nimmt das Verständnis der Fragestellung jedoch während der Erstellung des Reviews zu und nicht vorhersehbare neue Fragestellungen können sich ergeben. Eine Veränderung der Forschungsfrage ist nur nach sorgfältiger Überlegung zulässig und darf nicht durch die Kenntnisse der Studienergebnisse bedingt sein. Der präzisen Formulierung der Forschungsfragen für die Metaanalyse kam vor diesem Hintergrund eine besondere Bedeutung zu, da so möglichst verhindert wurde, dass die Fragen zu einem späteren Zeitpunkt der Reviewerstellung noch einmal **modifiziert** werden mussten (Khan et al. 2004). Die Forschungsfragen für die vorliegende Metaanalyse wurden a priori formuliert und im Untersuchungsverlauf nicht modifiziert.

Bei der Erstellung eines Reviews ist der Einbezug von mindestens einem weiteren Reviewer gute wissenschaftliche Praxis (Khan et al. 2004). Da das vorliegende Review eine Abschlussarbeit und somit eine Prüfungsleistung darstellt, wurde kein zweiter Reviewer hinzugezogen.

2.2. Identifizierung der Literatur

Um hinsichtlich des Auswahlprozesses möglichst viele relevante Studien zu erfassen und das Auftreten von Bias zu minimieren, wurde für die Suche nach Publikationen eine Metadatenbank ausgewählt und die Methodik der Literatursuche dokumentiert.

2.2.1. Auswahl der Datenbanken

Elektronische Datenbanken enthalten i.d.R. nicht alle relevanten Publikationen zu einer Forschungsfrage (Khan et al. 2004). Validität und Genauigkeit der Ergebnisse eines Reviews stehen jedoch im engen Zusammenhang mit der Vollständigkeit der Literaturrecherche (Khan et al. 2004). Metadatenbanken ermöglichen eine umfangreichere Recherche unter einer

Suchoberfläche (**Cross-Search**), da sie mehrere Datenbanken vereinen. Die **Metadatenbank Web of Science (WOS)** (NSUBG o.D.a) umfasst die Datenbanken *Web of Science Core Collection*, *MEDLINE*, *SciELO Citation Index*, *ProQuest Dissertations & Theses Citation Index*, *Grants Index*, *KCI-Korean Journal Database* (NSUBG o.D.b; o.D.a). Hierdurch ergeben sich Vorteile wie eine breite Datenbasis, Interdisziplinarität, einheitliche Suchfunktionen über alle Datenbanken, eine langfristige Verfügbarkeit sowie eine gute Auffindbarkeit von Publikationen (Remick 2012). Aufgrund dieser Vorteile nutzten auch Kuyah et al. (2019); Muchane et al. (2020) und Mupepele et al. (2021) WOS als Datenbank für Ihre Metaanalysen. Aus diesen Gründen wurde WOS auch für die Literaturrecherche der vorliegenden Arbeit herangezogen.

2.2.2. Verknüpfen von Suchbegriffen für die Datenbankrecherche

Aus der Forschungsfrage wurden Suchbegriffe identifiziert. Unterschiedliche Schreibweisen dieser Suchbegriffe sowie deren Synonyme wurden als Begriffe in die Suche mit eingeschlossen. Datenbanken unterscheiden sich hinsichtlich der Suchwerkzeuge und -felder sowie der Verknüpfungen von **Suchbegriffen** (z.B. freie Textwörter, Indexbegriffe, MeSH- bzw. MeSH-ähnliche Begriffe, Schlagwörter) (Khan et al. 2004). Bei der Suche in der Datenbank WOS wurden **Boole'sche Operatoren** und Trunkierungen (Platzhaltersymbole) genutzt. Boole'sche Operatoren (AND, OR, NOT, XOR) sind der Boole'schen Algebra entnommen und drücken die logischen Beziehungen zwischen den Suchbegriffen aus (Rautenberg 2002). Literatur kann so aufgrund der Verknüpfung der Suchbegriffe ein- bzw. ausgeschlossen werden. Datenbankspezifische **Trunkierungen** fungieren als Platzhalter für einzelne oder beliebig viele Zeichen und ermöglichen die Suche eines Wortstammes mit allen möglichen Endungen. In WOS gilt das Stern-Symbol als Trunkierung (*). So wurde vermieden, dass unterschiedliche Schreibweisen jeweils einzeln gesucht werden mussten. Beispielsweise werden in WOS unter *agrofor** die Begriffe *agroforest*, *agroforestry*, *agroforestation* und *agroforestry systems* gesucht. Dies erhöhte die Effizienz der Suche und verringerte zudem das Risiko, dass Literaturstellen aufgrund einer anderen Schreibweise des Suchbegriffs nicht berücksichtigt wurde.

Anhand bereits bekannter Literatur wurden Synonyme unterschiedlicher Schreibweisen gesammelt und die, für die Recherche benötigten, **freien Textwörter** und daraus die **Schlagwörter** (MeSH-Begriffe bzw. MeSH-ähnliche Begriffe) erstellt (siehe Anhang **Tab.: 8**). Waren MeSH-Begriffe vorhanden, waren diese teilweise im Anhang von Abstracts zu finden. Indexierer einschlägiger Fachzeitschriften greifen die Vorschläge der Studienautoren jedoch nicht immer auf (Khan et al. 2004). Jeder Datenbank liegt ein individueller **Thesaurus** (kontrolliertes Vokabular) oder eine eigene **Indexierungsstruktur** zugrunde. Basierend auf diesen Kenntnissen ließ sich eine

hinreichende Anzahl freier Textbegriffe den entsprechenden Schlagwörtern bzw. MeSH-Begriffen zuordnen. Auf diese Weise ließen sich die benötigten, spezifischen Suchbegriffe zu jeder einzelnen Fragenkomponente (*Population, Intervention/Exposition, Endpunkt*) charakterisieren. Diese strukturierte Vorgehensweise ermöglichte eine hohe Sensitivität der Recherche und damit die Chance, einen Großteil der relevanten Studien zu erfassen (Khan et al. 2004).

Die festgelegten Suchbegriffe wurden nun mittels der **Bool'schen Operatoren** miteinander verknüpft. Die **Kombination der Suchbegriffe** mit den Operatoren schaffte die Grundgesamtheit der Literatur für das weitere methodische Vorgehen der Reviewerstellung. Zur Illustration: Bei der Kombination von Suchbegriffen und Bool'schem Operator *agroforestry* **OR** *water* wurden alle Literatur identifiziert, in denen einer von beiden oder beide Begriffe gleichzeitig vorkamen. Die Kombination *agroforestry* **AND** *water* hingegen, berücksichtigte nur Literatur, in der beide Begriffe zusammen vorkamen. Die Verknüpfung *agroforestry* **NOT** *water* hätte ausschließlich Literatur ergeben, in denen der Begriff *agroforestry* vorgekommen wäre, aber nicht *water*. Allerdings würden hier auch Literatur ausgeschlossen, welche beide Begriffe *agroforestry* und *water* enthielten. Daher wurde der Operator NOT, aufgrund der Empfehlungen von Khan et al. (2004), nicht verwendet. Alle Wörter und Begriffe, welche für die Bezeichnung des Sachverhaltes in Frage kamen, wurden mit dem Operator OR kombiniert. Hierdurch wurde für jede Komponente der Fragestellung eine große Anzahl an Suchergebnissen erzielt. Diese wurden nun mit AND verknüpft. Das Ergebnis war der Erhalt sämtlicher Literatur in WOS, welche für die verschiedenen Komponenten der Fragestellung gleichzeitig zutrafen. Für die gewählten Suchbegriffen und deren Quellen: Anhang; **Tab.: 8** und **Box 1**.

2.2.3. Berücksichtigung grauer Literatur und Internetrecherche

Aufgrund der unvollständigen Indexierung von Artikeln und Fachzeitschriften in elektronischen bibliographischen Datenbanken, wird die Berücksichtigung von weiteren Quellen, wie **graue Literatur**, technischen Berichten, Diskussionspapieren und Konferenzberichten empfohlen (z.B. *Datenbank OPENGREY (n.d.), welche Informationen zu graue Literatur in Europa enthält*) (Khan et al. 2004). Aufgrund des Umfangs wurde graue Literatur in der vorliegenden Metaanalyse nicht berücksichtigt; ebenso wenig wie **laufende Forschungsarbeiten**. Der Vollständigkeit halber wurden laufende Projekte zum Thema Agroforst auf der Website des Deutschen Fachverbandes für Agroforstwirtschaft (DeFAF 2023) recherchiert.

2.2.4. Softwarenutzung

Für die Verwaltung und Bearbeitung der Literatur wurde das Open-Source Literaturverwaltungsprogramm Zotero genutzt (Corporation for Digital Scholarship 2023). Für die Erstellung der Tabelle zur Dokumentation wurde Microsoft Excel verwendet (Microsoft 2023). Die Berechnungen der Metaanalyse wurden mit dem Statistikprogramm R (R Core-Team (CRAN) 2023) über die graphische Benutzeroberfläche RStudio (Posit Software PBC 2023) ausgeführt. Weiterhin wurde das Datenextraktionstool *WebPlotDigitizer* verwendet um numerische Daten aus Abbildungen zu extrahieren (Rohatgi 2022).

2.2.5. Auswahl relevanter Studien

Die aufgefundene Literatur in WOS wurde in einem mehrstufigen Verfahren analysiert und dabei in die Metaanalyse mit aufgenommen oder davon ausgeschlossen. Die Kriterien für die Auswahl der Literatur wurden aus der Reviewfrage abgeleitet. Es wurden nur Studien im Review berücksichtigt, welche sämtliche **Einschlusskriterien** erfüllten und keines der **Ausschlusskriterien** verletzten. Diese Kriterien wurden *a priori* festgelegt (Khan et al. 2004), (**Tab.: 1**). Auch wenn erst im Verlauf der Reviewarbeit Kenntnis über Art und Umfang der Studien erlangt wurde, mussten die Auswahlkriterien nicht *a posteriori* modifiziert werden.

Tab.: 1 Kriterien zum Einschluss oder Ausschluss der Literatur in die Metaanalyse (nach Khan et al. 2004).

Fragekomponenten	Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
Populationen	Landnutzungssysteme welche einer landwirtschaftlichen Nutzung entsprechen.	Andere Landnutzungssysteme.
Interventionen	Bewirtschaftung eines etablierten Agroforstsystem im Vergleich zur konventionellen Bewirtschaftung unter vergleichbaren Faktoren (Klima, Boden, etc.) Vergleiche derselben Fläche vor und nach Etablierung des Agroforstsystems.	Fehlender Vergleich. Agroforstsystem fehlt.
Endpunkt	Beobachteter und statistisch ausgewerteter Parameter des Bodenwasserhaushaltes (Bodenfeuchte).	Andere untersuchte Parameter. Fehlende statistische Auswertung.
Studiendesign	Experimentelle Studie. Beobachtungsstudie.	Nicht experimentelle Studie. Keine Beobachtungsstudie.

2.2.6. Beschaffung der Volltexte

Nach Ausschluss irrelevanter Literatur in WOS, wurden die Volltexte der potenziell relevanten Literatur beschafft. Waren diese nicht elektronisch frei zugänglich, wurden die jeweiligen Autoren kontaktiert. Literatur, welche potenziell relevant waren, deren Volltexte aber im Zeitfenster der Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht zu beschaffen waren (*keine Rückmeldung der Autoren*), wurden dokumentiert vom Review ausgeschlossen (Siehe **Additional_File_4**). Die Ausschlusskriterien wurden nach dem Vorbild von Mupepele et al. (2021) festgelegt. Ausgeschlossen wurden Einträge aus den Suchergebnissen, wenn eine der folgenden Kriterien zutraf:

- 1) Die Bodenfeuchte wurde in der Untersuchung nicht berücksichtigt.
- 2) Es wurde kein Agroforstsystem einbezogen (gemäß der Definition von Agroforstwirtschaft, die in dem Artikel gegeben wird).
- 3) Es existierte keine Kontrollfläche.
- 4) Die Studie war konzeptionell und basierte nicht auf Primärdaten.
- 5) Es gab keinen Zugang zu der Studie mit dem Abonnement der Universität Göttingen oder durch persönliche Kommunikation.
- 6) Es waren nicht genügend Daten verfügbar, um die für eine Metaanalyse erforderlichen Informationen zu extrahieren.
- 7) Die Studie oder die Daten lagen als Duplikat vor.
- 8) Reviews und Metaanalysen wurden ausgeschlossen, aber auf weitere Referenzen überprüft.

2.2.7. Mehrfachpublikationen

Bei der Recherche in unterschiedlichen Datenbanken, ist es wahrscheinlich, dass Mehrfachpublikationen derselben Studie gefunden werden. Dabei kann es sich um exakte Dubletten oder um Publikationsserien handeln, bei der aktuellere Arbeiten beispielsweise über eine Erhöhung der Stichprobenzahl oder verlängerte Nachbeobachtung berichten. Werden solche Daten doppelt berücksichtigt, führt dies zu einer Verzerrung der Analyse. Nach Khan et al. (2004) unter anderem deshalb, da häufiger Studien mit positiven Ergebnissen mehrfach publiziert werden.

Fanden sich Mehrfachpublikationen bei der Recherche, wurden, nach den Empfehlungen von Khan et al. (2004), ausschließlich die aktuelle Publikation mit einer vollständigen Darstellung und der längsten Nachbeobachtungsdauer berücksichtigt. Um eine sichere Erkennung von Mehrfachpublikationen zu gewährleisten, wurde zusätzlich die Funktion der Erkennung von

Eintragsdoubletten der Literaturverwaltungssoftware Zotero genutzt (Corporation for Digital Scholarship 2023).

2.2.8. Systematische Verzerrungen und Publikationsbias

Folgende Einflussfaktoren können nach Khan et al. (2004) eine schlechte Auffindbarkeit von Studien bedingen: fehlende statistische Signifikanz, Art und Sprache der Studie, Publikationszeitpunkt und Zeitpunkt der Indexierung in den Datenbanken. Unter **Publikationsbias** wird der Zusammenhang zwischen Publikationswahrscheinlichkeit und statistischer Signifikanz verstanden, welcher unabhängig von der Qualität des Studiendesigns ist. Je geringer die Publikationswahrscheinlichkeit einer Studie, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit der Zugänglichkeit für den Reviewer. Werden solche Studien nicht in ein Review mit einbezogen, wird die Wirksamkeit einer Intervention bzw. Exposition überschätzt und es entsteht ein Publikationsbias (Khan et al. 2004). Mit Hilfe einer **Funnel-Plot-Analyse** wurde das Risiko für Publikationsbias und weitere Biasformen des Reviews näher untersucht (Kapitel 2.5.5).

Eine Beschränkung der Recherche auf wenige **Datenbanken** erhöht nach Khan et al. (2004) ebenso das Risiko für Bias. Dieses Risiko wurde in der vorliegenden Arbeit durch die Berücksichtigung nur einer Metadatenbank reduziert.

Außerdem kann Bias durch **Sprachbeschränkungen** bei der Studienausswahl auftreten, welche in einem Review die Präzision des Gesamteffektes mindern können (Khan et al. 2004). Zur Vermeidung dieser Art des Bias wurde die **Übersetzungssoftware** DeepL genutzt (DeepL SE 2023). Diese gilt hinsichtlich der Übersetzungen vom Deutschen ins Englische (Zulfiqar et al. 2018) sowie Französische (Volkart et al. 2018) und *vice versa*, als aktuell präziseste. Während weitere Sprachen ebenso mit hoher Genauigkeit ins das Englische übersetzt werden können, z.B. Spanisch (Aguilar 2023) sowie Japanisch (Takakusagi et al. 2021), kommen andere Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass die Übersetzung von Fremdsprachen ins Englische, z.B. Portugiesisch (Bacquelaine 2022), noch keine hohe Präzision aufweisen. Um das Risiko von Fehlinterpretationen durch Übersetzungsfehler und einen daraus folgenden Bias für das Review zu vermeiden, wurden im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich deutsch- und englischsprachige Studien berücksichtigt. Vor dem Hintergrund, dass viele Wissenschaftler Ihre Ergebnisse auf internationaler Ebene, zunehmend in der englischen Sprache veröffentlichen und der Rahmen der vorliegenden Arbeit den zeitlich beschränkten Umfang einer Masterarbeit umfasst, wird die Beschränkung der Literatur auf diesen **Sprachraum** als ausreichend angesehen. Da Zulfiqar et al. (2018) für Übersetzungen der Software *DeepL* aus dem Englischen eine zuverlässige Übersetzung nachweisen konnten, wurde bei der Nutzung grundsätzlich nicht von einem möglichen Bias ausgegangen.

Bei komplexeren Sachverhalten und Sätzen weisen Zulfiqar et al. (2018) jedoch auf mögliche Unschärfen der Software hin, welche einer Plausibilitätsprüfung durch den Nutzer bedürfen. Dies wurde bei Übersetzungen berücksichtigt.

2.3. Bewertung der Literatur

Studien mit Qualitätsmängeln (*mangelnde Berücksichtigung guter wissenschaftlicher Praxis*) erhöhen die Anfälligkeit der Studien für systematische Fehler (Bias) und damit das Risiko, den „wahren“ Effekt der Intervention oder Exposition zu über- oder unterschätzen. Die Qualität der eingeschlossenen Studien entscheidet damit maßgeblich über die Qualität eines Reviews (Khan et al. 2004).

2.3.1. Qualitätsbewertung anhand von Leitfäden

Eine Qualitätsbewertung stützt sich nach Khan et al. (2004) auf die Beurteilung von Qualitätsmerkmalen des **Designs**, der **Durchführung** sowie der **Analyse** einer Studie. Anhand eines Leitfadens werden einzelnen Qualitätsmerkmalen numerische Werte zugeordnet. Die hieraus entstandene **Werteskala** ermöglicht es, jeder Studie einen quantitativen Gesamtqualitätsscore zu zuweisen. Unterscheiden sich die eingeschlossenen Studien hinsichtlich Ihrer Qualität, lassen sich diese damit in Untergruppen hoher bzw. geringer Qualität einteilen (Higgins et al. 2023).

Liegt ein solcher **Leitfaden** (o.a. Checklisten) bereits aus vergangenen Reviews gleicher oder ähnlicher Thematik vor, kann diese herangezogen und bei Bedarf der Forschungsfrage angepasst werden. Dies erhöht, bei Reviews gleicher Thematik, zudem die **Vergleichbarkeit** (Khan et al. 2004). Da unterschiedliche Leitfäden nachweislich zu unterschiedlichen Qualitätsbewertungen der verwendeten Literatur führen, müssen die Kriterien und Gewichtungen daher unter Berücksichtigung der Fragestellung angepasst werden (Khan et al. 2004; Mupepele et al. 2016). Geschieht dies nicht, kommt es zu einem hierdurch bedingten Bias. Um diesen zu vermeiden, empfehlen Khan et al. (2004) Qualitätsleitfäden aus Reviews gleicher oder ähnlicher Thematik ausfindig zu machen und auf Ihre Anwendbarkeit hin zu prüfen.

Um die Existenz vorhandener Leitfäden zur Qualitätsbewertung von Literatur zu prüfen, wurden folgende **Reviews und Metaanalysen zum Thema Agroforst** analysiert Shi et al. (2018); Pavlidis und Tsihrintzis (2018); Basche und DeLonge (2019); Kuyah et al. (2019); Muchane et al. (2020); Pent (2020); Mupepele et al. (2021). Unter diesen führten nur Mupepele et al. (2021) eine Qualitätsbewertung nach Mupepele et al. (2016), durch. Die Checkliste von Mupepele et al. (2016) basiert auf 30 publizierten Qualitätschecklisten der evidenzbasierten Praxis; unter anderem der Cochrane Collaboration, dem *Oxford Centre for Evidence-based Medicine*, der *McMaster*

Universität in Kanada und der *Collaboration for Environmental Evidence* (Mupepele et al. 2016) und ist nach aktueller Recherche am geeignetsten, um die Evidenz von nicht randomisierten, kontrollierten Studien zu Ökosystemdienstleistungen oder Naturschutzstudien einheitlich zu bewerten (Mupepele et al. 2016).

Für die vorliegende Arbeit sollte eine Qualitätsbewertung der Literatur anhand des Evidenzbewertungsschemas von Mupepele et al. (2016) durchgeführt werden. Aufgrund des nicht vorhersehbaren Aufwandes wurde diese jedoch nicht durchgeführt.

2.3.2. Wichtige Biasformen und ihre Überprüfung

Als Bias wird bei Forschungsergebnissen das systematische abweichen von den „wahren“ Effekten bezeichnet, welche diese entweder unter- oder überschätzen (Sutherland et al. 2013). Vier wichtige Biasformen für dieses Review, deren Charakteristika sowie Maßnahmen zu ihrer Vermeidung sind in **Tab.: 2** erläutert.

Tab.: 2 Erläuterung von vier wichtige Biasformen für dieses Review und Maßnahmen zur deren Vermeidung (nach Khan et al. 2004; Schmucker et al. 2020; bmj 2020).

Biasform	Erläuterung	Maßnahmen zur Vermeidung
Selection bias	Vergleichbarkeit der Untersuchungsflächen ist aufgrund von Störgrößen (<i>eng.</i> ; ‚ <i>confounder</i> ‘) nicht gegeben. Stichprobendesign nicht repräsentativ gewählt.	Maßnahmen zum Ausschluss von Störgrößen treffen. Auswahl von Untersuchungsflächen mit gleichen Ausgangsbedingungen. Repräsentatives Stichprobendesign.
Performance bias	Einzelne oder alle Untersuchungsflächen werden Interventionen bzw. Expositionen ausgesetzt, welche nicht zur Forschungsfrage gehören.	Ausschließlich Interventionen bzw. Expositionen durchführen, welche für die Forschungsfrage relevant sind. Unterlassen von Interventionen bzw. Expositionen, welche nicht für die Forschungsfrage relevant sind.
Measurement bias	Verwendung nicht standardisierter Messmethoden. Variierende Quantität und Qualität bei der Erhebung der Messungen auf Untersuchungs- und Kontrollfläche. Verwendung unterschiedlicher Messgeräte auf Untersuchungs- und Kontrollfläche.	Verwendung standardisierter Messmethoden. Gleichbleibende Quantität und Qualität bei der Erhebung der Messungen auf Untersuchungs- und Kontrollfläche. Verwendung gleicher Messgeräte.

Attrition bias	Verlust von Stichprobenpunkten/Untersuchungsflächen im Verlauf der Untersuchung. Fehlende Dokumentation solcher Fälle.	Dokumentation bei Verlusten von Stichprobenpunkten/Untersuchungsflächen im Verlauf der Untersuchung. (Eine in diesem Fall anschließende Intention-to-Treat- oder Sensitivitäts-Analyse (Khan et al. 2004) kommt bei den berücksichtigten Studiendesigns der vorliegenden Untersuchung nicht in Betracht.)
----------------	--	---

Nach Khan et al. (2004) ist die Erkennung von Bias zum einen abhängig von einem fundierten Verständnis und der daraus folgenden Fähigkeit zur Bewertung der Studienqualität. Zum anderen ist die Erkennung von Bias in Literatur mit mangelhafter Studienbeschreibung schwierig bis unmöglich (Khan et al. 2004). Das Evidenzbewertungsschema von Mupepele et al. (2016) berücksichtigt in der Qualitätscheckliste Fragen, mit denen für das jeweilige Studiendesign relevante Biasformen identifiziert werden können (Mupepele et al. 2016).

2.4. Datenextraktion aus den Publikationen

In diesem Kapitel wird die detaillierte Vorgehensweise zur Extraktion der benötigten Daten aus den ausgewählten Publikationen beschrieben. Ziel der umfassenden Datenextraktion war es, sicherzustellen, dass alle relevanten Informationen im Kontext der Forschungsfrage erfasst wurden.

2.4.1. Erfasste Variablen

Aus den 86 eingeschlossenen Volltexten wurden Daten zur **Bodenfeuchte**, sowie 50 weitere Variablen extrahiert. Diese zusätzlichen Variablen, darunter geografische Koordinaten, Klimadaten, Bewirtschaftungssystem, Bodendaten und Baumarten sowie der Untersuchungszeitraum wurden berücksichtigt, um ein umfassendes Verständnis für die Auswirkungen von Agroforstsystemen auf die Bodenfeuchte zu ermöglichen. (Anhang; Tab.: 10). So sollte sichergestellt werden, dass alle relevanten Variablen im Kontext der Forschungsfrage erfasst wurden. In Fällen, in denen eine Studie mehrere Agroforstbehandlungen (Untersuchungsflächen) umfasste, wurde jede Untersuchungsfläche als eigenständiger Datenpunkt betrachtet. Daraus resultierte, dass Kontrollflächen bei Studien mit mehr als einem Experiment bei der Datenerhebung mehrfach

aufgenommen wurden. Ein einheitliches Agroforstsystem mit verschiedenen Baumarten wurde jedoch nur als einmalige Beobachtung festgehalten (Tonnito et al. 2006 in Muchane et al. 2020¹).

Die Daten wurden, je nach Verfügbarkeit, aus dem Ergebnisteil, den Tabellen, den Anhängen, den Diagrammen und den Abbildungen der einzelnen Arbeiten extrahiert. In 51 der 86 Publikationen lagen die Daten zur Bodenfeuchte nur als Abbildung vor. Aus diesen 51 Publikationen wurden die numerischen Daten zur Bodenfeuchte mit dem Datenextraktionstool *WebPlotDigitizer* (Rohatgi 2022) extrahiert und die exportierten Daten via *Microsoft Excel* (Microsoft 2023) berechnet. Die Bodenfeuchtedaten wurden über die gesamte erfasste Bodentiefe, jeweils für die Untersuchungs- und Kontrollfläche gemittelt (arithmetisches Mittel).

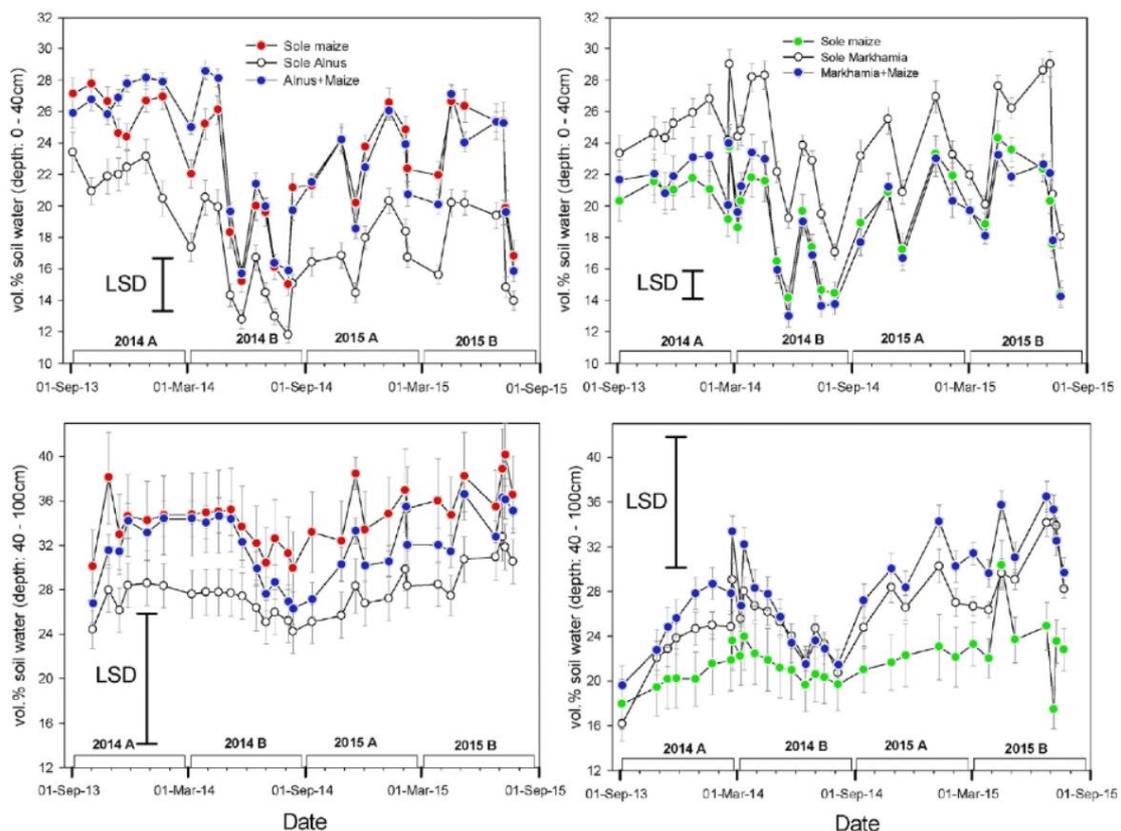


Abb. 3 Illustration der manuellen Extraktion der numerischen Daten aus Abbildung Fig. 3 von Ndoli et al. (2017) via *WebPlotDigitizer* (Rohatgi 2022). Vor dem manuellen Setzen der Datenpunkte erfolgte die Kalibrierung der Achsen. Datenpunkte, aus denen die numerischen Daten extrahiert wurden, sind hier zur Visualisierung unterschiedlich eingefärbt. *Sole maize* ist eine Maismonokultur und wurde als Kontrollfläche berücksichtigt. *Alnus + maize* sowie *Markhamia + maize* sind Agroforstflächen, welche jeweils unterschiedliche Baumarten mit einer Maiskultur kombinieren.

¹ Muchane et al. 2020 zitieren Tonnito et al. 2006 ohne Angabe im Literaturverzeichnis; daher war die Zitierung der Primärliteratur nicht möglich.

2.4.2. Umrechnung in die volumetrische Bodenfeuchte

Die Bodenfeuchte war in den Publikationen als gravimetrischer oder volumetrischer Bodenwassergehalt angegeben. Der volumetrische Bodenwassergehalt gilt hinsichtlich des potentiell pflanzenverfügbaren Wassers als aussagekräftiger (Amelung et al. 2018). War in Publikationen, welche nur den gravimetrischen Bodenwassergehalt gemessen hatten, die Bodenlagerungsdichte angegeben, wurde hieraus der volumetrische Bodenwassergehalt geschätzt (Formel [1]).

$$\Theta_v = \frac{mw}{\rho_w} \cdot \frac{1}{Vg} \quad [1]$$

Θ_v : volumetrischer Bodenwassergehalt (%)

mw : gravimetrischer Bodenwassergehalt (%)

ρ_w : Dichte des Wassers ($\frac{g}{cm^3}$)

Vg : Bodenlagerungsdichte ($\frac{g}{cm^3}$)

War der Bodenwassergehalt in Millimetern (mm) für eine Bodenschichtdicke angegeben, wurde für die jeweilige Bodenschicht der volumetrische Bodenwassergehalt wie folgt geschätzt (Formel [2]).

$$\Theta_v = \frac{\text{Bodenwassergehalt (mm)}}{\text{Bodenschichtdicke (mm)}} \quad [2]$$

Θ_v : volumetrischer Bodenwassergehalt (%)

2.5. Statistische Auswertung

2.5.1. Datenvorbereitung und verwendete Schätzer

Für die statistische Analyse und die Visualisierung der Daten in R-Studio wurden verschiedene Pakete genutzt, darunter *nlme* (Pinheiro et al. 2023), *ggplot2* (Wickham et al. 2023) und *metafor* (Viechtbauer 2023). Für weitere Details siehe R-Script als Markdown Dokument (Anhang 6.1).

Um einen grundlegenden Überblick über die Daten zu gewinnen und zentrale Tendenzen, Streuungen und deren allgemeine Verteilung zu verstehen wurden Methoden der **deskriptiven Statistik** angewandt. Die Berechnung von Mittelwerten und Medianen sowie die Erstellung von Histogrammen und **Boxplots** schafften die Voraussetzungen, um die Datenstruktur zu verstehen und die Grundlage für weiterführende Analysen zu legen. Durch den Einsatz von Boxplots konnten zudem sogenannte **Ausreißer** in den Daten effektiv erkannt werden und der weitere

Umgang mit diesen entschieden werden. Diese Schritte stellten sicher, dass die weiteren Analysen robust und zuverlässig waren. Zur Überprüfung der Datenverteilung wurden ein **Shapiro-Wilk-** und **Quantil-Quantil-Test** durchgeführt, um die **Normalverteilungsannahme** zu überprüfen (Rubia 2023).

2.5.2. Schätzung fehlender Maßzahlen für die statistische Streuung

In vielen eingeschlossenen Publikationen fehlten die **Maßzahlen für die statistische Streuung** und Genauigkeit (Standardabweichung (SD) und Standardfehler (SE)). Für die **Berechnung der Varianz der Effektgröße** (logarithmiertes Response Ratio (lnRR)) lagen im Datensatz nicht genug Werte für SD und n vor, für SE waren jedoch für die Untersuchungsfläche und die Kontrollfläche die meisten Werte verfügbar (jeweils 7). Daher wurde aus allen vorhandenen SE Werten (14) der Median für die fehlenden SE Werte von 84 Studien geschätzt. Dann wurde anhand einer Näherungsformel, welche aus der Delta-Methode abgeleitet wurde, die Varianz für das logarithmierte Response Ratio (RR) geschätzt.

Die **Delta-Methode** ist ein statistisches Verfahren, welches zur Schätzung der Varianz und des Standardfehlers von Funktionen von Zufallsvariablen verwendet wird, insbesondere wenn diese Funktionen nicht-linear sind. Sie basiert auf einer Taylor-Expansion erster Ordnung der Funktion um den Erwartungswert der Zufallsvariablen. Die Methode ermöglicht es, Konfidenzintervalle und Signifikanztests für abgeleitete Größen, wie beispielsweise Verhältnisse oder logarithmierte Verhältnisse von Mittelwerten, zu berechnen. In der Metaanalyse und anderen Anwendungen, bei denen Effektgrößen aus unterschiedlichen Studien zusammengefasst werden, wird die Delta-Methode genutzt, um die Unsicherheit von kombinierten oder transformierten Schätzungen zu quantifizieren (van der Vaart und Wellner 1996; Ver Hoef 2012; Nunes et al. 2013; Fletcher und Jowett 2022).

Unter der Annahme, dass die Korrelation zwischen den beiden Gruppen (Untersuchungs- und Kontrollgruppe) vernachlässigbar war, wurde eine vereinfachte Berechnung des SE des lnRR, basierend auf den Standardfehlern der Mittelwerte beider Gruppen und deren Mittelwerte selbst, berechnet. Im Folgenden wird die Herleitung der Formel erläutert.

Definition des Response Ratios

RR für zwei Gruppen (Untersuchungs- und Kontrollgruppe) mit den Mittelwerten μU und μK ist definiert als:

$$RR = \frac{\mu U}{\mu K} \quad [3]$$

μU = Mittelwert der Bodenfeuchte (Vol. %) der Untersuchungsfläche

μK = Mittelwert der Bodenfeuchte (Vol. %) der Kontrollfläche

Log-Transformation des Response Ratios

Der natürliche Logarithmus des Response Ratios ist definiert als:

$$\ln(RR) = \ln\left(\frac{\mu U}{\mu K}\right) = \ln(\mu U) - \ln(\mu K) \quad [4]$$

$\ln(RR)$ = logarithmiertes Response Ratio

μU = Mittelwert der Bodenfeuchte (Vol. %) der Untersuchungsfläche

μK = Mittelwert der Bodenfeuchte (Vol. %) der Kontrollfläche

Anwendung der Delta-Methode

Die Varianz von $\ln(RR)$, unter Vernachlässigung der Kovarianz zwischen μU und μK , kann näherungsweise durch folgende Formel veranschaulicht werden (Grundlage ist die Verwendung der Taylor-Expansion erster Ordnung von $\ln(RR)$ um den Erwartungswert von RR):

$$Var(\ln(RR)) = \left(\frac{\partial \ln(RR)}{\partial \mu U}\right)^2 Var(\mu U) + \left(\frac{\partial \ln(RR)}{\partial \mu K}\right)^2 Var(\mu U)$$

Da $\frac{\partial \ln(RR)}{\partial \mu U} = \frac{1}{\mu U}$ und $\frac{\partial \ln(RR)}{\partial \mu K} = -\frac{1}{\mu K}$ wurde berechnet:

$$Var(\ln(RR)) = \left(\frac{1}{\mu U}\right)^2 Var(\mu U) + \left(-\frac{1}{\mu K}\right)^2 Var(\mu K)$$

$\ln(RR)$ = logarithmiertes Response Ratio (RR)

μU = Mittelwert der Bodenfeuchte (Vol. %) der Untersuchungsfläche

μK = Mittelwert der Bodenfeuchte (Vol. %) der Kontrollfläche

Umrechnung von Varianz in Standardfehler

Der Standardfehler (SE) ist die Quadratwurzel der Varianz, daraus folgte:

$$SE_{\ln(RR)} = \sqrt{Var(\ln(RR))}$$

Ersetzen von $Var(\mu U)$ und $Var(\mu K)$ durch die Quadrate der Standardfehler der Mittelwerte (SE_U^2 und SE_K^2) ergab:

$$SE_{\ln(RR)} = \sqrt{\left(\frac{SE_U}{\mu U}\right)^2 + \left(\frac{SE_K}{\mu K}\right)^2} \quad [5]$$

$SE_{\ln(RR)}$ = Varianz des logarithmierten Response Ratio ($\ln RR$)

SE_U = Standardfehler der Untersuchungsfläche

SE_K = Standardfehler der Kontrollfläche

μU = Mittelwert der Bodenfeuchte (Vol. %) der Untersuchungsfläche

μK = Mittelwert der Bodenfeuchte (Vol. %) der Kontrollfläche

Diese grundlegende Formel wurde verwendet, um den Standardfehler des natürlichen Logarithmus des Response Ratios (RR) unter der Annahme zu berechnen, dass die Mittelwerte unabhängig sind und es keine Korrelation zwischen den Gruppen gab.

Obwohl die **Delta-Methode** ein leistungsfähiges Werkzeug zur Schätzung des Standardfehlers von nicht-linearen Funktionen von Zufallsvariablen, einschließlich des logarithmierten Response Ratios (log RR), darstellt (van der Vaart und Wellner 1996; Nunes, Oliveira, und Mexia 2013; Zepeda-Tello et al. 2022), wurde nachträglich die Entscheidung für die Verwendung der **escalc** Funktion aus dem **metafor**-Paket getroffen (Viechtbauer 2010). Diese Entscheidung wurde getroffen, um mögliche Verzerrungen zu minimieren, die durch die Korrelation zwischen den Untersuchungs- und Kontrollflächen entstehen konnten, welche in dem Datensatz aufgrund der räumlichen Nähe der Vergleichsflächen vorlagen. Die *escalc*-Funktion ermöglicht eine präzisere Handhabung solcher Datenstrukturen und berücksichtigt explizit die Korrelation zwischen den Messungen (Viechtbauer 2010), was zu einer genaueren Schätzung der Effektgrößen und ihrer Varianzen führte.

Daher wurden während der Datenaufbereitung **fehlende Varianzen** der gewählten Effektgröße durch das Maximum der mit der Funktion ‚escalc‘ geschätzten Varianzen ersetzt. Es wurde daher die „schlechteste“ Varianz der vorhandenen Studien als Schätzer für die fehlenden Studien angenommen. Hierbei konnten nur drei Studien bei der Berechnung berücksichtigt werden, welche jeweils Angaben zu SD und dem Stichprobenumfang (n) für die Untersuchungs- und

Kontrollfläche aufwiesen. Dieser konservative Ansatz ermöglichte es, Publikationen trotz fehlender SE und SD Werte in die Metaanalyse einzuschließen und minimierte das Risiko falsch positiver Befunde (Viechtbauer 2010).

2.5.3. Quantitative Synthese von Effekten einzelner Studien (Metaanalyse)

Ein Effekt ist ein Maß für den Zusammenhang zwischen einer Intervention bzw. Exposition und einem Endpunkt. Dabei wird zwischen dem individuellen Effekt und Gesamteffekt differenziert. Der **individuelle Effekt** bezieht sich auf die Effekte der einzelnen, in die Analyse eingeschlossenen, Studien. Der **Gesamteffekt** bezeichnet das Zusammenfassen der individuellen Effekte durch die Metaanalyse. Ein **Punktschätzer** gibt Auskunft über Richtung (positiver oder negativer Zusammenhang) und Größe des Effektes. Die **Genauigkeit eines Effektes** (p-Wert) gibt den Grad der zufallsbedingten Unsicherheit bei der Effektschätzung an. Das **Konfidenzintervall** gibt den Bereich an, in dem der „wahre“ Wert der Effektgröße mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit (z.B. 95 %) erwartet werden kann (Khan et al. 2004).

Die Einzeleffekte (mittlere volumetrische Bodenfeuchte %) wurden über verschiedenen Klimazonen hinweg erhoben. Die absoluten Änderungen der volumetrischen Bodenfeuchte variierten zwischen den verschiedenen Klimazonen und waren daher für einen direkten Vergleich nicht geeignet. Aus diesem Grund wurde als **Effektgröße** das **logarithmische Verhältnis der Mittelwerte** (eng. *log transformed ratio of means*) (ROM) verwendet. Diese Transformation ist besonders geeignet für die Analyse von Verhältnissen, da sie eine symmetrische Verteilung um den Nullpunkt erzeugt und eine Annäherung an die Normalverteilung ermöglicht (Nakagawa et al. 2022).

Zur Überprüfung des **Gesamteffektes** hinsichtlich der statistischen Robustheit, werden konventionell zwei unterschiedliche statistische Verfahren angewendet, das *Fixed Effect*-Modell und das *Random Effects*-Modell (Khan et al. 2004; Field und Gillett 2010; J. Higgins et al. 2023). Wird bei der Schätzung des durchschnittlichen Effektes angenommen, dass es einen einzigen zugrunde liegenden „wahren“ Effekt gibt, wird das **Fixed Effect -Modell** (FE-Modell) gewählt. Beim **Random Effects -Modell** (RE-Modell) wird hingegen angenommen, dass es keinen einzigen Effektwert, sondern eine Verteilung der Effekte gibt, die auf der Variabilität zwischen den Studien sowie dem Zufall beruhen (Zufallsvariabilität) (Khan et al. 2004).

Als **Hypothese** dieser Untersuchung wurde angenommen, dass der Effekt von Agroforstsystemen auf die Bodenfeuchte signifikant von der Variable (Baumalter) beeinflusst wird. Die Bodenfeuchte wird jedoch von zahlreichen weiteren Faktoren beeinflusst (Amelung et al. 2018; Stahr

et al. 2020). Daher wurde der Gesamteffekt des Baumalters auf die volumetrische Bodenfeuchte anhand eines **Modells** mit zufälligen Effekten geschätzt (**RE-Modell**), wobei nach Gurevitch und Nakagawa (2015) ein zufälliger Effekt für die Studie und keine festen Effekte verwendet wurden. Da das RE-Modell die Varianz der beobachteten Effekte zwischen den Studien bei der Berechnung der Konfidenzintervalle berücksichtigt (unter Annahme deren Normalverteilung) erzeugt ein RE-Modell bei Vorliegen von Heterogenität breitere Konfidenzintervalle als ein FE-Modell. Vor diesem Hintergrund muss berücksichtigt werden, dass das FE-Modell hierdurch, bei signifikanter ungeklärter Heterogenität zwischen den Studien, eine nicht angemessene Genauigkeit für den Gesamteffekt kalkuliert (Khan et al. 2004).

Um die a priori Hypothese zu überprüfen, wurde eine **Metaanalyse** (Viechtbauer 2010; Koricheva et al. 2013) über den gesamten, erfassten Datensatz durchgeführt. Hierzu wurden **Forest Plots** erstellt, um eine visuelle Darstellung der Ergebnisse der einzelnen Studien sowie des Gesamteffekts zu ermöglichen. Forest Plots sind ein wesentliches Werkzeug in Metaanalysen, welche die Größe und Richtung der Effekte sowie die Variabilität zwischen den Studien visualisieren (Khan et al. 2004; Crawley 2013). **Funnel Plots** wurden genutzt, um möglichen Publikationsbias zu identifizieren. Diese Methoden trugen dazu bei, die Vollständigkeit und Unvoreingenommenheit der Datenbasis zu beurteilen und die Qualität der Metaanalyse sicherzustellen.

2.5.4. Untersuchung der Heterogenität

Die Variabilität der Effekte zwischen einzelnen Studien wird als **Heterogenität** bezeichnet (Khan et al. 2004). Diese entsteht, wenn zwischen einzelnen Studien Ungleichheiten hinsichtlich der jeweiligen Populationen, Interventionen bzw. Expositionen und Endpunkte vorliegen (Khan et al. 2004). Existieren Unterschiede in Studiendesign und Studienqualität wird dies als **methodische Heterogenität** bezeichnet (Khan et al. 2004). Da das Vorliegen von Heterogenität die Möglichkeit zur Durchführung einer Metaanalyse entscheidend beeinflusst, wird diese mit Heterogenitätstests quantifiziert (Khan et al. 2004). Eine erste visuelle Einschätzung der vorliegenden Heterogenität ermöglichen Forest Plots (Khan et al. 2004). Sind die Punktschätzer auf derselben Seite der vertikalen Linie zu finden, die den *Nulleffekt* kennzeichnet, ist zu erwarten, dass die Interventionen denselben qualitativen (positiven oder negativen) Effekt hervorrufen (Khan et al. 2004). Befinden sich die Punktschätzer jedoch verteilt auf beiden Seiten der vertikalen Linie, zeigt dies sowohl positive wie auch negative Auswirkungen der Interventionen und damit eine typische Form von Heterogenität (Khan et al. 2004). Überlappen die Konfidenzintervalle, ist dies ein Hinweis darauf, dass die Unterschiede zwischen den Punktschätzern zufallsbedingt sind und ein erwartbares, unvermeidliches Maß an Heterogenität vorliegt (Khan et al. 2004).

Für die Effektgrößen wurde mit **Sigma²** (σ^2) die geschätzte Varianz innerhalb des RE-Modells und mit dem **Q-Test** die Heterogenität der Studienergebnisse getestet (Cochran 1954; J. P. T. Higgins und Thompson 2002; J. Higgins et al. 2023). Sigma² auch als Varianzkomponente bekannt, bezieht sich i.d.R. auf die geschätzte Variabilität zwischen den Studien. Mit Sigma² lässt sich der Grad der Heterogenität zwischen den Ergebnissen verschiedener Studien messen, d.h. es wird angegeben, wie stark sich die Effektstärken zwischen den Studien unterscheiden. Die Quantifizierung der zwischen den Studien bestehenden Variabilität ist besonders bei RE-Modellen von Bedeutung. Da diese Modelle Heterogenität explizit berücksichtigen ebenso wie die Variabilität bei der Schätzung der Gesamteffektgröße und der Konfidenzintervalle. Dies führt zu genaueren und aussagekräftigeren Ergebnissen der Metaanalyse. Der **Q-Test** wurde verwendet, um die Hypothese zu testen, dass alle Studien in der Metaanalyse den gleichen Effekt teilen (Homogenität), gegen die Alternative, dass die Effektgrößen zwischen den Studien variieren (Heterogenität). Der Q-Test misst also, ob die beobachteten Unterschiede zwischen den Studienergebnissen größer sind, als man sie aufgrund des Zufalls allein erwarten würde. Ein signifikantes Ergebnis des Q-Tests deutet darauf hin, dass zwischen den Studien eine signifikante Variabilität besteht. Dies ist ein Hinweis darauf, dass Unterschiede in den Studiencharakteristika (wie Methodik, Population oder weitere Variablen) einen Einfluss auf die Ergebnisse haben könnten. Die Heterogenitätsschätzungen waren daher mit entscheidend, um zu quantifizieren, ob die Ergebnisse über verschiedene Studien hinweg konsistent waren, oder ob es signifikante Unterschiede gab, die möglicherweise weitere Analysen oder Subgruppenuntersuchungen erforderten.

Zudem wurde mittels I^2 -Statistik, das Verhältnis der Heterogenität (d.h. Variabilität zwischen den Untersuchungen) zur Gesamtvariabilität (d.h. Summe der Variabilität zwischen den Untersuchungen und innerhalb der Untersuchungen) dargestellt (Cochran 1954; Higgins und Thompson 2002). Falls die Heterogenität einen beträchtlichen Anteil an der Gesamtvariabilität hatte, wurde angenommen das zusätzliche Umweltvariablen (Moderatoren) wie die Länge des Untersuchungszeitraums, die Tiefe der Probennahme oder der Ort der Studie dazu beitragen konnten, das Modell zu verbessern, indem sie zur weiteren Erklärung der Heterogenität beitrugen. Dies wurde mittels eines Modells mit gemischten Effekten untersucht. Die Auswahl der fixen Effekte beruhte auf einem Likelihood-Verhältnis-Test der Anpassungen mit maximaler Wahrscheinlichkeit misst (Nakagawa und Santos 2012).

2.5.5. Untersuchung von Publikationsbias

Zur Überprüfung des Risikos von Publikationsbias, wurde eine Post-hoc-Bewertung durchgeführt. Ein häufig angewendetes Verfahren ist die **Funnel-Plot-Analyse** (Khan et al. 2004)

(Kapitel 3.1). Ein Funnel Plot, auch als Trichtergrafik oder Trichterdiagramm bekannt, ist eine grafische Darstellung der in die Metaanalyse eingeschlossenen Studien als Punktwolke (Egger et al. 1997). Der individuelle Effekt der Studie wird auf der x-Achse gegen den Wert des Standardfehlers (SE) (Maß für die Studiengröße) auf der y-Achse aufgetragen. Werden sämtliche verfügbare Studien in das Review mit eingeschlossen, sollte die Verteilung der Datenpunkte eine Trichterform abbilden, welcher dann als symmetrischer Trichter bezeichnet wird.

Die Trichterform ist zum einen dadurch bedingt, das größere Studien präzisere Ergebnisse erreichen, welche weniger stark streuen und daher näher am Mittelwert aller Studienergebnisse liegen. Zum anderen durch die Grundannahme, dass Studien mit einem höheren Stichprobenumfang i.d.R. einen niedrigeren SE aufweisen und damit weiter oben im Plot liegen. Während kleinere Studien mit niedrigerem Stichprobenumfang und höherem SE weiter unten dargestellt werden. Angenommen wird für diese, dass sie weniger präzise Ergebnisse hervorbringen und die Effektgrößen daher stärker streuen. Der Grundannahme, dass der SE mit steigender Stichprobengröße sinkt, liegt die Erwartung zugrunde, dass mit steigender Stichprobengröße die Stichprobe mehr Informationen über die Population enthält und daher genauer ist. Dies wird durch das Gesetz der großen Zahlen unterstützt, das besagt, dass sich mit zunehmender Stichprobengröße der Durchschnitt der Stichprobe dem wahren Durchschnitt der Population nähert (Leyer und Wesche 2007; Puhani 2020).

Läge keine Verzerrung vor (idealer Fall), wären die Punkte im Funnel-Plot innerhalb der weißen Fläche symmetrisch verteilt (umgekehrte Trichterform). Ein symmetrischer Trichter stützt die Aussage, das Publikationsbias und andere Biasformen eher unwahrscheinlich sind (Khan et al. 2004). Die Aussagekraft der Funnel-Plot-Analyse steigt demnach mit der Anzahl an Studien und der Varianz der Studiengröße (Khan et al. 2004).

2.5.6. Post-hoc Analysen

Als a priori Hypothese der vorliegenden Arbeit wurde angenommen, dass das Baumalter einen signifikanten Einfluss auf die Bodenfeuchte in Agroforstsystemen hat. Da nach Abschluss der Datenaufnahme sichtbar wurde, dass Publikationen über mehrere Klimazonen hinweg erfasst wurden, wurde **a posteriori** auch ein Einfluss der jeweiligen Klimazone auf die Bodenfeuchte vermutet (Zech et al. 2014; Amelung et al. 2018; Stahr et al. 2020). Weiterhin fiel die hohe Heterogenität von Variablen, wie beispielsweise die der untersuchten Bodentiefe und der Länge des Untersuchungszeitraums, in den Publikationen auf. Dies ließ die Hypothese aufkommen, dass der Einfluss auf die Bodenfeuchte auch durch andere Variablen bedingt sein konnte oder aber die hohe Heterogenität die Analysen verzerren könnte. Die **Daten** wurden daher im

nächsten Schritt auf die Studien beschränkt, welche Informationen zu den Variablen Baumalter, Klima, Länge des Untersuchungszeitraums und untersuchte Bodentiefe aufwiesen. Die Variablen wurden ausgewählt, da bei diesen ein wahrscheinlicher Einfluss auf die Variabilität der Bodenfeuchte vermutet wurde. Zudem waren Informationen zu den Variablen in den meisten Studien gegeben und somit konnten möglichst viele Studien berücksichtigt werden. Mit der Auswahl dieser Variablen wurde für diese Arbeit ein **Fokus für die Analysen** gewählt. Dies bedeutet, dass nicht alle erhobenen Variablen untersucht werden konnten. Zum einen, da viele Variablen in nur wenig Studien verfügbar und dadurch für eine quantitative Metaanalyse nicht geeignet waren; zum anderen, um den Fokus der Arbeit zu erhalten.

2.5.7. Modellauswahl für Post-hoc Analysen

Zur Modellfindung für die Subanalysen der Metaanalyse-Modelle wurde für die genannten Variablen eine rekursive Feature Eliminierung (RFE) in einer ANOVA durchgeführt, mit dem Akaike-Informationskriterium (AIC) als Ausscheidungskriterium. Hiermit sollten Variablen identifiziert werden, welche das Zusammenfassen von Studien in Subgruppen ermöglichten. In der statistischen Analyse wird die **rekursive Feature-Eliminierung** verwendet, um die wichtigsten Variablen in einem Modell zu identifizieren (Choubin et al. 2023). Die **ANOVA** (Analyse der Varianz) ist eine statistische Methode, die verwendet wird, um die Unterschiede zwischen den Gruppenmittelwerten einer Stichprobe zu testen (Rizzuti und De Napoli 2020). Das **AIC** ist eine Maßzahl, die sowohl die Güte der Anpassung eines Modells als auch die Komplexität des Modells berücksichtigt. Es wird damit versucht, das Gleichgewicht zwischen der Anpassungsgüte und der Komplexität eines Modells zu finden, um ein überangepasstes Modell zu vermeiden (Kubara und Kopczewska 2023). Ausgehend von einem initialen Modell, das alle vier Variablen (Baumalter, Klima, Untersuchungszeitraum und untersuchte Bodentiefe) enthielt, wurden schrittweise die Variablen mit dem geringsten Einfluss (höchstem AIC-Wert) entfernt. Dieser Prozess wurde fortgesetzt, bis ein optimiertes Modell gefunden wurde. So konnten aus den eingeschlossenen Variablen die Variable identifiziert werden, welche die Unterschiede zwischen Agroforstsystemen und Kontrollflächen am ehesten erklärte und für die Aufteilung der Daten in Subgruppen am ehesten geeignet war.

Das optimierte Modell prognostizierte Unterschiede in der Bodenfeuchte basierend auf dem Klima. Die Analyse deutete darauf hin, dass das Baumalter keinen zusätzlichen Nutzen für die Vorhersage der Bodenfeuchte bot. Für die **Subanalysen** wurden daher Metaanalyse-Modelle unter Einbeziehung von Baumalter und Klima als Prädiktoren erstellt. So sollte analysiert werden, ob das Baumalter in den jeweiligen Klimazonen einen Einfluss ausübte. Daher wurden Sub-

Analysen für die jeweiligen Klimazonen erstellt, mit jeweils einem spezifischen Metaanalyse-Modell.

3. Ergebnisse

3.1. Ergebnisse der Literatursuche

Die Literatursuche in der Metadatenbank WOS ergab 1866 Einträge. Nach Ausschluss von 8 Duplikaten wurden 1858 wissenschaftliche Arbeiten in die Vorauswahl mit eingeschlossen. 907 Einträge wurden bereits aufgrund des Titels ausgeschlossen. 649 Einträge wurden nach Prüfung des Abstracts ausgeschlossen. Damit wurden insgesamt 1722 Einträge ausgeschlossen. 136 Einträge wurden nach Prüfung des Abstracts auf Eignung, anhand der Volltexte, überprüft. Daraus wurden 57 Literatureinträge für die quantitative Metaanalyse berücksichtigt (**Abb. 4**). Alle ausgeschlossenen Einträge wurden mit Begründung ausgeschlossen (**Anhang 6.1**).

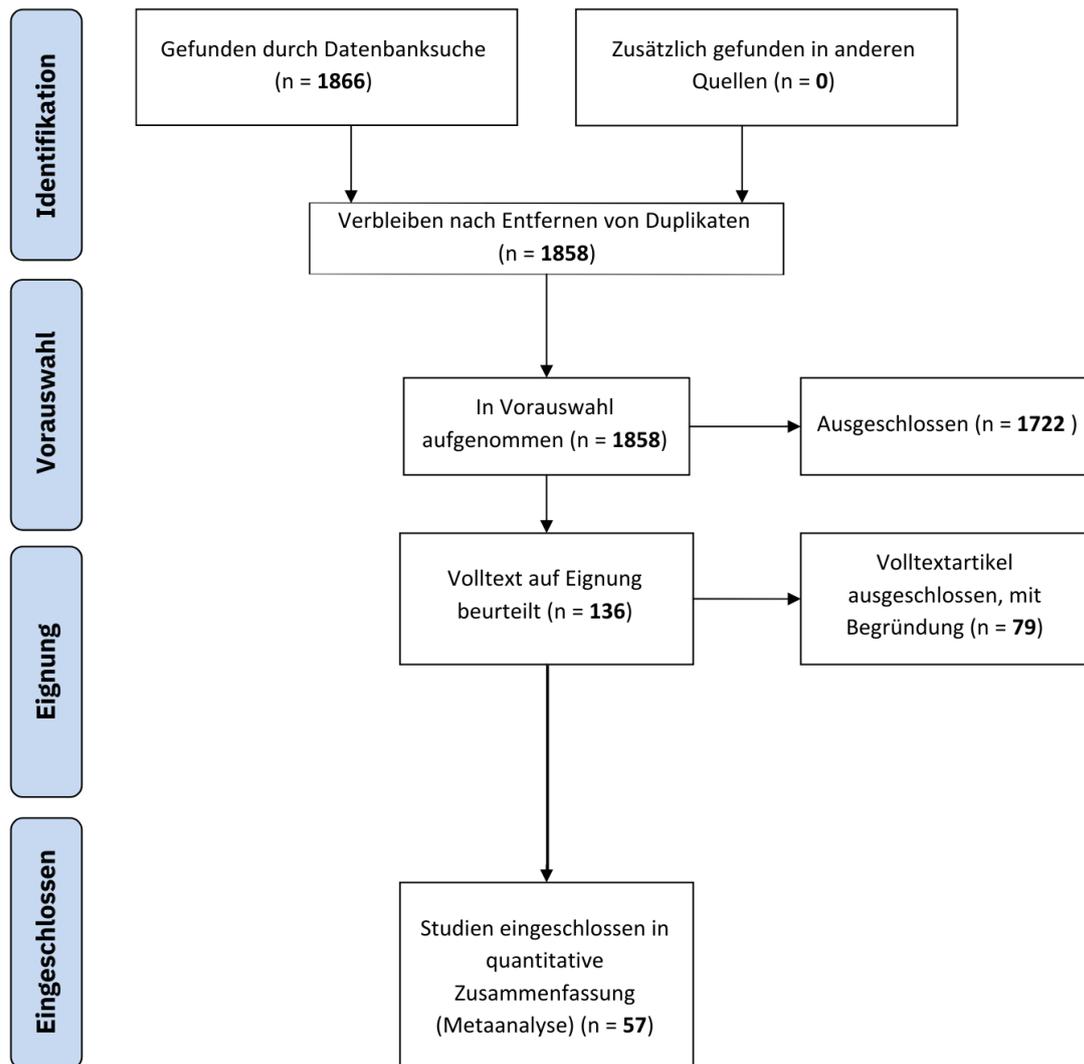


Abb. 4 Prisma Flow Diagramm zur Visualisierung der Studienauswahlprozesse (PRISMA 2009).

Bei den 57 Studien handelte es sich entweder um kontrollierte Feldexperimente oder kontrollierte Beobachtungsstudien. Von 57 eingeschlossenen Studien wiesen 31 nur eine Untersuchungsfläche, 17 Studien zwei Untersuchungsflächen, 7 Studien drei Untersuchungsflächen und 3 Studien vier Untersuchungsflächen auf (**Abb. 5**). Insgesamt wurden 98 kontrollierte Untersuchungsflächen extrahiert.

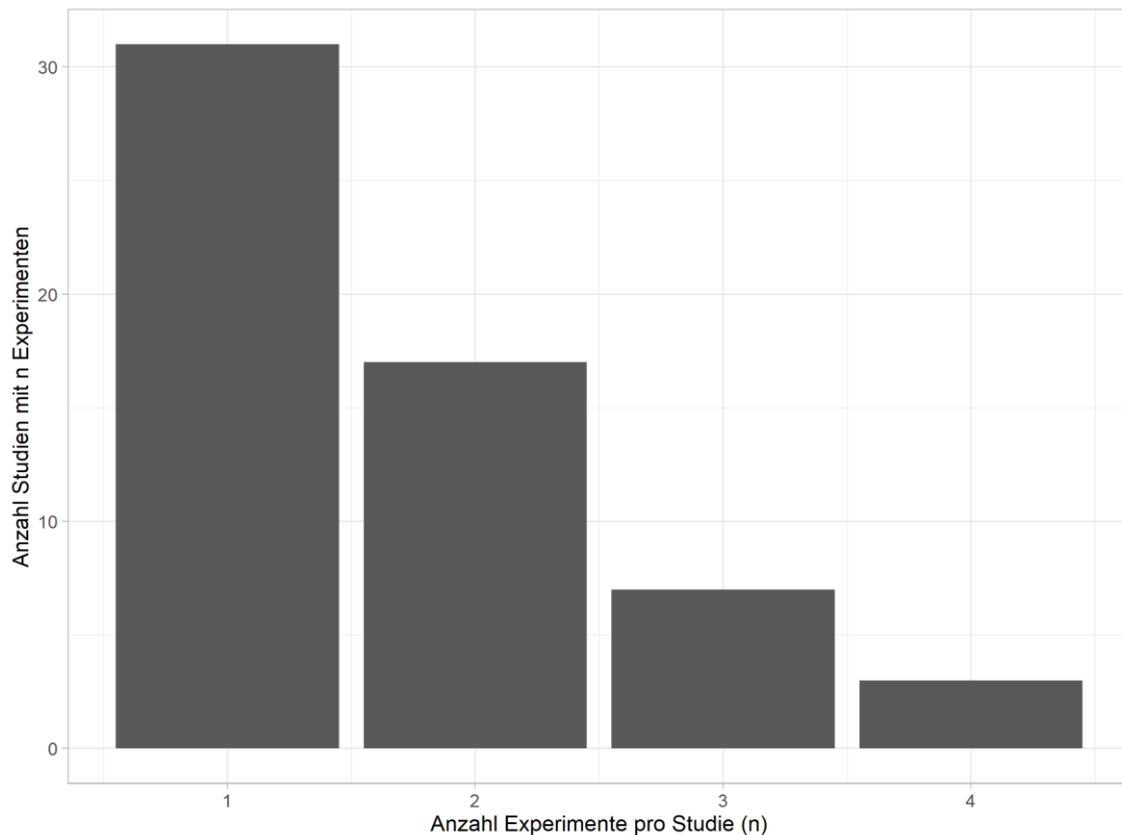


Abb. 5 Verteilung der 57 in der Metaanalyse eingeschlossenen Studien und deren jeweilige Experimentanzahl. Jeder Balken repräsentiert die Anzahl an Studien mit (n) Experimenten.

3.2. Geographische Verteilung der Studienregionen

Die Standorte der eingeschlossenen Studien waren global verteilt und umfassten Daten von 1997 bis 2023. Daten aus 26 Ländern verteilten sich auf die sechs Klimazonen **Arid (Subtropische Trockenzone)** [im weiteren Arid], **Humid (Feucht-gemäßigte Zone)** [im weiteren Humid], **Semihumid (Randtropen)** [im weiteren Semihumid (R)], **Semihumid (Subtropische Winterregenzzone)** [im weiteren Semihumid (SW)], Vollhumid (Innere Tropenzone) [im weiteren Vollhumid] und **Nival (Gebirgsklima)** [im weiteren Nival] (Klimazonen nach Penk (FLOHN) (Schönwiese 2020)), (**Abb. 6**). Der Großteil der Studien stammte aus den Klimazonen Semihumid (R) und Humid mit jeweils 26 und 25 Studien. Für die Zonen Arid und Semihumid (SW) wurden jeweils 17 Studien eingeschlossen. Die wenigsten Studien fanden sich aus der Vollhumiden und Nivalen Zone mit einer Studienanzahl von jeweils 12 und 1 (**Tab.: 3**).

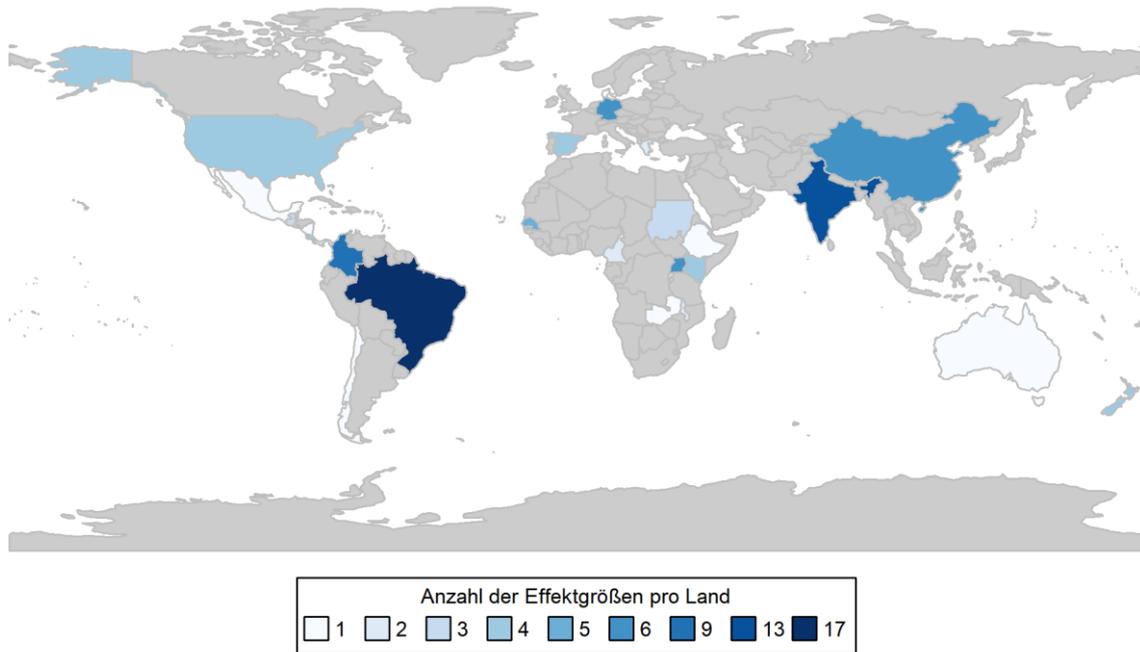


Abb. 6 Geographische Verteilung der in der Metaanalyse berücksichtigten Studien. Globale Karte mit Anzahl der Effektgrößen (Untersuchungsflächen) pro Land.

Für einige Länder waren Studien aus mehreren Klimazonen innerhalb eines Landes zu finden. So erstreckten sich die 17 Studien aus Brasilien über die Aride, Humide und Semihumide (R) Klimazone. Ebenso waren die 10 Studienergebnisse aus Indien über die fünf Klimazonen Arid, Humid, Nival, Semihumid (R) sowie Semihumid (SW) verteilt. Studien aus Kolumbien (8), Costa Rica (4), Kenia (4) und Neuseeland stammten aus jeweils zwei Klimazonen. Die Studien der übrigen Länder stammten aus nur einer Klimazone (**Tab.: 3**).

Tab.: 3 Geographische Verteilung der in der Metaanalyse berücksichtigten Untersuchungsflächen (Effektgrößen) nach Klimazonen und Ländern sowie die Anzahl der Studien die aus jeder Klimazone berücksichtigt wurden. Klimaklassifikation nach PENK (FLOHN) (Schönwiese 2020).

Klimazonen (PENK (FLOHN))	Land	Effektgröße
Arid		
(Subtropische Trockenzone)	Australia	1
	Ethiopia	1
	Senegal	2
	Sudan	3
	India	3
	Kenya	3
	Brazil	4
	Σ Untersuchungsflächen	Σ 17
	Σ Studien	Σ 9
	Humid	
(Feucht-gemäßigte Zone)	Chile	1
	Denmark	1

	New Zealand	2
	USA	4
	India	4
	Germany	6
	Brazil	7
	Σ Untersuchungsflächen	Σ 25
	Σ Studien	Σ 14
Semihumid (Randtropen)	Nicaragua	1
	Zambia	1
	India	1
	Costa Rica	1
	Malawi	2
	Columbia	2
	Panama	2
	Rwanda	2
	Guatemala	3
	Uganda	6
	Brazil	5
	Σ Untersuchungsflächen	Σ 26
	Σ Studien	Σ 15
Semihumid (Subtropische Winterregenzone)	Mexico	1
	India	1
	Brazil	1
	Greece	2
	New Zealand	2
	Spain	4
	China	6
	Σ Untersuchungsflächen	Σ 17
	Σ Studien	Σ 11
Vollhumid (Innere Tropenzone)	Kenya	1
	Cameroon	2
	Costa Rica	3
	Colombia	6
	Σ Untersuchungsflächen	Σ 12
	Σ Studien	Σ 7
Nival (Gebirgsklima)	India	1
	Σ Untersuchungsflächen	Σ 1
	Σ Studien	Σ 1

3.3.Deskriptive statistische Analyse

In diesem Kapitel wurden mittels deskriptiver Statistik, zentralen Tendenzen, die Verteilung und die Streuung, der in der Metaanalyse erfassten Variablen, untersucht und visuell dargestellt. Die

sorgfältige Aufbereitung und visuelle Präsentation der Daten mittels Boxplots, Histogrammen und Streudiagrammen sollten ein Verständnis für die Charakteristika und Muster innerhalb der zusammengetragenen Ergebnisse ermöglichen.

Boxplots boten dabei eine kompakte Übersicht über die Verteilungen der Variablen, indem sie nicht nur Median und Quartile, sondern auch potenzielle Ausreißer aufzeigten. Histogramme ermöglichten eine Einsicht in die Form der Verteilungen, offenbarten Tendenzen zur Normalverteilung oder Abweichungen davon und erleichtern das Erkennen von Häufungen innerhalb der Daten. Streudiagramme dienten der Visualisierung von Beziehungen zwischen zwei Variablen und gaben Aufschluss darüber, ob und in welcher Form Zusammenhänge bestanden. Die Anwendung dieser deskriptiven, statistischen Methoden ermöglichte es, die Grundlage für die darauffolgenden Analyseschritte zu schaffen.

3.3.1. Untersuchungs- und Kontrollflächen

98 kontrollierte Feldexperimente aus 57 Studien beinhalteten die sechs **Agroforstsystemklassen** Alley Cropping, Forest Farming, Forest Pasture (Dehesa), Orchard Meadow, Shaded Perennial und Silvopasture. Diese Verteilung zeigte in den sechs Klimazonen jeweils Unterschiede in der Präsenz als auch in der Frequenz. Der Agroforsttyp **Alley Cropping** war mit 39 Feldexperimenten am häufigsten. Er war in absteigender Häufigkeit, in den Klimazonen Arid, Semihumid (R) und Humid vertreten. Der zweithäufigste Agroforsttyp **Shaded Perennial** war mit 25 Feldexperimenten in absteigender Häufigkeit in den Klimazonen Semihumid (R), Vollhumid und Humid vorhanden. Der Agroforsttyp **Forest Pasture (Dehesa)** war mit 18 Feldexperimenten, in absteigender Häufigkeit, in den Klimazonen Semihumid (SW), Humid und gleichhäufig in den Zonen Arid und Semihumid (R) zu finden. Der Agroforsttyp **Silvopasture** war mit einer Frequenz von 11 am häufigsten in der Klimazone Humid und gleichhäufig in der Ariden und der Semihumiden (R) Zone zu finden. Der Agroforsttyp **Forest Farming** war mit einem Häufigkeitsgrad von 3 jeweils einmal in den Klimazonen Arid, Humid und Semihumid (SW) zu finden. Der Agroforsttyp **Orchard Meadow** war mit einer Frequenz von 2 ausschließlich in der Semihumiden (SW) Klimazone zu finden (**Abb. 7**).

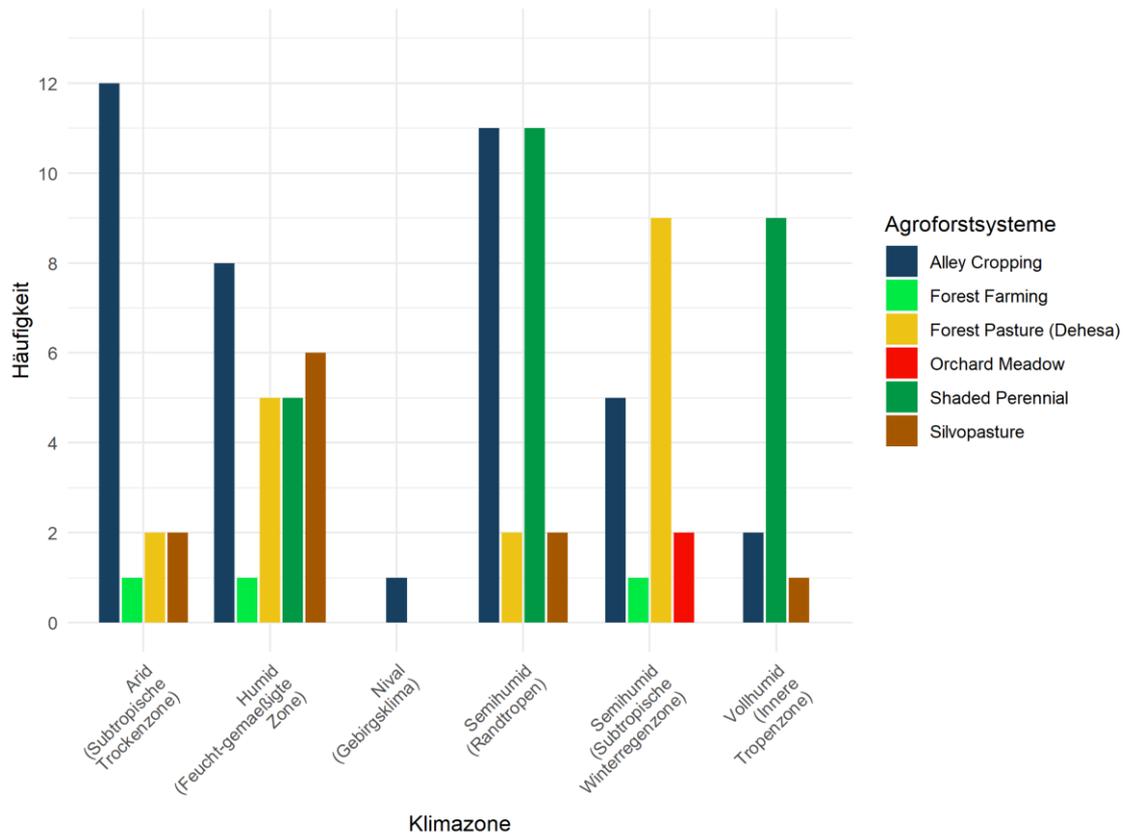


Abb. 7 Häufigkeit der Agroforstsysteme je Klimazone.

Die Kontrollflächen der 98 Feldexperimente waren mit fünf verschiedenen Landnutzungstypen *Agriculture* (Ackerbau), *Bare ground* (Blanker Boden), *Grassland* (Grünland), *Natural Fallow* (natürliche Brache) und *Pasture* (Weide) voneinander verschieden. Die Kontrollflächentypen waren sowohl in Präsenz als auch in Frequenz in den sechs Klimazonen unterschiedlich verteilt. Der Kontrollflächentyp **Agriculture** war mit einer Anzahl von 53 der häufigste und in allen Klimazonen in variabler Frequenz präsent. Der Kontrollflächentyp **Pasture** war mit einer Anzahl von 32 der zweithäufigste und nur in der nivalen Zone nicht vertreten. Der Kontrollflächentyp **Grassland** wurde mit einer niedrigen Präsenz und Frequenz ausschließlich in den Klimazonen Humid und Semihumid (SW) gefunden. Ebenso wies der Kontrollflächentyp **Natural Fallow** ausschließlich in der Humiden Zone eine Häufigkeit von 4 auf. Der Kontrollflächentyp **Bare ground** kam mit einer Häufigkeit von 2 ausschließlich in der Semihumiden (SW) Zone vor (**Abb. 8**).

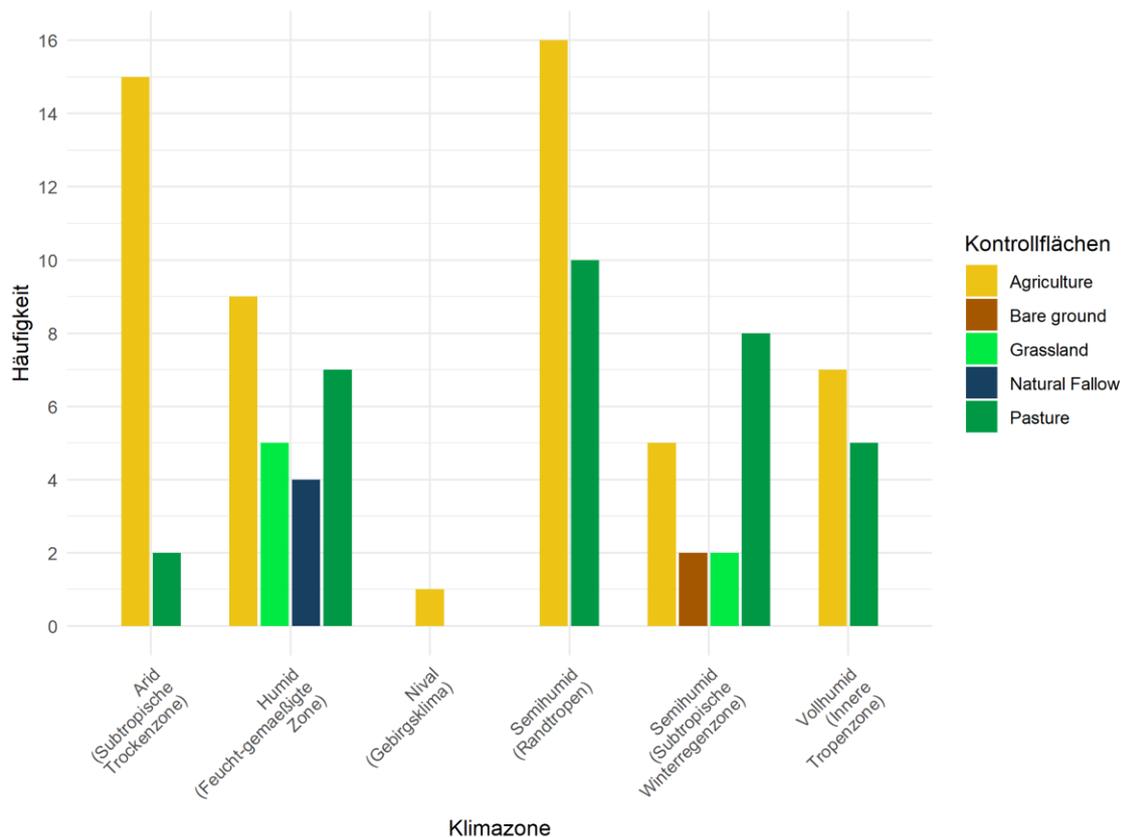


Abb. 8 Häufigkeit der konventionellen Landnutzungssysteme der Kontrollflächen je Klimazone.

Nachfolgend werden die Klima-, Baum-, und Boden-Variablen vorgestellt, welche aus den Studien extrahiert wurden und für die Beantwortung der Hypothesen relevant waren. Die Variablen wurden als Boxplots visualisiert, Mittelwerte wurden als Median angegeben.

3.3.2. Klimavariablen

Aus dem gesamten Datensatz waren für 92 der 98 Untersuchungsflächen Werte für den mittleren **Jahresniederschlag** in Millimetern angegeben (**Abb. 9**). Die subtropische Trockenzone (**Arid**) wies die geringsten Niederschlagsmengen auf, mit einem Median von 734 mm, welche sich am oberen Ende der Interquartilspanne (IQR) befand und wies die geringste Streuung aller erfassten Klimazonen auf. Dies deutete auf eine geringe Variabilität in den Niederschlagsmustern innerhalb dieser Zone hin. Im Gegensatz dazu zeigte die feucht-gemäßigte Zone (**Humid**) einen höheren Median des Jahresniederschlags (1282 mm) mit einer breiteren interquartilen Spanne auf, was auf eine höhere Variabilität innerhalb dieser Zone hindeutete. Die Whisker erstreckten sich weiter, was auf einige Regionen mit höheren Niederschlagsmengen hinwies. Das Gebirgsklima (**Nival**) war durch einen einzelnen Datenpunkt repräsentiert (190 mm), da für diese Zone nur eine Messung vorlag. Daher waren keine Schlussfolgerungen über die Variabilität innerhalb dieser Zone möglich. Die Randtropen (**Semihumid**) zeigten eine schmale IQR mit einem Median

von 1408 mm, was auf eine vergleichsweise geringe Variabilität in den Niederschlagsmengen innerhalb dieser Zone hinwies. Im Vergleich zu der Ariden Zone wies sie jedoch eine weitere Spanne der Niederschlagsmengen sowie einen Ausreißer auf. Die subtropische Winterregenzone (**Semihumid**) zeigte ähnlich breite Streuung wie die Randtropen eine, wies jedoch den geringsten Median (631 mm) der untersuchten Klimazonen auf. Die Spanne zeigte, dass Datenpunkte enthalten waren, welche deutlich mehr Niederschlag aufwiesen. Schließlich zeigte die innere Tropenzone (**Vollhumid**) die weiteste IQR, wobei der Median (3500 mm) im oberen Drittel der IQR lag. Die Vollhumide Zone war die Klimazone mit der höchsten durchschnittliche Niederschlagsmenge und der höchsten Heterogenität der Daten.

Zusammenfassend zeigten die dargestellten Boxplots eine deutliche Variabilität der Niederschlagsmengen zwischen den verschiedenen Klimazonen. Die Variabilität innerhalb der Zonen variierte ebenfalls beträchtlich mit den trockensten Bedingungen in der subtropischen Trockenzone und durchweg hohen Niederschlagsmengen in der inneren Tropenzone.

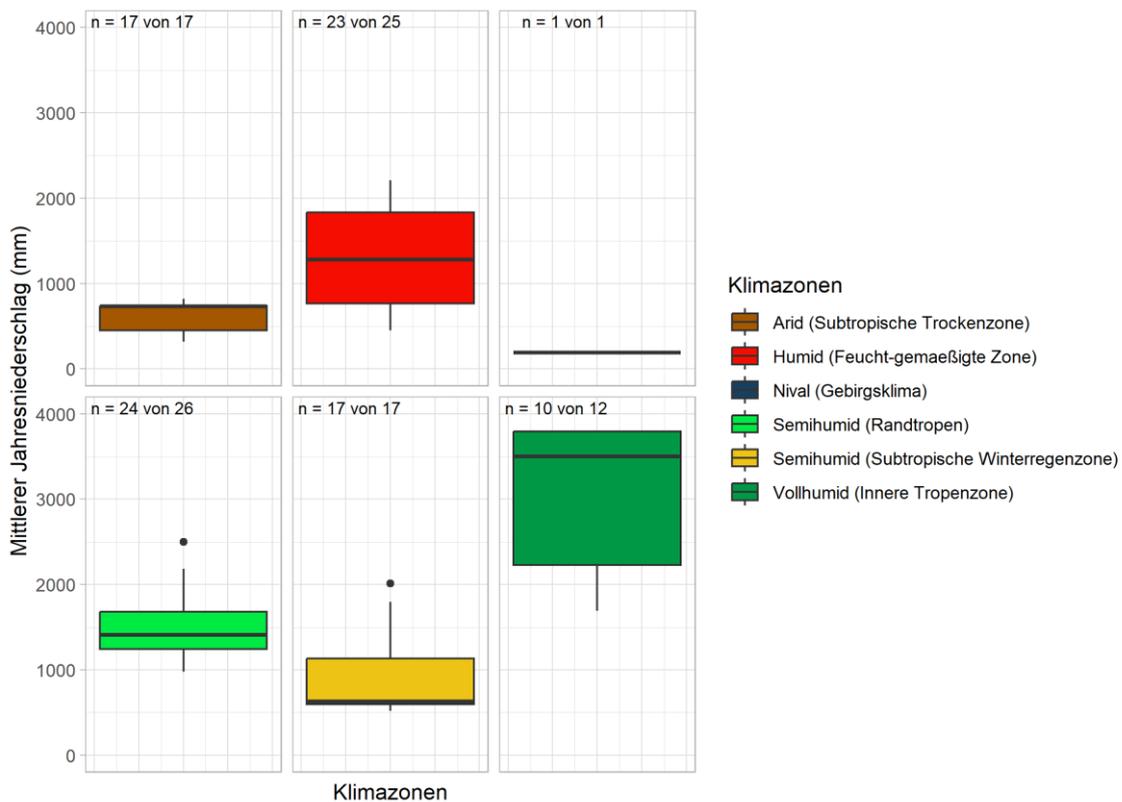


Abb. 9 Verteilung des mittleren **Jahresniederschlags (mm)** in den erfassten Klimazonen als Boxplot. n = Anzahl der Untersuchungen, in denen die Variable angegeben war, im Vergleich zu allen Untersuchungen in dieser Klimazone.

Aus dem gesamten Datensatz waren für 92 der 98 Untersuchungsflächen Werte für die mittlere **Jahrestemperatur** angegeben (**Abb. 10**).

Die Subtropische Trockenzone (**Arid**) zeigte mit einem Median von 27 °C die höchsten mittleren Jahrestemperaturen mit einer schmalen IQR an, was auf ein heißes und relativ gleichmäßiges Klima in dieser Zone hindeutet. Es waren keine Ausreißer vorhanden. Jedoch enthielten nur vier der 17 Studien für die aride Zone Angaben zur mittleren Jahrestemperatur. Dies schränkte die Aussagekraft der Daten ein, gab aber einen Hinweis auf die Tendenzen in der Klimazone. Die feucht-gemäßigte Zone (**Humid**) wies die weiteste IQR aller Klimazonen auf, was auf eine größere Variabilität der Jahrestemperaturen hinwies. Der Median lag mit 18 °C am oberen Ende der IQR. Die Whisker deuteten auf eine weitreichende Temperaturverteilung hin. Das Gebirgsklima (**Nival**) war lediglich durch einen einzelnen Datenpunkt repräsentiert (-4,25 °C), was auf die sehr begrenzte Datengrundlage dieser Zone hinwies und daher keine Schlussfolgerungen über die Temperaturvariabilität erlaubte. Die Boxplots für die **Randtropen (Semihumid)** und die **Subtropische Winterregenzone (Semihumid)** zeigten eine moderate interquartile Spanne und Medianwerte von 23,1 °C und respektive 15,6 °C. Beide Klimazonen wiesen jeweils einen Ausreißer auf, was auf einzelne Standorte mit ungewöhnlichen Temperaturbedingungen hinwies. Die Innere Tropenzone (**Vollhumid**) zeigt eine enge interquartile Spanne und einen niedrigen Median welcher mit 25,5 °C das obere Ende der IQR darstellte. Dies sprach für konstante und gemäßigte Temperaturbedingungen in dieser Zone.

Zusammenfassend verdeutlichen die Boxplots eine klare Differenzierung der mittleren Jahrestemperaturen zwischen den verschiedenen Klimazonen. Die Dateninterpretation war aber aufgrund der weiten Spannweite der verfügbaren Datenpunkte in jeder Klimazone mit Unsicherheiten verbunden. Die subtropische Trockenzone wies die höchsten Temperaturen auf, während die subtropische Winterregenzone (Semihumid) die niedrigsten Durchschnittstemperaturen zeigte.

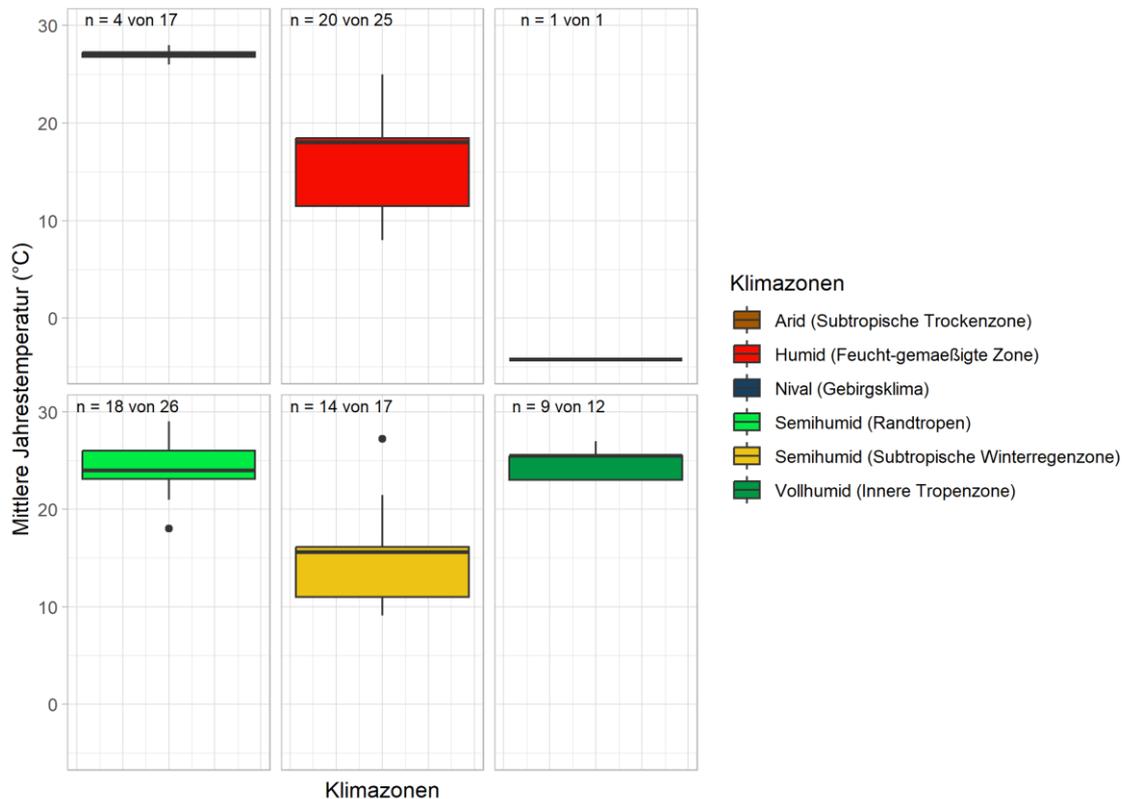


Abb. 10 Verteilung der mittleren **Jahrestemperatur (°C)** in den erfassten Klimazonen als Boxplot. n = Anzahl der Untersuchungen, für die die Variable angegeben war, im Vergleich zu allen Untersuchungen in dieser Klimazone.

3.3.3. Baumvariablen

Aus dem gesamten Datensatz war für 70 der 98 Untersuchungsflächen das **Baumalter** angegeben (**Abb. 11**). In der subtropischen Trockenzone (**Arid**) zeigte sich unter allen Klimazonen die zweithöchste Variabilität sowie das zweithöchste mittlere Baumalter aller Klimazonen (9 Jahre). Für 14 der 17 Untersuchungsflächen waren Daten zum Baumalter verfügbar. Die feucht-gemäßigte Zone (**Humid**) zeigte die höchste Variabilität und das höchste mittlere Baumalter (13,5 Jahre). Die Zahl der eingeschlossenen Untersuchungsflächen in dieser Zone war mit 25 aus 25 Studien die höchste unter den untersuchten Klimazonen. Die Randtropen (**Semihumid**) zeigten eine geringe Variabilität und ein mittleres Baumalter von 4,25 Jahren. Für 18 der 26 Untersuchungsflächen lagen Daten vor. Drei der Untersuchungsflächen zeigten mit 22, 30 und 35 Jahren deutliche Abweichungen vom mittleren Baumalter in dieser Klimazone. Die subtropische Winterregenzone (**Semihumid**) zeigte die geringste Variabilität und das zweitniedrigste mittlere Baumalter (4 Jahre) sowie eine Untersuchungsfläche als Ausreißer (9 Jahre). Die innere Tropenzone (**Vollhumid**) zeigte die geringste Variabilität und das geringste Baumalter (3 Jahre). Die Anzahl der Untersuchungsflächen mit Angaben zum Baumalter war mit 4 von 12 ebenfalls die

geringste, was die Aussagekraft der Ergebnisse für diese Zone einschränkte. Für die Klimazone des Gebirgsklimas (**Nival**) lag nur eine Untersuchungsfläche aus einer Studie vor und für diese war das Baumalter nicht angegeben. Zwei einzelne Ausreißer des Datensatzes waren in der ariden Zone (50 Jahre) und in der humiden Zone (80 Jahre) zu finden.

Insgesamt deuten die Boxplots auf deutliche Variation im Baumalter zwischen den verschiedenen Klimazonen hin. Das mittlere Baumalter über alle Klimazonen hinweg (Gesamtdatensatz) lag mit 7 Jahren (*Median*) relativ niedrig. 64 % aller Untersuchungsflächen wiesen ein Baumalter von unter 10 Jahren auf, 82 % von unter 20 Jahren und 94 % von unter 30 Jahren. Nur 12 von 98 Untersuchungsflächen wiesen ein Alter ≥ 20 Jahre auf. Davon lagen 8 in der Zone **Humid**. Die vier Untersuchungsflächen mit einem Baumalter von mehr als 30 Jahren, waren gleichzeitig die mit dem höchsten Alter im Datensatz (30, 35, 50, 80) und machten nur 6 % der Untersuchungsflächen aus.

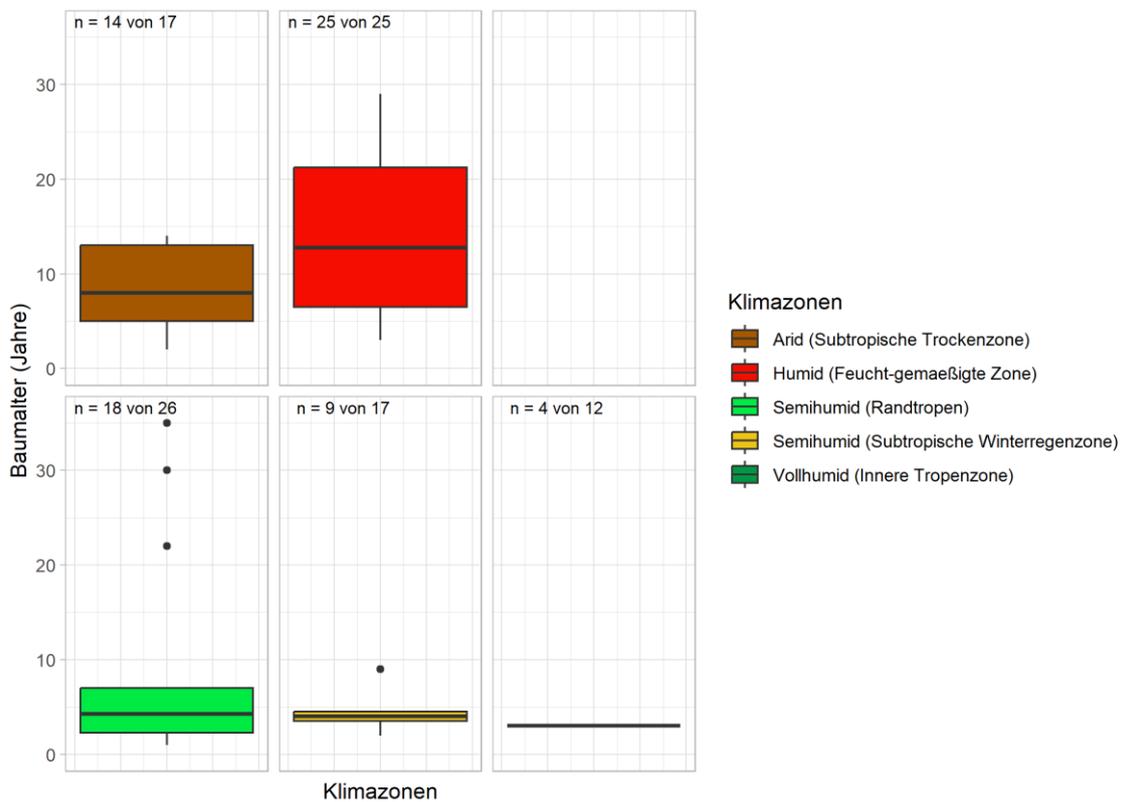


Abb. 11 Verteilung des **Baumalters** in den erfassten Klimazonen als Boxplot. n = Anzahl der Untersuchungen, für die diese Variable angegeben war, im Vergleich zu allen Untersuchungen in dieser Klimazone. Weitere Datenpunkte als Ausreißer (n/ha), welche aufgrund einer gleichmäßigen Skalierung für alle Klimazonen in der Abbildung nicht visualisiert wurden **Arid**: 50; **Humid**: 80.

Aus dem gesamten Datensatz waren nur für 26 der 98 Untersuchungsflächen Werte für den **Brusthöhendurchmesser (BHD)** angegeben (Anhang, **Abb. 33**). In der subtropischen

Trockenzone (**Arid**) waren nur für drei der 17 Untersuchungsflächen BHD-Werte verfügbar (Median = 12 cm). In der feucht-gemäßigten Zone (**Humid**) waren ebenfalls nur für 7 der 25 Untersuchungsflächen Daten für die BHD-Werte verfügbar (Median = 26,8 cm). Für die Klimazone Gebirgsklima (**Nival**) waren aus der einen eingeschlossenen Studie keine Daten zum BHD angegeben. Für die Randtropen (**Semihumid**) ergab sich aus 8 von 26 Untersuchungsflächen ein Median von 24,55 cm. Für die subtropische Winterregenzone (**Semihumid**) ergab der Median aus 6 von 17 Untersuchungsflächen einen BHD von 32,75 cm. In der inneren Tropenzone (**Vollhumid**) waren mit nur zwei von zwölf Untersuchungsflächen die wenigsten Datenpunkte vorhanden (Median = 10,6).

Für die Variable **Baumhöhe** waren aus dem gesamten Datensatz nur für 31 der 98 Untersuchungsflächen Werte vorhanden (Anhang, **Abb. 35**). Für die Variable **Baumdicke** waren für 54 von 98 Untersuchungsflächen Daten vorhanden (Anhang, **Abb. 34**). Die Datenpunkte dieser Variablen waren heterogen über die Klimazonen verteilt. Aus diesen Gründen wurden diese Variablen in den weiteren Analysen nicht weiter berücksichtigt.

3.3.4. Bodenvariablen

Die Bodentiefe, in welcher die Bodenfeuchte auf den Untersuchungs- und Kontrollflächen erfasst wurde, zeigte über die Klimazonen hinweg eine hohe Variabilität. Die subtropischen Trockenzone (**Arid**) wies die höchste mittlere Bodentiefe aller Klimazonen auf (90 cm) mit einer relativen, mittleren Variabilität der erfassten Tiefen. Die feucht-gemäßigte Zone (**Humid**) zeigte eine vergleichbare Variabilität wie die aride Zone, wies jedoch eine deutlich niedrigere, mittlere Erfassungstiefe auf (35 cm). Im Gegensatz dazu war die Datenlage für das Gebirgsklima (**Nival**) mit nur einer berücksichtigten Studie begrenzt, was eine Interpretation der Variabilität in dieser Zone nicht zuließ. Die **Randtropen (Semihumid)** und die **subtropische Winterregenzone (Semihumid)** zeigten ähnliche mittlere Erfassungstiefen von respektive 90 cm und 100 cm. Die subtropische Winterregenzone (Semihumid) zeigte jedoch eine doppelt so hohe Variabilität wie die Zone Randtropen (Semihumid) und zeigte von allen Klimazonen die höchste Variabilität. Die innere Tropenzone (**Vollhumid**) zeigte neben der geringsten mittleren erfassten Bodentiefe (25 cm) auch die geringste Variabilität aller Klimazonen.

Insgesamt zeigen die Auswertungen eine hohe Variabilität der erfassten Bodentiefen. Im Mittel lag diese über alle Klimazonen hinweg bei 40 cm (*Median*). 11 % aller Untersuchungsflächen wiesen Erfassungen nur bis in eine Bodentiefe von 5 cm auf, 20 % bis in eine Tiefe von 15 cm, 37 % bis in eine Tiefe von 25 cm und 50 % bis in eine Tiefe von 40 cm. 50 % der Daten (Erfassungstiefe > 50 cm) wiesen eine mittlere Erfassungstiefe von 100 cm (Median) auf. Dier vier

Untersuchungsflächen mit den höchsten Erfassungstiefen zeigten Werte von 200, 400, 500 und 600 cm.

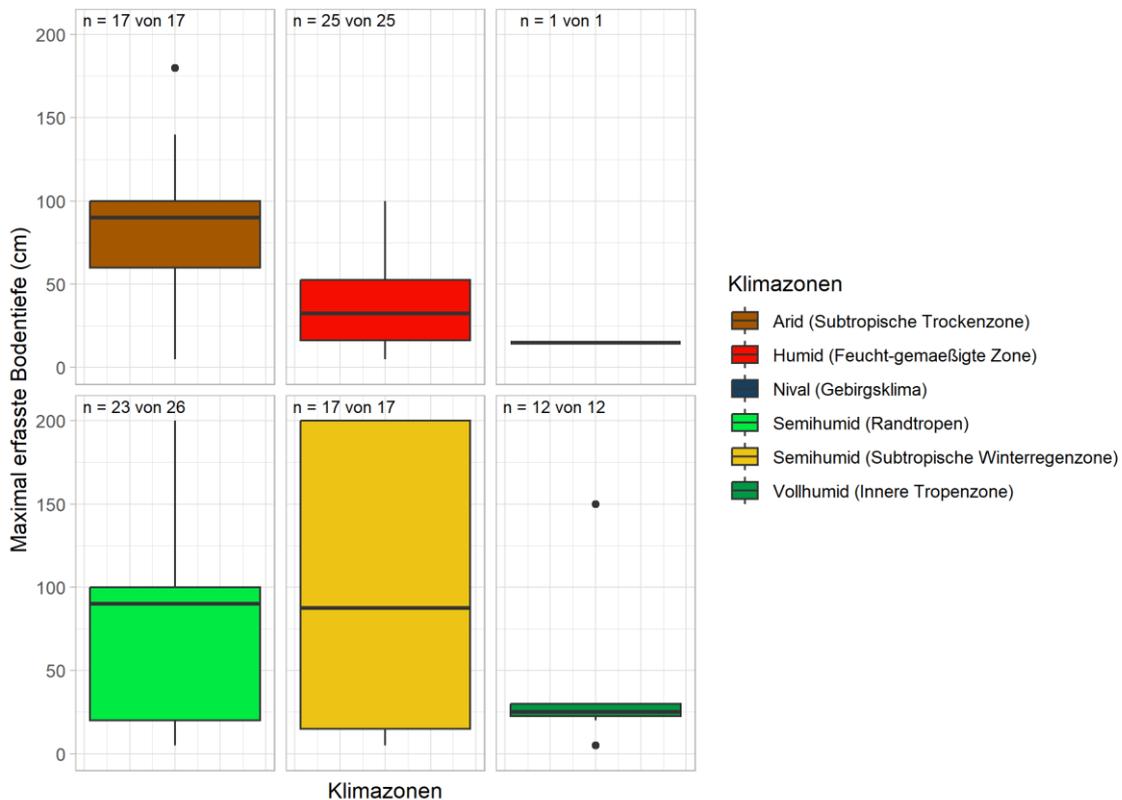


Abb. 12 Verteilung der maximal erfassten Bodentiefe (cm) in den erfassten Klimazonen als Boxplot. n = Anzahl der Untersuchungen, für die diese Variable angegeben war, im Vergleich zu allen Untersuchungen in dieser Klimazone. Weitere Datenpunkte als Ausreißer (n/ha), welche aufgrund einer gleichmäßigen Skalierung für alle Klimazonen in der Abbildung nicht visualisiert wurden **Humid**: 500 cm; **Semihumid**: 600 cm; **Vollhumid**: 400 cm.

Die nachfolgenden **Bodenparameter** wurden ebenfalls mit in den Studien erfasst. Diese Parameter konnten vor dem Hintergrund einer zielgerichteten Fokussierung auf die Studienfrage und aufgrund der geringen Anzahl an Datenpunkten, welche sich heterogen über die Klimazonen verteilen, nicht tiefergehend analysiert werden. Sie wurden aber deskriptiv als Boxplots visualisiert, um einen Überblick über die Tendenzen in den jeweiligen Klimazonen zu ermöglichen. Hinter den nachfolgenden Variablen ist in Klammern angegeben, für wie viele Untersuchungsflächen aus dem Gesamtdatensatz Daten zu der jeweiligen Variable vorlagen. **Bodenlagerungsdichte** (53 von 98) (Anhang, Abb. 36), **Boden-pH** (48 von 98) (Anhang, Abb. 37), **Tongehalt** (44 von 98) (Anhang, Abb. 38), **Schluffgehalt** (40 von 98) (Anhang, Abb. 39), **Sandgehalt** (42 von 98) (Anhang, Abb. 40).

3.3.5. Untersuchungszeitraum

Die subtropische Trockenzone (**Arid**) zeigte eine relativ geringe Variabilität der Gesamtbeobachtungsdauer (Monate) und lag im Mittel bei 8 Monaten. Die feucht-gemäßigte Zone (**Humid**) wies eine leicht höhere Variabilität auf, lag im Mittel jedoch nur bei 5 Monaten. Das Gebirgsklima (**Nival**) war nur durch eine einzige Studie repräsentiert; dies ließ keine Aussage über die Variabilität zu. Die Beobachtungsdauer in den **Randtropen (Semihumid)** war im Mittel 12 Monate lang. In der **subtropischen Winterregenzone (Semihumid)** lag diese im Mittel bei 18 Monaten. Beide Semihumiden Klimazonen zeigten eine heterogene Gesamtbeobachtungsdauer. Die innere Tropenzone (**Vollhumid**) zeigte eine Beobachtungsdauer von 12 Monaten mit einer höheren Variabilität in Richtung kürzerer Beobachtungszeiten.

Die Gesamtbeobachtungsdauer über alle Klimazonen lag im Mittel bei 10 Monaten (*Median*). 27 % der Untersuchungsflächen wurden nur bis zu zwei Monate beobachtet und 39 % bis zu sechs Monate. Damit wurden nur 51 % der Untersuchungsflächen länger als sechs Monate beobachtet. 46 % aller Untersuchungsflächen wurden jedoch mindestens 12 Monate oder länger beobachtet (Maximum 46 Monate).

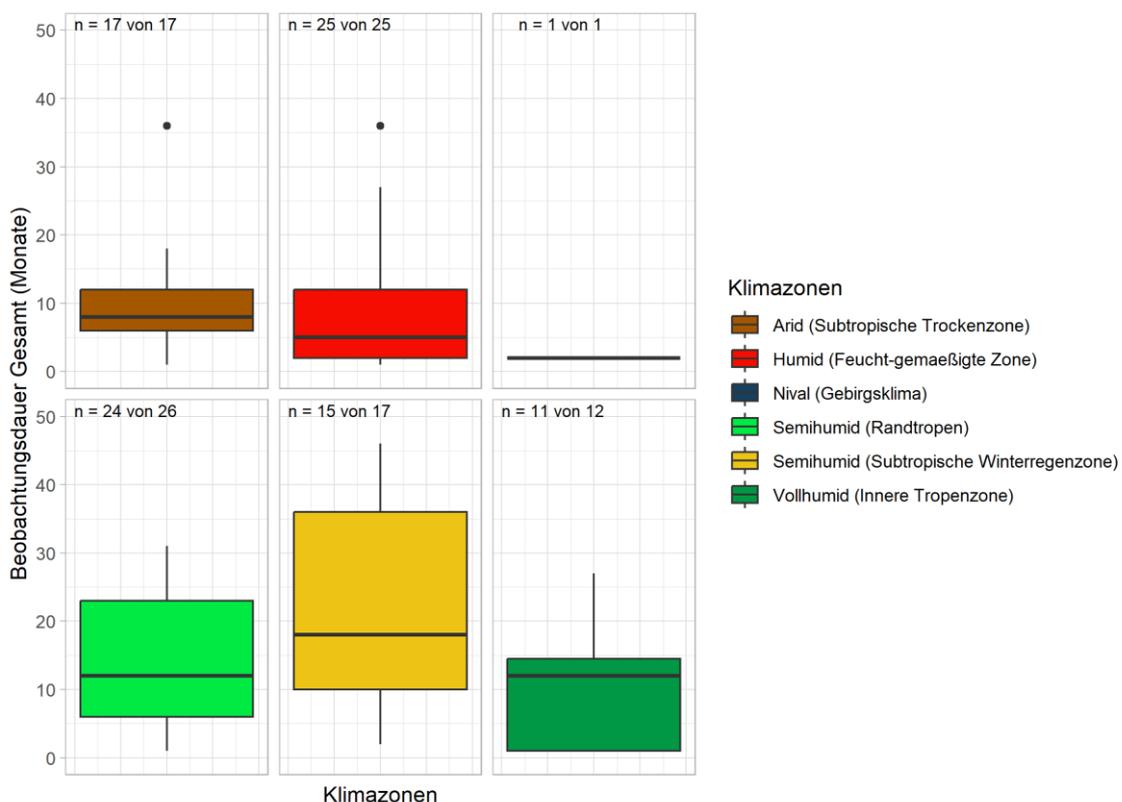


Abb. 13 Verteilung des Dauer der Untersuchungszeiträume (Monate) in den erfassten Klimazonen als Boxplot. n = Anzahl der Untersuchungen, für die diese Variable angegeben war, im Vergleich zu allen Untersuchungen in dieser Klimazone.

3.3.6. Verteilung und Spannweite der Daten

Aus den 57 Studien wurden 98 kontrollierte Feldexperimente extrahiert. Die Analyse der erhobenen Daten zeigte für den volumetrischen Bodenwassergehalt (%) aller Untersuchungsflächen eine Spannweite von 59,17 % auf. Wobei der kleinste Wert bei 2,83 % und der größte Wert bei 62 % lag. Auf den Kontrollflächen betrug die Spannweite 45,30 %, wobei der kleinste Wert bei 4,70 % lag und der größte bei 50,00 %. Die Differenz des volumetrischen Bodenwassergehaltes (%) zwischen der trockensten Untersuchungsfläche und der dazugehörigen Kontrollfläche betrug damit 1,87 %, während sie zwischen der feuchtesten Untersuchungsfläche und deren Kontrollfläche 12,00 % betrug. Diese Spannweiten verdeutlichen die Variabilität innerhalb des untersuchten Datensatzes und zeigten die Streubreite der Werte (**Abb. 14**).

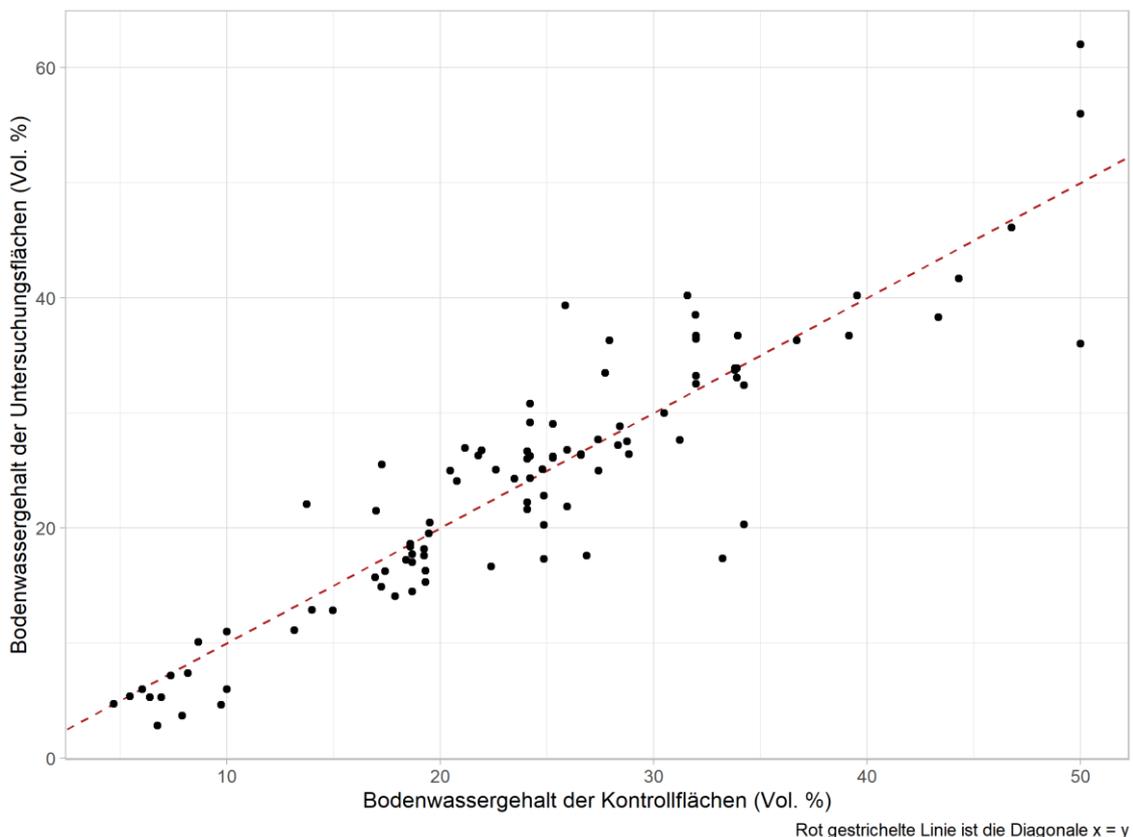


Abb. 14 Visualisierung der Spannweite der 98 Datenpunkte. Einheit sind die absoluten Werte des volumetrischen Bodenwassergehaltes (%). Ein Datenpunkt visualisiert jeweils den volumetrischen Bodenwassergehalt der Kontrollfläche (X-Achse) und der dazugehörigen Untersuchungsfläche Agroforst (Y-Achse).

Die Mittelwerts-Differenzen des volumetrischen Bodenwassergehaltes (%) für die jeweiligen Untersuchungsflächen und Kontrollflächen ergaben eine linksschiefe Verteilung für den Gesamtdatensatz (**Abb. 15**). Für die weiteren analytischen Schritte der quantitativen Metaanalyse war die Mittelwerts-Differenz als Effektgröße, aufgrund der Abweichung von der Normalverteilung sowie der großen Spannweite der Daten, nicht geeignet.

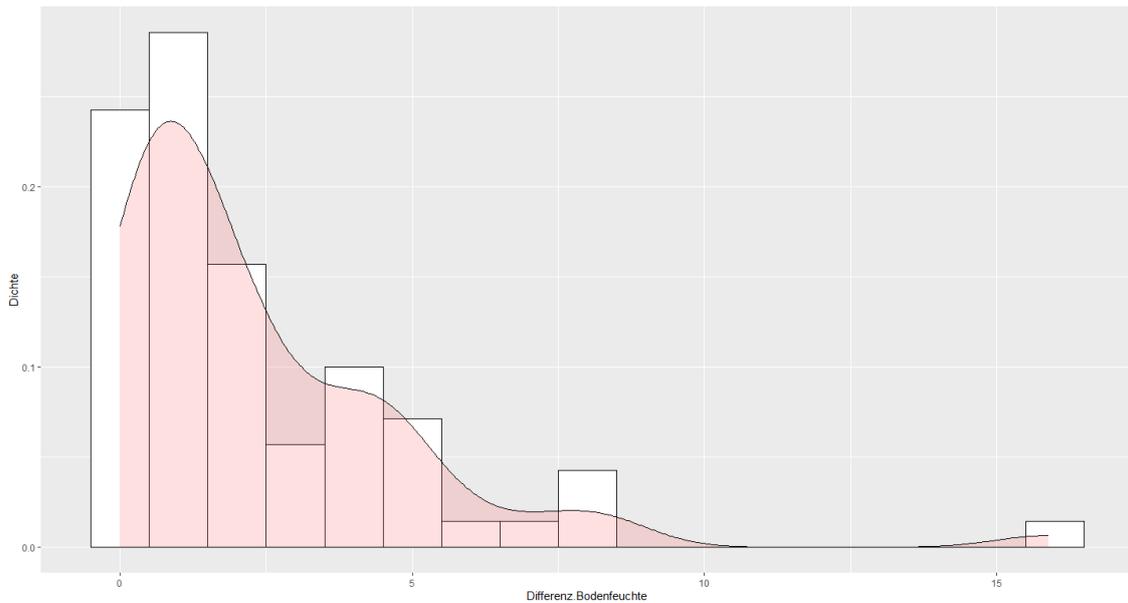


Abb. 15 Häufigkeitsverteilung der Mittelwerts-Differenz der volumetrischen Bodenfeuchte.

Um eine einheitliche Messung der Ergebnisse über alle Studien hinweg zu ermöglichen und die absoluten Datenunterschiede zu relativieren, wurde als Effektgröße das Response Ratio (RR) berechnet und logarithmiert ($\ln RR$) (Abb. 16). So konnte die hohe Variabilität der Daten berücksichtigt werden und ein besserer Einblick in die relativen Unterschiede der Daten gewonnen werden. Zudem konnte durch die Wahl des RR als Effektgröße, eine robustere Schätzung des Effektes gewährleistet werden, da das RR weniger anfällig für Verzerrungen durch nicht-normalverteilte Daten ist (Viechtbauer 2010; Koricheva et al. 2013). Des Weiteren konnten so die Annahmen der Normalität und der Homogenität der Fehlervarianz gewährleistet werden, wie von Hedges et al. (1999) empfohlen. Zusätzlich war der Effekt der Untersuchungsflächen auf die Kontrollflächen durch das RR leichter interpretierbar, da es das relative Ausmaß des Effektes zwischen den Flächen angab. Das $\ln RR$ von 0,0 bedeutete, dass es keine Unterschiede zwischen der Untersuchungsfläche und der Kontrollfläche gab. Ein positiver $\ln RR$ zeigte, dass die Untersuchungsfläche einen höheren Bodenwassergehalt aufwies als die Kontrollfläche. Während ein negativer $\ln RR$ von bedeutete, dass die Untersuchungsfläche einen niedrigeren Bodenwassergehalt als die Kontrollfläche aufwies.

Es lagen nicht für alle 57 eingeschlossenen Studien Streumaße (Standardabweichung (SD), Standardfehler (SE)) vor, welche extrahiert werden konnten. Der SD konnte nur aus fünf Studien extrahiert werden, der SE aus sieben Studien. Da so für viele Studien keine Varianz des Response Ratio (RR) berechnet werden konnte, wurde die Varianz nur für die Untersuchungsflächen berechnet, welche SD und n Werte aufwiesen. Die schlechteste Varianz der vorhandenen Studien, wurde als Schätzer für die fehlenden Werte verwandt. Die Verwendung des Maximums der

Varianz (der „schlechteste Wert“) wird als konservativer Schätzer für die Varianz von Response Ratios bei fehlenden SD/SE Werten in der Forschung unterstützt (Bakbergenuly et al. 2020; Nakagawa et al. 2023). Diese Methode war einerseits robust und leicht umsetzbar, andererseits minimierte sie das Risiko falsch positiver Ergebnisse, indem der schlechteste Fall angenommen wurde, was zu vorsichtigeren und zuverlässigeren Schlussfolgerungen führte. Mit den aus den Daten geschätzten Werten für die SD ergab sich eine veränderte (homogenisierte) Normalverteilung der Daten (**Abb. 16**).

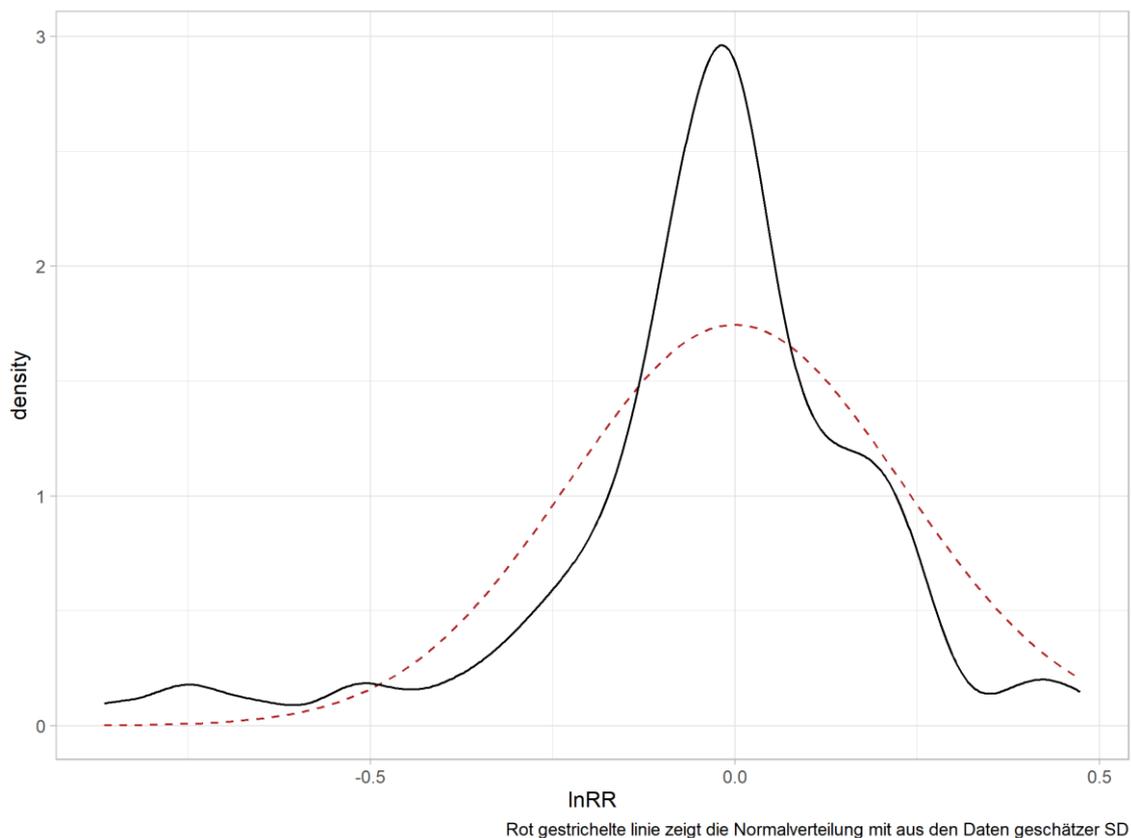


Abb. 16 Normalverteilung **ohne** und **mit** Schätzung der Varianz für fehlende Werte der Standardabweichung (SD). Die **schwarze Linie** zeigt die Verteilung des logarithmierten Response Ratios (lnRR) vor der Schätzung der fehlenden Werte der Varianz (SD). Die **rot gestrichelte Linie** zeigt die Normalverteilung für Datenpunkt mit einer geschätzten SD.

3.4. Induktive statistische Analyse

3.4.1. Überprüfung der Normalverteilungsannahme

Um die Annahme der Normalverteilung des Datensatzes zu testen, wurde ein Quantil-Quantil-Diagramm (Q-Q-Plot) erstellt sowie der Shapiro Wilk Test durchgeführt. Die Ergebnisse des **Shapiro-Wilk Test** ergaben einen Wert von $W = 0,906$, welcher darauf hindeutete, dass die Daten eine gewisse Abweichung von der Normalverteilung aufwiesen, aber nicht stark abwichen. Der Wert $p = 0,000003$ des Shapiro Wilk Test war deutlich unter dem Signifikanzniveau von 0,05.

Daher wurde die Nullhypothese, dass die Daten normalverteilt waren, abgelehnt. Der **Q-Q-Plot** zeigte, dass die Datenpunkte in der Graphen-Mitte zwar auf der geraden Linie lagen, von dort an aber bis zu den Enden der Verteilung, den sogenannten ‚Tails‘, deutlich davon abwichen.

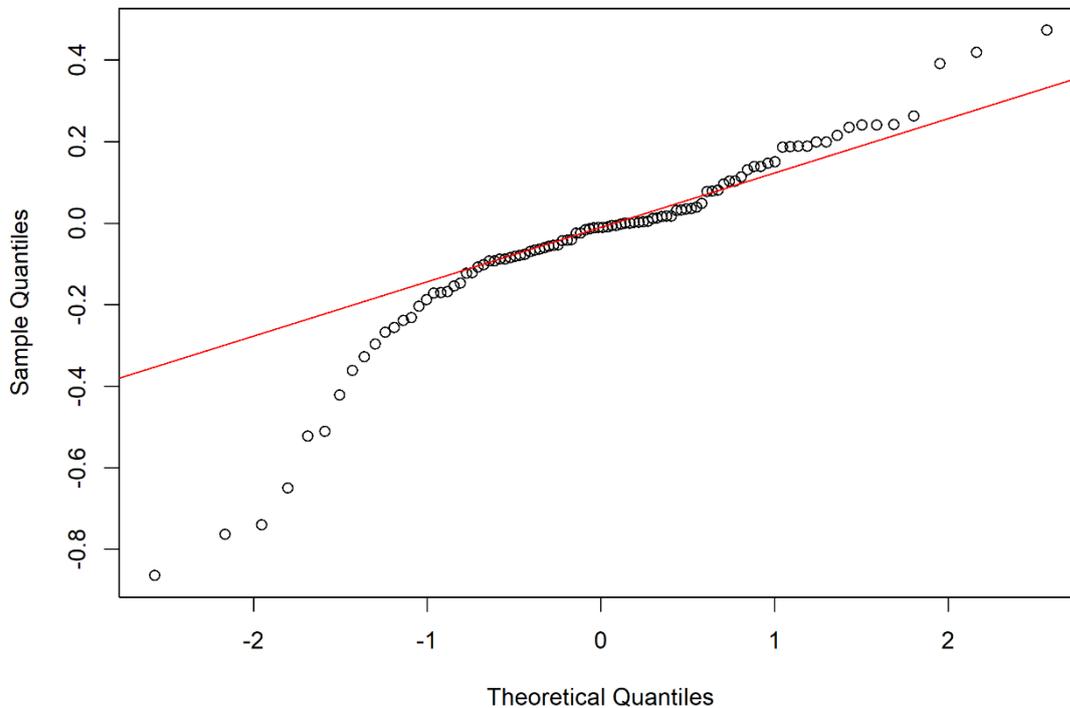


Abb. 17 Quantil-Quantil (QQ) Plot zur Überprüfung der Normalverteilung des logarithmierten Response Ratio (lnRR). Bei einer idealen Normalverteilung wären die Daten auf der roten Linie gleichmäßig verteilt.

Die Ergebnisse des Shapiro-Wilk Test und des QQ-Plots zur Überprüfungen zur Normalverteilung wiesen darauf hin, dass keine ideale Normalverteilung vorlag. Metaanalysen erweisen sich jeoch als robust gegenüber leichten Abweichungen von der Normalverteilung (Hess 2005; Schmider et al. 2010; Ganguly 2014; Vázquez et al. 2016). Daher wurden die Voraussetzungen für eine Überprüfung der Hypothesen durch eine Metaanalyse für gegeben angenommen.

3.4.2. Metaanalyse: Einfluss der Agroforstsysteme auf die Bodenfeuchte

Im nächsten Schritt wurde zur Überprüfung des Einflusses der Agroforstsysteme auf die Bodenfeuchte, ein **multivariates Metaanalyse-Modell** unter Verwendung der Maximum-Likelihood-Methode durchgeführt. In der **zweiten Hypothese** wurde angenommen, dass der positive Einfluss des Baumalters auf die Bodenfeuchte mit dem Alter zunimmt. Um diese Hypothese zu überprüfen, wurden in dem Metaanalyse-Modell aus 39 Studien insgesamt 70 Untersuchungsflächen eingeschlossen die Daten zum Baumalter enthielten. Aus dem Gesamtdatensatz wurden damit 28 Untersuchungsflächen aus 19 Studien ausgeschlossen, welche keine Daten zum Baumalter enthielten.

Die **geschätzte Effektgröße** zeigte einen Mittelwert von $-0,042$ ($SD = 0,036$). Mit den Werten für $z = -1,159$ und $p = 0,246$ wies dies darauf hin, dass die durchschnittliche Effektgröße statistisch nicht signifikant von Null verschieden war. Das zeigte, dass kein konsistenter Effekt der Agroforstsysteme auf die Bodenfeuchte, über die Studien hinweg, nachgewiesen werden konnte. Das **Konfidenzintervall** für die Effektgröße betrug $95\% CI = [-0,113; 0,029]$ und schloss somit die Null mit ein, welches die Schlussfolgerung eines nicht signifikanten Gesamteffekts weiter stützte.

Der **Q-Test auf Heterogenität** ergab mit $Q = 65.1863$ (Freiheitsgrade, $df = 69$) und einem Wert von $p = 0,607$ Hinweise darauf, dass keine signifikante Heterogenität zwischen den einbezogenen Studien bestand. Dieses Ergebnis zeigte, dass die beobachtete Variabilität zwischen den Studien nicht größer war als das, was man zufällig erwarten würde. Keine signifikante Heterogenität laut Q-Test deutete darauf hin, dass die Studienergebnisse konsistent waren. Dies wurde durch die Ergebnisse der I^2 Statistik von 0% unterstützt, welche aussagte, dass keine signifikante Heterogenität zwischen den Studienergebnissen vorlag.

Die geschätzte **Varianz** von des **Sigma²** $\sigma^2 = 0,018$ deutete jedoch auf eine zwischen den Studien bestehende Variabilität (Heterogenität) hin. Die Variation zwischen den Effektgrößen der Studien betrug demnach $SD = 0,134$. σ^2 ist ein Maß für die geschätzte Varianz der wahren Effektgrößen zwischen den Studien, also ein Maß für die Heterogenität. Das bedeutete, dass die tatsächlichen Effektgrößen zwischen den einzelnen Studien um den Gesamteffekt variierten, was durch echte Unterschiede in den Effekten, aber auch durch andere Faktoren verursacht werden konnte. Da σ^2 signifikant von Null verschieden war, deutete dies darauf hin, dass nicht alle Unterschiede zwischen den Studienergebnissen durch Zufall erklärt werden konnten und dass es eine echte Variabilität in den Effektgrößen zwischen den Studien gab.

Zusammenfassend zeigten die Ergebnisse dieser Metaanalyse, dass kein statistisch signifikanter Effekt der Agroforstsysteme auf die volumetrische Bodenfeuchte nachgewiesen werden konnte. Die geringe Heterogenität zwischen den Studien deutete darauf hin, dass die beobachteten Ergebnisse konsistent und hinreichend homogen waren, um zusammengefasst zu werden, die Variabilität der Studien um den Gesamteffekt durch die Metaanalyse aber nicht erklärt werden konnte. Die bestehende Variabilität zwischen den Studien (Ergebnisse des σ^2) und der nicht signifikante Gesamteffekt unterstützten die Schlussfolgerung, dass weitere Untersuchungen notwendig waren, um definitive Aussagen über den untersuchten Effekt machen zu können.

Die Metaanalyse wurde als **Forest-Plot** dargestellt und die Untersuchungen wurden, für eine visuelle Bewertung des Einflusses des Baumalters, aufsteigend sortiert (**Abb. 18**). Den

Datenpunkte dieser Metaanalyse wurden in einer weiteren Metaanalyse auch die ausgeschlossenen Datenpunkte hinzugefügt, dies führte nur zu geringfügigen, nicht signifikanten Änderungen der Ergebnisse, ohne Änderung des Gesamteffektes (siehe Anhang **Abb. 27**). Weitere Informationen zu Werten der Modellanpassung und den Informationskriterien, sowie Details zur Metaanalyse zu **Abb. 27** können dem R-Script entnommen werden (Anhang **6.1**).

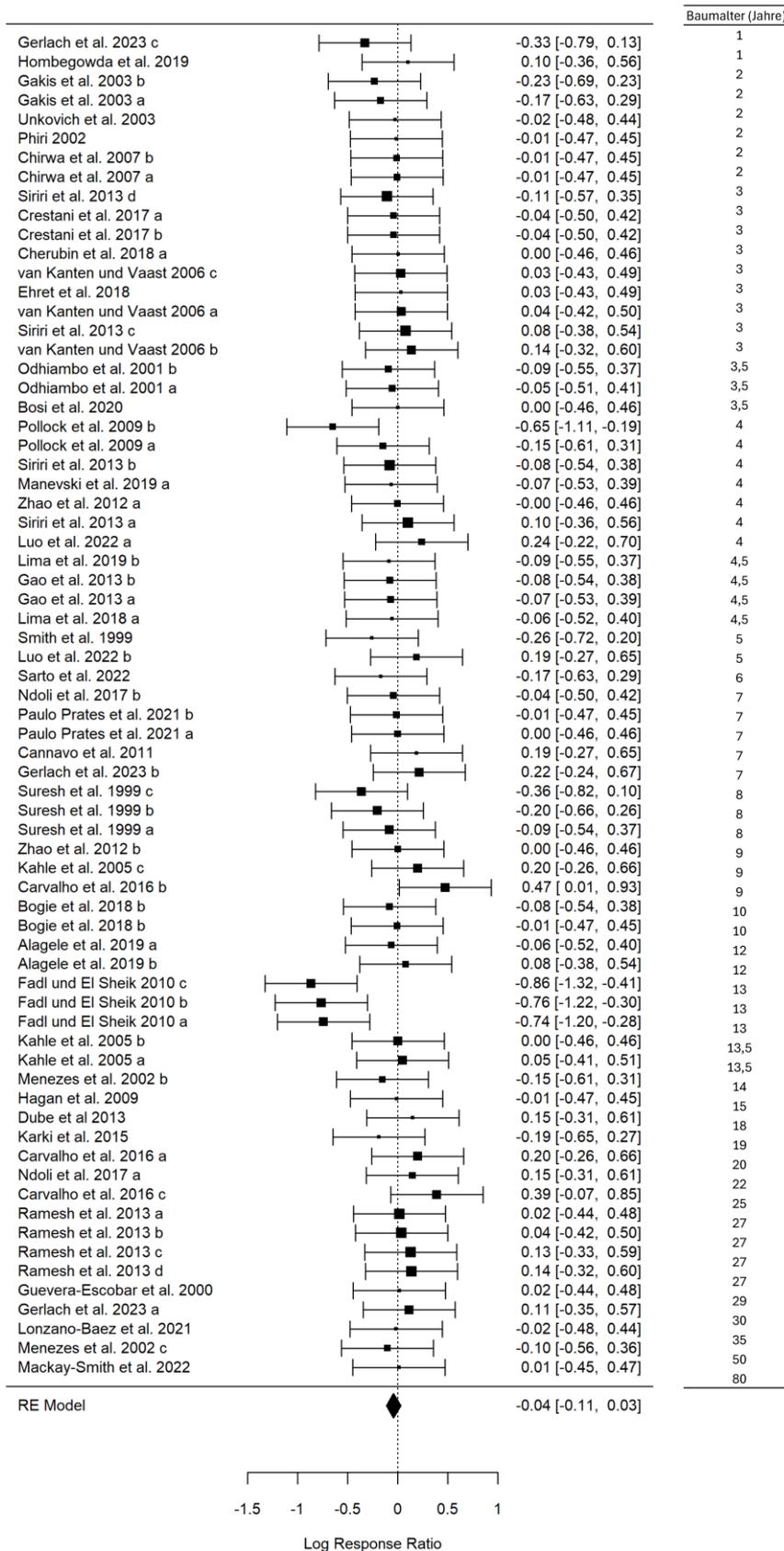


Abb. 18 Forest-Plot zur Metaanalyse über den Einfluss des Baumalters. Untersuchungen sind absteigend nach Baumalter sortiert. Für jede Studie wird der Effekt, nach Ihrer Gewichtung in der Metaanalyse, durch einen Punktschätzer als Rechteck unterschiedlicher Größe dargestellt. Der Gesamteffekt ist unter den Einzeleffekten als Raute aufgetragen. Die Mitte der Raute präsentiert den Punktschätzer, die Breite gibt das Konfidenzintervall an. Nebenstehende Tabelle gibt das jeweilige Baumalter zur Untersuchung an (**Median = 7**).

3.4.3. Rekursive Feature Eliminierung mittels Varianzanalyse (ANOVA)

Da das σ^2 der Metaanalyse auf ungeklärte Variabilität zwischen den Studien hinwies wurden die weiteren Variablen, welche aus den Studien extrahiert worden waren, auf ihren möglichen Einfluss hin in Subanalysen untersucht. Dafür wurden vorab alle Variablen anhand der kombinierten Boxplots daraufhin bewertet, ob sich diese für den Einschluss in eine **mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA)** eignen. Waren die Voraussetzungen erfüllt, wurden diese mit in die Varianzanalyse eingeschlossen. Anhand der Varianzanalyse sollten weitere sinnvolle Subanalysen erkennbar werden.

Die Ergebnisse des Shapiro-Wilk Test und des QQ-Plots zur Überprüfungen zur Normalverteilung wiesen darauf hin, dass keine ideale Normalverteilung vorlag (Kapitel 3.4.1.). Ebenfalls wie die Metaanalyse ist jedoch auch die ANOVA gegenüber einer nicht strengen Normalverteilung robust (Vallejo und Ato 2012; Zygmunt und Smith 2014; Blanca et al. 2017). Daher wurde die Verteilung der Daten als hinreichend Normalverteilt angesehen, um eine Varianzanalyse durchzuführen.

Die Studien wurden über sechs Klimazonen hinweg erfasst, welche hinsichtlich der Umweltfaktoren stark unterschiedlich waren. Unter allen erfassten Variablen wurde daher vermutet, dass das Klima einen Einfluss auf die Variabilität der Daten ausübte und eine Gruppierung nach Klimazonen ein zielführender nächster Schritt bei der Subanalyse war.

Eine Voraussetzung für eine multifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) ist, dass die Homogenität der Varianzen (Homoskedastizität) gegeben sein muss (Thompson 2015; Wang et al. 2017; Jayalath et al. 2017; Zhou et al. 2023). Hierfür eignet sich der Levene-Test, u.a. aufgrund seiner Robustheit gegenüber Abweichungen von der Normalverteilung (Kim und Cribbie 2018). Da der Leven-Test Gruppierungen der Daten benötigt, wurden die Klimazonen als Gruppen festgelegt, zwischen denen die Homogenität der Varianzen getestet wurde. Der **Levene-Test** zeigte, dass die Varianzen der zwischen den Klimazonen nicht signifikant unterschiedlich waren, $F = 1,463$, $p = 0,2094$, ($p > 0,05$). Damit wurde die Nullhypothese des Levene-Tests, die besagt, dass alle Gruppen gleiche Varianzen haben, nicht abgelehnt. Die Bedingung der Homogenität der Varianzen (Homoskedastizität) für die ANOVA war somit erfüllt.

Da der Datensatz viele unabhängige Variablen enthielt, wurden mittels einer Modellselektion die Variablen identifiziert, welche die Varianz der Bodenfeuchte am besten erklärten. Zur Modellselektion wurde eine rekursive Feature-Eliminierung (RFE) mit einer ANOVA kombiniert (Kapitel 2.5.2.). Aus allen erhobenen Variablen wurden solche als potenzielle Prädiktoren in die RFE eingeschlossen, welche mindestens so häufig in dem Datensatz vorkamen wie die Variable

Baumalter, da diese zur **Überprüfung der zweiten Hypothese** weiterhin mit eingeschlossen wurde. Nach diesen Bedingungen wurden die Variablen Klima, Baumalter, Beobachtungsdauer und Tiefe der Bodenfeuchtemessung in die RFE mit eingeschlossen (**Tab.: 4**). Anhand des Akaike-Informationskriterium (AIC) wurde die Variable Klima als stärkster Einfluss auf die Variable Bodenfeuchte identifiziert. Da das Modell auch den Intercept mit einschloss (Annahme das alle anderen betrachteten Variablen gleich Null sind und keinen Effekt haben) wurden insgesamt fünf Modelle betrachtet.

Interpretation der Ergebnisse

Beim Übergang von **Modell 1** zu **Modell 4** (9 zu 6 Freiheitsgrade) verbesserten sich die AIC- und BIC-Werte kontinuierlich, was auf eine verbesserte Modellgüte bei gleichzeitiger Verringerung der Komplexität hinwies. Die sehr kleinen L.Ratio-Werte und die hohen p-Werte (0,926; 0,752; 0,957) zwischen den aufeinanderfolgenden Modellen deuteten jedoch darauf hin, dass die Verbesserungen der Modellpassung nicht statistisch signifikant waren. Von **Modell 4** zu **Modell 5** zeigt eine deutliche Reduktion der Freiheitsgrade von 6 auf 2. Dieser Schritt resultiert in einer Verschlechterung des AIC-Wertes (von -18,502 zu -13,430), was auf eine reduzierte Modellgüte hindeutet. Der L.Ratio-Wert zwischen Modell 4 und 5 war mit 13,072 relativ hoch, und der zugehörige p-Wert von 0,011 statistisch signifikant. Dies bedeutete, dass die Eliminierung der Variablen vom vierten zum fünften Modell zu einer signifikanten Verschlechterung der Modellpassung führte (**Tab.: 4**).

Basierend auf den AIC- und BIC-Werten sowie der statistischen Signifikanz der Modellveränderungen schien **Modell 4** (Variable: Klima) das optimale Modell zu sein. Es bot die beste Balance zwischen Modellgüte und Komplexität, ohne signifikante Informationen zu verlieren, wie es beim Übergang zu Modell 5 der Fall war. Die Tatsache, dass **Modell 5** nur den Intercept enthielt, betont die Bedeutung des Intercept in diesem Modellierungsprozess. Der signifikante p-Wert beim Übergang zu diesem stark vereinfachten Modell unterstrich, dass die Eliminierung der Variable Klima und die Reduzierung auf den Intercept zu einer erheblichen Verschlechterung der Modellpassung führte.

Tab.: 4 Ergebnisse der Rekursiven-Feature-Eliminierung mittels einer ANOVA zur Prüfung des Einflusses von **Baumalter** und **Klima**. (**df** = Freiheitsgrade; **AIC** = Akaike-Informationskriterium; **BIC** = Bayesianisches Informationskriterium; **logLik** = Log-Likelihood; **Test** = Vergleich zwischen den Modellen; **L.Ratio** = Likelihood Ratio; **p-value** = p-Wert).

Model	df	AIC	BIC	logLik	Test	L.Ratio	p-value	Variablen
1	9	-12.614	6.955	15.307		NA	NA	Baumalter + Klima + Beobachtungsdauer + Untersuchte Bodentiefe
2	8	-14.606	2.790	15.303	1 vs 2	0.008	0.927	Baumalter + Klima + Beobachtungsdauer
3	7	-16.506	-1.285	15.253	2 vs 3	0.100	0.752	Baumalter + Klima
4	6	-18.503	-5.457	15.251	3 vs 4	0.003	0.958	Klima
5	2	-13.431	-9.082	8.715	4 vs 5	13.072	0.011	Intercept

Mit dem zuvor identifizierten optimalen **Modell 4** aus der RFE wurde nun wiederholt eine ANOVA durchgeführt. Dies bot spezifische Einblicke in den Einfluss der Variable Klima auf die Bodenfeuchte. Die Variable Klima zeigte, mit $p = 0,009$ ($p < 0,05$) dass die Unterschiede in den Mittelwerten der Bodenfeuchte zwischen den fünf Klimakategorien signifikant war. Hier wurde der Intercept mitbetrachtet, dessen p-Wert von $0,236$ ($p > 0,05$) zeigte, dass der Intercept allein keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die Bodenfeuchte hatte (**Tab.: 5**).

Diese Ergebnisse bestätigten, dass die Variable „Klima“ einen statistisch signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable hatte, während der Intercept (der Basiswert der abhängigen Variable, wenn das Klima gleich Null wäre) keinen signifikanten Effekt zeigte. Dies bestätigte die Auswahl aus der rekursiven Feature-Eliminierung. Das signifikante Ergebnis der ANOVA für die Variable Klima wies darauf hin, dass Unterschiede in der Reaktion der Bodenfeuchte in Abhängigkeit von der Klimazone bestanden.

Tab.: 5 Ergebnisse der ANOVA für das Klima als Prädiktor.

numDF	denDF	F-value	p-value	Variable
1	32	1.454	0.237	Intercept
4	32	4.052	0.009	Klima

Die ANOVA konnte jedoch keine Spezifischen Informationen darüber liefern, welche Klimazonen sich voneinander unterschieden. Um den Einfluss der Klimazone auf die Bodenfeuchte weiter zu

untersuchen, wurde im nächsten Schritt für jede Klimazone jeweils eine Metaanalyse durchgeführt (Kapitel 3.4.4.).

Zur **Überprüfung der ersten Hypothese**, dass der Agroforstsystem-Typ einen Einfluss auf die Bodenfeuchte hatte, wurde die Variable Klima aus der REF entfernt und die Variable Agroforstsystem-Typ eingeschlossen. Die Variablen Agroforstsystemtyp und Klima konnten nicht zusammen modelliert werden, da es sich bei beiden um kategoriale Variablen handelte. Bei einer RFE und einer ANOVA wären alle Kategorien beider Variablen zu einzelnen Subgruppen zusammengefasst worden und hätten damit jeweils nur noch wenige Datenpunkte enthalten. Dies hätte zu einer Überanpassung des Modells geführt und eine Interpretation wäre nicht mehr zulässig gewesen.

Interpretation der Ergebnisse

Die AIC-Werte verbesserten sich von **Modell 1** zu **Modell 5** kontinuierlich, was darauf hindeutete, dass die Modelle mit weniger Variablen tendenziell eine bessere Balance zwischen Passgenauigkeit und Komplexität erreichten. Insbesondere der Sprung von **Modell 4** zu **Modell 5** zeigt eine deutliche Verbesserung im AIC, was auf eine verbesserte Modellgüte hindeutete. Keiner der Vergleiche zwischen den aufeinanderfolgenden Modellen zeigt eine statistisch signifikante Verbesserung der Modellpassung ($p > 0,05$). Dies bedeutete, dass die Entfernung von Variablen in jedem Schritt nicht zu einer signifikanten Verbesserung der Modellpassung führte. Obwohl der AIC bei **Modell 5** am niedrigsten war, was auf die beste Modellgüte hinwies, bestand dieses Modell nur noch aus dem **Intercept**. Dies stellte eine übermäßige Vereinfachung dar, insbesondere da das Ziel darin bestand, den Einfluss mehrerer Variablen zu untersuchen. Dies zeigte, dass die untersuchten unabhängigen Variablen (Agroforstsystemklassen) keinen signifikanten Beitrag zur Erklärung der Variabilität der Bodenfeuchte leisteten (**Tab.: 6**).

Tab.: 6 Ergebnisse der Rekursiven-Feature-Eliminierung mittels einer ANOVA zur Prüfung des Einflusses von **Baumalter** und **Agroforstsystemtyp**. (**df** = Freiheitsgrade; **AIC** = Akaike-Informationskriterium; **BIC** = Bayesianisches Informationskriterium; **logLik** = Log-Likelihood; **Test** = Vergleich zwischen den Modellen; **L.Ratio** = Likelihood Ratio; **p-value** = p-Wert).

Model	df	AIC	BIC	logLik	Test	L.Ratio	p-value	Variablen
1	9	-2.404	17.165	10.202		NA	NA	Baumalter + Agroforsttyp + Beobachtungsdauer + Untersuchte Bodentiefe
2	8	-4.402	12.993	10.201	1 vs 2	0.002	0.960	Baumalter + Agroforsttyp + Beobachtungsdauer
3	7	-6.338	8.883	10.169	2 vs 3	0.064	0.801	Baumalter + Agroforsttyp
4	6	-8.095	4.951	10.048	3 vs 4	0.243	0.622	Agroforsttyp
5	2	-13.431	-9.082	8.715	4 vs 5	2.665	0.615	Intercept

Nach diesen Ergebnissen wurden die Daten nach den fünf verschiedenen Klimazonen gruppiert und in Subanalysen anhand von einzelnen Metaanalysen weiter untersucht.

3.4.4. Metaanalyse für jede Klimazone

Für die klimatische Zone Arid war mit 14 Untersuchungseinheiten aus 7 Studien die geschätzte Gesamteffektgröße negativ ($\ln RR = -0,237$), was auf einen negativen Einfluss in dieser Klimazone hindeutete. Der p-Wert von 0,0235 wies auf Signifikanz hin. Der Heterogenitätstest (Q-Test) gab mit $p = 0,075$ moderate Anzeichen von Heterogenität zwischen den Studien.

Arid (Subtropische Trockenzone)

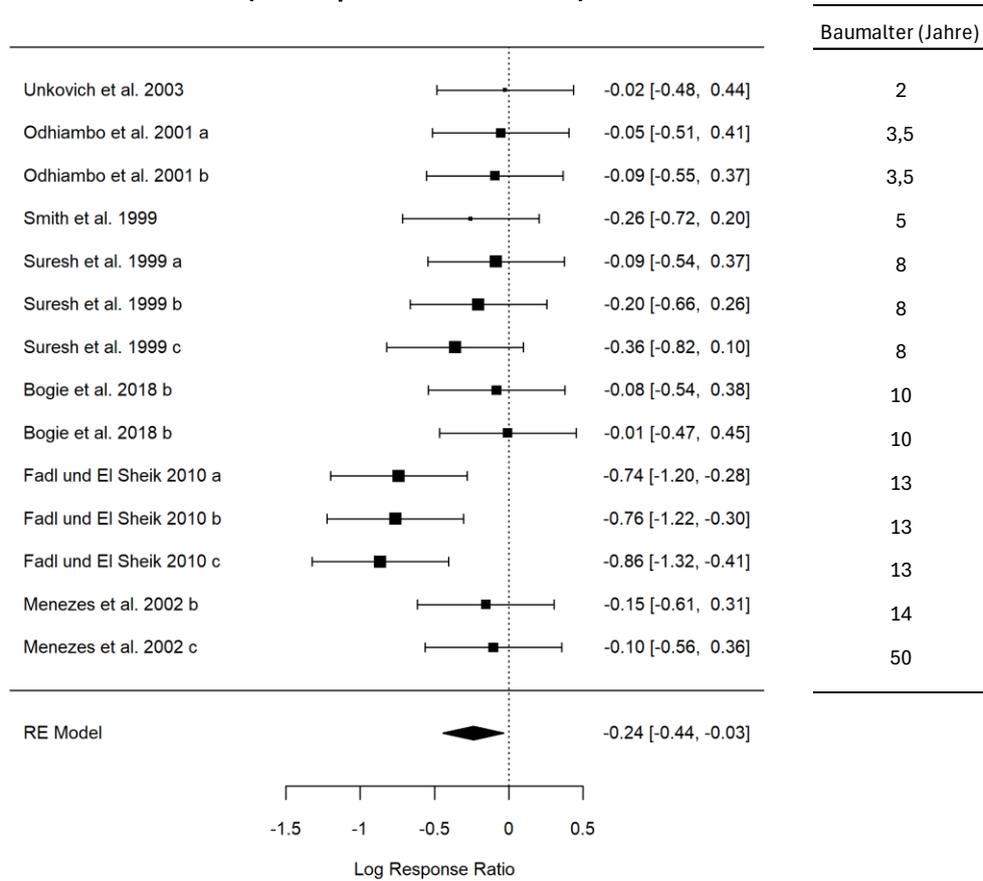


Abb. 19 Forest-Plot zur Metaanalyse über den Einfluss des Baumalters in der ariden Zone. Untersuchungen sind absteigend nach Baumalter sortiert. Für jede Studie wird der Effekt, nach Ihrer Gewichtung in der Metaanalyse, durch einen Punktschätzer als Rechteck unterschiedlicher Größe dargestellt. Der Gesamteffekt ist unter den Einzeleffekten als Raute aufgetragen. Die Mitte der Raute präsentiert den Punktschätzer, die Breite gibt das Konfidenzintervall an. Nebenstehende Tabelle gibt das jeweilige Baumalter zur Untersuchung an (**Median = 9**).

In der klimatischen Zone Humid wurden 25 Untersuchungseinheiten aus 14 Studien eingeschlossen. Die Gesamteffektgröße war positiv ($\ln RR = 0,077$) aber nicht statistisch signifikant ($p = 0,099$). Der p-Wert für den Heterogenitätstest (Q-Test) ($p = 0,996$) zeigte eine sehr geringe Heterogenität.

Humid (Feucht-gemäßigte Zone)

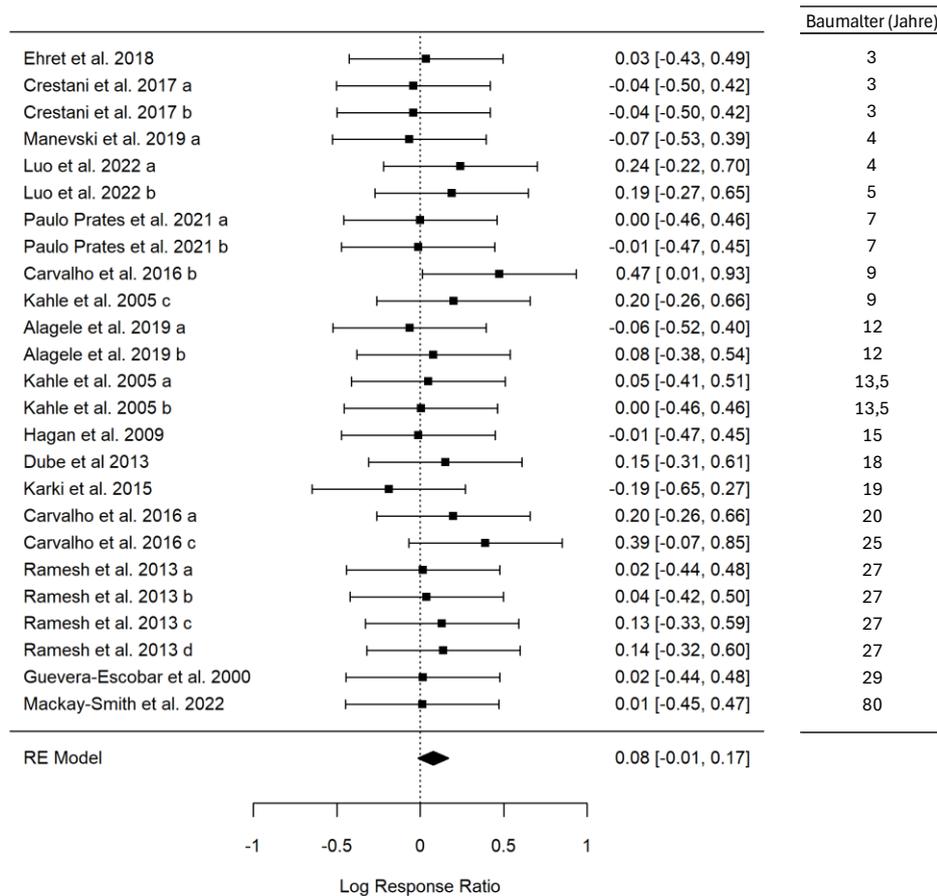


Abb. 20 Forest-Plot zur Metaanalyse über den Einfluss des Baumalters in der humiden Zone. Untersuchungen sind absteigend nach Baumalter sortiert. Für jede Studie wird der Effekt, nach Ihrer Gewichtung in der Metaanalyse, durch einen Punktschätzer als Rechteck unterschiedlicher Größe dargestellt. Der Gesamteffekt ist unter den Einzeleffekten als Raute aufgetragen. Die Mitte der Raute präsentiert den Punktschätzer, die Breite gibt das Konfidenzintervall an. Nebenstehende Tabelle gibt das jeweilige Baumalter zur Untersuchung an (**Median = 13,5**).

In der Klimazone Semihumid (R) wurden 18 Untersuchungseinheiten zusammengefasst, welche aus 10 Studien stammten. Diese zeigten mit einem Gesamteffekt ($\ln RR = 0,001$) und einer Signifikanz von ($p = 0,98$) einen sehr geringen, nicht signifikanten Wert nahe Null. Der Heterogenitätstest (Q-Test) zeigte ähnlich wie in der Humiden Klimazone kaum Heterogenität zwischen den Studien ($p = 0,995$).

Semihumid (Randtropen)

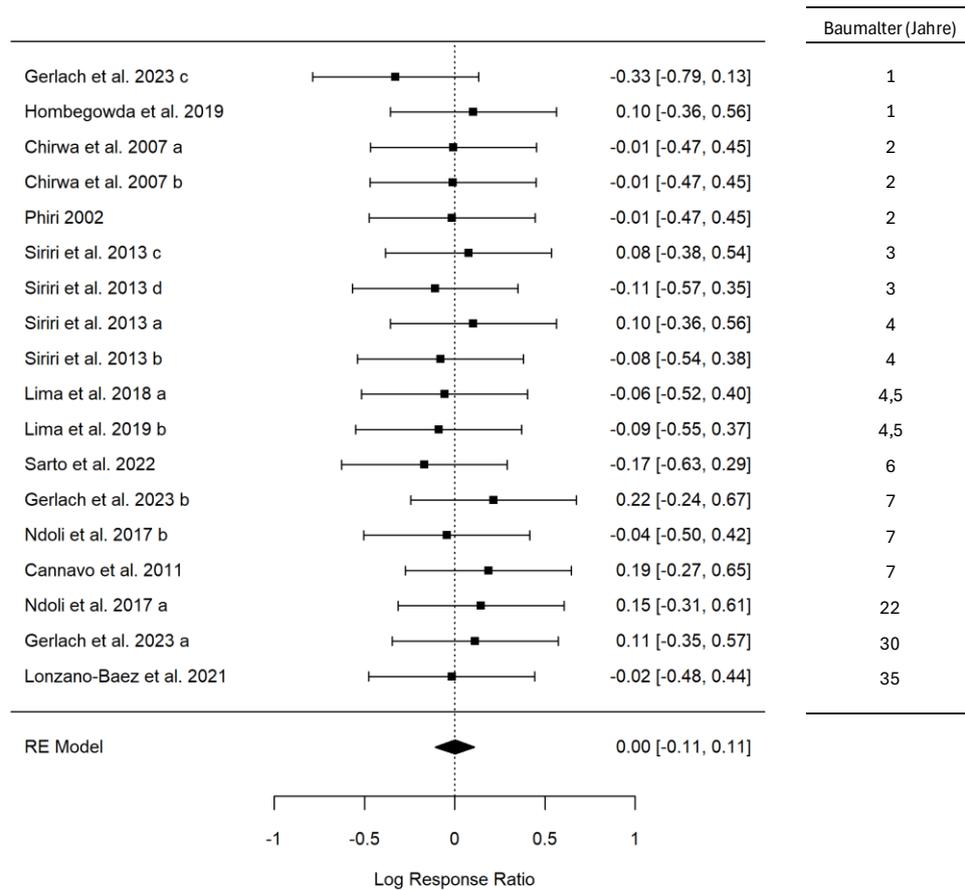


Abb. 21 Forest-Plot zur Metaanalyse über den Einfluss des Baumalters in der semihumiden Zone (Randtropen). Untersuchungen sind absteigend nach Baumalter sortiert. Für jede Studie wird der Effekt, nach ihrer Gewichtung in der Metaanalyse, durch einen Punktschätzer als Rechteck unterschiedlicher Größe dargestellt. Der Gesamteffekt ist unter den Einzeleffekten als Raute aufgetragen. Die Mitte der Raute präsentiert den Punktschätzer, die Breite gibt das Konfidenzintervall an. Nebenstehende Tabelle gibt das jeweilige Baumalter zur Untersuchung an (**Median = 4,25**).

In der Klimazone Semihumid (SW) zeigte sich aus 9 Untersuchungseinheiten aus sechs Studien ein nicht signifikanter Gesamteffekt von ($\ln RR = -0,149$) welcher knapp über dem Signifikanzniveau lag ($p = 0,056$). Eine geringe Variabilität zwischen den Studien zeigte der Heterogenitätstest (Q-Test) mit ($p = 0,634$).

Semihumid (Subtropische Winterregenzone)

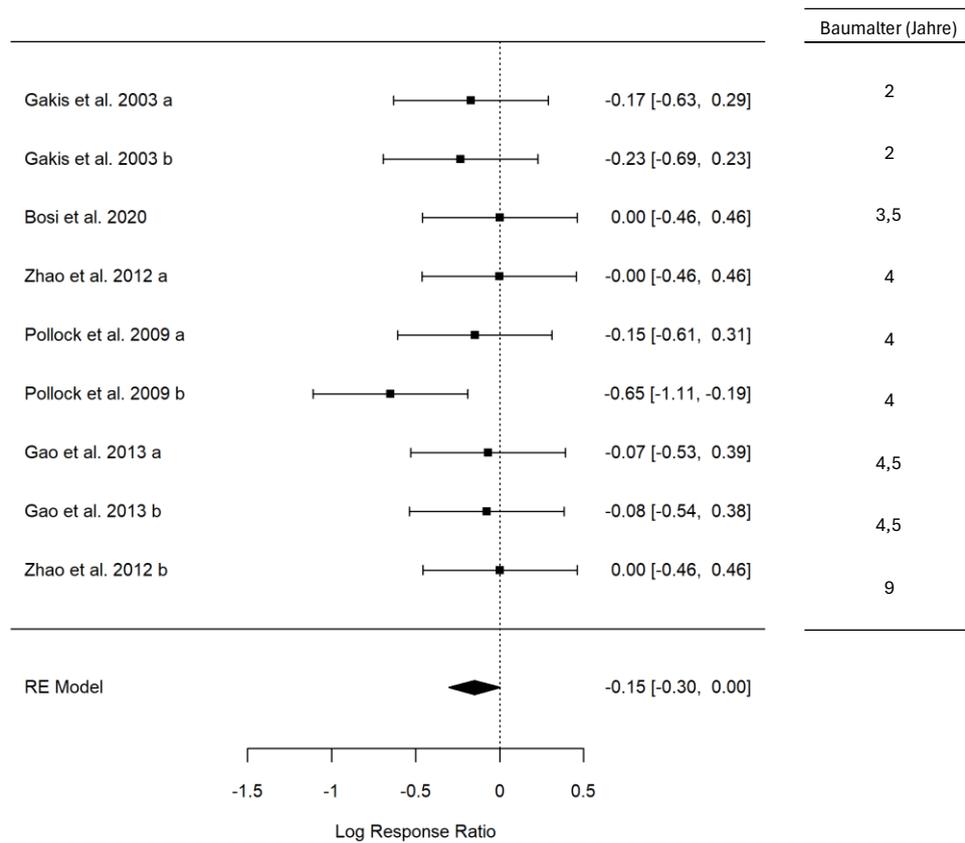


Abb. 22 Forest-Plot zur Metaanalyse über den Einfluss des Baumalters in der semihumiden Zone (Subtropische Winterregenzone). Untersuchungen sind absteigend nach Baumalter sortiert. Für jede Studie wird der Effekt, nach ihrer Gewichtung in der Metaanalyse, durch einen Punktschätzer als Rechteck unterschiedlicher Größe dargestellt. Der Gesamteffekt ist unter den Einzeleffekten als Raute aufgetragen. Die Mitte der Raute präsentiert den Punktschätzer, die Breite gibt das Konfidenzintervall an. Nebenstehende Tabelle gibt das jeweilige Baumalter zur Untersuchung an (**Median = 4**).

In der Vollhumiden Zone ergab aus vier Untersuchungseinheiten aus zwei Studien, ein nicht signifikanter, positiver Gesamteffekt ($\ln RR = 0,052$) mit ($p = 0,656$). Der geringe Wert des Q-Test ergab eine geringe Heterogenität ($p = 0,979$).

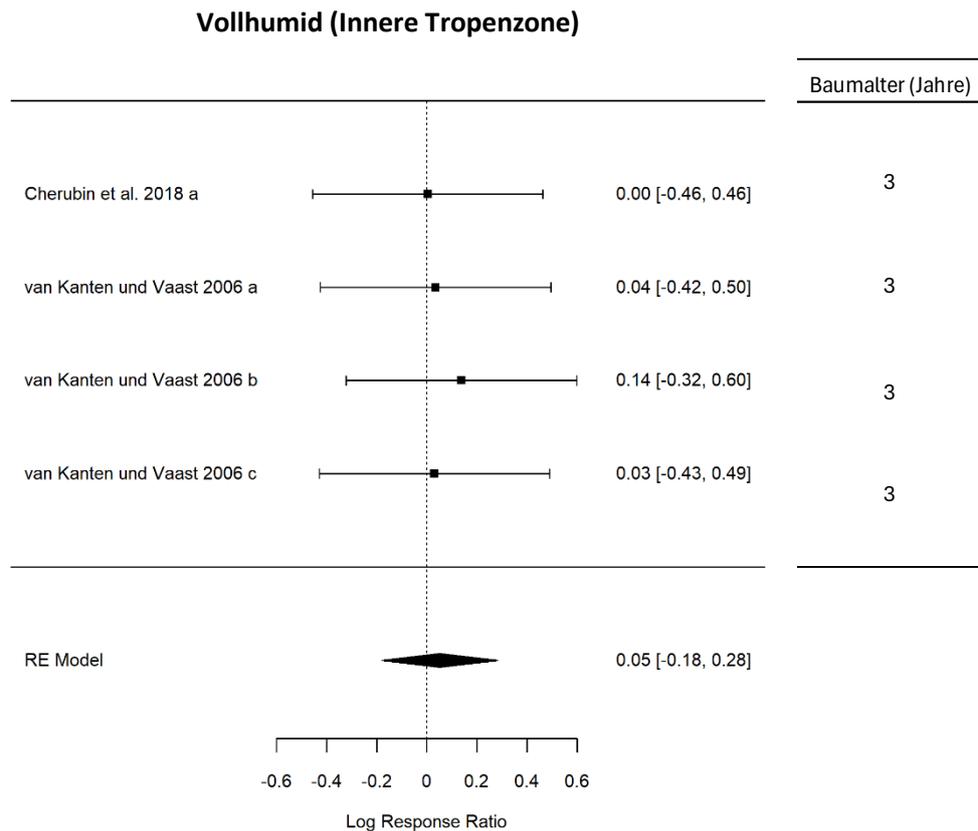


Abb. 23 Forest-Plot zur Metaanalyse über den Einfluss des Baumalters in der vollhumiden Zone. Untersuchungen sind absteigend nach Baumalter sortiert. Für jede Studie wird der Effekt, nach ihrer Gewichtung in der Metaanalyse, durch einen Punktschätzer als Rechteck unterschiedlicher Größe dargestellt. Der Gesamteffekt ist unter den Einzeleffekten als Raute aufgetragen. Die Mitte der Raute präsentiert den Punktschätzer, die Breite gibt das Konfidenzintervall an. Nebestehende Tabelle gibt das jeweilige Baumalter zur Untersuchung an (**Median = 3**).

Zusammenfassung der Subanalysen

Die Ergebnisse zeigten, dass die Effekte in den verschiedenen Klimazonen variierten, wobei nur die subtropische Trockenzone einen statistisch signifikanten negativen Effekt aufwies. Bis auf die subtropische Trockenzone, wo eine moderate Heterogenität festgestellt wurde, zeigten die anderen Zonen sehr geringe bis geringe Heterogenität, was auf konsistente Studienergebnisse in diesen Zonen hindeutete. Die feucht-gemäßigte Zone und die Randtropen zeigten nicht signifikante positive Effekte, während die subtropische Winterregenzone eine nicht signifikante negative Tendenz aufwies. Die innere Tropenzone zeigte ebenfalls eine nicht signifikante positive Effektgröße. Die Varianzkomponente **Sigma²** (σ^2) war in allen Zonen außer der subtropischen Trockenzone null, was darauf hindeutete, dass es innerhalb dieser Zonen wenig bis keine unerklärte Variabilität zwischen den Studien gab.

3.5. Überprüfung von Publikationsbias

Mittels eines **Funnel-Plots** (Trichterdiagramm) wurde die Publikationsverzerrung (eng. *publication bias*) der Metaanalyse untersucht (**Abb. 24**). Die X-Achse stellt das logarithmierte Response-Ratio (lnRR) (Effektgröße) der jeweiligen Untersuchungsfläche dar, während die Y-Achse den Standardfehler (SE) der Studien zeigt. Im Funnel-Plot ist jede der 98 Untersuchungsflächen aus den 57 Studien mit einem Punkt repräsentiert. Die vertikale Linie in der Mitte des Diagramms repräsentiert den gepoolten Effektschätzer (Gesamteffekt), welcher aus allen Studien berechnet wurde.

In dem dargestellten Funnel-Plot zeigt sich eine asymmetrische Verteilung der Punkte. Der Großteil der Untersuchungsflächen aus den Studien (96 von 98) weist einen SE-Wert von 0,235 auf und liegt damit auf der unteren Linie des Funnel-Plot. Von diesen liegen 8 außerhalb der weißen Fläche. Die restlichen 2 Studien mit SE-Werten von $< 0,117$ und $< 0,059$ liegen ebenfalls knapp außerhalb des Funnel-Plot. Die asymmetrische Form der 96 Datenpunkte mit einem SE-Wert von 0,235 kommt dadurch zustande, dass für diese Datenpunkte keine Werte für den Stichprobenumfang (n) und SD vorlagen und die fehlenden Werte daher konservativ anhand der Studie mit der schlechtesten Varianz geschätzt wurde (Kapitel 2.5.2).

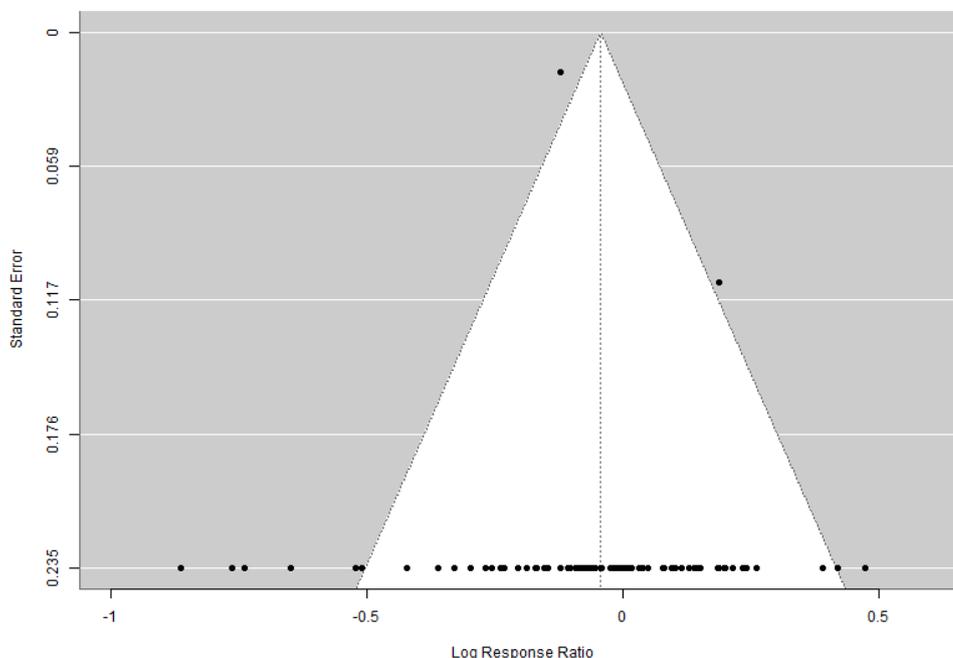


Abb. 24 Funnel-Plot zur Beurteilung von Publikationsbias nach Schätzung fehlender SE-Werte durch die Funktion *escalc* aus dem Paket *metafor* in R. Im Diagramm ist jede der 98 Untersuchungsflächen aus den 57 Studien mit einem Punkt repräsentiert. **X-Achse:** logarithmierte Response-Ratio (lnRR). **Y-Achse:** Standardfehler (SE) der Untersuchungsflächen. **Vertikale gestrichelte Linie (Wert = -0,04):** gepoolter Effektschätzer (Gesamteffekt) aus allen Studien.

Wie stark die Form des Funnel-Plots von dem verwendete Schätzer für die Varianz der Effektgröße (Response Ratio (RR)) abhängt, wird in **Abb. 25** deutlich. Hier wurde die Varianz des RR anstatt anhand der Funktion *escalc* aus dem Paket *metafor* in R anhand einer Näherungsformel geschätzt, welche aus der **Delta-Methode** abgeleitet wurde (Kapitel 2.5.2.).

In diesem Fall befinden sich 79 der 98 Datenpunkte unterhalb eines SE-Wertes von 0,062. Dies zeigt eine höhere Genauigkeit der Schätzer, die Hälfte der Datenpunkte liegt dabei außerhalb des Funnel Plots und ist heterogen verteilt. Der asymmetrische Funnel-Plot weist bei dieser Annahme der geschätzten SE-Werte die Form eines *inverted Funnel-Plots* auf (Fox 2021).

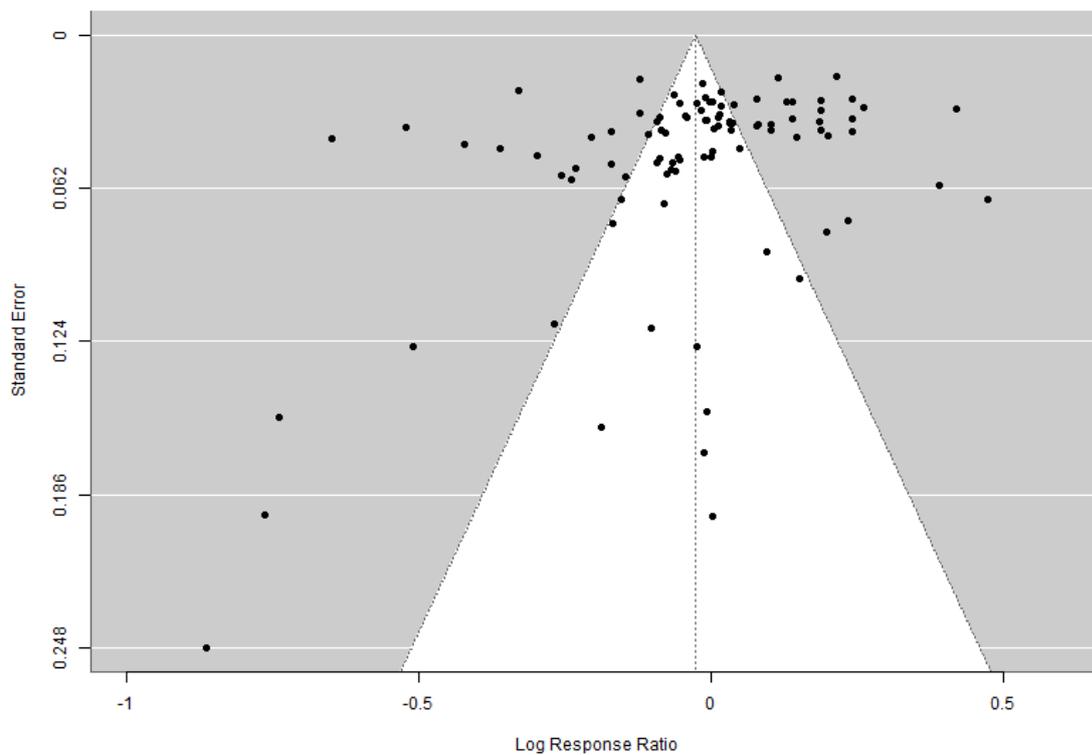


Abb. 25 Funnel-Plot zur Beurteilung von Publikationsbias nach Schätzung fehlender SE-Werte mittels Median der vorhandenen SE-Werte. Im Diagramm ist jede der 98 Untersuchungsflächen aus den 57 Studien mit einem Punkt repräsentiert. **X-Achse:** logarithmierte Response-Ratio (lnRR). **Y-Achse:** Standardfehler (SE) der Untersuchungsflächen. **Vertikale gestrichelte Linie (Wert = -0,04):** gepoolter Effektschätzer (Gesamteffekt) aus allen Studien.

4. Diskussion

In diesem Kapitel werden vorerst die angewandten Methoden kritisch diskutiert und anschließend die Ergebnisse der Metaanalyse verglichen, diskutiert und bewertet. Im Anschluss werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und ein Fazit gezogen.

4.1. Methodendiskussion

4.1.1. Methodik der Metaanalyse

Die Methodik-Leitfäden für systematische Metaanalysen von Khan et al. (2004); Cooper et al. (2009); Field und Gillett (2010); Hansen et al. (2022); Higgins et al. (2023),

welche für diese Arbeit genutzt wurden, entsprechen dem aktuellen Stand der Forschung. Vielen Metaanalysen, wie den Arbeiten von Pumariño et al. (2015); Shi et al. (2018); Kuyah et al. (2019); Muchane et al. (2020) liegen jedoch keine systematischen Leitfäden zugrunde. Nur wenige Arbeiten wie die von Basche und DeLonge (2019); Pent (2020); Mupepele et al. (2021) sind anhand systematischer Leitfäden angefertigt worden. Systematische Leitfäden bieten jedoch den Vorteil einer verbesserten Transparenz und Reproduzierbarkeit. Zudem tragen sie dazu bei Bias zu reduzieren und die Objektivität zu erhöhen; die Genauigkeit der Ergebnisse zu steigern sowie die Vergleichbarkeit zwischen Metaanalysen zu gewährleisten. Bei der vorliegenden Arbeit wurde mit der Anwendung der genannten Leitfäden die Kriterien guter wissenschaftlicher Praxis angestrebt. Diese sind: Transparenz, Reproduzierbarkeit, Objektivität, Genauigkeit, Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit (Deutscher Hochschulverband et al. 2012; ALLEA 2017; Deutsche Forschungsgemeinschaft 2022).

Vor diesem Hintergrund wird für alle Arbeitsschritte, welche die Formulierung der Forschungsfrage, die Auswahl und Verknüpfung der Suchbegriffe sowie die Auswahl der Ein- und Ausschlusskriterien betreffen, angenommen, dass diese korrekt durchgeführt wurden. Die Auswahl der Metadatenbank WOS wurde von den Autoren Kuyah et al. (2019); Muchane et al. (2020); Mupepele, Keller, und Dormann (2021) in ihren Metaanalysen als ausreichend umfangreich angesehen. In der vorliegenden Arbeit wurde ebenso ausschließlich die WOS berücksichtigt. Nach Khan et al. (2004); Field und Gillett (2010); J. Higgins et al. (2023) enthalten einzelne Datenbanken jedoch nicht alle relevante Literatur zu einer Thematik. Vor diesem Hintergrund weisen Khan et al. (2004) darauf hin, dass in solchen Fällen das Risiko für Publikationsbias erhöht ist. In einer Metaanalyse kann der Fokus nur auf eine bestimmte Anzahl an Datenbanken gelegt werden, welche im Zeitraum der Untersuchung auch berücksichtigt werden können. In der vorliegenden Arbeit kann Publikationsbias daher nicht ausgeschlossen werden. Folgende relevante

Datenbanken wären weiterhin für eine Literatursuche geeignet gewesen, konnten aber nicht berücksichtigt werden: AGRIS (2024); GEOBASE (2024); Google Scholar (2024); PubMed (2024); ScienceDirect (2024); Scopus (2024).

Durchführung

Die Empfehlung von Khan et al. (2004), mindestens zwei Reviewer zur Bewertung hinsichtlich des Ein- oder Ausschlusses von Literatur, einzubeziehen, konnte in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden. Daher kann trotz der gewissenhaften und transparenten Dokumentation der Ein- und Auswahlkriterien, ein subjektiver Einfluss auf die Auswahl nicht ausgeschlossen werden. Somit können Fehler hinsichtlich der Qualität und Vergleichbarkeit der eingeschlossenen Studien aufgetreten sein. Dies kann weiterhin Einfluss auf die Heterogenität der Studienergebnisse gehabt haben.

Datenextraktion

Das Datenextraktionstool *WebPlotDigitizer* von Rohatgi (2022), mit welchem Daten aus Abbildungen extrahiert wurden, zeigte in Untersuchungen eine sehr hohe Genauigkeit (Drevon et al. 2017; Aydin und Yassikaya 2022). Da die Datenpunkte zudem sorgfältig manuell gesetzt wurden, wird von einer hohen Übereinstimmung mit den Originaldaten ausgegangen.

Qualitätsbewertung

Untersuchungen zur **methodischen Heterogenität** quantifizieren, ob Zusammenhänge zwischen den Unterschieden in Design und Qualität und den Variationen der Effekte bestehen (Khan et al. 2004). Erkenntnisse dazu werden auch benötigt, um die Aussagekraft der Schlussfolgerungen zu bewerten. Beruht die Heterogenität auf Unterschieden in der Studienqualität, sollte von einer Metaanalyse abgesehen werden, da das Risiko besteht, dass es durch die übermäßige Gewichtung von Studien, minderwertigen Designs oder schlechter Qualität zu systematischen Verzerrung des Gesamteffektes kommt (Khan et al. 2004). Als mögliche Lösung sollten die Studien nicht nach Größe und Präzision gewichtet werden, sondern entsprechend ihrer Qualität. Khan et al. (2004) führen an, dass zu dem Verfassungszeitpunkt keine anerkannten Standards für eine solche Gewichtung bestanden und daher davon abgesehen werden sollte. Mit dem Instrument zur Evidenzbewertung von Mupepele et al. (2016) bestand jedoch die Möglichkeit einer qualitativen Gewichtung. Eine Qualitätsbewertung der Literatur wurde vorab nach diesem Leitfaden geplant, aber aufgrund des erheblichen, nicht vorhersehbaren Zusatzaufwandes nicht durchgeführt. Die fehlende Gewichtung der Studien nach Evidenzklassen kann damit zu einer Verzerrung der Ergebnisse der Metaanalyse führen. Zudem ist die Heterogenität der Ergebnisse der Metaanalyse

nicht klar auf die Heterogenität der Ergebnisse oder auf Unterschiede in der Studiendesign-Qualität oder andere Faktoren zurückzuführen (Khan et al. 2004; J. Higgins et al. 2023).

Unter allen gefundenen Metaanalysen zum Thema Agroforst, führten nur Mupepele et al. (2021) eine Qualitätsbewertung der Literatur durch. Aufgrund des Aufwandes und möglicherweise aufgrund anderer unbekannter Gründe werden diese in aktuellen Metaanalysen bisher noch sehr selten durchgeführt.

Bias

Selektionsbias ist in der vorliegenden Untersuchung zu erwarten, da nur Studien zu Agroforstflächen ausgewählt wurden, welche eine anliegende Vergleichsfläche aufweisen. Dies ist jedoch unvermeidbar, da Effekte sonst nicht gemessen werden können.

Subanalysen

Ist Heterogenität festzustellen, lassen sich die Populationen, Interventionen bzw. Expositionen und Endpunkte der Studien in Untergruppen stratifizieren und Effektunterschiede zwischen den verschiedenen Untergruppen besser quantifizieren (Khan et al. 2004). Da statistische Verfahren zur Aufdeckung von Heterogenität nur eine begrenzte statistische Power haben, können Zusammenhänge übersehen werden. Khan et al. (2004) weisen vor dem Hintergrund darauf hin, dass die Untersuchungen zu den Ursachen von Heterogenität mit Vorsicht interpretiert werden müssen. Eine hohe Zahl an Untergruppenanalysen führt dazu, dass einige davon fälschlicherweise signifikant werden, welches ein Grundproblem von multiplen Analysen darstellt (Khan et al. 2004). Vor diesem Hintergrund sollten Untersuchungen zur Erklärung von Heterogenität nur für eine geringe Anzahl von Studiencharakteristika eingeplant werden. Vor allem Charakteristika, bei denen der Verdacht für einen Zusammenhang mit der Effektgröße vorliegt (Khan et al. 2004).

Bei der Erstellung der Subgruppenanalysen wurden die Hinweise von Khan et al. (2004) berücksichtigt, indem nur die Variablen in die Subanalysen mit einbezogen wurden, bei denen von einem starken Einfluss auf die Bodenfeuchte ausgegangen wurde.

4.1.2. Fehler bei der Datenaufnahme

Die Durchführung einer Metaanalyse ist nach Khan et al. (2004) nur dann zielführend und aussagekräftig, wenn sich die Studien hinsichtlich ihrer Charakteristika und methodischen Qualität ausreichend ähneln und bezüglich der beobachteten Effekte homogen sind.

In der vorliegenden Arbeit wurden für jede Studie die Werte der volumetrischen Bodenfeuchte über die gesamte erfasste Bodentiefe, als arithmetisches Mittel berechnet. Die erfasste

Bodentiefe variierte jedoch in den eingeschlossenen Studien stark (5 cm bis > 200 cm) (Kapitel **3.3.4**). Die Vergleichbarkeit der Bodenfeuchtwerte zwischen den Studien ist damit beeinträchtigt. Hier wäre eine tiefenbezogene Analyse zielführend gewesen, in welcher die Bodenfeuchtwerte für jeden Tiefenabschnitt separat verglichen worden wären. Dies hätte eine Vergleichbarkeit besser ermöglicht. Das Wassernutzungsmuster von Bäumen in Agroforstsystemen kann im Bodenprofil einen *S-förmigen* Verlauf annehmen, welcher sich mit zunehmendem Alter ausdehnt und eine Tiefe von mehr als 20 m erreichen kann (Wang et al. 2023). Die Bodenwassernutzung ist damit nicht in allen Bodenhorizonten gleich und kann mit dem arithmetischen Mittel über alle Bodenhorizonte zumindest nicht detailliert erfasst werden. Die Ergebnisse von Wang et al. (2023) zeigen, dass durch die Bildung des arithmetischen Mittels über die gesamte Erfassungstiefe, die Effekte abgeschwächt werden können; dies gilt besonders für Studien mit hohen Erfassungstiefen. Um den Einfluss dieses Fehlers auf die Datenauswertung zu überprüfen, wurde die Erfassungstiefe der Studien mit in die ANOVA und die RFE eingeschlossen (Kapitel **3.4.3**).

Die Untersuchungsflächen waren sich in Ihren weiteren Charakteristika ähnlich und damit vergleichbar nach den Ein- und Ausschlusskriterien (Kapitel **2.2.6**). Bei folgenden Charakteristika zeigte sich eine **Heterogenität**: erfasste Bodentiefe, Baumartenvielfalt, Bodentextur sowie die Frequenz, in der alle erhobenen Variablen in den Studien vorlagen und extrahiert werden konnten. Es wurden daher nur die Variablen für eine weitere Analyse ausgewählt, welche auch in ausreichendem Umfang aus den Studien extrahiert werden konnten. Vor diesem Hintergrund werden die eingeschlossenen Studien als vergleichbar angesehen.

4.1.3. Umgang mit fehlenden Daten

In vielen eingeschlossenen Publikationen fehlten die Maßzahlen für die statistische Streuung und Genauigkeit (Standardabweichung (SD) und Standardfehler (SE)). Kuyah et al. (2019), Muchane et al. (2020) und Mupepele et al. (2021) berichten ebenfalls, dass die Standardabweichung in den meisten in der Metaanalyse berücksichtigten Studien nicht angegeben war

. Sind jedoch die p-Werte zu der Effektgröße gegeben und dazu Informationen zu der Stichprobengröße (n) und die Verteilung der Daten, können SD oder SE daraus geschätzt werden (Maritz und Sheather 1998; Hsing et al. 2003; Spicker et al. 2023). Einige Studien, welche keine SD- und SE-Werte enthielten, gaben p-Werte an, jedoch waren dazu oft keine Informationen zur Stichprobengröße angegeben.

Bei vielen Studien, aus welchen die Bodenfeuchtwerte für die vorliegende Arbeit extrahiert wurden, war die Bodenfeuchte nicht Teil der Hauptforschungsfrage, sondern wurde nur als

sekundäre Umweltvariable mit erfasst. Die fehlende Angabe von statistischen Parametern hat hier wahrscheinlich ihren Ursprung.

Zu der durchgeführten Schätzung der fehlenden SE-Werte über den Median der vorhandenen SE-Werte, sowie der Berechnung der Varianz des RR anhand der Näherungsformel aus der Delta-Methode konnten keine Publikationen gefunden werden, welche die Genauigkeit dieser Schätzung bei so wenigen Datenpunkten quantifiziert hatten. Daher stellte die *escalc* Funktion aus dem Paket *metafor* trotz der wenigen SD-Werte und Stichprobenumfänge, welche berücksichtigt wurden, die statistisch robustere Herangehensweise dar (Viechtbauer 2010; 2023).

Die Verwendung von nur wenigen Standardabweichungen (SD-Werten) aus einer kleinen Anzahl von Untersuchungsflächen zur Berechnung der Varianz des relativen Risikos (RR) für eine Metaanalyse bringt folgende Schwächen und Risiken mit sich: Da nur 5 von 98 Untersuchungsflächen SD-Werte aufwiesen, sind diese Werte nicht repräsentativ für die gesamte Stichprobe. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der geschätzten Varianzen sind hiermit stark beeinträchtigt.

Dem gegenüber stehen die Vorteile einer fortschrittlichen statistischen Methode durch die Verwendung des etablierten und gut dokumentierten Pakets *metafor*. Die Funktion *escalc* bietet verschiedene Optionen für die Effektgrößenschätzung und Varianzberechnung und somit eine hohe Anpassungsfähigkeit an die vorhandenen Daten. Zudem beinhaltet die Funktion statistische Korrekturen und Modelle, welche dazu beitragen, die Unsicherheiten in den Schätzungen zu berücksichtigen, insbesondere wenn die Datenbasis begrenzt ist (Viechtbauer 2010; 2023).

Während die Verwendung einer begrenzten Anzahl von SD-Werten zur Schätzung der Varianz des RR für die Metaanalyse bedeutende Schwächen mit sich bringt, bot der Einsatz spezialisierter statistischer Software wie *metafor* Möglichkeiten, diese Herausforderungen konsistent und nachvollziehbar anzugehen.

4.1.4. Einfluss von Methodikfehlern auf die Ergebnisse

Einer der größten **Vorteile** dieser Arbeit liegt in der Anwendung systematischer Leitfäden für Metaanalysen, die auf dem neuesten Stand der Forschung basieren. Dies verbessert nicht nur die Transparenz und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, sondern trägt auch zu einer Reduzierung des Bias und zu einer Erhöhung der Objektivität und Genauigkeit bei. Die Verwendung präziser Tools zur Datenextraktion, wie dem *WebPlotDigitizer*, und die sorgfältige manuelle Setzung von Datenpunkten steigern die Übereinstimmung mit den Originaldaten, was die Qualität der Metaanalyse maßgeblich verbessert. Zudem ermöglicht die Nutzung des etablierten Pakets

metaphor und der Funktion *escalc* auch bei einer begrenzten Datenbasis die Durchführung statistisch robuster Analysen.

Dennoch birgt die Methodik dieser Arbeit auch signifikante Risiken und **Nachteile**. Ein Problem stellt der potenzielle Publikationsbias dar, bedingt durch die Beschränkung auf eine einzige Metadatenbank, was das Risiko erhöht, relevante Studien zu übersehen. Ebenso kann die selektive Auswahl von Studien, die spezifische Vergleichsflächen aufweisen, zu einem Selektionsbias führen. Besonders problematisch erscheint das Auslassen einer Qualitätsbewertung und Gewichtung der Studien nach Evidenzklassen, was zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen kann, da sich die Heterogenität der Studienergebnisse nicht eindeutig auf Qualitätsschwankungen zurückführen lässt. Die Variation in der erfassten Bodentiefe zwischen den Studien stellt ein weiteres Risiko für die Genauigkeit der Ergebnisse dar.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Stärken dieser Metaanalyse in der systematischen Anwendung von Forschungsleitfäden und der Verwendung fortschrittlicher statistischer Methoden liegen. Doch werden die Ergebnisse durch Limitationen in der Datenbasis und Methodik beeinträchtigt. Insbesondere die Problematik des Publikations- und Selektionsbias, die fehlende Qualitätsbewertung der eingeschlossenen Studien und der Umgang mit heterogenen sowie fehlenden Daten sind signifikante Herausforderungen, die die Glaubwürdigkeit und Aussagekraft der Ergebnisse einschränken. Daher wurden diese Limitationen in der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt.

4.2. Ergebnisdiskussion

4.2.1. Zusammenfassung der Ergebnisse

Aus 1866 gefundenen Studien wurden 57 in die quantitative Metaanalyse eingeschlossen. Die 57 Studien beinhalteten zwischen einer und vier kontrollierte Untersuchungsflächen. Insgesamt ergaben sich daraus 98 kontrollierte Untersuchungsflächen, welche aus 26 Ländern und aus sechs Klimazonen stammten (Arid, Humid, Semihumid (R), Semihumid (SW), Vollhumid, Nival). Dabei waren die Studien über die Klimazonen unterschiedlich häufig verteilt und erstreckten sich teilweise auch innerhalb eines Landes über mehrere Klimazonen. Die Klimazone mit der höchsten Anzahl an Untersuchungsflächen war **Semihumid (R)** (26), gefolgt von der Zone **Humid** (25). Darauf folgten die Zonen **Arid** (17) und **Semihumid (SW)** (17). Die Zone **Vollhumid** wies die zweitwenigsten Untersuchungsflächen auf (12), die Zone **Nival** wies nur eine Untersuchungsfläche auf. 98 Untersuchungsflächen verteilten sich auf sechs Agroforstklassen (Alley Cropping, Forest Farming, Forest Pasture (Dehesa), Orchard Meadow, Shaded Perennial und Silvopasture).

Die Agroforsttypen waren in absteigender Häufigkeit vertreten: **Alley Cropping** (39), **Shaded Perennial** (25), **Forest Pasture** (Dehesa) (18), **Silvopasture** (11), **Forest Farming** (3), **Orchard Meadow** (2). Die 98 Kontrollflächentypen waren in absteigender Häufigkeit **Agriculture** (53), **Pasture** (32), **Grassland** (7), **Natural Fallow** (4), **Bare ground** (2).

Aus den 57 Studien wurden 51 Variablen (Klima-, Boden-, Baumvariablen) extrahiert, welche in variabler Frequenz in den Studien vorhanden waren. Der mittlere Jahresniederschlag und die mittlere Jahrestemperatur war den Klimazonen entsprechend verschieden. Auffallend war, dass der mittlere Jahresniederschlag der Zone **Arid** (734 mm) leicht über dem, der Zone **Semihumid** (SW) (631 mm) lag.

Für 70 der 98 Untersuchungsflächen lagen Angaben zum **Baumalter** vor. Das mittlere Baumalter variierte in den Klimazonen wie folgt: **Arid** (9), **Humid** (13,5), **Semihumid** (R) (4,25), **Semihumid** (SW) (4), **Vollhumid** (3). Für die Klimazone **Nival** lagen keine Angaben zum Baumalter vor. Über alle Klimazonen hinweg betrug das mittlere Baumalter 7 Jahre. 64 % aller Untersuchungsflächen wiesen ein Baumalter von unter 10 Jahren auf, 82 % von unter 20 Jahren und 94 % von unter 30 Jahren. Weitere Baumvariablen, welche aus den Studien extrahiert wurden, wurden aus den weiteren Analysen aufgrund von Datenmangel ausgeschlossen (Kapitel 3.3.3). Die **mittlere Bodentiefe** (Median), welche in den Studien untersucht wurde, variierte über die Klimazonen hinweg: **Semihumid** (SW) (100 cm), **Semihumid** (R) (90 cm), **Arid** (90 cm), **Humid** (35 cm), **Vollhumid** (25 cm). Über alle Klimazonen hinweg betrug der Median 40 cm. Die unteren 50 % der Daten, welche eine Erfassungstiefe ≤ 40 cm aufwiesen, zeigten einen Median von 20 cm. Die oberen 50 % der Daten, welche eine Erfassungstiefe von ≥ 50 cm aufwiesen, zeigten einen Median von 100 cm. Weitere Bodenparameter, welche aus den Studien extrahiert wurden, wurden aus den weiteren Analysen aufgrund von Datenmangel ausgeschlossen (Kapitel 3.3.4). Die Dauer des **Untersuchungszeitraums** lag über den gesamten Datensatz, im Mittel bei 10 Monaten (Median) und war für 93 der 98 Untersuchungsflächen angegeben. In den einzelnen Klimazonen variierte der mittlere Untersuchungszeitraum stark: Semihumid (SW) (18), Semihumid (R) (12), Vollhumid (12) Arid (8), Humid (5). Die Dauer des Untersuchungszeitraums zeigte innerhalb der Klimazonen starke Variationen.

Die Analyse ergab für den **volumetrischen Bodenwassergehalt** (%) der Untersuchungsflächen eine Spannweite der Daten von 59,17 %. Der kleinste Wert lag bei 2,83 % und der größte Wert bei 62 %. Für die Kontrollflächen betrug die Spannweite 45,30 %, mit dem kleinsten Wert von 4,70 % und dem größten Wert von 50,00 %. Die Überprüfung der Normalverteilungsannahme des Shapiro-Wilk-Tests und des Q-Q-Plots zeigten, dass keine ideale Normalverteilung vorlag.

Das multivariate Metaanalyse-Modell zur Überprüfung der zweiten Hypothese umfasste alle Untersuchungsflächen, welche Angaben zum Baumalter enthielten (70 Untersuchungsflächen aus 38 Studien). Der geschätzte Gesamteffekt (-0,042) zeigte, dass die Agroforstsysteme einen leichten, nicht signifikanten ($p = 0,246$), negativen Einfluss auf die Bodenfeuchte hatten (Kapitel 3.4.2.). Der Q-Test als Heterogenitätstest zeigte, dass keine signifikante Heterogenität zwischen den Studien bestand. Die Ergebnisse des Σ^2 wiesen jedoch darauf hin, dass nicht alle Unterschiede zwischen den Studien durch Zufälle erklärt werden konnten und dass es eine echte Variabilität in den Effektgrößen zwischen den Studien gab. Die visuelle Bewertung der Forest Plots zeigte ebenfalls keinen Einfluss des Baumalters auf die Bodenfeuchte.

Die Modellselektion über die RFE mittels ANOVA ergab für die betrachteten Variablen Baumalter, **Klima**, Beobachtungsdauer und untersuchte Bodentiefe, dass die Variable Klima am besten geeignet war, die Varianz in den Daten zu erklären. Die Ergebnisse der ANOVA waren signifikant ($p = 0,009$). Zur Überprüfung der **ersten Hypothese** wurde die Modellselektion über die RFE mittels ANOVA für die Variablen Baumalter, **Agroforstsystemtyp**, Beobachtungsdauer und untersuchte Bodentiefe durchgeführt. Im Ergebnis hatte das Modell ohne zusätzliche Prädiktoren den geringsten Informationsverlust. Hiernach konnten die unterschiedlichen Agroforstsystemtypen die Varianz in den Daten nicht erklären.

Die **multivariaten Metaanalyse Modelle** für die **Subgruppen** nach Klimazonen ergaben für die Zone **Arid** einen signifikanten negativen Gesamteffekt ($\ln RR = -0,237$; $p = 0,024$). Es gab nicht signifikante Hinweise auf Heterogenität zwischen den Studien (Q-Test; $p = 0,075$). Die visuelle Interpretation des Forest Plots zeigte keinen Einfluss des Baumalters (Median = 9 Jahre) auf die Bodenfeuchte aber Ausreißer-Werte für die Untersuchungsflächen von Fadl und El Sheik (2010). Die Zone **Humid** zeigte einen nicht signifikanten positiven Gesamteffekt ($\ln RR = 0,077$; $p = 0,099$) und wies keine Heterogenität zwischen den Studien auf (Q-Test; $p = 0,996$). Bei der visuellen Interpretation des Forest Plots waren ab einem Baumalter von 20 Jahren keine negativen Effektgrößen für die Bodenfeuchte mehr sichtbar (Median = 13,5 Jahre). Die Zone **Semihumid (R)** zeigte einen nicht signifikanten Gesamteffekt nahe Null ($\ln RR = 0,001$; $p = 0,98$) und wies keine Heterogenität zwischen den Studien auf ($p = 0,995$). Die visuelle Interpretation des Forest Plots zeigte keine Hinweise auf einen Einfluss des Baumalters (Median = 4,25 Jahre) auf die Bodenfeuchte. Die Zone **Semihumid SW** zeigte einen nur knapp nicht signifikanten negativen Gesamteffekt ($\ln RR = -0,149$; $p = 0,056$) mit nicht signifikanten Hinweisen auf eine geringe Heterogenität zwischen den Studien (Q-Test; $p = 0,634$). Die visuelle Interpretation des Forest Plots zeigte keine Hinweise auf einen Einfluss des Baumalters (Median = 4 Jahre) auf die Bodenfeuchte. Die Zone **Vollhumid** zeigte einen nicht signifikanten positiven Gesamteffekt ($\ln RR = 0,052$; $p = 0,656$) und

wies keine Heterogenität zwischen den Studien auf (Q-Test; $p = 0,979$). Die visuelle Interpretation des Forest Plots zeigte keine Hinweise auf einen Einfluss des Baumalters (Median = 3 Jahre) auf die Bodenfeuchte.

Die Überprüfung auf Publikationsbias mittels Funnel Plot ergab eine asymmetrische Verteilung der Untersuchungsflächen aus den Studien. 96 von 98 Untersuchungsflächen waren linear bei einem SE-Wert von 0,235 verteilt. 8 Untersuchungsflächen lagen außerhalb des Funnel Plots.

4.2.2. Interpretation der Ergebnisse

Variable Baumalter

Der mittlere Jahresniederschlag der Zone **Arid** lag leicht über dem, der Zone **Semihumid-SW**; erwartbar wäre jedoch, dass das Gegenteil der Fall wäre. Die charakteristischen Spannweiten von Umweltvariablen der unterschiedlichen Klimazonen weisen jedoch Überschneidungen auf (Essl und Rabitsch 2013; Schönwiese 2020; Häckel 2021). Die Stichproben der Zonen **Arid** und **Semihumid** (SW) sind zudem gering, daher ist es möglich, dass diese Ergebnisse zufällig sind. Möglich ist jedoch auch, dass die Studien bei der Datenaufnahme teilweise fehlerhaft klassifiziert wurden.

Das mittlere **Baumalter** über den gesamten Datensatz ist mit 7 Jahren niedrig. Das 94 % der Untersuchungsflächen ein Alter von unter 30 Jahren aufweisen zeigt, dass die in die Untersuchung eingeschlossenen Agroforstsysteme vergleichsweise jung sind. Innerhalb der **ersten vier Jahre** nach der Pflanzung konzentrieren sich die Feinwurzeln der Bäume in Agroforstsystemen hauptsächlich in der Oberbodenschicht (0 – 30 cm). Vom **vierten bis zum sechsten Jahr** entwickeln die Bäume vertikale Feinwurzeln, bevor sie beginnen, die tieferen Bodenschichten (1 – 2 m) lateral zu erkunden und damit den Wurzelraum unterhalb der Zwischenkulturen zu nutzen (O'Connor et al. 2023). In den ersten Jahren nach der Pflanzung kommt es daher zur Konkurrenz zwischen Bäumen und Zwischenkulturen (Houx et al. 2013). Den baumalterabhängigen Bodenfeuchteinfluss zeigen auch Untersuchungen aus dem ariden Raum (Rhoades 1995).

Forest Plots

Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass der nicht signifikante, leicht negative Bodenfeuchteinfluss von Agroforstsystemen in der Klimazonen **Semidhumid-SW**, durch das niedrige durchschnittliche Baumalter beeinflusst wird, zudem weist nur eine Untersuchungsfläche ein Alter über vier Jahre auf. Weiterhin wird der negative Gesamteffekt wahrscheinlich durch den Ausreißer der Studie von Pollock et al. (2009b) verzerrt. Für die Klimazone **Semihumid R** wird ebenfalls

das niedrige Baumalter, für den nicht signifikanten Gesamteffekt vermutet. Nur 3 der 18 Untersuchungsflächen wiesen ein Alter von mehr als 7 Jahren auf.

Für die Klimazone **Humid** kann ein Einfluss des Baumalters ab einem Alter von ≥ 20 Jahre vermutet werden, da von da an die Effektgrößen über 8 Untersuchungsflächen nicht mehr negativ sind (**Abb. 20**: Carvalho et al. 2016 bis Mackay-Smith et al. 2022). Hinweise, dass Agroforstsysteme erst ab einem Alter von 20 Jahren ähnliche Wasserkapazitäten wie regionale Wälder aufweisen (Liu et al. 2019) aber tiefere Wurzeln im Vergleich zu Waldbäumen entwickeln können (O'Connor et al. 2023), bestätigen die visuelle Interpretation des Forest Plots. Da 8 von 12 der Untersuchungsflächen mit Baumaltern ≥ 20 Jahre in der Zone Humid lagen, wies diese die höchste Anzahl der ältesten Untersuchungsflächen auf. Die Klimazone **Vollhumid** wies nur vier Untersuchungsflächen auf und das Baumalter betrug in allen 3 Jahre. Ein Einfluss des Baumalters kann hieraus nicht erkennbar werden. Auffallend ist, dass keine der Untersuchungsflächen negative Effektgrößen aufweisen. Im Gegensatz zu allen anderen Klimazonen, wo die Untersuchungsflächen mit solchen Baumaltern fast ausschließlich negative Effektgrößen aufweisen. Dies lässt sich womöglich darauf zurückführen, dass Bodenwasser keine knappe Ressource in dieser Klimaregion ist. Da nur zwei Studien in dieser Klimazone eingeschlossen wurden, sollten diese Interpretationen mit Zurückhaltung bewertet werden.

Khan et al. (2004) messen der nicht-statistischen, visuellen Methode zur Bewertung von Heterogenität ebenso eine sehr hohe Aussagekraft zu und raten daher davon ab, sich ausschließlich auf p-Werte zu verlassen. Die Herausforderung bei der Interpretation der Forest Plots besteht darin, sich der Einschränkungen dieser Methode bewusst zu sein und sie in Verbindung mit anderen statistischen Verfahren zu verwenden, um eine genaue und unvoreingenommene Interpretation der Studienergebnisse zu gewährleisten.

Interpretation des Funnel Plots

Die Interpretation des Funnel Plots wird durch die wenigen vorhandenen, originären Daten für die statistische Streuung erschwert. Der Funnel Plot aus **Abb. 24** lässt eine Interpretation hinsichtlich des Publikationsbias nicht zu und ist dementsprechend mehr oder weniger ohne Aussagekraft. Der Funnel Plot aus **Abb. 25** zeigt das Muster eines *inverted* Funnel Plots (Fox 2021), welche in Metaanalysen der Ökologie besonders häufig beobachtet werden; deren Ursache allerdings noch unbekannt ist. Vor dem Hintergrund, dass auch die SE Werte, welche diesem Funnel Plot zugrunde liegen zu großen Teilen geschätzt wurden (Kapitel **2.5.2**), ist eine Interpretation des Publikationsbias anhand dieses Funnel Plots ebenso nicht belastbar. Da die vorliegende Arbeit dieselbe Datengrundlage verwendet hat wie die Metaanalysen von Kuyah et al. (2019),

Muchane et al. (2020), Mupepele et al. (2021), sowie vergleichbare Anzahlen der berücksichtigten Literatur verwendet wurden und die Metaanalyse zudem systematisch erstellt wurde, kann vermutet werden, dass Publikationsbias vermieden wurde. In der vorliegenden Arbeit kann Publikationsbias jedoch nicht quantifiziert werden.

Eine asymmetrische Verteilung kann auf einen Publikationsbias hinweisen, d.h. dass Studien mit bestimmten Ergebnissen weniger wahrscheinlich veröffentlicht werden. Funnel Plots sind damit hilfreich zur Identifizierung von Publikationsbias, erfassen aber nicht die Qualität der eingeschlossenen Studien (Higgins und Thompson 2002). Weist der Funnel-Plot keine symmetrische, sondern eine asymmetrische Form auf, kann dies ein Hinweis darauf sein, dass zu wenig Studien berücksichtigt wurden. Oft handelt es sich bei den fehlenden Studien um Untersuchungen geringerer Studiengröße in denen andere (kleinere oder größere) Effekte beobachtet wurden als in größeren Studien des Reviews. Die Wahrscheinlichkeit, dass das Fehlen solcher Studien ausschließlich zufallsbedingt ist, schätzen Khan et al. (2004) eher gering ein.

Neben Publikationsbias, als Ursachen für eine asymmetrische Trichterform, sind weitere Biasformen möglich. Häufige Ursachen sind *Location bias*, *English Language Bias*, *Database Bias*, oder *Citation Bias* sowie Bias aufgrund von Mehrfachpublikationen, mangelhafter methodischer Qualität kleinerer Studien oder Heterogenität der Daten (Khan et al. 2004). Unabhängig von der Ursache beeinträchtigt ein asymmetrischer Funnel-Plot laut Khan et al. (2004) das Vertrauen in die Ergebnisse des Reviews.

Anhand statistischer Tests kann abgeschätzt werden, ob die Asymmetrie des Funnel-Plots zufallsbedingt ist. Diese statistischen Tests ergeben jedoch häufig keine einheitlichen Ergebnisse. Daher empfehlen Khan et al. (2004) eine Überinterpretation der statistischen Test zu vermeiden und weisen darauf hin, dass Funnel-Plots lediglich eine Orientierung darstellen und das wahre Ausmaß von Publikationsbias und ähnlichen systematischen Fehlern nie ganz erfasst werden können.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass bei dem *Random Effects -Modell* die kleineren Studien bei der Schätzung des Gesamtgewichts stärker gewichtet werden als bei einem *Fixed Effect -Modell*. Folglich unterliegen Publikationsbias und eine mangelnde Studienqualität dann ebenfalls einer stärkeren Gewichtung, wenn die kleineren Studien davon betroffen sind (Khan et al. 2004).

Ursachen für die Heterogenität der Bodenfeuchte in Agroforstsystemen

Klimazonen unterscheiden sich hinsichtlich wichtiger **Umweltvariablen** von Ökosystemen: Temperatur, Niederschlag, Sonneneinstrahlung (Essl und Rabitsch 2013; Schönwiese 2020; Häckel 2021), Schädlinge und Krankheiten (Essl und Rabitsch 2013) sowie Bodentyp (Zech et al. 2014; Amelung et al. 2018). Die physikalischen Eigenschaften von Böden variieren in den unterschiedlichen Klimazonen mit der Bodentiefe. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Faktoren Bodenfeuchtigkeit, Eindringwiderstand von Wurzeln, Makroporosität und Bodentextur sowie weiterer Faktoren (Blume et al. 2011; Blum 2012; Zech et al. 2014; Amelung et al. 2018; Arévalo-Hernández et al. 2019; Stahr et al. 2020). Dementsprechend sind auch Agroforstsysteme in unterschiedlichen Klimazonen unterschiedlichen Umweltfaktoren verschiedener Stärke ausgesetzt. Eine Gruppierung des Datensatzes nach Klimazonen wird vor diesem Hintergrund als sinnvoll bewertet.

Der **Wasserhaushalt von Agroforstsystemen** ist natürlichen Ökosystemen ähnlicher (Dunin et al. 1999); allerdings erst in späteren **Entwicklungsstadien**. Agroforstwirtschaftsstandorte zeigen zu Beginn der Etablierung der Systeme, aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums der Bäume, ähnliche Bodenfeuchtemuster wie konventionelle landwirtschaftliche Flächen (Landgraf et al. 2022). Natürliche Ökosysteme zeigen im Sommer eine ausgeprägte physiologische Aktivität, um das Überleben der dominanten mehrjährigen Arten sicherzustellen. Bäume verbrauchen mehr Wasser als andere Pflanzen mit kürzerem Wuchs, die unter denselben Umweltbedingungen wachsen. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass **Bäume mehrjährig** sind, eine größere verdunstende Blattoberfläche haben, ein größeres Bodenvolumen zur Feuchtaufnahme nutzen können und Niederschläge besser abfangen (Zomer et al. 2007). **Landwirtschaftliche Systeme** hingegen bestehen hauptsächlich aus determinierten einjährigen Arten und weisen abgekürzte Wasserentnahmephase auf, die mit maximaler Bodenwasserverfügbarkeit während der kühleren Monate zusammenfallen (Dunin et al. 1999). In Monokulturen wird Bodenwasser hauptsächlich aus den oberen Bodenschichten genutzt, während in Agroforstsystemen die Feuchtigkeit des Bodenprofils gleichmäßig genutzt wird (Niether et al. 2017).

Baumarten weisen **artspezifische Nutzungsmuster** des Bodenwassers auf, welche über die verschiedenen Bodenzonen variieren (Everson et al. 2009; Link et al. 2015). In Agroforstsystemen verringerten beispielsweise Eukalyptusbäume die Bodenfeuchte schneller als Weiden (Bosi et al. 2020). Einen Einfluss übt die **Wurzelplastizität** aus, sowie die artspezifische maximale Wurzeltiefe (Dhyani et al. 1990). Diese variiert zwischen unterschiedlichen Baumarten sowie auch innerhalb einer Art. Die Wurzelplastizität ist neben den genetischen Veranlagungen abhängig

von den Bodenverhältnissen. In Agroforstsystemen beeinflussen zudem die Zwischenkulturar-ten in der näheren Umgebung die Wurzelplastizität der Bäume (Isaac et al. 2014). Hierbei gibt es **Artzusammensetzungen** (Bäume und Zwischenkulturen), welche zu einer komplementären Bodenwassernutzung führen (Wu et al. 2017; Lu et al. 2023) und Artzusammensetzungen wel-che zu Konkurrenz führen (Cao et al. 2021; Clermont-Dauphin et al. 2018). Durch die unter-schiedliche Wachstumsgeschwindigkeit von Baumarten, lässt sich eine unterschiedlich schnelle Wurzelentwicklung ableiten (Robinson et al. 2006). Ein **schnelles Wurzelwachstum** führt früher zur Konkurrenz mit der Begleitkultur; führt jedoch auch schneller zum Erschließen tieferer Bo-denschichten. Eine komplementäre Bodenwassernutzung kann so früher eine Konkurrenz ablö-sen, wenn die Baumarten und Zwischenkulturen eine komplementäre Nutzung aufweisen.

Weiterhin konnte für einige Baumarten nachgewiesen werden, dass Bäume eine hohe Anpas-sungsfähigkeit zeigen, indem sie den Schwerpunkt ihrer Wassernutzung zwischen Bodenwasser und Grundwasserquellen variieren können (Lefroy et al. 2001a) und dies jahreszeitenspezifisch (Lefroy et al. 2001b; Link et al. 2015). Von dieser Flexibilität ist jedoch erst ab einem höheren Alter mit entsprechender Wurzeltiefe auszugehen. Diese Erkenntnisse zeigen, dass Agroforst-systeme mit älteren Bäumen andere Einflussfaktoren und Dynamiken des Bodenwasserhaushal-tes aufweisen als jung etablierte Systeme.

Die **Bodenbearbeitung** hat einen Einfluss auf die Bodenfeuchte (López-Díaz et al. 2020). Da un-terschiedliche Kontrollflächentypen eingeschlossen wurden, kann hierdurch eine Variabilität der Ergebnisse entstehen. Der volumetrische **Bodenwassergehalt** in Agroforstsystemen variiert **im Jahresverlauf** für jeweils jede Bodenschicht individuell (Ehret et al. 2018). Der Bodenwassergeh-alt variiert auf Agroforstflächen auch mit der Himmelsrichtung (Ehret et al. 2018). **Windschutz-barrieren** verringern den Bodenwasserverlust (Campi et al. 2009). Je nach Alter und Struktur des Agroforstsystems kommt es jedoch zu unterschiedlich starken Effekten von Windschutzbarrie-ren. Niedrigere **Zersetzungsraten der Laubstreu** führen zu einer geringeren Bodentemperatur und höheren Bodenfeuchte (Badejo et al. 1998). Die Zersetzungsraten sind u.a. artspezifisch (Ba-dejo et al. 1998). Die untersuchten Studien wiesen eine Vielzahl unterschiedlicher Baumarten auf. In Abhängigkeit von dem Baumalter, der Baumdichte, Boden- und Klimabedingungen wird die Zersetzungsraten der Laubstreu variieren. Die Einflüsse der Konkurrenz um den Bodenwas-serhaushalt sind oft komplex.

Dem **Hydraulic Lift** wird eine entscheidende Rolle bei der Erhaltung der Lebensfähigkeit von Wurzeln und der Anpassung an trockene Gebiete beigemessen. Die positiven Effekte des *Hydraulic Lifts* sind durch Untersuchungen belegt. Studien, welche die positiven Einflüsse des

Hydraulic Lift belegen, machen i.d.R. jedoch keine Angaben zum Baumalter. Mit den Kenntnissen über die allgemeine Physiologie der Pflanzen ist jedoch davon auszugehen, dass die Effekte des *Hydraulic Lifts* erst auftreten können, wenn die Pflanze das Bodenvolumen mit ihrem Wurzelsystem entsprechend erschlossen hat. Das Phänomen *Hydraulic Lift* wird neben Faktoren wie Wurzeltiefe und -plastizität noch von weiteren Faktoren, wie dem Vorhandensein von **Mykorrhizapilze** und der **Bodentextur**, beeinflusst. Da Mykorrhizapilze bei der Verteilung des Wassers zwischen den Pflanzen eine wichtige Rolle spielen, kann deren Einfluss nur in Klimazonen stattfinden, in welchen geeignete Klimabedingungen für Mykorrhizapilze herrschen (Alagele et al. 2021). *Hydraulic lift* hat aufgrund des ausgeprägteren Boden-Wurzel-Kontakts, in texturierten und verdichteten Böden eine höhere Relevanz als in grob texturierten Böden und den Untersuchungsflächen (Amelung et al. 2018). Die Böden der Untersuchungsflächen in der **ariden Zone** wiesen fast ausschließlich Sandgehalte von über 70 % auf. Daraus lässt sich schließen, dass der *Hydraulic Lift* in dieser Klimazone nicht so stark ausgeprägt ist wie in anderen Klimazonen. Zudem weisen Bäume in der ariden Zone aufgrund der kargen Wachstumsbedingungen ein relativ reduziertes Wachstum gegenüber Bäumen aus anderen Klimazonen auf, daher ist zu erwarten, dass deren Wurzelsysteme nicht so ausgeprägt sind wie vergleichbare Bäume im selben Alter in anderen Klimazonen. Darin wird einer der Gründe vermutet, warum in der Klimazone Arid auch Bäume mit einem Alter von ≥ 10 Jahren negative Effektgrößen aufweisen. In ariden Zonen kann die umverteilte Wassermenge des *Hydraulic Lifts* bis zu 60 % der täglich transpirierten Wassermenge betragen (Bayala et al. 2008). Das tägliche Transportvolumen eines Baumes durch *Hydraulic Lift* wird mit 102 ± 54 Litern Wasser angegeben (Emerman und Dawson 1996). Das Transportvolumen ist jedoch baumartenspezifisch und dazu davon abhängig, dass im Boden überhaupt genug Bodenwasser vorhanden ist. Sind die Niederschläge zu niedrig und erreichen die tieferen Bodenschichten nicht, kann *Hydraulic Lift* auch nicht auftreten. Hierin liegt zudem die Ursache für den Ausreißer der Klimazone Arid. Die Studien von Fadl und El Sheik (2010) wiesen die niedrigsten Niederschlagswerte der Untersuchung auf (320 mm). Obwohl die Effektgröße negativ war, wird dem Einfluss von Bäumen in diesen Regionen eine hohe Bedeutung beigemessen. In dieser Untersuchung handelte es sich um die Baumart *Acacia senegal*. In Trockengebieten entwickeln viele Baum- und Straucharten, wie beispielsweise Eukalyptus-Arten (*Eucalyptus spp.*), tiefe Wurzelsysteme. Besonders holzige Leguminosen wie *Acacia* und *Prosopis* können Wurzeltiefen von bis zu 20 Metern erreichen, wobei sogar Extremwerte von 50 bis 60 Metern möglich sind (Stone und Kalisz 1991).

Daher wird in der Praxis oft eine **mechanische Trennung der Wurzeln** von Bäumen und Zwischenfrüchten vorgenommen, um so eine Konkurrenz um Wasser zu vermindern (Bayala und

Prieto 2020). Zu den Wurzeln werden **Bäume auch oberirdisch zurückgeschnitten** um den Transpirationssog und damit den Wasserbedarf zu vermindern (Broadhead et al. 2003; Pezzopane et al. 2020). Solche Studien wurden aus der vorliegenden Untersuchung jedoch ausgeschlossen, um eine Verzerrung der Ergebnisse zu vermeiden.

Mit zunehmendem Alter der Bäume trocknen die Feinwurzeln der tiefen Bodenschicht unterhalb der Wurzelzone der Zwischenkulturen aus. Zudem verringern Agroforstsysteme in niederschlagsarmen Zeiten den Bodenwassergehalt (Anderson et al. 2009). Dieser negative Einfluss auf die Bodenfeuchte erhöht jedoch gleichzeitig die Wasserinfiltrationsrate und erhöht zudem die Zunahme des nicht wassergesättigten Bodenvolumens und damit die Fähigkeit des Bodens, Herbst- und Winterniederschläge zu speichern (O'Connor et al. 2023). Die Bodenfeuchte in Agroforstsystemen unterliegt im Jahresverlauf einer hohen Variabilität. Der Bodenwassergehalt in langjährig etablierten Agroforstsystemen, ist bis zu dem Zeitpunkt des Blattaustriebs höher, fällt aber darauffolgend ab und ist dann niedriger als in Monokulturen (Inurreta-Aguirre et al. 2022). Dies zeigt, dass die **Beobachtungsdauer der Untersuchungen** einen Einfluss auf die Ergebnisse haben kann. **Krautige Pflanzen und Sträucher** nutzen hinsichtlich des Bodenwassers meist die oberen 30 cm des Bodens. Ein- und mehrjährige Gräser nutzen hingegen die oberen 40 bis 60 cm des Bodens. **Bäume** hingegen nutzen in höherem Alter weniger die oberen 50 cm und stärker **tiefere Bodenschichten** (Cubera und Moreno 2007; Elena Munoz-Villers et al. 2020). Mit zunehmendem **Baumalter** nimmt zudem der Gehalt an **organischem Material** signifikant zu. Dies kann die Bodenstruktur und -funktion verbessern, einschließlich der Fähigkeit zur Wasserspeicherung und -versorgung von Pflanzen (O'Connor et al. 2023). Alley-Cropping-Systeme haben in der Vegetationszeit einen lateralen Einzugsbereich auf den Bodenwassergehalt von 8 m (Lefroy et al. 2001b). Vergleichbare Entfernungen konnten für andere Agroforstsysteme nachgewiesen werden (Wang et al. 2023).

Hypothesenprüfung

Als **erste Hypothese** wurde angenommen, dass die Agroforstsystemklassen einen unterschiedlich positiven Einfluss auf die Bodenfeuchte ausüben.

Anhand einer RFE mittels ANOVA wurde der Einfluss der unterschiedlichen Agroforstklassen auf die Varianz der Bodenfeuchte überprüft (Kapitel **3.4.3**; **Tab.: 6**). Obwohl der AIC Hinweise darauf gab, dass die Agroforstklassen die Varianz der Daten besser erklärten als die Variablen Baumalter, Beobachtungsdauer und erfasste Bodentiefe, wurde das Modell signifikant besser ohne diese vier Prädiktoren erklärt. Vor dem Hintergrund der hohen Variabilität der Untersuchungsflächen, weisen auch die Agroforstklassen untereinander keine Vergleichbarkeit auf. Welches

auch darauf zurückzuführen ist, dass eine Unterschiedlichkeit der Variable Baumalter zur Beantwortung der zweiten Hypothese gegeben sein musste. Auf der Grundlage dieser Kenntnisse, wird die erste Hypothese abgelehnt.

Als **zweite Hypothese** wurde angenommen, dass unter den zahlreichen Einflussfaktoren welche Agroforstsysteme charakterisieren, der Faktor **Baumalter** von besonderer Relevanz für den Einfluss auf die Bodenfeuchte ist.

Eine Überprüfung des Einflusses anhand eines multivariaten Metaanalyse-Modells ergab keinen Einfluss des Baumalter für den gesamten Datensatz. Die Anwendung dieses Modells auf die jeweiligen Klimazonen zeigte jedoch einen individuellen Effekt der Agroforstsysteme. Das mittlere Baumalter sowie seine Variabilität war in den Klimazonen voneinander verschieden. Die Klimazone Humid, mit dem höchsten mittleren Baumalter, wies ebenso den höchsten Gesamteffekt auf, welcher jedoch nur leicht und zudem nicht signifikant war. Klimazonen mit vergleichbaren mittleren Baumaltern (Semihumid R und Vollhumid) zeigten nahezu einen Nulleffekt. Die Klimazone Arid wies mit dem zweithöchsten mittleren Baumalter, als einzige einen signifikanten negativen Effekt auf. Die Klimazone Semihumid SW zeigte ebenso einen negativen Effekt, welcher jedoch nicht signifikant war. Die visuelle Analyse der Forest Plots zeigte für alle Klimazonen keine deutlich erkennbaren Zusammenhänge. Lediglich in der Klimazone Humid wurde ab dem Alter ≥ 20 Jahren für acht Untersuchungsflächen ein positiver Effekt des Baumalters beobachtet. Diese Einschätzung ist jedoch subjektiv und der einzige Anhaltspunkt, welcher die Hypothese stärkt. Der einzige Einflussfaktor, welcher für den Effekt der Agroforstsysteme auf die Bodenfeuchte statistisch gesichert werden konnte, ist der des Klimas. Vor dem Hintergrund der methodischen Fehler, welche bei der Datenerhebung aufgetreten sind, sowie der vielen fehlenden SE und SD Werte welche geschätzt werden mussten und zuletzt vor dem Hintergrund der fehlenden statistischen Signifikanz, wird die zweite Hypothese abgelehnt.

4.2.3. Limitationen der Arbeit

Die **Pflanzdichte** in Agroforstsystemen übt ebenfalls einen Einfluss auf den Bodenwasserhaushalt aus. Hohe Pflanzdichten können zu Bodentrockenheit führen. Dies gilt auch für semihumide Klimazonen, wo diese zu einem Rückgang der Bodenwasserspeicher und damit zu abnehmenden Transpirationsraten führen (Basant 2022). Dichtere Pflanzreihen führen zu einer geringeren Wasserverfügbarkeit (Everson et al. 2009). Die Baumdichte pro Hektar war nur für 54 von 98 Untersuchungsflächen angegeben. Die geringste Baumdichte war 8 n/ha und die höchste 40.000 n/ha. Damit war eine extreme Spannweite gegeben, welche im Mittel jedoch bei 372 n/ha lag (*Median*). Nur zehn Untersuchungsflächen wiesen Baumdichten von mehr als 1000 n/ha auf und

nur sechs mehr als 10.000 n/ha. Die Untersuchungsflächen wiesen damit eine hohe Heterogenität bei der Baumdichte pro Hektar auf. Die Baumdichten wiesen keine Korrelation mit dem Baumalter auf, sondern unterlagen einer starken Variabilität. Die Heterogenität der Baumdichten erschwert die Vergleichbarkeit der Untersuchungsflächen in dieser Arbeit. Subgruppenanalysen, Regressionsanalysen, Sensitivitätsanalysen oder eine Meta-Regression wären mögliche Forschungsansätze, um den Einfluss der Pflanzdichte auf die Ergebnisse zu überprüfen.

Das Zusammenfassen des **arithmetischen Mittels** des **volumetrischen Bodenwassergehalts** aus verschiedenen Bodentiefen kann zu signifikanten Verzerrungen führen, da die Unterschiede in den Tiefen nicht angemessen berücksichtigt werden. Dies liegt daran, dass die Fähigkeit des Bodens, Wasser zu halten, je nach Bodentyp, Textur und Gehalt an organischer Substanz variiert. In der Regel besitzen Oberböden eine höhere Wasserhaltekapazität als tiefere Schichten. Außerdem sind Wasserverluste durch Verdunstung und Transpiration in den oberen Schichten wesentlich höher als in tieferen Bereichen. Durch die einfache Mittelwertbildung wird der Einfluss der oberflächennahen Schichten über- und der der tieferen Schichten unterbewertet. Diese Verzerrungen können zu einer falschen Einschätzung der tatsächlichen Wasserverfügbarkeit für Pflanzen führen, was wiederum Fehlinterpretationen von Bodendaten und -prozessen nach sich ziehen kann. Es wäre daher sinnvoller gewesen, Wassergehalte der Bodenschichten separat zu analysieren und zu interpretieren. Die durch Mittelwertbildung entstehenden Verzerrungen müssen bei der Interpretation der Bodendaten berücksichtigt werden.

Die **Variablen Baumalter und BHD** korrelierten in dieser Untersuchung nicht miteinander. Studien deuten darauf hin, dass der BHD eines Baumes besser mit der Wurzelentwicklung korreliert als mit dem Baumalter (Ercanli et al. 2015; Gao et al. 2016; Liu et al. 2017; Zhou et al. 2019). Diese Beziehung deutet darauf hin, dass der BHD als zuverlässigerer Indikator für die Größe und Struktur des Wurzelsystems eines Baumes dienen kann und Einblicke in die Stabilität des Baumes und seine Fähigkeit zur Ressourcenbeschaffung (Wasseraufnahme) bietet. Diese Korrelation unterstreicht die Bedeutung der physischen Dimensionen gegenüber dem chronologischen Alter für das Verständnis des Baumwachstums und der ökologischen Wechselwirkungen.

Vor diesem Hintergrund wäre der BHD ein besserer Indikator für den Einfluss auf die Bodenfeuchte gewesen als das Baumalter. Der BHD war jedoch nur für 26 Untersuchungen verfügbar und konnte in die Metaanalyse nicht einbezogen werden. Eine erste deskriptive Betrachtung ergab Hinweise darauf, dass ab einem BHD von 10 cm der Einfluss auf die Bodenfeuchte steigt. Mit zunehmendem BHD nimmt das RR extremere Werte an, positiv wie auch negativ.

4.2.4. Empfehlungen für weiterführende Forschung

Zukünftige Untersuchungen sollten den BHD als Indikator für die Größe und die Struktur des Wurzelsystems berücksichtigen sowie tiefenbezogene Analysen der Bodenfeuchte durchführen. Dies gewährleistet robustere Einflussindikatoren und detailliertere Aussagen zu dem für das Pflanzenwachstum relevanten Bodenwasserhaushalt. Eine Klassifizierung nach Klimazonen oder vergleichbare Klassifizierungen sollten beibehalten werden, um möglichst Untersuchungen mit weitgehend gleichmäßigen Umweltbedingungen zu erfassen. Zudem kann eine Klassifizierung nach Ökozonen oder Biomen zu detaillierteren und aussagekräftigeren Ergebnissen beitragen. Ökoregionen umfassen verschiedene ökologische Merkmale wie Klima, Vegetation, Böden und Landnutzung und ermöglichen so eine differenziertere und detailliertere Analyse der Umweltvariablen, die sich auf agroforstwirtschaftliche Systeme auswirken, im Gegensatz zu Klimazonen, die sich in erster Linie auf das Klima allein konzentrieren (Eldin 1983; Nair 1985; Klinka 2009; Chuchma und Středová 2015; Goudarzian und Yazdani 2015).

Eine nachträgliche Klassifizierung der Studien nach Ökozonen, Biomen oder Ökoregionen kann über die Plattform „*WWF Terrestrial Ecoregions Of The World (Biomes)*“ durchgeführt werden welche durch den WWF® und die Firma Esri® betrieben wird (WWF 2024; Olson et al. 2001). Hierzu müssen die geographischen Lagedaten bekannt sein, diese lagen aber aus allen Studien vor. Eine detailliertere Klassifizierung benötigt aber entsprechend einen ausreichend umfangreichen Datensatz, damit keine statistischen Beschränkungen auftreten. In dieser Untersuchung wurde daher davon abgesehen. Werden diese Voraussetzungen berücksichtigt, so lassen sich robustere Ergebnisse erzielen, als sie in dieser Untersuchung vorliegen.

Landgraf et al. (2022) betonen, dass langfristige Beobachtungen und Untersuchungen notwendig sind, um die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf den Bodenwasserhaushalt besser zu verstehen und nachhaltige Landnutzungsstrategien zu entwickeln.

5. Schlussfolgerungen

Diese Masterarbeit widmete sich der eingehenden Untersuchung des Einflusses von Agroforstsystemen auf die Bodenfeuchte. Durch die systematische Metaanalyse von 57 Studien mit insgesamt 98 kontrollierten Untersuchungsflächen aus unterschiedlichen Klimazonen wurde ein umfassender Überblick über die bestehende Literatur gewonnen. Die zentralen Erkenntnisse dieser Arbeit verdeutlichen die Komplexität der Interaktionen zwischen den Agroforstsystemen und dem Bodenwasserhaushalt.

Die Ergebnisse der Metaanalyse zeigen, dass Agroforstsysteme einen differenzierten Einfluss auf die Bodenfeuchte ausüben, der stark von der jeweiligen Klimazone und den Systemeigenschaften abhängig ist. Obwohl das Baumalter als potenzieller Einflussfaktor untersucht wurde, zeigen die Ergebnisse, dass diese Variable allein nicht determinierend für die Bodenfeuchte ist.

Weiterhin wurde deutlich, dass die Datenlage zu einigen potenziell relevanten Variablen begrenzt ist. Variablen wie die Pflanzdichte, der Brusthöhendurchmesser und die Bodentextur wurden als potenziell wichtige Einflussgrößen identifiziert, die in den betrachteten Studien jedoch nicht durchgängig erfasst wurden. Die durchgeführten Analysen legen nahe, dass eine tiefere und spezifischere Betrachtung dieser Aspekte zu einem differenzierteren Verständnis des Einflusses von Agroforstsystemen auf den Bodenwasserhaushalt führen könnte.

Diese Arbeit hat gezeigt, dass die Effekte von Agroforstsystemen auf die Bodenfeuchte von der jeweiligen Klimazone abhängig sind. Und weiterhin, dass Agroforstsysteme in einigen Klimazonen potenziell zu einer Verringerung der Bodenfeuchte beitragen können, während sie in anderen möglicherweise eine neutrale oder leicht positive Wirkung haben. Besonders die aride Klimazone zeigte einen signifikant negativen Effekt, was die Notwendigkeit einer angepassten Betrachtung und Managementstrategie in unterschiedlichen klimatischen Bedingungen hervorhebt. In anderen Klimazonen, wie etwa in humiden und semihumiden Regionen, variierten die Effekte von neutral bis leicht positiv, wobei die Signifikanz dieser Effekte nicht gegeben war.

Insgesamt leistet diese Masterarbeit einen Beitrag zum Verständnis der Rolle von Agroforstsystemen bezüglich der Bodenfeuchte. Das Ziel dieser Arbeit, eine Antwort auf die Forschungsfrage zu finden, wurde teilweise erreicht. Die Bedeutung einer umfassenden Betrachtung wird hervorgehoben, die über einzelne Faktoren wie das Baumalter hinausgeht und Kenntnis über die Wechselwirkungen zwischen klimatischen Bedingungen, Bodenbeschaffenheit, artspezifischen Eigenschaften der Bäume und Bewirtschaftungspraktiken notwendig macht, um den Einfluss von Agroforstsystemen auf die Bodenfeuchte besser zu verstehen. Zusammenfassend wurde deutlich, dass die Beziehung zwischen Agroforstsystemen und Bodenfeuchte komplex ist, einer hohen Variabilität und Dynamik in Zeit und Raum unterliegt und nicht allein durch das Baumalter oder die Klimazone erklärt werden kann.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Ergebnisse dieser Arbeit eine Grundlage für weitere Forschungen zu dem Einfluss von Agroforstsystemen auf die Bodenfeuchte bieten. Die Erkenntnisse bieten einen Überblick über den Forschungsstand, der bisher oft von der vereinfachenden Annahme ausgegangen ist, dass Agroforstsysteme generell zu einer Verbesserung der Bodenfeuchte beitragen. Die differenzierte Betrachtung in dieser Arbeit unterstreicht die

Notwendigkeit einer kontextabhängigen Bewertung und Planung von Agroforstsystemen, um deren potenzielle Vorteile voll auszuschöpfen und negative Auswirkungen zu minimieren. Sie unterstreicht zudem die Notwendigkeit weiterer Studien, um die identifizierten Einflussfaktoren genauer zu quantifizieren und zu verstehen, wie diese in verschiedenen ökologischen Kontexten interagieren.

5.1.Ausblick: Analogie zum nachhaltigen Waldbau

Die Variabilität von Agroforstsystemen wird möglicherweise verständlicher, wenn die Analogie zum nachhaltigen Waldbau in Deutschland gezogen und dabei die Notwendigkeit eines differenzierten Verständnisses hervorhoben wird. In Deutschland hat die Erkenntnis, dass nicht jeder Wald per se einen positiven Beitrag zur Umwelt leistet, zu einem Umdenken geführt. Fichtenmonokulturen beispielsweise, die anfällig für Schädlinge und Sturm sind und eine geringe Biodiversität aufweisen, werden zunehmend kritisch betrachtet. Diese Einsicht hat den Weg für ein differenzierteres Verständnis von nachhaltiger Forstwirtschaft geebnet, welches standortangepasst ist und regionale Baumarten fördert (Bartsch et al. 2020).

Ähnlich verhält es sich mit Agroforstsystemen. Nicht jedes Agroforstsystem ist per se besser als eine konventionelle Landnutzungsform. Die nachhaltige Etablierung und die Auswahl standortangepasster Baumarten sind entscheidend, damit Agroforstsysteme ihre vollen Vorteile entfalten können, da sie natürlichen Ökosystemen ähnlicher sind als konventionellen Landnutzungsformen.

Wie ein nachhaltig bewirtschafteter Wald, der verschiedene Baumarten und Unterwuchs beherbergt, fördern Agroforstsysteme die Biodiversität durch die Integration von Bäumen und Sträuchern in landwirtschaftliche Nutzflächen. Agroforstsysteme verbessern ähnlich wie nachhaltiger Waldbau die Bodenstruktur und -fruchtbarkeit und verringern die Bodenerosion. Durch ihre Vielfalt bieten Agroforstsysteme eine größere Resilienz gegenüber dem Klimawandel, analog zu einem diversifizierten Wald. Agroforstsysteme bieten diversifizierte Landnutzung und tragen zur Minderung des Klimawandels durch eine erhöhte Kohlenstoffbindung bei.

Die Etablierung von Agroforstsystemen erfordert allerdings Zeit, ähnlich wie die Umstellung auf nachhaltige Forstwirtschaft. Bäume in Agroforstsystemen müssen sich erst etablieren, und die vollen Vorteile werden oft erst nach Jahren, teilweise Jahrzehnten, sichtbar. Dies ist darin begründet, dass Bäume durch ihre Charakteristika einen hohen Einfluss auf die Eigenschaften des Systems haben und sich ihre positiven Auswirkungen jedoch erst mit zunehmendem Alter ausprägen und steigern. Aktuelle Studien untersuchen Agroforstsysteme oft zu einem recht jungen

Zeitpunkt, wo sich die Charakteristika dieser Systeme jedoch noch nicht vollständig ausgebildet haben.

Um die Vorteile von Agroforstsystemen zu verdeutlichen und ein Umdenken in der Landnutzungspolitik zu fördern, könnte es hilfreich sein, politischen Entscheidungsträgern und Praktikern die Parallelen zum nachhaltigen Waldbau und die Notwendigkeit eines differenzierten Verständnisses nahezubringen. Agroforst verbindet den starken Kontrast der unterschiedlichen Zeitskalen von Forst- und Landwirtschaft. Die i.d.R. annuelle der Landwirtschaft und die der Dekaden und Jahrhunderte der Forstwirtschaft. Dieser Faktor spiegelt sich bei der Zurückhaltung hinsichtlich der Umstellung von konventionellen Landwirtschaftsbetrieben auf Agroforstsysteme wider.

Der ökologische und ökonomische Nutzen von Agroforstsystemen gegenüber den ökologischen und ökonomischen Kosten von konventionellen Landnutzungssystemen hat eine breite Evidenz. Anhand derer kann politischen Entscheidern und Praktikern Wissen und Entscheidungssicherheit vermittelt werden, um vor dem Hintergrund des bereits stattfindenden Klimawandels, notwendige Landnutzungsänderungen zu fördern. Die Förderung und Implementierung von Agroforstsystemen sollten als zentrale Strategie für eine zukunftsfähige, ökologisch nachhaltige und resiliente Landwirtschaft angesehen werden.

Literaturverzeichnis

- Ad-hoc-AG Boden. 2005. *Bodenkundliche Kartieranleitung: mit 41 Abbildungen, 103 Tabellen und 31 Listen*. Edited by Herbert Sponagel. 5., Verbesserte und erweiterte Auflage. Stuttgart: In Kommission: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller).
- AGRIS. 2024. "AGRIS - Home." Database. 2024. <https://agris.fao.org/>.
- Aguilar, Argelia. 2023. "Challenging Machine Translation Engines: Some Spanish-English Linguistic Problems Put to the Test." *Cadernos de Tradução* 43 (March): 1–26. <https://doi.org/10.5007/2175-7968.2023.e85397>.
- Alagele, Salah M., Shibu Jose, Stephen H. Anderson, and Ranjith P. Udawatta. 2021. "Hydraulic Lift: Processes, Methods, and Practical Implications for Society." *Agroforestry Systems* 95 (4): 641–57. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00614-w>.
- ALLEA. 2017. *The European Code of Conduct for Research Integrity*. Edited by ALLEA - All European Academies. Revised Edition. Berlin: ALLEA - All European Academies. <http://www.allea.org/wp-content/uploads/2017/03/ALLEA-European-Code-of-Conduct-for-Research-Integrity-2017-1.pdf>.
- Amelung, Wulf, Hans-Peter Blume, Heiner Fleige, Rainer Horn, Ellen Kandeler, Ingrid Kögel-Knabner, Ruben Kretzschmar, Karl Stahr, and Berndt-Michael Wilke. 2018. *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde*. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55871-3>.
- Anderson, Stephen H., Ranjith P. Udawatta, Tshepiso Seobi, and Harold E. Garrett. 2009. "Soil Water Content and Infiltration in Agroforestry Buffer Strips." *Agroforestry Systems* 75 (1): 5–16. <https://doi.org/10.1007/s10457-008-9128-3>.
- Arévalo-Hernández, César Oswaldo, Flavia da Conceição Pinto, José Olímpio de Souza Júnior, Arlicelio de Queiroz Paiva, and Virupax C. Baligar. 2019. "Variability and Correlation of Physical Attributes of Soils Cultivated with Cacao Trees in Two Climate Zones in Southern Bahia, Brazil." *Agroforestry Systems* 93 (3): 793–802. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0176-4>.
- Aydin, Orhan, and Muhammed Yasin Yassikaya. 2022. "Validity and Reliability Analysis of the PlotDigitizer Software Program for Data Extraction from Single-Case Graphs." *Perspectives on Behavior Science* 45 (1): 239–57. <https://doi.org/10.1007/s40614-021-00284-0>.
- Bacquelaine, Françoise. 2022. "DeepL et Google Translate Face à l'ambiguïté Phraséologique." *Journal of Data Mining & Digital Humanities* Towards robotic translation? (December). <https://doi.org/10.46298/jdmdh.9118>.
- Badejo, M. A., T. I. Nathaniel, and G. Tian. 1998. "Abundance of Springtails (Collembola) under Four Agroforestry Tree Species with Contrasting Litter Quality." *Biology and Fertility of Soils* 27 (1): 15–20. <https://doi.org/10.1007/s003740050393>.
- Bakbergenuly, Ilyas, David C. Hoaglin, and Elena Kulinskaya. 2020. "Estimation in Metaanalyses of Response Ratios." *BMC Medical Research Methodology* 20 (1): 263. <https://doi.org/10.1186/s12874-020-01137-1>.
- Bartsch, Norbert, Burghard Lüpke, and Ernst Röhrig. 2020. *Waldbau Auf Ökologischer Grundlage*. 8., Vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. UTB ; 8310 : Forstwissenschaften, Agrarwissenschaften, Ökologie, Biologie. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.
- Basant, Shishir. 2022. *Changes in Ecohydrology Due to Woody Plant Encroachment in Subtropical Savannas*.
- Basche, Andrea D., and Marcia S. DeLonge. 2019. "Comparing Infiltration Rates in Soils Managed with Conventional and Alternative Farming Methods: A Meta-Analysis." *PLOS ONE* 14 (9): e0215702. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215702>.

- Bayala, J., and I. Prieto. 2020. "Water Acquisition, Sharing and Redistribution by Roots: Applications to Agroforestry Systems." *PLANT AND SOIL* 453 (1–2): 17–28. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04173-z>.
- Bayala, Jules, Lee Kheng Heng, Meine van Noordwijk, and Sibiri Jean Ouedraogo. 2008. "Hydraulic Redistribution Study in Two Native Tree Species of Agroforestry Parklands of West African Dry Savanna." *Acta Oecologica* 34 (3): 370–78. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2008.06.010>.
- Beillouin, Damien. 2022. "State of the Art of Meta-Analysis Results Focusing on the Effect of Agroforestry on Ecosystem Services." Conference_item presented at the CIRAD, Résumé, 1 p. Scientific Seminaire Day: Heterogeneity in Agroforestry and Mixed Forest: Impacts on Ecosystem Functioning and Modelling Challenges, Montpellier, December 7. <https://agritrop.cirad.fr/603635/>.
- Beillouin, Damien, Bernhard Schauburger, Ana Bastos, Phillipe Ciais, and David Makowski. 2020. "Impact of Extreme Weather Conditions on European Crop Production in 2018." *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences* 375 (September). <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0510>.
- Bissolli, Peter, Wolfgang Janssen, Markus Ziese, Florian Imbery, Karsten Friedrich, Andreas Paxian, Andrea Kreis, Jan Daßler, Jan Nicolas Breidenbach, and Volker Zins. 2022. "Trockenheit in Europa 2022." Deutscher Wetterdienst, Abteilungen Klimaüberwachung, Agrarmeteorologie, Hydrometeorologie. https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/duerre/20220706_trockenheit_europa_2022.pdf?__blob=publicationfile&v=7.
- Blanca, María J., Rafael Alarcón, and Jaume Arnau. 2017. "Non-Normal Data: Is ANOVA Still a Valid Option?" *Psicothema*, no. 29.4 (November): 552–57. <https://doi.org/10.7334/psicothema2016.383>.
- BLE. 2021. "Agroforstwirtschaft – traditionelle Systeme mit Zukunftspotential." *ökolandbau.de - Das Informationsportal*. September 17, 2021. <https://www.oekolandbau.de/landwirtschaft/pflanze/grundlagen-pflanzenbau/regenerative-landwirtschaft/agroforstsysteme/>.
- Blum, Winfried E. H. 2012. *Bodenkunde in Stichworten*. 7., neu Bearbeitete Auflage. Hirt's Stichwortbücher. Stuttgart: Gebr. Borntraeger.
- Blum, Winfried E. H., Peter Schad, and Stephen Nortcliff. 2018. *Essentials of Soil Science: Soil Formation, Functions, Use and Classification (World Reference Base, WRB)*. Stuttgart: Borntraeger Science Publishers.
- Blume, H.-P., K. Stahr, and Peter Leineweber. 2011. *Bodenkundliches Praktikum — Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte und für Geowissenschaftler*. 3. Berlin/Wien: Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- BMEL. 2019. "Zukunftsstrategie ökologischer Landbau - Impulse für mehr Nachhaltigkeit in Deutschland." Druck und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/ZukunftsstrategieOekologischerLandbau2019.pdf?__blob=publicationfile&v=5.
- bmj. 2020. "Chapter 4. Measurement Error and Bias | The BMJ." *The BMJ | The BMJ: Leading General Medical Journal*. Research. Education. Comment. October 28, 2020. <https://www.bmj.com/about-bmj/resources-readers/publications/epidemiology-uninitiated/4-measurement-error-and-bias>.
- Böhm, Christian, Michael Kanzler, and Dirk Freese. 2014. "Wind Speed Reductions as Influenced by Woody Hedgerows Grown for Biomass in Short Rotation Alley Cropping Systems in Germany." *Agroforestry Systems* 88 (4): 579–91. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9700-y>.
- Bosi, Cristiam, José Ricardo Macedo Pezzopane, and Paulo Cesar Sentelhas. 2020. "Soil Water Availability in a Full Sun Pasture and in a Silvopastoral System with Eucalyptus." *Agroforestry Systems* 94 (2): 429–40. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00402-7>.

- Broadhead, J. S., C. R. Black, and C. K. Ong. 2003. "Tree Leafing Phenology and Crop Productivity in Semi-Arid Agroforestry Systems in Kenya." *Agroforestry Systems* 58 (2): 137–48. <https://doi.org/10.1023/A:1026091921043>.
- Campi, P., A. D. Palumbo, and M. Mastrorilli. 2009. "Effects of Tree Windbreak on Microclimate and Wheat Productivity in a Mediterranean Environment." *European Journal of Agronomy* 30 (3): 220–27. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.10.004>.
- Cao, Quan, Zikui Wang, Xianlong Yang, and Yuying Shen. 2021. "The Effects of Cocksfoot Cover Crop on Soil Water Balance, Evapotranspiration Partitioning, and System Production in an Apple Orchard on the Loess Plateau of China." *Soil and Tillage Research* 205 (January): 104788. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104788>.
- Chalmin, Anja. 2008. "Agroforstsysteme in Deutschland." *Landinfo*, no. 7/2008 (July): 1–7. <https://www.agroforst.uni-freiburg.de/download/Agroforstsysteme%20in%20Deutschland-%20Landinfo.pdf>.
- Chalmin, Anja, Klaus Mastel, Alexander Möndel, Reinhold Vetter, TIB-Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover, Technische Informationsbibliothek (TIB), Heinrich Spiecker, et al. 2009. "Neue Optionen für eine nachhaltige Landnutzung - Schlussbericht des Projektes agroforst." Schlussbericht. Freiburg: Universität Freiburg.
- Choubin, Bahram, Abolfazl Jaafari, Jalal Henareh, Farzaneh Sajedi Hosseini, and Amir Mosavi. 2023. "Averaged Neural Network Integrated with Recursive Feature Elimination for Flood Hazard Assessment." In *2023 IEEE 17th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, 000733–38. <https://doi.org/10.1109/SACI58269.2023.10158640>.
- Chuchma, Filip, and Hana Středová. 2015. "Discrepancy in Climatic Zoning of the Current Soil Productivity Evaluation System." *Contributions to Geophysics and Geodesy* 45 (4): 255–68. <https://doi.org/10.1515/congeo-2015-0023>.
- Ciais, Ph, M. Reichstein, N. Viovy, A. Granier, J. Ogee, V. Allard, M. Aubinet, et al. 2005. "Europe-Wide Reduction in Primary Productivity Caused by the Heat and Drought in 2003." *Nature* 437 (7058): 529–33. <https://doi.org/10.1038/nature03972>.
- Clermont-Dauphin, Cathy, Chaiyanam Dissataporn, Nopmanee Suvannang, Pirach Pongwichian, Jean-luc Maeght, Claude Hammecker, and Christophe Jourdan. 2018. "Intercrops Improve the Drought Resistance of Young Rubber Trees." *Agronomy for Sustainable Development* 38 (6): 1–10. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0537-z>.
- Cochran, William G. 1954. "The Combination of Estimates from Different Experiments." *Biometrics* 10 (1): 101–29. <https://doi.org/10.2307/3001666>.
- Cooper, Harris M., Larry V. Hedges, and Jeffrey C. Valentine, eds. 2009. *The Handbook of Research Synthesis and Meta-Analysis*. 2nd ed. New York: Russell Sage Foundation.
- Corporation for Digital Scholarship. 2023. "Zotero | Your Personal Research Assistant." Cross-Platform. JavaScript. Zotero. Vienna, Virginia 22182 USA: Corporation for Digital Scholarship. <https://www.zotero.org/>.
- Crawley, Michael J. 2013. *The R Book*. Second edition. Chichester: Wiley. <https://opac.sub.uni-goettingen.de/DB=1/SET=2/TTL=11/SHW?FRST=11>.
- Cubera, Elena, and Gerardo Moreno. 2007. "Effect of Single Quercus Ilex Trees upon Spatial and Seasonal Changes in Soil Water Content in Dehesas of Central Western Spain." *Annals of Forest Science* 64 (3): 355–64. <https://doi.org/10.1051/forest:2007012>.
- DeepL SE. 2023. "DeepL Translate – Der Präziseste Übersetzer Der Welt." Cross-Platform. Köln: DeepL SE. <https://www.DeepL.com/translator>.
- DeFAF. 2023. "Laufende Projekte - Übersicht zu aktuellen Projekten des DeFAF." Text.Article. *Agroforst* (blog). 2023. <https://agroforst-info.de/laufende-projekte/>.
- Deutsche Forschungsgemeinschaft. 2022. "Leitlinien zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis." Bonn. https://www.dfg.de/download/pdf/foerderung/rechtliche_rahmenbedingungen/gute_wissenschaftliche_praxis/kodex_gwp.pdf.

- Deutscher Hochschulverband, Allgemeine Fakultätentag, and Die Fakultätentage. 2012. "Gute wissenschaftliche Praxis für das Verfassen wissenschaftlicher Qualifikationsarbeiten." In , 7. Bonn. https://www.uni-frankfurt.de/58205511/DHV_AFT_Gute_wiss_Praxis_Quali_Arbeiten.pdf.
- Dhyani, S. K., P. Narain, and R. K. Singh. 1990. "Studies on Root Distribution of Five Multipurpose Tree Species in Doon Valley, India." *Agroforestry Systems* 12 (2): 149–61. <https://doi.org/10.1007/BF00123470>.
- Drevon, Daniel, Sophie R. Fursa, and Allura L. Malcolm. 2017. "Intercoder Reliability and Validity of WebPlotDigitizer in Extracting Graphed Data." *Behavior Modification* 41 (2): 323–39. <https://doi.org/10.1177/0145445516673998>.
- Dunin, F. X., J. Williams, K. Verburg, and B. A. Keating. 1999. "Can Agricultural Management Emulate Natural Ecosystems in Recharge Control in South Eastern Australia?" *AGROFORESTRY SYSTEMS* 45 (1–3): 343–64. <https://doi.org/10.1023/A:1006271805222>.
- DWD. o.D. "RCP-Szenarien - Die neuen RCP-Szenarien für den 5. IPCC Sachstandsbericht." Text. Deutscher Wetterdienst. o.D. <https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/rcp-szenarien.html>.
- Egger, M., G. Davey Smith, M. Schneider, and C. Minder. 1997. "Bias in Meta-Analysis Detected by a Simple, Graphical Test." *BMJ (Clinical Research Ed.)* 315 (7109): 629–34. <https://doi.org/10.1136/bmj.315.7109.629>.
- Ehret, Miriam, Ruediger Grass, and Michael Wachendorf. 2018. "Productivity at the Tree-Crop Interface of a Young Willow-Grassland Alley Cropping System." *AGROFORESTRY SYSTEMS* 92 (1): 71–83. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0015-z>.
- Eldin, Michel. 1983. "A System of Agroclimatic Zoning to Evaluate Climatic Potential for Crop Production." In *Agroclimate Information For Development*. Routledge.
- Elena Munoz-Villers, Lyssette, Josie Geris, Maria Susana Alvarado-Barrientos, Friso Holwerda, and Todd Dawson. 2020. "Coffee and Shade Trees Show Complementary Use of Soil Water in a Traditional Agroforestry Ecosystem." *HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES* 24 (4): 1649–68. <https://doi.org/10.5194/hess-24-1649-2020>.
- Emerman, S. H., and T. E. Dawson. 1996. "Hydraulic Lift and Its Influence on the Water Content of the Rhizosphere: An Example from Sugar Maple, *Acer Saccharum*." *OECOLOGIA* 108 (2): 273–78. <https://doi.org/10.1007/BF00334651>.
- Ercanli, Ilker, Alkan Gunlu, and Emin Zeki Başkent. 2015. "Mixed Effect Models for Predicting Breast Height Diameter from Stump Diameter of Oriental Beech in Göldağ." *Scientia Agricola* 72 (June): 245–51. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0225>.
- Essl, Franz, and Wolfgang Rabitsch. 2013. *Biodiversität Und Klimawandel: Auswirkungen Und Handlungsoptionen Für Den Naturschutz in Mitteleuropa*. SpringerLink : BücherSpringer eBook Collection. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29692-5>.
- Etienne, M. 1996. *Western European Silvopastoral Systems*. Edited by Michel Étienne. Science Update. Paris: Institut National de la Recherche Agronomique.
- Everson, C. S., T. M. Everson, and W. van Niekerk. 2009. "Soil Water Competition in a Temperate Hedgerow Agroforestry System in South Africa." *Agroforestry Systems* 75 (3): 211–21. <https://doi.org/10.1007/s10457-008-9174-x>.
- FAO. 2017. *The Future of Food and Agriculture : : Trends and Challenges*. Food and Agriculture Organization of the United Nations,. <https://digitallibrary.un.org/record/1311693>.
- Field, Andy P., and Raphael Gillett. 2010. "How to Do a Meta-Analysis." *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology* 63 (3): 665–94. <https://doi.org/10.1348/000711010X502733>.
- Fletcher, David, and Tim Jowett. 2022. "Single-Fit Bootstrapping: A Simple Alternative to the Delta Method." *Methods in Ecology and Evolution* 13 (6): 1358–67. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13848>.

- Foley, Jonathan A., Ruth DeFries, Gregory P. Asner, Carol Barford, Gordon Bonan, Stephen R. Carpenter, F. Stuart Chapin, et al. 2005. "Global Consequences of Land Use." *Science* 309 (5734): 570–74. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>.
- Fox, Jeremy. 2021. "What the Heck Is up with the Many Ecological Metaanalyses That Have Inverted Funnel Plots?" *Dynamic Ecology* (blog). May 17, 2021. <https://dynamicecology.wordpress.com/2021/05/17/what-the-heck-is-up-with-the-many-ecological-metaanalyses-that-have-inverted-funnel-plots/>.
- Freyer, Bernhard. 2016. *Ökologischer Landbau: Grundlagen, Wissensstand und Herausforderungen*. 1st ed. UTB ; 4639 : Agrarwissenschaftutb-studi-e-book. Bern: Haupt Verlag. <http://elibrary.utb.de/doi/book/10.36198/9783838546391>.
- Ganguly, S. S. 2014. "Robust Regression Analysis for Non-Normal Situations under Symmetric Distributions Arising In Medical Research." *Journal of Modern Applied Statistical Methods* 13 (May): 446–62. <https://doi.org/10.56801/10.56801/v13.i.715>.
- Gao, Xuan, Zhandong Li, Hongmei Yu, Zehui Jiang, Chen Wang, Yu Zhang, Lianghua Qi, and Lei Shi. 2016. "Modeling of the Height–Diameter Relationship Using an Allometric Equation Model: A Case Study of Stands of *Phyllostachys Edulis*." *Journal of Forestry Research* 27 (2): 339–47. <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0145-6>.
- Geiger, Flavia, Jan Bengtsson, Frank Berendse, Wolfgang W. Weisser, Mark Emmerson, Manuel B. Morales, Piotr Ceryngier, et al. 2010. "Persistent Negative Effects of Pesticides on Biodiversity and Biological Control Potential on European Farmland." *Basic and Applied Ecology* 11 (2): 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2009.12.001>.
- GEOBASE. 2024. "Engineering Village." Database. 2024. <https://www.engineeringvillage.com/home.url?redir=t>.
- Google Scholar. 2024. "Google Scholar." Database. 2024. <https://scholar.google.com/>.
- Goudarzian, Pardis, and Mohammad Reza Yazdani. 2015. "Climate Diversity in Line with Agroforestry Systems: Studying Technicalities of Agroforestry Systems and Allied Components in Two Diverse Climatic Regions (Warm Climate vs. Cold Climate) (Case Study: Kazeroun & Sepidan in Fars Province, I.R.Iran)." *Desert* 20 (2): 157–66. <https://doi.org/10.22059/jdesert.2015.56479>.
- Gurevitch, Jessica, and Shinichi Nakagawa. 2015. "Research Synthesis Methods in Ecology." In *Ecological Statistics: Contemporary Theory and Application*, edited by Gordon A. Fox, Simoneta Negrete-Yankelevich, and Vinicio J. Sosa, 0. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199672547.003.0010>.
- Häckel, Hans. 2021. *Meteorologie*. 9., Vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Utb-Studi-e-bookUTB ; 1338utb-Studi-e-Book : Geowissenschaften. Stuttgart: utb GmbH. <https://elibrary.utb.de/doi/book/10.36198/9783838555041>.
- Hansen, Christopher, Holger Steinmetz, and Jörn Block. 2022. "How to Conduct a Meta-Analysis in Eight Steps: A Practical Guide." *Management Review Quarterly* 72 (1): 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11301-021-00247-4>.
- Hedges, Larry, Jessica Gurevitch, and Peter Curtis. 1999. "The Meta-Analysis of Response Ratios in Experimental Ecology." *Ecology* 80 (June): 1150–56. <https://doi.org/10.2307/177062>.
- Heißenhuber, Alois, Wolfgang Haber, and Christine Krämer. 2015. *30 Jahre SRU-Sondergutachten - "Umweltprobleme der Landwirtschaft" - Eine Bilanz*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/umweltprobleme-der-landwirtschaft>.
- Hering, Th., A. Biertümpfel, and C. Fürstenau. 2016. "Agroforstsysteme zur Bereicherung intensiv genutzter Agrarräume – erste Erfahrungen aus Thüringen." Vortragsfolien. 5. Forum Agroforstsysteme. Senftenberg: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. <https://agroforst-info.de/wp-content/uploads/2018/10/hering-et-al-2016-agroforst-zur-bereicherung-intensiv-genutzter-Agrarraeume.pdf>.
- Hess, Melinda. 2005. "Robust Inference in Meta-Analysis: An Empirical Comparison of Point and Interval Estimates Using the Standardized Mean Difference and Cliff's Delta,"

- January. https://www.academia.edu/34057162/Robust_Inference_in_Meta_Analysis_An_Empirical_Comparison_of_Point_and_Interval_Estimates_Using_the_Standardized_Mean_Difference_and_Cliffs_Delta.
- Higgins, JPT, J Thomas, J Chandler, M Cumpston, T Li, MJ Page, and VA Welch. 2023. "Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions Version 6.4 (Updated August 2023)." Cochrane. 2023. <https://training.cochrane.org/handbook/current/chapter-i>.
- Higgins, Julian P. T., and Simon G. Thompson. 2002. "Quantifying Heterogeneity in a Meta-Analysis." *Statistics in Medicine* 21 (11): 1539–58. <https://doi.org/10.1002/sim.1186>.
- Houx, J. H., III, R. L. McGraw, H. E. Garrett, R. L. Kallenbach, F. B. Fritsch, and Wendi Rogers. 2013. "Extent of Vegetation-Free Zone Necessary for Silvopasture Establishment of Eastern Black Walnut Seedlings in Tall Fescue." *AGROFORESTRY SYSTEMS* 87 (1): 73–80. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9523-7>.
- Hsing, Tailen, Sanju Attoor, and Edward Dougherty. 2003. "Relation Between Permutation-Test P Values and Classifier Error Estimates." *Machine Learning* 52 (1): 11–30. <https://doi.org/10.1023/A:1023985022691>.
- Hübner, Rico, Christian Böhm, Georg Eysel-Zahl, Wolfram Kudlich, Ernst Kuersten, Norbert Lamersdorf, Christoph Meixner, et al. 2022. "Kohlenstoffzertifizierung in Der Agroforstwirtschaft?! Potentiale, Erfassung Und Handlungsempfehlungen" 100 (August): 1–33.
- Inurreta-Aguirre, Héctor Daniel, Pierre-Éric Lauri, Christian Dupraz, and Marie Gosme. 2022. "Impact of Shade and Tree Root Pruning on Soil Water Content and Crop Yield of Winter Cereals in a Mediterranean Alley Cropping System." *Agroforestry Systems* 96 (4): 747–57. <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00736-9>.
- IPCC. 2014. "AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014 — IPCC." 2014. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.
- . 2022. "Summary for Policymakers." *Climate Change 2022, Assessment Report, Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR6)*: 48. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>.
- Isaac, Marney E., Luke C. N. Anglaaere, Kira Borden, and Stephen Adu-Bredu. 2014. "Intraspecific Root Plasticity in Agroforestry Systems across Edaphic Conditions." *AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT* 185 (March): 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.12.004>.
- ISO. 1993. "ISO 11465:1993(En), Soil Quality — Determination of Dry Matter and Water Content on a Mass Basis — Gravimetric Method." Text. ISO Online Browsing Platform (OBP). 1993. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:11465:ed-1:v1:en>.
- Jacobs, Suzanne R., Heidi Webber, Wiebke Niether, Kathrin Grahmann, Dietmar Luettschwager, Carmen Schwartz, Lutz Breuer, and Sonoko D. Bellingrath-Kimura. 2022. "Modification of the Microclimate and Water Balance through the Integration of Trees into Temperate Cropping Systems." *AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY* 323 (August): 109065. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109065>.
- Jayalath, Kalanka P., Hon Keung Tony Ng, Ananda B. Manage, and Kent E. Riggs. 2017. "Improved Tests for Homogeneity of Variances." *Communications in Statistics - Simulation and Computation* 46 (9): 7423–46. <https://doi.org/10.1080/03610918.2016.1241404>.
- Jose, Shibu. 2009. "Agroforestry for Ecosystem Services and Environmental Benefits: An Overview." *Agroforestry Systems* 76 (May): 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>.
- Kaul, Hans-Peter, Timo Kautz, and Jens Léon. 2022. *Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung*. 5., Vollständig überarbeitete Auflage. utb ; Nr. 2629 : Agrarwissenschaften. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer. <https://elibrary.utb.de/doi/book/10.36198/9783838558554>.
- Kay, Sonja, Carlo Rega, Gerardo Moreno, Michael Herder, Joao Palma, Robert Borek, J. Crous-Duran, et al. 2019. "Agroforestry Creates Carbon Sinks Whilst Enhancing the

- Environment in Agricultural Landscapes in Europe." *Land Use Policy* 83 (February): 581–93. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.02.025>.
- Khan, Khalid S., Regina Kunz, Jos Kleijnen, and Gerd Antes. 2004. *Systematische Übersichten Und Metaanalysen: Ein Handbuch Für Ärzte in Klinik Und Praxis Sowie Experten Im Gesundheitswesen ; Mit 40 Tabellen*. Berlin: Springer.
- Kim, Yoosun Jamie, and Robert A. Cribbie. 2018. "ANOVA and the Variance Homogeneity Assumption: Exploring a Better Gatekeeper." *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology* 71 (1): 1–12. <https://doi.org/10.1111/bmsp.12103>.
- Klinka, Karel. 2009. "Reflections on the Biogeoclimatic Approach to Ecosystem Classification of Forested Landscape," March.
- Köhler, Michael. 2010. *Cacao Agroforestry under Ambient and Reduced Throughfall: Three Water Use Characteristics and Stand Water Budgeting*. Göttingen: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:7-webdoc-2532-9>.
- Konapala, Goutam, Ashok K. Mishra, Yoshihide Wada, and Michael E. Mann. 2020. "Climate Change Will Affect Global Water Availability through Compounding Changes in Seasonal Precipitation and Evaporation." *Nature Communications* 11 (1): 3044. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16757-w>.
- Koricheva, Julia, Jessica Gurevitch, and Kerrie L. Mengersen, eds. 2013. *Handbook of Meta-Analysis in Ecology and Evolution*. Princeton: Princeton University Press. <http://www.jstor.org/stable/10.2307/j.ctt24hq6n>.
- Köstler, Josef Nikolaus, Ernst Brückner, and Hans Bibelriether. 1968. *Die Wurzeln der Waldbäume: Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa ; mit 135 Abbildungen und 20 Tabellen*. Hamburg: Verlag Paul Parey.
- Kubara, Maria, and Katarzyna Kopczewska. 2023. "Akaike Information Criterion in Choosing the Optimal k -Nearest Neighbours of the Spatial Weight Matrix." *Spatial Economic Analysis* 19 (February): 1–19. <https://doi.org/10.1080/17421772.2023.2176539>.
- Kuyah, Shem, Cory W. Whitney, Mattias Jonsson, Gudeta W. Sileshi, Ingrid Öborn, Catherine W. Muthuri, and Eike Luedeling. 2019. "Agroforestry Delivers a Win-Win Solution for Ecosystem Services in Sub-Saharan Africa. A Meta-Analysis." *Agronomy for Sustainable Development* 39 (5): 1–18. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0589-8>.
- Landgraf, Jessica, Dörthe Tetzlaff, Songjun Wu, Jonas Freymüller, and Chris Soulsby. 2022. "Using Stable Water Isotopes to Understand Ecohydrological Partitioning under Contrasting Land Uses in a Drought-Sensitive Rural, Lowland Catchment." *Hydrological Processes* 36 (12): e14779. <https://doi.org/10.1002/hyp.14779>.
- Lefroy, E. C., J. S. Pate, and R. J. Stirzaker. 2001. "Growth, Water Use Efficiency, and Adaptive Features of the Tree Legume Tagasaste (*Chamaecytisus Proliferus* Link.) on Deep Sands in South-Western Australia." *Australian Journal of Agricultural Research* 52 (2): 221–34. <https://doi.org/10.1071/ar00036>.
- Lefroy, E. C., R. J. Stirzaker, and J. S. Pate. 2001. "The Influence of Tagasaste (*Chamaecytisus Proliferus* Link.) Trees on the Water Balance of an Alley Cropping System on Deep Sand in South-Western Australia." *Australian Journal of Agricultural Research* 52 (2): 235–46. <https://doi.org/10.1071/ar00035>.
- Lehmann, Johannes, Inka Peter, Claudia Steglich, Gerhard Gebauer, Bernd Huwe, and Wolfgang Zech. 1998. "Below-Ground Interactions in Dryland Agroforestry." *Forest Ecology and Management* 111 (2): 157–69. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00322-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00322-3).
- Leyer, Ilona, and Karsten Wesche. 2007. *Multivariate Statistik in Der Ökologie: Eine Einführung*. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer.
- Link, Candice M., Naresh V. Thevathasan, Andrew M. Gordon, and Marney E. Isaac. 2015. "Determining Tree Water Acquisition Zones with Stable Isotopes in a Temperate Tree-Based Intercropping System." *Agroforestry Systems* 89 (4): 611–20. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9795-9>.

- Liu, Chang-An, Yu Nie, Xin Rao, Jian-Wei Tanga, and Kadambot H. M. Siddique. 2019. "The Effects of Introducing *Flemingia Macrophylla* to Rubber Plantations on Soil Water Content and Exchangeable Cations." *CATENA* 172 (January): 480–87. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.038>.
- Liu, Mu, Zhongke Feng, Zhixiang Zhang, Chenghui Ma, Mingming Wang, Bo-ling Lian, Renjie Sun, and Li Zhang. 2017. "Development and Evaluation of Height Diameter at Breast Models for Native Chinese *Metasequoia*." *PLOS ONE* 12 (8): e0182170. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182170>.
- López-Díaz, M. Lourdes, Rafael Benítez, Víctor Rolo, and Gerardo Moreno. 2020. "Managing High Quality Timber Plantations as Silvopastoral Systems: Tree Growth, Soil Water Dynamics and Nitrate Leaching Risk." *New Forests* 51 (6): 985–1002. <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09770-w>.
- Lu, Enfu, Bin Yang, Wenjie Liu, and Xiai Zhu. 2023. "Herbs Perform Better than Woody Plants at Improving Soil Hydrological Properties in Rubber Agroforestry Systems." *AGROFORESTRY SYSTEMS* 97 (8): 1391–1404. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00862-y>.
- Lundgren, B.O., and J.B. Raintree. 1983. "Sustained Agroforestry." *Nestel, B. (Ed.). Agricultural Research for Development: Potentials and Challenges in Asia*, ISNAR, The Hague, The Netherlands, , 37–49. https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNABC621.pdf.
- Malézieux, Eric, Damien Beillouin, and David Makowski. 2022. "Feeding the World Better: Crop Diversification to Build Sustainable Food Systems." *Perspective*, January, 1–4. <https://doi.org/10.19182/perspective/36932>.
- Margesin, Rosa, and Franz Schinner, eds. 2005. *Manual for Soil Analysis: Monitoring and Assessing Soil Bioremediation*. Soil Biology. - Berlin : Springer, 2004- ; ZDB-ID: 2151755-1 5. Berlin: Springer.
- Maritz, J. S., and J. S. Sheather. 1998. "A General Method for Estimating Standard Errors." *Journal of Nonparametric Statistics* 9 (2): 37–43. <https://doi.org/10.1080/10485259808832739>.
- Maurer, Indre. 2016. "Empfehlungen für Studierende zur Anfertigung wissenschaftlicher Arbeiten." Göttingen: Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät | Professur für Organisation und Unternehmensentwicklung | Georg-August-Universität Göttingen. https://www.uni-goettingen.de/de/document/download/73e8fef3b28967b13eb812462620fdb9.pdf/Empfehlungen_Wiss_Arbeiten_072016.pdf.
- Meinert, Torben, Andreas Becker, Peter Bissolli, Jan Daßler, Jan Nicolas Breidenbach, and Markus Ziese. 2019. "Ursachen und Folgen der Trockenheit in Deutschland und Europa ab Juni 2019." Deutscher Wetterdienst, Abteilungen Klimaüberwachung, Agrar- und Hydrometeorologie. https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/duerre/20190712_trockenheit_juni_juli_2019.pdf?__blob=publicationFile&v=1.
- Meinert, Torben, Cathleen Frühauf, Bianca Plückhahn, and Andreas Brömser. 2022. "Die Trockenheit in Deutschland im Sommer 2022 aus agrarmeteorologischer Sicht." Deutscher Wetterdienst, Abteilung Agrarmeteorologie. https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/duerre/20220811_trockenheit_sommer_2022.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- Meinert, Torben, and Corina Schube. 2018. "Die Trockenheit in Deutschland 2018 aus agrarmeteorologischer Sicht." Deutscher Wetterdienst, Abteilung Agrarmeteorologie. https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/duerre/20180705_trockenheit_in_deutschland_2018.pdf?__blob=publicationFile&v=5.
- Microsoft. 2023. "Microsoft Excel Für Office 365 MSO." Windows. Microsoft 365. Microsoft. <https://www.microsoft.com/de-de/microsoft-365/excel>.
- Muchane, Mary N., Gudeta W. Sileshi, Sofia Gripenberg, Mattias Jonsson, Lorena Pumariño, and Edmundo Barrios. 2020. "Agroforestry Boosts Soil Health in the Humid and Sub-Humid

- Tropics: A Meta-Analysis." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 295 (June): 106899. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106899>.
- Mupepele, Anne-Christine, Matteo Keller, and Carsten F. Dormann. 2021. "European Agroforestry Has No Unequivocal Effect on Biodiversity: A Time-Cumulative Meta-Analysis." *BMC Ecology and Evolution* 21 (1): 193. <https://doi.org/10.1186/s12862-021-01911-9>.
- Mupepele, Anne-Christine, Jessica C. Walsh, William J. Sutherland, and Carsten F. Dormann. 2016. "An Evidence Assessment Tool for Ecosystem Services and Conservation Studies." *Ecological Applications* 26 (5): 1295–1301. <https://doi.org/10.1890/15-0595>.
- Musongora, Muyisa, Nancy Karanja, Wangai Kimenju, and Solomon Kamau. 2023. "Spatio-Temporal Change of Selected Soil Physico-Chemical Properties in Grevillea-Banana Agroforestry Systems." *Heliyon* 9 (5): e16121. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16121>.
- Nair, P. K. R. 1985. "Classification of Agroforestry Systems." *Agroforestry Systems* 3 (2): 97–128. <https://doi.org/10.1007/BF00122638>.
- Nair, P. K. Ramachandran. 1993. *An Introduction to Agroforestry*. Dordrecht [u.a.]: Kluwer Acad. Publ.
- Nair, P. K. Ramachandran, and Dennis Garrity. 2012. *Agroforestry - the Future of Global Land Use*. Advances in Agroforestry. - [Dordrecht] : Springer, 2005- ; ZDB-ID: 24533749 9. Dordrecht [u.a.]: Springer. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-4676-3>.
- Nair, P. K. Ramachandran, B. Mohan Kumar, and Vimala D. Nair. 2021. "Classification of Agroforestry Systems." In *An Introduction to Agroforestry: Four Decades of Scientific Developments*, edited by P. K. Ramachandran Nair, B. Mohan Kumar, and Vimala D. Nair, 29–44. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75358-0_3.
- Nakagawa, Shinichi, Malgorzata Lagisz, Michael D. Jennions, Julia Koricheva, Daniel W. A. Noble, Timothy H. Parker, Alfredo Sánchez-Tójar, Yefeng Yang, and Rose E. O’Dea. 2022. "Methods for Testing Publication Bias in Ecological and Evolutionary Metaanalyses." *Methods in Ecology and Evolution* 13 (1): 4–21. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13724>.
- Nakagawa, Shinichi, Daniel W. A. Noble, Malgorzata Lagisz, Rebecca Spake, Wolfgang Viechtbauer, and Alistair M. Senior. 2023. "A Robust and Readily Implementable Method for the Meta-Analysis of Response Ratios with and without Missing Standard Deviations." *Ecology Letters* 26 (2): 232–44. <https://doi.org/10.1111/ele.14144>.
- Nakagawa, Shinichi, and Eduardo S A Santos. 2012. "Methodological Issues and Advances in Biological Meta-Analysis." *Evolutionary Ecology* 26 (5): 1253–74. <https://doi.org/10.1007/s10682-012-9555-5>.
- Ndoli, Alain, Frederic Baudron, Antonius G. T. Schut, Athanase Mukuralinda, and Ken E. Giller. 2017. "Disentangling the Positive and Negative Effects of Trees on Maize Performance in Smallholdings of Northern Rwanda." *FIELD CROPS RESEARCH* 213 (November): 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.07.020>.
- Nerlich, Kristin, Simone Graeff, and Wilhelm Claupein. 2012. "Agroforestry in Europe: A Review of the Disappearance of Traditional Systems and Development of Modern Agroforestry Practices, with Emphasis on Experiences in Germany." *Agroforestry Systems* 87 (April). <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9560-2>.
- Nichol, Craig, Roger Beckie, and Leslie Smith. 2002. "Evaluation of Uncoated and Coated Time Domain Reflectometry Probes for High Electrical Conductivity Systems." *Soil Science Society of America Journal* - SSSAJ 66 (September). <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1454>.
- Niether, Wiebke, Ulf Schneidewind, Laura Armengot, Noah Adamtey, Monika Schneider, and Gerhard Gerold. 2017. "Spatial-Temporal Soil Moisture Dynamics under Different Cocoa Production Systems." *CATENA* 158 (November): 340–49. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.011>.
- Noorduijn, S. L., K. R. J. Smettem, R. Vogwill, and A. Ghadouani. 2009. "Relative Impacts of Key Drivers on the Response of the Water Table to a Major Alley Farming Experiment."

- Norden, Richard van. 2014. "Global Scientific Output Doubles Every Nine Years." Text. Nature.Com Newsblog. May 7, 2014. <https://blogs.nature.com/news/2014/05/global-scientific-output-doubles-every-nine-years.html>.
- NSUBG. o.D.a. "DBIS." Text. Datenbank-Infosystem (DBIS). o.D. https://dbis.ur.de/dbinfo/detail.php?bib_id=subgo&colors=&ocolors=&lett=f&tid=0&titel_id=3366.
- . o.D.b. "GöDiscovery." Text. SUB - GöDiscovery. o.D. <https://www.sub.uni-goettingen.de/lernen-lehren/wissenschaftlich-arbeiten-tools-und-techniken/literaturfinden/uebersicht-kataloge-und-datenbanken/goediscovery/>.
- Nunes, Célia, Manuela M. Oliveira, and João T. Mexia. 2013. "Application Domains for the Delta Method." *Statistics* 47 (2): 317–28. <https://doi.org/10.1080/02331888.2011.605892>.
- O'Connor, Claire, Bernarhd Zeller, Caroline Choma, Francois Delbende, Ali Siah, Christophe Waterlot, and Kasaina Sitraka Andrianarisoa. 2023. "Trees in Temperate Alley-Cropping Systems Develop Deep Fine Roots 5 Years after Plantation: What Are the Consequences on Soil Resources?" *AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT* 345 (April). <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108339>.
- Olson, David, Eric Dinerstein, Eric Wikramanayake, Neil Burgess, George Powell, Emma Underwood, Jennifer D'amico, et al. 2001. "Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth." *BioScience* 51 (November): 933–38. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:TEOTWA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2).
- Ong, C. K., J. E. Corlett, R. P. Singh, and C. R. Black. 1991. "Above and below Ground Interactions in Agroforestry Systems." *Forest Ecology and Management, Agroforestry: Principles and Practice*, 45 (1): 45–57. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(91\)90205-A](https://doi.org/10.1016/0378-1127(91)90205-A).
- OPENGREY. 2023. "OPENGREY.EU - Grey Literature Database -." Text. OpenGrey. 2023. <https://opengrey.eu/>.
- Page, Matthew J., Joanne E. McKenzie, Patrick M. Bossuyt, Isabelle Boutron, Tammy C. Hoffmann, Cynthia D. Mulrow, Larissa Shamseer, et al. 2021. "The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews." *BMJ* 372 (March): n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.
- Page, Matthew J, David Moher, Patrick M Bossuyt, Isabelle Boutron, Tammy C Hoffmann, Cynthia D Mulrow, Larissa Shamseer, et al. 2021. "PRISMA 2020 Explanation and Elaboration: Updated Guidance and Exemplars for Reporting Systematic Reviews." *BMJ*, March, n160. <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>.
- Palma, Joao, A.R. Graves, R.G.H. Bunce, Paul Burgess, Riccardo de filippi, Karel Keesman, Keulen, et al. 2003. "Modelling Environmental Benefits of Silvoarable Agroforestry in Europe." *Changing European Farming Systems for a Better Future; New Visions for Rural Areas*, January.
- Parolo, Pietro Della Briotta, Raj Kumar Pan, Rumi Ghosh, Bernardo A. Huberman, Kimmo Kaski, and Santo Fortunato. 2015. "Attention Decay in Science." *Journal of Informetrics* 9 (4): 734–45. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2015.07.006>.
- Pavlidis, George, and Vassilios A. Tsihrintzis. 2018. "Environmental Benefits and Control of Pollution to Surface Water and Groundwater by Agroforestry Systems: A Review." *Water Resources Management* 32 (1): 1–29. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1805-4>.
- Pent, Gabriel J. 2020. "Over-Yielding in Temperate Silvopastures: A Meta-Analysis." *Agroforestry Systems* 94 (5): 1741–58. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00494-6>.
- Petzold, Rainer, David Butler Manning, Norbert Feldwisch, Thomas Glaser, Peter Schmidt, Maik Denner, and Karl-Heinz Feger. 2013. "Linking Biomass Production in Short Rotation Coppice with Soil Protection and Nature Conservation." *iForest - Biogeosciences and Forestry* 7 (November). <https://doi.org/10.3832/ifer1168-007>.
- Pezzopane, Jose Ricardo Macedo, Willian Lucas Bonani, Cristiam Bosi, Eduardo Lopes Fernandes da Rocha, Alberto Carlos de Campos Bernardi, Patricia Perondi Anchoa Oliveira, and

- Andre de Faria Pedroso. 2020. "Reducing Competition in a Crop-Livestock-Forest Integrated System by Thinning Eucalyptus Trees." *EXPERIMENTAL AGRICULTURE* 56 (4): 574–86. <https://doi.org/10.1017/S0014479720000162>.
- Pinheiro, José, Douglas Bates, Saikat DebRoy, Deepayan Sarkar, EISPACK authors, Siem Heisterkamp, Bert Van Willigen, and Johannes Ranke. 2023. "Linear and Nonlinear Mixed Effects Models." <https://cran.r-project.org/web/packages/nlme/index.html>.
- Posit Software PBC. 2023. "RStudio." Cross-Platform. C++. RStudio. Posit PBC. <https://posit.co/products/open-source/rstudio/>.
- PubMed. 2024. "PubMed." PubMed. 2024. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>.
- Puhani, Josef. 2020. *Statistik: Einführung Mit Praktischen Beispielen*. 13., erweiterte und überarbeitete Auflage. LehrbuchSpringer eBook Collection. Wiesbaden: Springer Gabler. <http://doi.org/10.1007/978-3-658-28955-3>.
- Pumariño, Lorena, Gudeta Weldesemayat Sileshi, Sofia Gripenberg, Riikka Kaartinen, Edmundo Barrios, Mary Nyawira Muchane, Charles Midega, and Mattias Jonsson. 2015. "Effects of Agroforestry on Pest, Disease and Weed Control: A Meta-Analysis." *Basic and Applied Ecology* 16 (7): 573–82. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2015.08.006>.
- R Core-Team (CRAN). 2023. "The Comprehensive R Archive Network." Cross-Platform. S, Scheme. R. R Foundation. <https://cran.r-project.org/>.
- Rautenberg, Wolfgang. 2002. *Einführung in die Mathematische Logik*. 2., verbesserte und erweiterte Auflage. Life Science and Basic Disciplines. Wiesbaden: Vieweg Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-91518-4>.
- Reeg, Tatjana, M. Brix, Manuel Oelke, and Werner Konold. 2009. *Baumlandschaften – Nutzen und Ästhetik von Bäumen in der offenen Landschaft*. 1. Auflage. Ostfildern: Jan Thorbecke Verlag.
- Remick, Karen. 2012. "Metadata Database Design as an Aid to Scientific Discovery." In *2012 IEEE International Professional Communication Conference*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/IPCC.2012.6408598>.
- Rhoades, Charles. 1995. "Seasonal Pattern of Nitrogen Mineralization and Soil Moisture beneath *Faidherbia Albida* (Syn *Acacia Albida*) in Central Malawi." *Agroforestry Systems* 29 (February): 133–45. <https://doi.org/10.1007/BF00704882>.
- Rizzuti, Sergio, and Luigi De Napoli. 2020. "ANOVA Applied to the Taguchi Method: A New Interpretation." In *Design Tools and Methods in Industrial Engineering*, edited by Caterina Rizzi, Angelo Oreste Andrisano, Francesco Leali, Francesco Gherardini, Fabio Pini, and Alberto Vergnano, 342–51. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31154-4_29.
- Robinson, N., R. J. Harper, and K. R. J. Smettem. 2006. "Soil Water Depletion by Eucalyptus Spp. Integrated into Dryland Agricultural Systems." *Plant and Soil* 286 (1): 141–51. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9032-4>.
- Rockström, Johan, Will Steffen, Kevin Noone, Åsa Persson, F. Stuart Chapin, Eric F. Lambin, Timothy M. Lenton, et al. 2009. "A Safe Operating Space for Humanity." *Nature* 461 (7263): 472–75. <https://doi.org/10.1038/461472a>.
- Rohatgi, Ankit. 2022. "WebPlotDigitizer." Pacifica, California, USA. <https://automeris.io/WebPlotDigitizer/citation.html>.
- Rosenbaum, U., Heye Bogena, Johan Huisman, Jan Vrba, and Harry Vereecken. 2011. "Correction of Temperature and Electrical Conductivity Effects on Dielectric Permittivity Measurements with ECH2O Sensors." *Vadose Zone Journal* 10 (May): 582–93. <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0083>.
- Rubia, José Moral-De La. 2023. "Proposal and Pilot Study: A Generalization of the W or W' Statistic for Multivariate Normality." *Open Journal of Statistics* 13 (1): 119–69. <https://doi.org/10.4236/ojs.2023.131008>.

- Schmider, Emanuel, Matthias Ziegler, Erik Danay, Luzi Beyer, and Markus Bühner. 2010. "Is It Really Robust?" *Methodology* 6 (4): 147–51. <https://doi.org/10.1027/1614-2241/a000016>.
- Schmucker, C., J. J. Meerpohl, and A. Blümle. 2020. "Bias in kontrollierten Studien." *HNO* 68 (4): 291–300. <https://doi.org/10.1007/s00106-020-00835-y>.
- Schönwiese, Christian-Dietrich. 2020. *Klimatologie: Grundlagen, Entwicklungen und Perspektiven*. 5., Überarbeitete und aktualisierte Auflage. UTB ; 1793utb-studi-e-book. Stuttgart: UTB GmbH. <http://elibrary.utb.de/doi/book/10.36198/9783838553870>.
- Schroth, Götz. 1998. "A Review of Belowground Interactions in Agroforestry, Focusing on Mechanisms and Management Options." *Agroforestry Systems* 43 (September): 5–34. <https://doi.org/10.1023/A:1026443018920>.
- Schumann, Frank. 2006. *Agroforstwirtschaft auf dem Berliner Barnim – Untersuchung, Planungs- und Gestaltungsvorschläge*. Berlin/Hamburg. <https://digital.zlb.de/viewer/metadata/33348832/1/>.
- Scialabba, Nadia, Adrian Muller, Christian Schader, Uta schmidt, Patrizia Schwegler, Daniel Fujiwara, and Yasser Ghoreishi. 2014. *Food Wastage Footprint: Full-Cost Accounting (Final Report)*. Edited by FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/i3991e/i3991e.pdf>.
- ScienceDirect. 2024. "ScienceDirect.Com | Science, Health and Medical Journals, Full Text Articles and Books." Database. 2024. <https://www.sciencedirect.com/>.
- Scopus. 2024. "Scopus Preview - Scopus - Welcome to Scopus." Database. 2024. <https://www.scopus.com/>.
- Seobi, Tshepiso, S. H. Anderson, R. P. Udawatta, and C. J. Gantzer. 2005. "Influence of Grass and Agroforestry Buffer Strips on Soil Hydraulic Properties for an Albaqualf." *Soil Science Society of America Journal* 69 (3): 893–901. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0280>.
- Shi, Lingling, Wenting Feng, Jianchu Xu, and Yakov Kuzyakov. 2018. "Agroforestry Systems: Meta-Analysis of Soil Carbon Stocks, Sequestration Processes, and Future Potentials." *Land Degradation & Development* 29 (11): 3886–97. <https://doi.org/10.1002/ldr.3136>.
- Sida, Tesfaye Shiferaw, Frédéric Baudron, Haekoo Kim, and Ken E. Giller. 2018. "Climate-Smart Agroforestry: Faidherbia Albida Trees Buffer Wheat against Climatic Extremes in the Central Rift Valley of Ethiopia." *Agricultural and Forest Meteorology* 248 (January): 339–47. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.10.013>.
- Siriri, D., J. Wilson, R. Coe, M. M. Tenywa, M. A. Bekunda, C. K. Ong, and C. R. Black. 2013. "Trees Improve Water Storage and Reduce Soil Evaporation in Agroforestry Systems on Bench Terraces in SW Uganda." *Agroforestry Systems* 87 (1): 45–58. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9520-x>.
- Somarriba, Eduardo. 1992. "Revisiting the Past: An Essay on Agroforestry Definition." *Agroforestry Systems* 19 (September): 233–40. <https://doi.org/10.1007/BF00118781>.
- Spicker, Dylan, Michael P. Wallace, and Grace Y. Yi. 2023. "Nonparametric Simulation Extrapolation for Measurement-Error Models." *Canadian Journal of Statistics* n/a (n/a). <https://doi.org/10.1002/cjs.11777>.
- Spiecker, Heinrich. 2009. *Neue Optionen Für Eine Nachhaltige Landnutzung: Schlussbericht Des Projektes Agroforst ; Projektlaufzeit April 2005 Bis September 2008*. Freiburg.
- Stadler-Kaulich, Noemi. 2021. *Dynamischer Agroforst: Fruchtbarer Boden, Gesunde Umwelt, Reiche Ernte*. München: oekom verlag.
- Stahr, Karl, Ellen Kandeler, Ludger Herrmann, and Thilo Streck. 2020. *Bodenkunde Und Standortlehre*. 4., Vollständig überarbeitete Auflage. UTB ; 2967utb-Studi-e-Book. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer. <https://elibrary.utb.de/doi/book/10.36198/9783838553450>.
- Stoate, Chris, Andrés Báldi, Pedro Beja, Nigel Boatman, Irina Herzon, Anne Doorn, Geert R. Snoo, Laszlo Rakosy, and C Ramwell. 2009. "Ecological Impacts of Early 21st Century Agricultural Change in Europe—A Review." *Journal of Environmental Management* 91 (September): 22–46. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.07.005>.

- Stone, E. L., and P. J. Kalisz. 1991. "On the Maximum Extent of Tree Roots." *Forest Ecology and Management* 46 (1): 59–102. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(91\)90245-Q](https://doi.org/10.1016/0378-1127(91)90245-Q).
- Sutherland, William J., David Spiegelhalter, and Mark Burgman. 2013. "Policy: Twenty Tips for Interpreting Scientific Claims." *Nature* 503 (7476): 335–37. <https://doi.org/10.1038/503335a>.
- Takakusagi, Yosuke, Takahiro Oike, Katsuyuki Shirai, Hiro Sato, Kio Kano, Satoshi Shima, Keisuke Tsuchida, et al. 2021. "Validation of the Reliability of Machine Translation for a Medical Article From Japanese to English Using DeepL Translator." *Cureus* 13 (9): e17778. <https://doi.org/10.7759/cureus.17778>.
- Thompson, Michael. 2015. "Is Your 'Homogeneity Test' Really Useful?" *Analytical Methods* 7 (4): 1627–29. <https://doi.org/10.1039/C4AY02762K>.
- United Nations. 2013. "IV. Resolutionen aufgrund der Berichte des Zweiten Ausschusse - Resolution 68/232." Resolution A/68/49 (Vol.I). 68. Generalversammlung der Vereinten Nationen. New York City; USA: Vereinte Nationen. <https://www.un.org/Depts/german/gv-68/band1/ar68232.pdf>.
- Unsel, Rüdiger, Nicole Reppin, Karin Eckstein, Wolfgang Zehlius-Eckert, Helmut Hoffmann, and Thomas Huber. 2011. "Leitfaden Agroforstsysteme - Möglichkeiten zur naturschutzgerechten Etablierung von Agroforstsystemen." Bundesamt für Naturschutz. https://www.bfn.de/sites/default/files/2023-03/BfN_Agroforst_Skript.pdf.
- Vaart, Aad W. van der, and Jon A. Wellner. 1996. "The Delta-Method." In *Weak Convergence and Empirical Processes: With Applications to Statistics*, edited by Aad W. van der Vaart and Jon A. Wellner, 372–400. Springer Series in Statistics. New York, NY: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2545-2_35.
- Vallejo, Guillermo, and Manuel Ato. 2012. "Robust Tests for Multivariate Factorial Designs under Heteroscedasticity." *Behavior Research Methods* 44 (2): 471–89. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0152-2>.
- Vázquez, F. J., E. Moreno, M. A. Negrín, and M. Martel. 2016. "Bayesian Robustness in Meta-Analysis for Studies with Zero Responses." *Pharmaceutical Statistics* 15 (3): 230–37. <https://doi.org/10.1002/pst.1741>.
- Veldkamp, Edzo, Marcus Schmidt, Christian Markwitz, Lukas Beule, René Beuschel, Andrea Biertümpfel, Xenia Bischel, et al. 2023. "Multifunctionality of Temperate Alley-Cropping Agroforestry Outperforms Open Cropland and Grassland." *Communications Earth & Environment* 4 (January): 20. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00680-1>.
- Ver Hoef, Jay M. 2012. "Who Invented the Delta Method?" *The American Statistician* 66 (2): 124–27. <https://doi.org/10.1080/00031305.2012.687494>.
- Veste, Maik, and Christian Böhm. 2018. *Agrarholz - Schnellwachsende Bäume in der Landwirtschaft: Biologie - Ökologie - Management*. 1. Auflage. SpringerLink : BücherSpringer e-Book Collection. Berlin: Springer Spektrum. <http://doi.org/10.1007/978-3-662-49931-3>.
- Viechtbauer, Wolfgang. 2010. "Conducting Metaanalyses in R with the Metafor Package." *Journal of Statistical Software* 36 (August): 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v036.i03>.
- . 2023. "Meta-Analysis Package for R." <https://cran.r-project.org/web/packages/metafor/index.html>.
- Volkart, Lise, Pierrette Bouillon, and Sabrina Girletti. 2018. "Statistical vs. Neural Machine Translation: A Comparison of MTH and DeepL at Swiss Post's Language Service." In .
- Wang, Yan, Patricia Rodríguez de Gil, Yi-Hsin Chen, Jeffrey D. Kromrey, Eun Sook Kim, Thanh Pham, Diep Nguyen, and Jeanine L. Romano. 2017. "Comparing the Performance of Approaches for Testing the Homogeneity of Variance Assumption in One-Factor ANOVA Models." *Educational and Psychological Measurement* 77 (2): 305–29. <https://doi.org/10.1177/0013164416645162>.
- Wang, Yaping, Xiaoyang Han, Weiming Yan, Liping Cheng, Xingdong Dang, and Wenzhao Liu. 2023. "Apple Trees Can Extract Soil Water from Both Deep Layers and Neighboring

- Cropland in the Tableland Region of Chinese Loess Plateau." *CATENA* 232 (November): 107396. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107396>.
- Warren, J. M., C. Lawson, and K. Belcher. 2008. *The Agri-Environment. Theory and Practice of Managing the Environmental Impacts of Agriculture*. Cambridge University Press. <http://hdl.handle.net/2160/2372>.
- Weihermüller, Lutz, and Heye R. Bogen. 2020. *Field Measurement Methods in Soil Science*. Edited by Stefan Wessel-Bothe and Lutz Weihermüller. Quantifying the Environment. Stuttgart: Borntraeger Science Publishers.
- Wellner, Marie, and Ludwig Theuvsen. 2017. "Landwirtschaft von unten: Community Supported Agriculture als zivilgesellschaftliche Nachhaltigkeitsinitiative." In *Nonprofit-Organisationen und Nachhaltigkeit*, edited by Ludwig Theuvsen, René Andeßner, Markus Gmür, and Dorothea Greiling, 235–44. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-18706-4_21.
- Wickham, Hadley, Winston Chang, Lionel Henry, Thomas Lin Pedersen, Kohske Takahashi, Claus Wilke, Kara Woo, et al. 2023. "Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics." <https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html>.
- Wu, Junen, Wenjie Liu, and Chunfeng Chen. 2017. "How Do Plants Share Water Sources in a Rubber-Tea Agroforestry System during the Pronounced Dry Season?" *Agriculture, Ecosystems & Environment* 236 (January): 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.017>.
- WWF. 2024. "WWF Terrestrial Ecoregions Of The World (Biomes)." 2024. <https://www.arcgis.com/apps/View/index.html?appid=d60ec415febb4874ac5e0960a6a2e448>.
- Zech, Wolfgang, Peter Schad, and Gerd Hintermaier-Erhard. 2014. *Böden Der Welt: Ein Bildatlas*. 2nd ed. Berlin: Springer Spektrum.
- Zepeda-Tello, Rodrigo, Michael Schomaker, Camille Maringe, Matthew J. Smith, Aurelien Belot, Bernard Rchet, Mireille E. Schnitzer, and Miguel Angel Luque-Fernandez. 2022. "The Delta-Method and Influence Function in Medical Statistics: A Reproducible Tutorial." arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.15310>.
- Zhang, Wei, Taylor H. Ricketts, Claire Kremen, Karen Carney, and Scott M. Swinton. 2007. "Ecosystem Services and Dis-Services to Agriculture." *Ecological Economics*, Special Section - Ecosystem Services and Agriculture, 64 (2): 253–60. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.024>.
- Zhao, Lianhao, Xiaodong Gao, Nana He, and Xining Zhao. 2022. "Ecohydrological Advantage of Young Apple Tree-Based Agroforestry and Its Response to Extreme Droughts on the Semiarid Loess Plateau." *AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY* 321 (June). <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108969>.
- Zhou, Runkai, Dasheng Wu, Ruyi Zhou, Luming Fang, Xinyu Zheng, and Xiongwei Lou. 2019. "Estimation of DBH at Forest Stand Level Based on Multi-Parameters and Generalized Regression Neural Network." *Forests* 10 (9): 778. <https://doi.org/10.3390/f10090778>.
- Zhou, Yuhang, Yiyang Zhu, and Weng Kee Wong. 2023. "Statistical Tests for Homogeneity of Variance for Clinical Trials and Recommendations." *Contemporary Clinical Trials Communications* 33 (June): 101119. <https://doi.org/10.1016/j.conctc.2023.101119>.
- Zomer, Robert, Deborah Bossio, Antonio Trabucco, L. Yuanjie, D.C. Gupta, and V. Singh. 2007. "Trees and Water: Smallholder Agroforestry on Irrigated Lands in Northern India. Colombo, Sri Lanka." *Book Trees and Water: Smallholder Agroforestry on Irrigated Lands in Northern India*, January.
- Zomer, Robert, Antonio Trabucco, Ric Coe, and Frank Place. 2009. "Trees on Farm: Analysis of Global Extent and Geographical Patterns of Agroforestry." *ICRAF Working Paper - World Agroforestry Centre*, January, 63 pp.
- Zulfiqar, Sonia, M. Wahab, Muhammad Sarwar, and Ingo Lieberwirth. 2018. "Is Machine Translation a Reliable Tool for Reading German Scientific Databases and Research Articles?"

Journal of Chemical Information and Modeling 58 (October).
<https://doi.org/10.1021/acs.jcim.8b00534>.

Zygmunt, Conrad, and Mario R. Smith. 2014. "Robust Factor Analysis in the Presence of Normality Violations, Missing Data, and Outliers: Empirical Questions and Possible Solutions." *The Quantitative Methods for Psychology* 10 (1): 40–55.
<https://doi.org/10.20982/tqmp.10.1.p040>.

6. Anhang

6.1. Zusätzliche Daten

Alle zusätzlichen Datenmaterialien wie das R-Script als R-Markdown Dokument, die WebPlotDigitizer-Projektdateien, die Abbildungen aus denen extrahiert wurde sowie die Datentabellen sind unter dem folgenden Link in der ownCloud der Uni-Göttingen abrufbar, sollte dieser unerwartet defekt sein, sind diese weiterhin über den zweiten Link abrufbar. Dies ist mein privater Dropbox-Ordner.

<https://owncloud.gwdg.de/index.php/s/mhhVJP1itkN9gFe>



https://www.dropbox.com/scl/fo/05cedixuqevd2tprn-klSz/Alm3KrefRwFRI98jmZ_yfFc?rlkey=mgs7g0h3b9s4dtm3pvqrgv54y&st=31vatdir&dl=0



6.2. Datenbankrecherche und Suchbegriffe

TS=((agroforest* OR agro-forest* OR silvopast* OR *silvoarabl* OR dehesa OR "alley* cropping" OR "wood* pasture*" OR "forest* farming*" OR "orchard* intercropping" OR "scatter* tree*" OR "grazed orchard" OR montado) AND ("soil moisture" OR "soil water" OR "soil humidity") AND (review* OR "systematic review*" OR "meta-analysis" OR metaanalysis))

Box 1: Suchstrang in der Datenbank Web of Science. Zeitpunkt der Suche Juli - Dezember 2023. Die Suche deckte die folgenden Datenbanken ab: Web of Science Core Collection, Medline, SciELO Citation Index. In die Suche wurden Ergebnisse aus allen Jahren und allen Sprachen eingeschlossen. Für die Suche nach bereits vorhandenen Metaanalysen in der Datenbank wurden dem Suchstrang die fettgedruckten Suchbegriffe und Operatoren hinzugefügt, für die Literatursuche weggelassen.

Tab.: 7 Kategorien von Agroforstsystemen, in welche die Literatur untergliedert wird (nach Beillouin 2022).

Fachbegriff Deutsch	Fachbegriff Englisch
Parklandschaften	Parklands
Verbesserte Brachflächen	Improved Fallows
Alleenbau	Alley cropping

Hecken	Hedgerows
Beschattete mehrjährige Pflanzen	Shaded perennial-crop
Silvopastorales System	Silvopasture

Tab.: 8 Suchbegriffe, welche für die Datenbankrecherche ausgewählt wurde; sowie die Quellen (Metaanalysen) zum Thema Agroforst, in welchen diese Suchbegriffe bereits genutzt wurden.

Komponente	Komponente2	freie Textwörter	Quelle1 Keywords	Quelle2 Keywords	Quelle3 Keywords	Sprache
1_Population	2_Intervention	agroforestry	Zhu et al. 2020	Shi et al. 2018		en
1_Population	2_Intervention	alley crop	Zhu et al. 2021			en
1_Population	2_Intervention	buffer strips	Zhu et al. 2022			en
1_Population	2_Intervention	intercropping	Zhu et al. 2023			en
1_Population	2_Intervention	shaded perennial	Zhu et al. 2024			en
1_Population	2_Intervention	perennial	Zhu et al. 2025			en
1_Population	2_Intervention	silvoarable	Zhu et al. 2026			en
1_Population	2_Intervention	silvopastoral	Zhu et al. 2027	Pavlidis und Tsihrintzis 2018		en
1_Population	2_Intervention	vegetative strips	Zhu et al. 2028			en
1_Population	2_Intervention	agrosilvicultural	Pavlidis und Tsihrintzis 2018			en
1_Population	2_Intervention	agrosilvopastoral	Pavlidis und Tsihrintzis 2019			en
3_Endpunkt		soil moisture	DeepL Translator Version 4.6.0.9212			en
3_Endpunkt		soil humidity	DeepL Translator Version 4.6.0.9213			en
1_Population	2_Intervention	agroforest*	Mupepele 2021			en
1_Population	2_Intervention	agro-forest*	Mupepele 2021			en
1_Population	2_Intervention	silvopast*	Mupepele 2021	Shi et al. 2018	Beillouin 2022	en
1_Population	2_Intervention	silvoarabl*	Mupepele 2021			en
1_Population	2_Intervention	dehesa	Mupepele 2021			en
1_Population	2_Intervention	alley* cropping	Mupepele 2021	Shi et al. 2018	Beillouin 2022	en
1_Population	2_Intervention	wood* pasture*	Mupepele 2021			en
1_Population	2_Intervention	forest* farming* orchard* inter-	Mupepele 2021			en
1_Population	2_Intervention	cropping	Mupepele 2021			en
1_Population	2_Intervention	scatter* tree*	Mupepele 2021			en
1_Population	2_Intervention	grazed orchard	Mupepele 2021			en
1_Population	2_Intervention	montado	Mupepele 2021			en
1_Population	2_Intervention	homegardens	Shi et al. 2018			en
1_Population	2_Intervention	parklands	Beillouin 2022			en
1_Population	2_Intervention	fallows	Beillouin 2023			en
1_Population	2_Intervention	hedgerows	Beillouin 2024			en
1_Population	2_Intervention	shaded perennial crop	Beillouin 2025			en

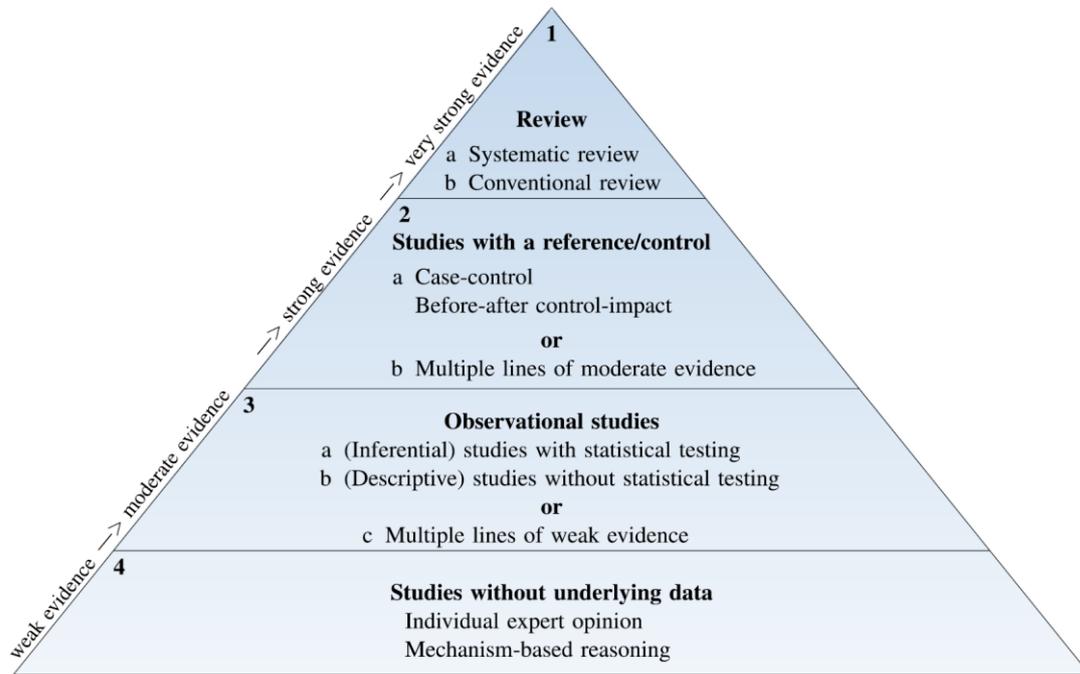


Abb. 26 Die Hierarchie der Evidenzstufen (LoE), (eng.: *Level-of-Evidence*) ordnet die Studiendesigns nach ihrer Evidenz. Sehr starke Evidenz (**LoE1**) bis schwache Evidenz (**LoE4**) mit interner Einstufung Unterebenen **a**, **b** und **c** (nach Mupepele et al. 2016).

Tab.: 9 Mindeststandards für die Qualität der Studien welche in die Metaanalyse eingeschlossenen werden sollen (nach Khan et al. 2004).

Allgemein	Spezifisch
Art der Forschungsfrage	Bewertung der Wirksamkeit
Studiendesign	Kontrollierte experimentelle Studie
Designschwelle	<i>Einschlusskriterium:</i> Kontrollierte experimentelle Studie
	<i>Ausschlusskriterium:</i> Nicht kontrollierte experimentelle Studie, Laborexperiment

Tab.: 10 Erfasste Variablen aus den Volltexten der eingeschlossenen Publikationen.
(Siehe Additional_File_4 unter Additional_Data).

Variablen
Autoren der Studie
Jahr der Veröffentlichung
Titel der Publikation
Land in dem die Studie durchgeführt wurde
Breitengrad der Untersuchungsregion
Längengrad der Untersuchungsregion
Klima der Untersuchungsregion
Höhe über NN der Untersuchungsregion
Mittlere Jahrestemperatur der Untersuchungsregion
Mittlerer Jahresniederschlag der Untersuchungsregion
Agroforsttyp der Untersuchungsfläche
Alter der Untersuchungsfläche in Jahren
Flächengröße der Untersuchungsfläche (ha)
Bewirtschaftungstyp der Kontrollfläche
Alter der Kontrollfläche in Jahren
Flächengröße der Kontrollfläche in (ha)
Baumdicke der Untersuchungsfläche (n/ha)
Mittlerer Brusthöhendurchmesser der Bäume auf der Untersuchungsfläche (cm)
Mittlerer Höhe der Bäume auf der Untersuchungsfläche (m)
Mittleres Baumalter der Bäume auf der Untersuchungsfläche (Jahre)
Baumarten auf der Untersuchungsfläche
Nutzpflanzenarten auf der Kontrollfläche
Baumarten auf der Kontrollfläche
Bodentyp der Untersuchungsfläche
Bodentyp der Kontrollfläche
Klassifizierungssystem nach dem der Bodentyp eingestuft wurde
Anteil der Bodentextur Ton der Untersuchungsfläche (%)
Anteil der Bodentextur Schluff der Untersuchungsfläche (%)
Anteil der Bodentextur Sand der Untersuchungsfläche (%)
Anteil der Bodentextur Ton der Kontrollfläche (%)
Anteil der Bodentextur Schluff der Kontrollfläche (%)
Anteil der Bodentextur Sand der Kontrollfläche (%)
Mittlerer pH-Wert zwischen Untersuchungsfläche und Kontrollfläche
Mittlerer pH-Wert der Untersuchungsfläche
Mittlerer pH-Wert der Kontrollfläche
Untersuchungsfläche Lagerungsdichte (g/cm ³)
Kontrollfläche Lagerungsdichte (g/cm ³)
Messmethode mit dem der Bodenwassergehalt erfasst wurde
Bodenfeuchte Erfassungsweise (gravimetrisch oder volumetrisch)
Tiefe der maximalen Bodenfeuchtemessung (cm)
Mittlere Bodenfeuchte der Untersuchungsfläche (%)
Standardfehler (SE) der Bodenfeuchtmessungen der Untersuchungsfläche
Stichprobenumfang (n) der Bodenfeuchtemessung der Untersuchungsfläche
Standardfehler (SD) der Bodenfeuchtemessung der Untersuchungsfläche
Mittlere Bodenfeuchte der Kontrollfläche (%)
Standardfehler (SE) der Bodenfeuchtmessungen der Kontrollfläche
Stichprobenumfang (n) der Bodenfeuchtemessung der Kontrollfläche
Standardfehler (SD) der Bodenfeuchtemessung der Kontrollfläche
Monat in dem die Beobachtungen begannen
Monat in dem die Beobachtungen endeten
Gesamt Beobachtungsdauer in Monaten
Studiendesign

6.3. Forest-Plots zum Gesamtdatensatz und zu den Klimazonen

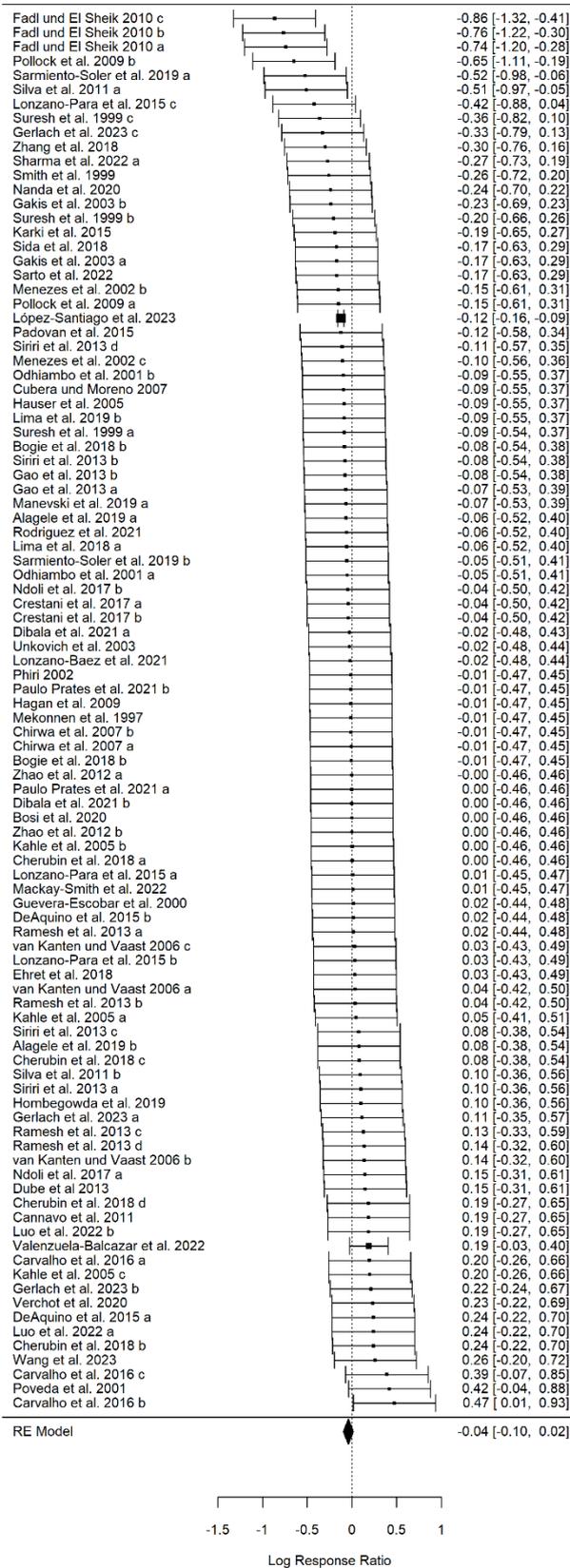


Abb. 27 Forest-Plot zur Metaanalyse über den gesamten Datensatz (98 Untersuchungen aus 57 Studien). Untersuchungen sind absteigend nach Effektgröße (LnRR) sortiert.

Arid (Feucht-gemäßigte Zone)

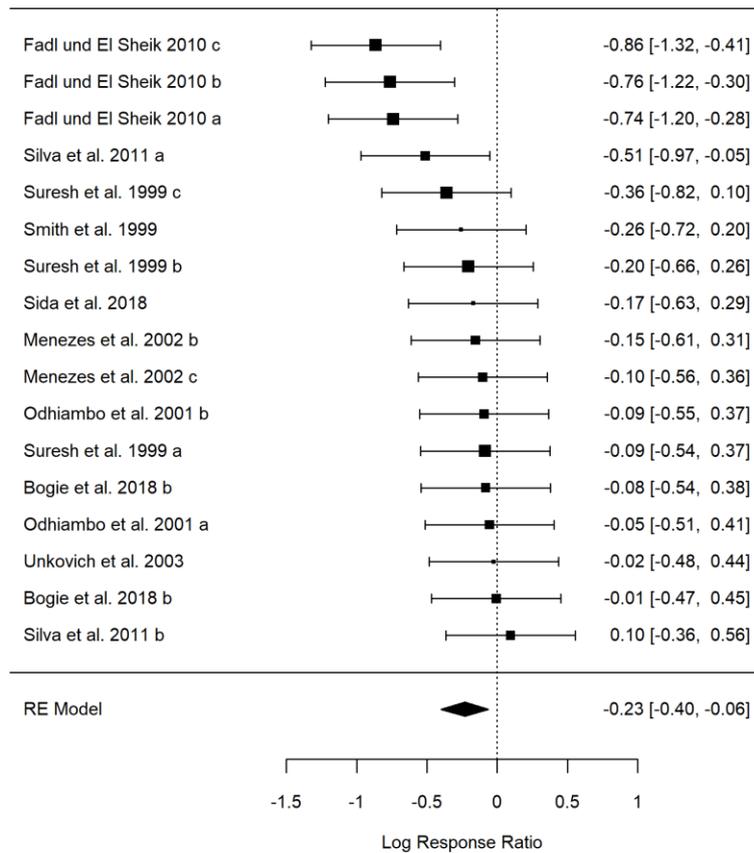


Abb. 28 Forest-Plot zur Metaanalyse (alle verfügbaren Datenpunkte) über den Einfluss des Baumalters in der ariden Zone. Untersuchungen sind absteigend nach Effektgröße (LnRR) sortiert. Für jede Studie wird der Effekt, nach ihrer Gewichtung in der Metaanalyse, durch einen Punktschätzer als Rechteck unterschiedlicher Größe dargestellt. Der Gesamteffekt ist unter den Einzeleffekten als Raute aufgetragen. Die Mitte der Raute präsentiert den Punktschätzer, die Breite gibt das Konfidenzintervall an.

Humid (Feucht-gemäßigte Zone)

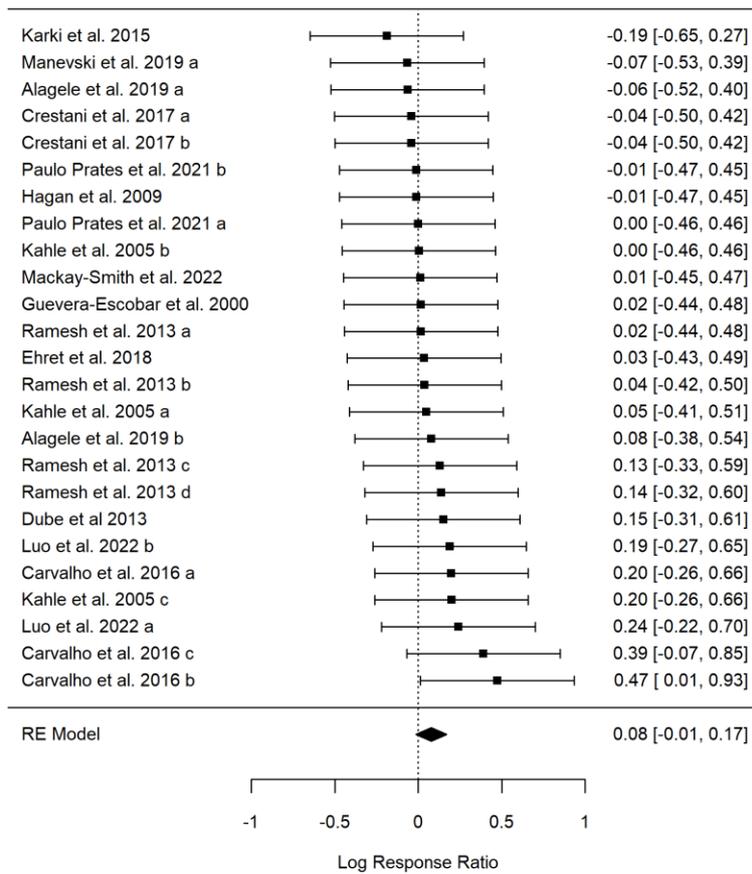


Abb. 29 Forest-Plot zur Metaanalyse (alle verfügbaren Datenpunkte) über den Einfluss des Baumalters in der humiden Zone. Untersuchungen sind absteigend nach Effektgröße (LnRR) sortiert. Für jede Studie wird der Effekt, nach ihrer Gewichtung in der Metaanalyse, durch einen Punktschätzer als Rechteck unterschiedlicher Größe dargestellt. Der Gesamteffekt ist unter den Einzeleffekten als Raute aufgetragen. Die Mitte der Raute präsentiert den Punktschätzer, die Breite gibt das Konfidenzintervall an.

Semihumid (Randtropen)

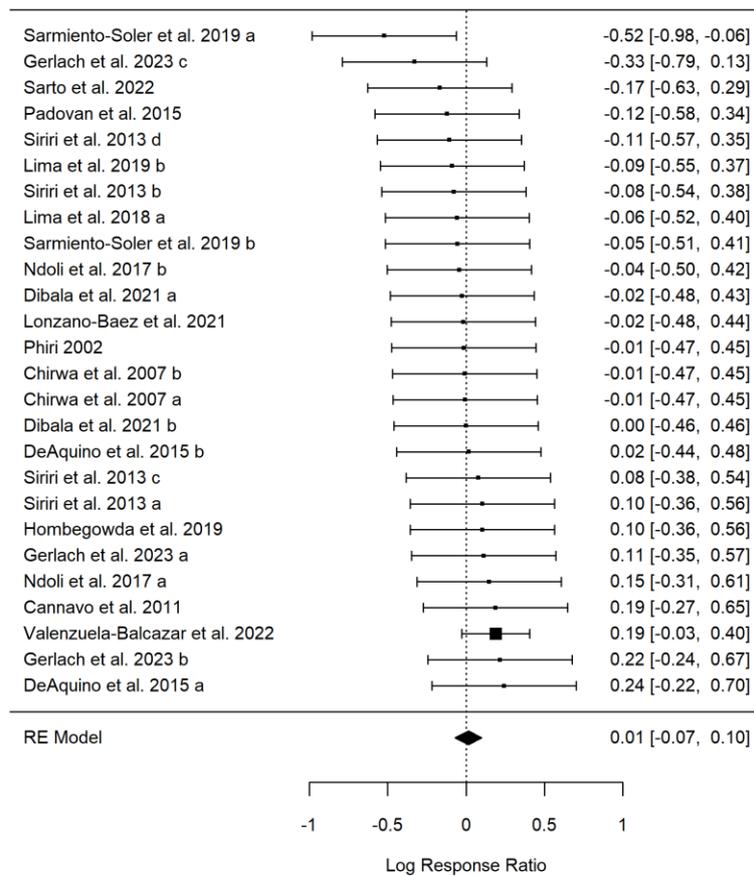


Abb. 30 Forest-Plot zur Metaanalyse (alle verfügbaren Datenpunkte) über den Einfluss des Baumalters in der semihumiden Zone (Randtropen). Untersuchungen sind absteigend nach Effektgröße (LnRR) sortiert. Für jede Studie wird der Effekt, nach ihrer Gewichtung in der Metaanalyse, durch einen Punktschätzer als Rechteck unterschiedlicher Größe dargestellt. Der Gesamteffekt ist unter den Einzeleffekten als Raute aufgetragen. Die Mitte der Raute präsentiert den Punktschätzer, die Breite gibt das Konfidenzintervall an.

Semihumid (Subtropische Winterregenzone)

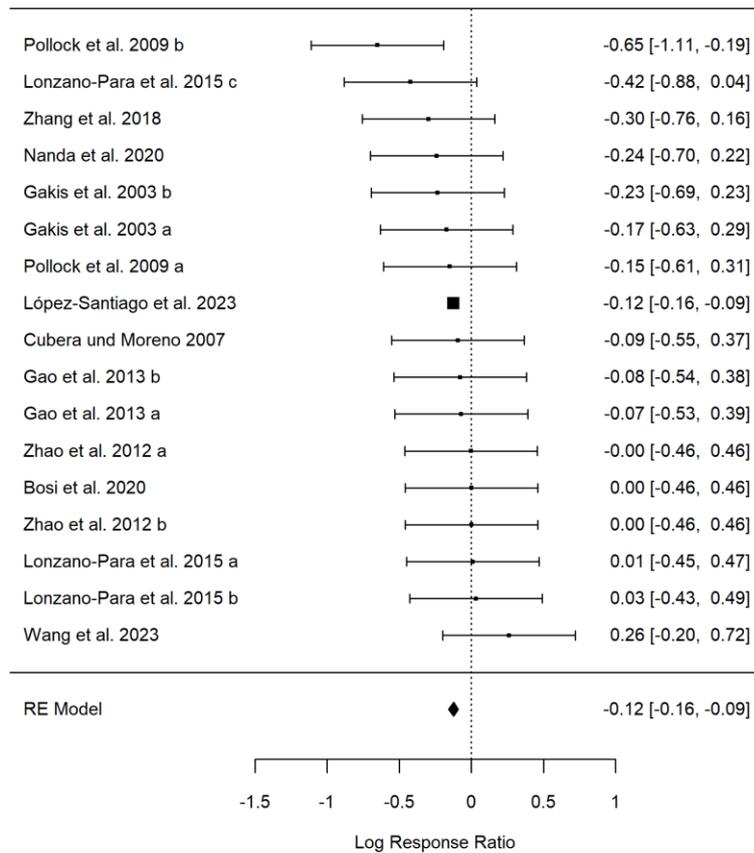


Abb. 31 Forest-Plot zur Metaanalyse (alle verfügbaren Datenpunkte) über den Einfluss des Baumalters in der semihumiden Zone (subtropische Winterregenzone). Untersuchungen sind absteigend nach Effektgröße (LnRR) sortiert. Für jede Studie wird der Effekt, nach ihrer Gewichtung in der Metaanalyse, durch einen Punktschätzer als Rechteck unterschiedlicher Größe dargestellt. Der Gesamteffekt ist unter den Einzeleffekten als Raute aufgetragen. Die Mitte der Raute präsentiert den Punktschätzer, die Breite gibt das Konfidenzintervall an.

Vollhumid (Innere Tropenzone)

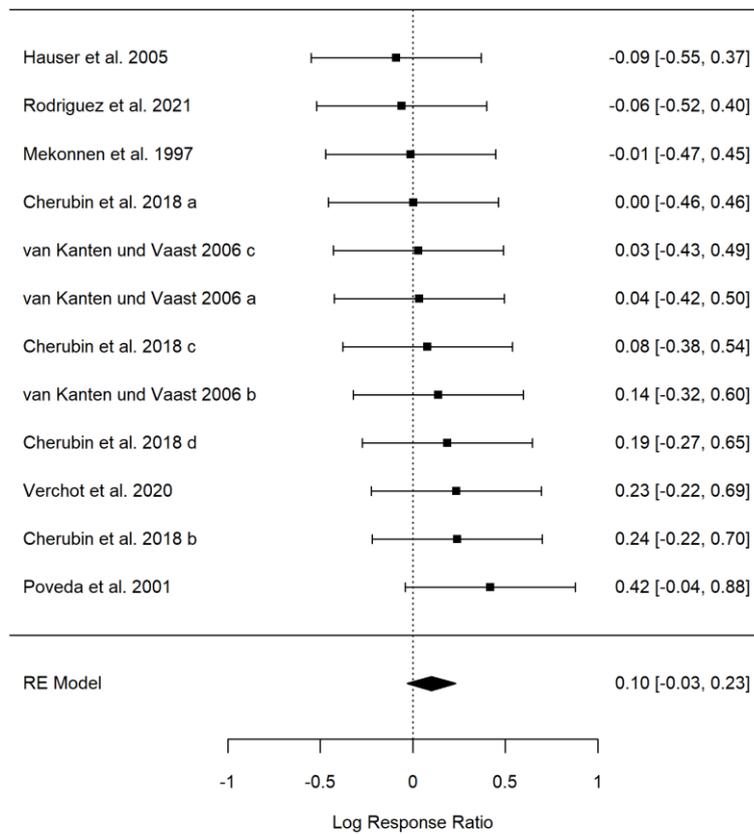


Abb. 32 Forest-Plot zur Metaanalyse (alle verfügbaren Datenpunkte) über den Einfluss des Baumalters in der vollhumiden Zone. Untersuchungen sind absteigend nach Effektgröße (LnRR) sortiert. Für jede Studie wird der Effekt, nach ihrer Gewichtung in der Metaanalyse, durch einen Punktschätzer als Rechteck unterschiedlicher Größe dargestellt. Der Gesamteffekt ist unter den Einzeleffekten als Raute aufgetragen. Die Mitte der Raute präsentiert den Punktschätzer, die Breite gibt das Konfidenzintervall an.

6.4.Boxplots zu weiteren erfassten Variablen

6.4.1. Baumvariablen

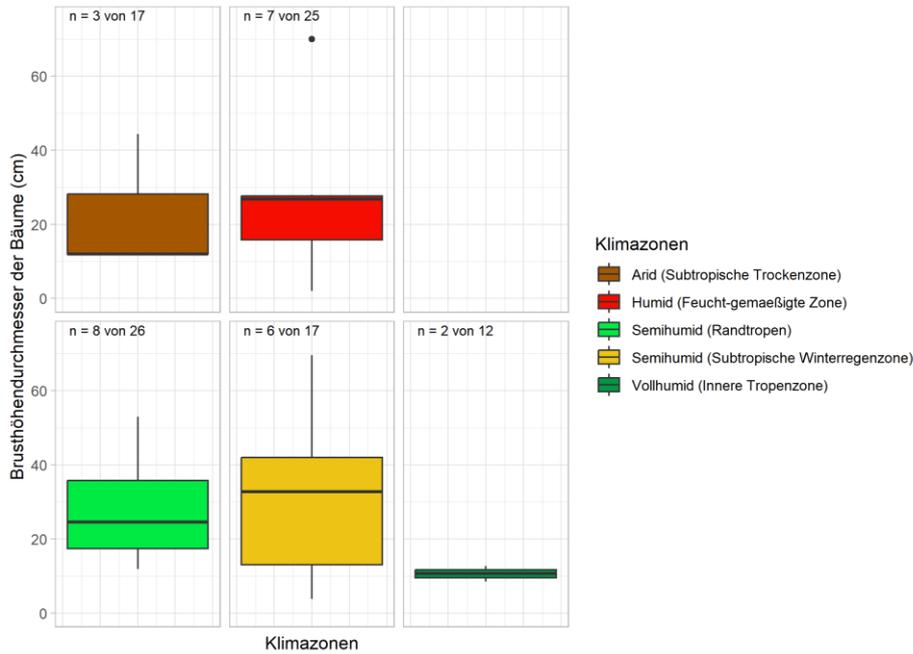


Abb. 33 Verteilung des **Brusthöhendurchmessers (BHD)** (cm) in den erfassten Klimazonen als Boxplot. n = Anzahl der Untersuchungen, für die die Variable angegeben war, im Vergleich zu allen Untersuchungen in dieser Klimazone.

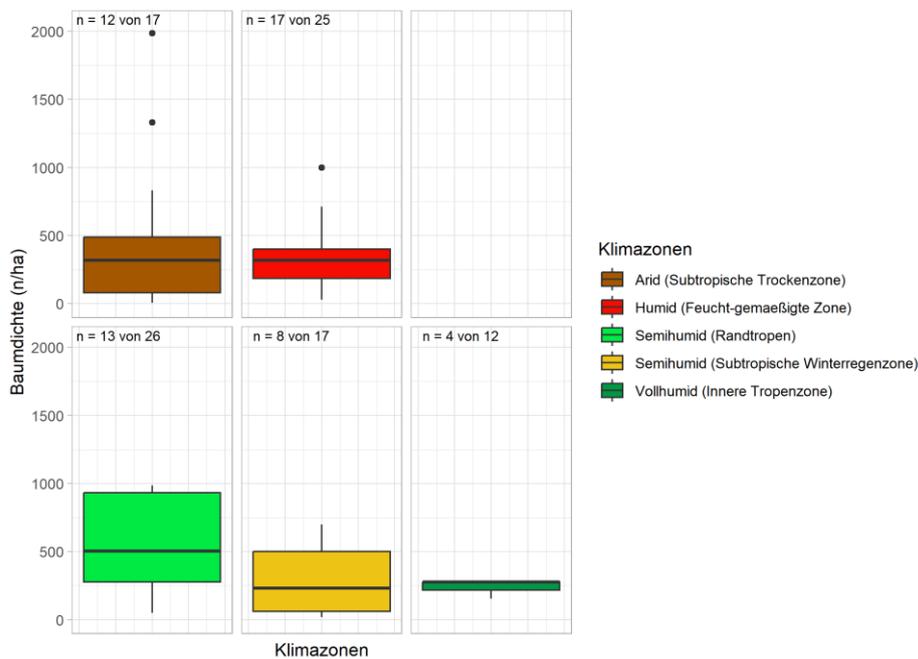


Abb. 34 Verteilung der **Baumdicke (n/ha)** in den erfassten Klimazonen als Boxplot. n = Anzahl der Untersuchungen, für die die Variable angegeben war, im Vergleich zu allen Untersuchungen in dieser Klimazone. Weitere Datenpunkte als Ausreißer (n/ha), welche aufgrund einer gleichmäßigen Skalierung für alle Klimazonen in der Abbildung nicht visualisiert wurden (durch Tausendertrennzeichen mit Punkt getrennt): **Humid**: 2.250, 14.000; **Semihumid**: 10.000, 17.000, 40.000; **Vollhumid**: 12.000.

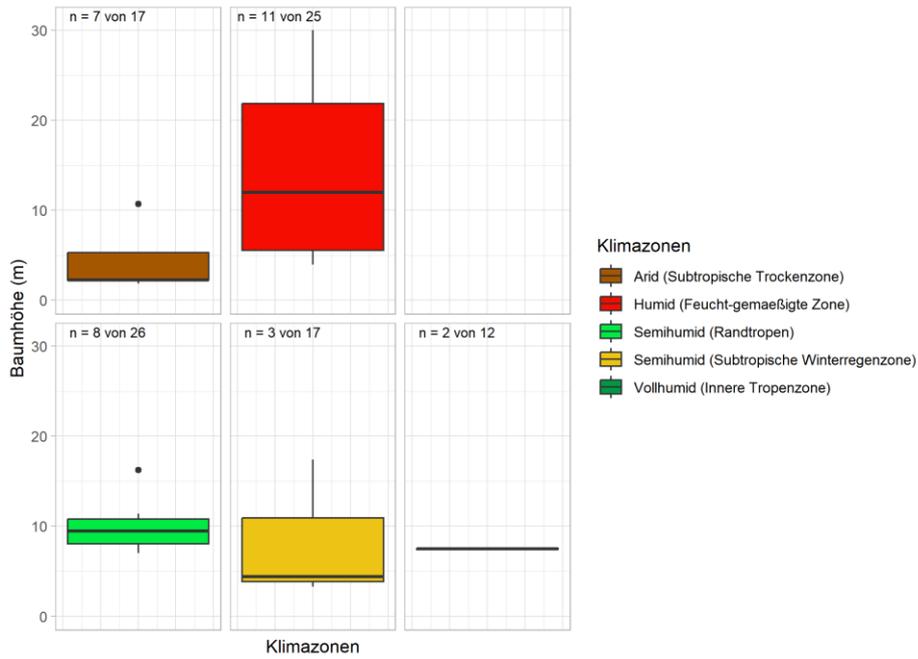


Abb. 35 Verteilung der **Baumhöhe (m)** in den erfassten Klimazonen als Boxplot. n = Anzahl der Untersuchungen, für die die Variable angegeben war, im Vergleich zu allen Untersuchungen in dieser Klimazone.

6.4.2. Bodenvariablen

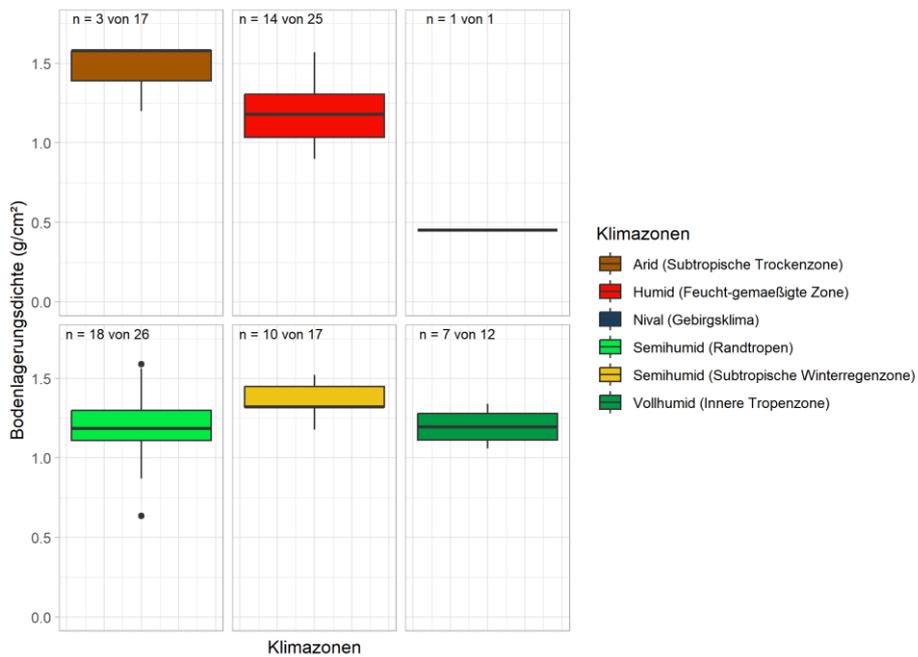


Abb. 36 Verteilung der **Bodenlagerungsdichte (g/cm³)** in den erfassten Klimazonen als Boxplot. n = Anzahl der Untersuchungen, für die die Variable angegeben war, im Vergleich zu allen Untersuchungen in dieser Klimazone.

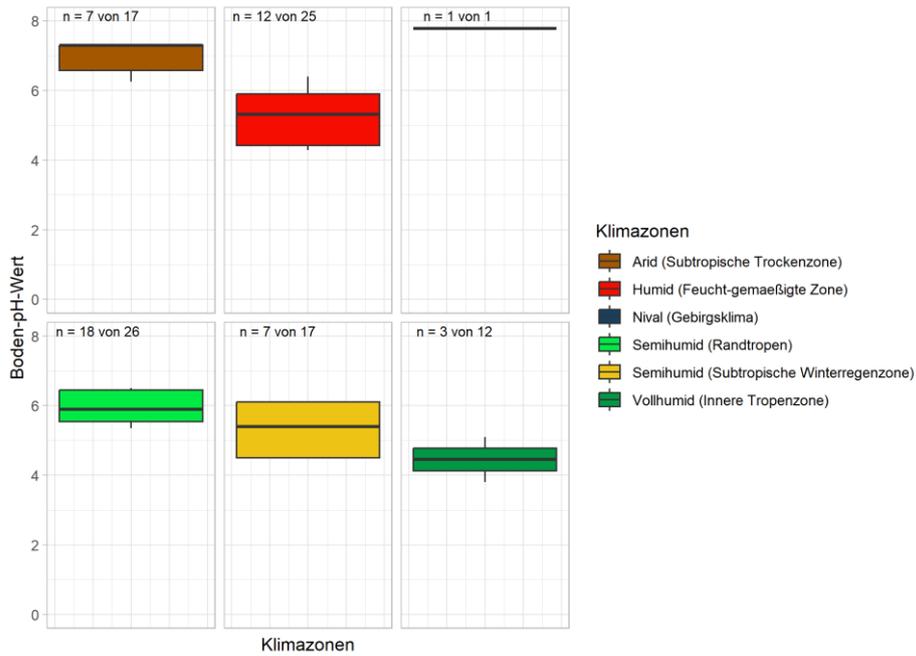


Abb. 37 Verteilung des **Boden-pHs** in den erfassten Klimazonen als Boxplot. n = Anzahl der Untersuchungen, für die die Variable angegeben war, im Vergleich zu allen Untersuchungen in dieser Klimazone.

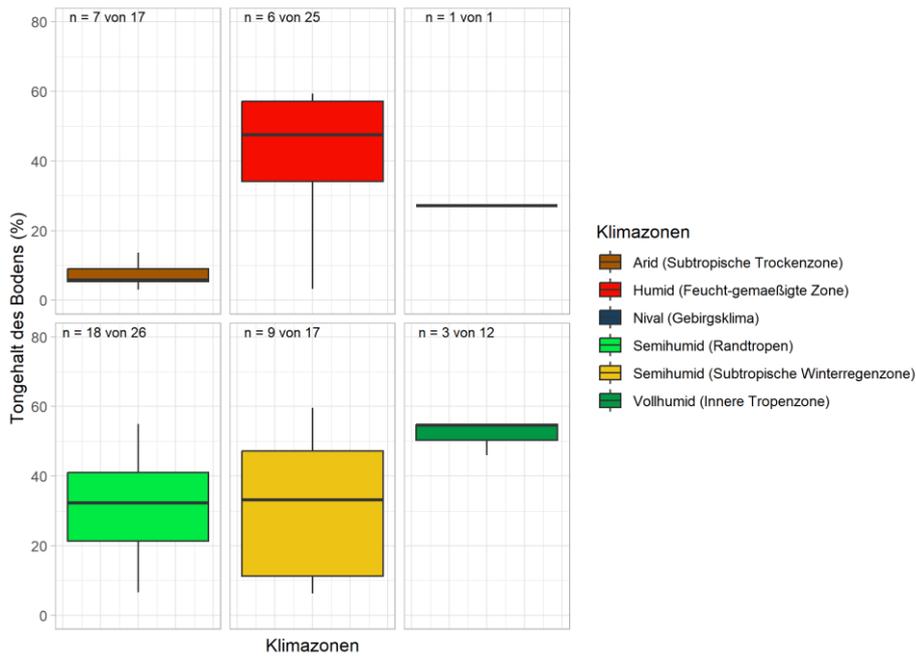


Abb. 38 Verteilung für den **Tongehalt des Bodens (%)** in den erfassten Klimazonen als Boxplot. n = Anzahl der Untersuchungen, für die die Variable angegeben war, im Vergleich zu allen Untersuchungen in dieser Klimazone.

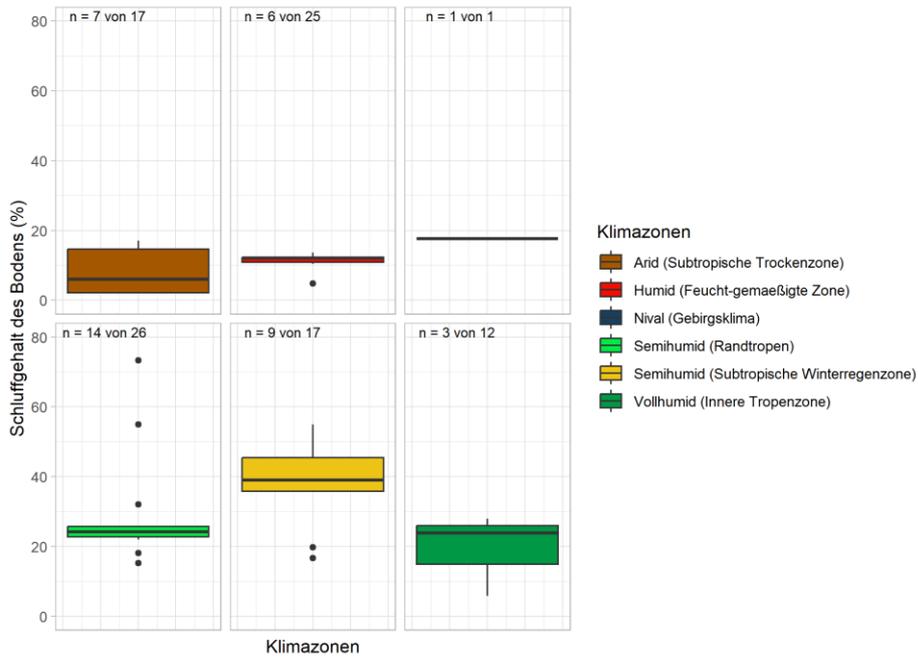


Abb. 39 Verteilung des **Schluffgehalts des Bodens (%)** in den erfassten Klimazonen als Boxplot. n = Anzahl der Untersuchungen, für die die Variable angegeben war, im Vergleich zu allen Untersuchungen in dieser Klimazone.

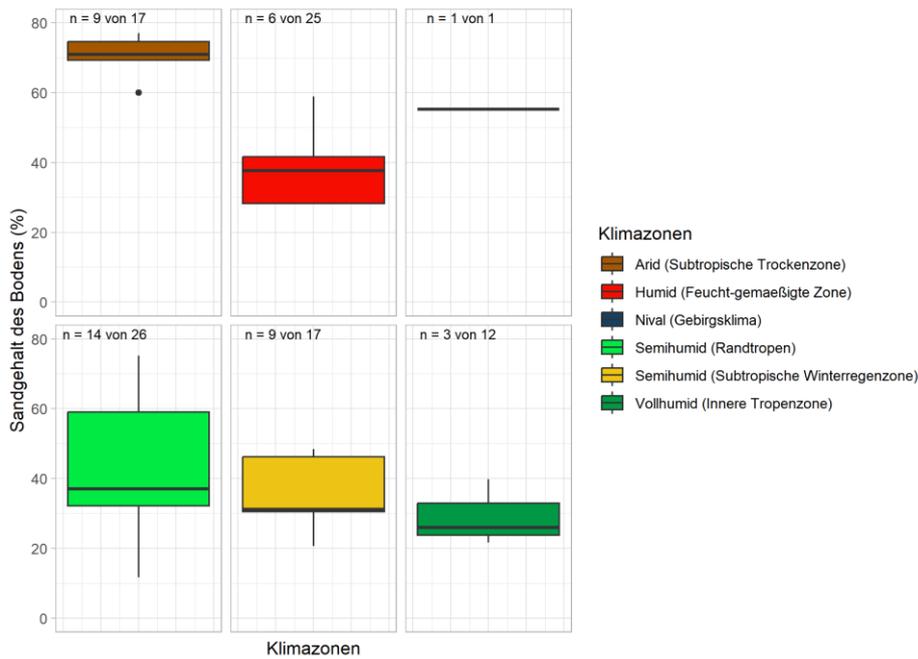


Abb. 40 Verteilung des **Sandgehalts des Bodens (%)** in den erfassten Klimazonen als Boxplot. n = Anzahl der Untersuchungen, für die die Variable angegeben war, im Vergleich zu allen Untersuchungen in dieser Klimazone.

6.4.3. Untersuchungszeitraum

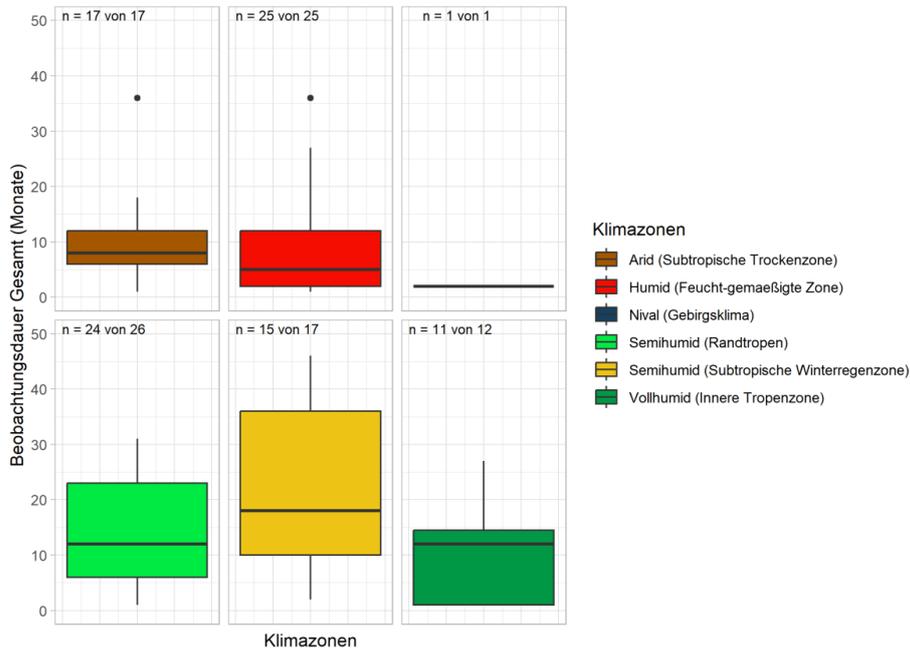


Abb. 41 Verteilung der **gesamten Beobachtungsdauer (Monate)** in den erfassten Klimazonen als Boxplot. n = Anzahl der Untersuchungen, für die die Variable angegeben war, im Vergleich zu allen Untersuchungen in dieser Klimazone.

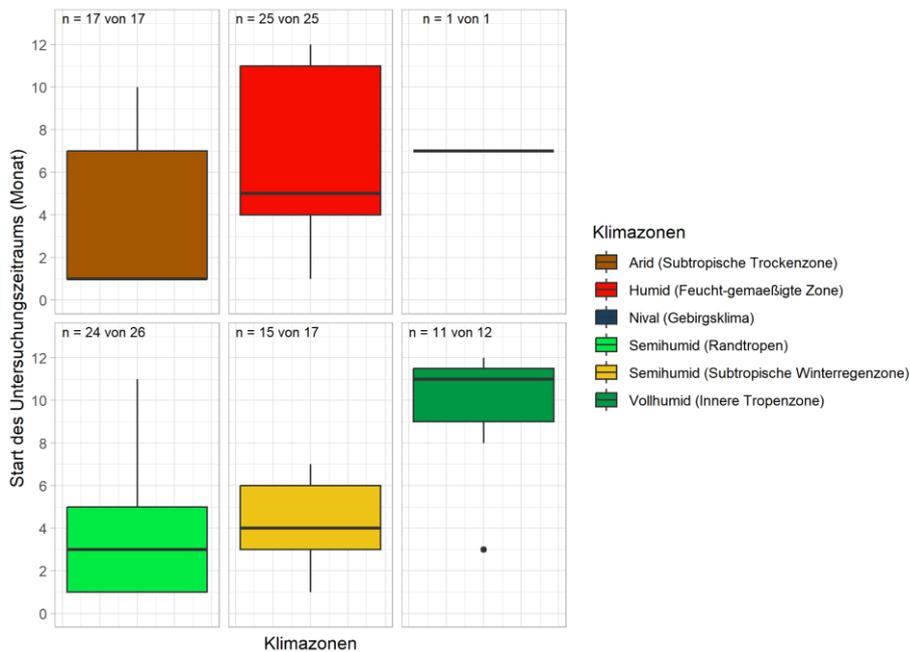


Abb. 42 Verteilung der Zeitpunkte im Jahr, in dem die **Untersuchungszeiträume begannen (Monat)** in den erfassten Klimazonen als Boxplot. n = Anzahl der Untersuchungen, für die die Variable angegeben war, im Vergleich zu allen Untersuchungen in dieser Klimazone.

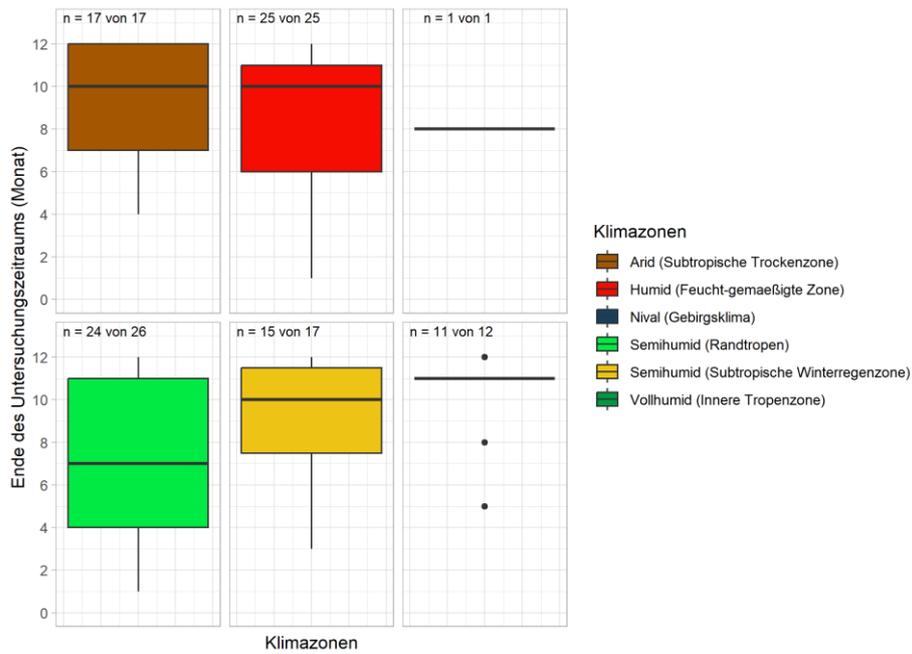


Abb. 43 Verteilung der Zeitpunkte im Jahr, in dem die **Untersuchungszeiträume endeten (Monat)** in den erfassten Klimazonen als Boxplot. n = Anzahl der Untersuchungen, für die die Variable angegeben war, im Vergleich zu allen Untersuchungen in dieser Klimazone.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich eidesstattlich, gemäß § 15 Abs. 3 der Allgemeinen Prüfungsordnung für Bachelor- und Master-Studiengänge sowie sonstige Studienangebote an der Universität Göttingen (APO) vom 20.12.2021, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinne nach entnommen sind, wurden in jedem Fall unter Angabe der Quellen (einschließlich des World Wide Web und anderer elektronischer Text- und Datensammlungen) kenntlich gemacht. Dies gilt auch für beigegebene Zeichnungen, bildliche Darstellungen, Skizzen und der-gleichen. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht. Die schriftliche und die elektronische Form der Arbeit stimmen überein. Mir ist bewusst, dass jedes Zuwiderhandeln als Täuschungsversuch zu gelten hat und gemäß § 18 Abs. 5 der Allgemeinen Prüfungsordnung für Bachelor- und Master- Studiengänge an der Universität Göttingen mit „nicht ausreichend“ bewertet wird (Maurer 2016). Einer elektronischen Überprüfung auf Plagiate stimme ich zu.

Göttingen, den 11.03.2024



Simon Dieckmann