

Eva Paton, Laura Tams, Björn Kluge & Pedro Alencar

Regenernten: Ansätze, Potenzial und Verlässlichkeit von Rainwater Harvesting in Deutschland

Rainwater harvesting: approaches, potential and reliability of rain water harvesting in Germany

Die Nutzung von Regenwasser kann Wasserdefizite in Dürre- und Trockenphasen ausgleichen und gleichzeitig die Effekte von Starkregenspitzen dämpfen – ein Potenzial, welches in Deutschland weder quantifiziert noch flächendeckend umgesetzt wird. In dieser Studie werden die Komplexität der Einflussfaktoren beim Regenernten bezüglich unterschiedlicher Auffangflächen, daraus resultierende Wasserqualitätsprobleme und unterschiedliche Ansätze der Speicherdimensionierung sowie zu befolgende Regularien vorgestellt. Für 43 über Deutschland verteilte Stationen wird der mögliche Ernteertrag und die zugehörigen Speicher-Ertrags-Beziehungen für unterschiedliche Regenausnutzungsraten und Versorgungssicherheiten über einen Zeitraum von 1980 bis 2020 quantifiziert und benötigte Speichergrößen mit der Methode "Yield After Spillage" (YAS) iteriert und bewertet. Unter Berücksichtigung von verschiedenen Verlustfaktoren ergibt sich ein maximaler Ernteanteil von 68 % bis 82 % des mittleren Jahresniederschlags. Bei voller Regenausnutzung und hoher Versorgungssicherheit ergeben sich unrealistisch große Speichergrößen. Bei reduzierter Regenausnutzung von 80 % oder 50 % ergeben sich regional variierende Speichergrößen von 140 bis 280 bzw. 43 bis 110 Liter pro Quadratmeter Auffangfläche. Mit einer Reduzierung der Versorgungssicherheit von 100 % auf 95 % ergeben sich ebenfalls erhebliche Speichergrößenreduzierungen. Für eine spezifische Speicherdimensionierung (Regenausnutzung 80 %, Versorgungssicherheit 95 %, täglich konstante Nutzmenge) wurde das typische saisonale Verhalten von Wasserdefizitphasen aufgrund von Trockenphasen und Überflusphasen von Regenspeichern aufgrund von Starkregenereignissen innerhalb des Zeitraumes 1980 bis 2020 identifiziert. Die meisten Defizitphasen treten in den Frühlingsmonaten auf, hierbei gibt es jedoch regionale Abweichungen. Die Überflusphasen sind bei den südlichen Stationen konzentriert auf die Hochsommermonate und heterogen verteilt bei den meisten anderen Stationen. Bei einem Drittel der Stationen ist ein positiver Trend der Defizittage pro Jahr über den Zeitraum 1980 bis 2020 zu verzeichnen. In der Studie wurde von einer konstanten, täglichen Nutzmenge ausgegangen. Eine den Defizitphasen angepasste, gedrosselte Bewirtschaftung und die Ableitung von regional angepassten Nutzungsmustern sollten bei der zukünftigen Regenspeicherdimensionierung berücksichtigt werden.

Schlagwörter: Dürre, Niederschlagsnutzung, Wasserdefizit, Defizittage, Überflusstage, Starkregen, Speicherdimensionierung, Zisterne

The use of rainwater can compensate for water deficits in drought periods and dry spells and at the same time dampen the effects of high-intensity storms, a potential that is neither quantified nor implemented extensively across in Germany. In this study, the complexity of factors influencing rainwater harvesting with regard to different collection areas and related water quality problems, traditional and novel harvesting systems and the different approaches to storage dimensioning as well as the regulations were reviewed. For 43 stations distributed across Germany, the potential harvest amount, corresponding storage-yield relationships for different rainwater usage proportions and water supply efficiencies was derived for the time period of 1980 to 2020 and required storage sizes were iterated using the YAS (Yield After Spillage) method. Taking into account several loss factors, a maximal portion of 68 to 82 % of average rainfall can be harvested. Using 100 % of the potential harvest and a high degree of water supply efficiency, unrealistic large storage sizes were derived. With a reduced harvest rate of 80 % and 50 %, storage tanks of 140 to 280 and 43 to 110 litres per catchment area, respectively, were iterated. A reduction of water supply efficiency of 100 to 95 % can further decrease the storage size significantly. For a specific storage dimensioning (80 % harvest use, 95 % water supply efficiency), the typical seasonal dynamics of water deficit phases due to drought periods and water excess phases due to high intensity storms were identified for the entire study period. Most of the deficit phases occurred in the spring months, however, some regional derivations occurred. The excess phases for the southern station concentrated on the midsummer months, and were heterogeneously distributed for the other stations. One third of the stations showed a positive trend of deficit days per year for the time period 1980 to 2020. Therefore, supply management adapted to deficit phases and derivation of regionally adapted demand patterns should be considered in future dimensioning of rainwater harvesting storage systems.

Keywords: Drought, use of rainwater, water deficits, days with water deficit, excess days, high-intensity storms, storage dimensioning, cistern

1 Einleitung

In trockeneren Ländern ist das gezielte Auffangen, Speichern und Nutzen von Regenwasser eine Normalität, in Deutschland hingegen wird es zumeist amateurhaft für einfache Bewässerungszwecke im Gartenbereich betrieben oder vereinzelt in Vorzeigeobjekten umgesetzt. Ein Standardeinbau in Wohn-, Bürogebäuden oder öffentlichen Gebäuden hat sich bisher nicht flächendeckend durchgesetzt und ist derzeit auch nicht absehbar (SOLER et al., 2018).

Dabei schaut die Wasserversorgung durch Regenwasser auf eine mehr als fünf Jahrtausend alte Tradition zurück (PINA & KASSAYE, 2017). Mitte des letzten Jahrhunderts fiel diese Art der Wasserversorgung jedoch den damaligen Anforderungen, Niederschlagswasser möglichst schnell abzuführen und Ver- und Entsorgung zu zentralisieren, in vielen Landesteilen zum Opfer.

In der Neuausrichtung des urbanen Wassermanagements hin zum klimaangepassten, blaugrünen Stadtumbau, wie z. B. dargestellt im Projekt BlueGreenStreets (2022), gewinnt die

Regenbewirtschaftung auch in Deutschland in den letzten Jahren stetig an Bedeutung. Hier stehen zumeist dezentrale Versickerungsmaßnahmen und Wasserrückhalt im Oberboden im Vordergrund, das gezielte Wasserauffangen und Speichern für eine spätere Nutzung spielt bisher eher eine Nebenrolle. Gleichzeitig wird Kritik an diesen Maßnahmen laut, da eine Vernässung des urbanen Raums durch übermäßiges Versickern negative Begleiterscheinungen haben kann (UHL, 2022). Dies sind z. B. ein vermehrter Eintrag von Schadstoffen Richtung Grundwasser oder das Schaffen von Brutplätzen für Insekten und eine mögliche Zunahme von mückenübertragenen Erkrankungen wie beschrieben in WENDT et al. (2020) und WILKING et al. (2019). Das gezielte und damit kontrollierte Regenernten erscheint hier eine risikoärmere Alternative zu sein.

In der vorliegenden Studie wird explizit unterschieden zwischen dem deutschen Begriff Regenwassernutzung als Teil der Regenwasserbewirtschaftung und dem englischen Verständnis "rainwater harvesting", welches im Folgenden mit dem Begriff "Regenernten" übersetzt wird. Unter dem Begriff "Regenwasserbewirtschaftung" versteht man die Aufgabe, Regenwasser bzw. das Niederschlagswasser nach dem Auftreffen auf Oberflächen zu entsorgen, indem es möglichst dezentral versickert, verzögert abgeleitet, eventuell gespeichert und genutzt wird. Die Regenwassernutzung wird dabei oft nur als Teilaspekt verstanden. Niederschlag wird hier eher als ein zu bewältigendes Problem und weniger als Ressource gehandelt.

Beim Regenernten – "rainwater harvesting" – ein Begriff aus dem anglo-amerikanischen Sprachraum, stehen die Vorteile einer gezielten Ressourcenschöpfung im Vordergrund (XU et al., 2020; UNEP, 2009): Eine Maximierung des Wasserdargebotes zur direkten Nutzung des gesammelten Wassers als Brauch- oder Trinkwasser führt zu Einsparung von Leitungswasser, Energieverbrauchs- und CO₂-Minimierung durch reduzierten Bedarf an Trinkwasseraufbereitung und -förderung, ökonomische Einsparung, Ernteertragserhöhung durch erhöhte Bewässerung im Garten oder Landwirtschaft und planmäßige Umgehung von offiziellen Leitungswasserrestriktionen in Dürreperioden. Vergleichbar zu den Zielen der Regenwasserbewirtschaftung werden auch die positiven Effekte des gezielten Rückhaltens und verzögerten Ablassens von gespeichertem Wasser zur Grundwasserspeisung und Verringerung von Niedrigabflüssen sowie Scheitelreduzierung der Regenernte zugerechnet (XU et al., 2020; LASPRILLA & KASSAYE, 2017; GARDNER & VIERITZ, 2010; STEC, 2020). Als umfassende Standardwerke und Best-Practice-Handbücher seien ESLAMIAN & ESLAMIAN (2020) und MEKDASCHI STUDER & LINIGER (2013) genannt (auf Englisch).

Systeme zum Regenernten setzen sich aus drei Komponenten zusammen: der Auffangfläche, den Zuleitungen und dem Speichersystem. Man unterscheidet bei der Regenernte zwischen Systemen im urbanen Raum, bei welchen zumeist von Dächern Wasser zur Trink- und Brauchwassernutzung gesammelt wird und Systemen im ländlichen Bereich, wo Oberflächenabfluss von Hangflächen hauptsächlich für die Bewässerung von Agrarflächen und für die Versorgung von Tieren gesammelt wird (ZABIDI et al., 2020; PRINZ, 1996). Die Speicherung erfolgt als Ex-situ-Speicherung in Zisternen oder Teichen oder als In-situ-Speicherung in der ungesättigten, oberen Bodenzone, wobei Oberflächenabfluss gezielt in Pflanzenstandorte geleitet wird,

um als pflanzenverfügbare Wasserressource zur Verfügung zu stehen (CORTESE et al., 2009).

Das Potenzial der Regenernte und die sich daraus ergebene Nutzmenge wird maßgeblich vom zur Verfügung stehenden Regendargebot bestimmt. Hierbei sind nicht nur raum-zeitliche Schwankungen des Jahresniederschlags zu berücksichtigen. Insbesondere für die Speicherdimensionierung sind saisonale Fluktuationen und das Verhältnis von Trocken- und Starkregenperioden von Bedeutung, da sie einen gravierenden Einfluss haben, wie groß der Speicher sein muss, um eine optimale Versorgungssicherheit zu garantieren (FWEKES & BUTLER, 2000; HANSON & VOGEL, 2014). Damit ergeben sich diverse Einflussfaktoren, welche bei der Regenernte berücksichtigt werden müssen:

- a) Nutzungsart: Trinkwasser, Brauchwasser im Haushalt (Toilette, Waschmaschine), Brauchwasser im Gartenbereich, Bewässerungswasser in der Landwirtschaft und davon abgeleitet die benötigte Wasserqualität
- b) Nutzungsmenge: Anzahl der zu versorgenden Personen oder Größe der Bewässerungsfläche
- c) Regendargebot: Schwankungen der jährlichen Niederschlagsmenge, Verhältnis von Trocken- und Starkregenperioden, saisonale Niederschlagsmuster, Klimaveränderungen
- d) Art, Größe und Beschaffenheit der Auffangfläche und daraus resultierende Wasserqualität
- e) Art und Länge der Zuleitung
- f) Art und Größe der Speichersysteme

Im ersten Teil dieser Arbeit wird der Stand des Wissens zu Regenerntesystemen beleuchtet. Es wird die große Vielfalt von möglichen Auffangflächen und Speichersystemen vorgestellt, die sich daraus ergebenden Wasserqualitätsprobleme erläutert sowie wichtige Regularien, verschiedene Dimensionierungsansätze für Zisternen und der Einfluss des Klimawandels auf die Versorgungssicherheit dargelegt.

Im zweiten Teil dieser Studie werden für 43 über Deutschland verteilte Stationen die mittleren jährlichen und täglichen Regenerntemengen und deren zeitliche und räumliche Variabilität quantifiziert. Im nächsten Schritt werden die dafür benötigten Speichergößen pro Quadratmeter Auffangfläche mit der sogenannten YAS-Methode für verschiedene Versorgungssicherheiten abgeleitet. Darüber hinaus werden die saisonalen Schwankungen von Wasserdefizitphasen aufgrund von Trockenphasen und Überlauf von Regenspeichern aufgrund von Starkregenereignissen innerhalb des Zeitraumes 1980 bis 2021 identifiziert und auf Trendverhalten untersucht. Des Weiteren wird eine Optimierungsmöglichkeit für Regenernteausnutzung und Speichergößen vorgestellt.

2 Regenernten: Review zu bestehenden Systemen, Regularien, Wasserqualitätsproblemen und Dimensionierungsansätzen

2.1 Auffangflächen

Dächer von Wohnhäusern, Bürogebäuden, Schulen, Sportanlagen, Krankenhäusern und Flughäfen können als Auffangflächen fürs Regenernten genutzt werden (STEC, 2020). Einhergehend mit einer schlechteren Wasserqualität ist Regenernten auf Gehwegen, Stellflächen und weniger stark befahrenen Stra-

ßen möglich (KÖNIG & NOLDE, 2021). Darüber hinaus gibt es speziellere, bisher weltweit relativ selten eingesetzte Auffangsysteme wie z. B. das Regenernten von Haltestellen, Denkmälern, Überdachungen, Fahrradstellplätzen oder Kleinstsystemen für den Balkonbereich (weitere Beispiele in Abb. 1).

Im ländlichen Raum kommen neben den umbauten Flächen schwer durchlässige Oberflächen wie Lehmflächen als Auffangflächen in Frage. Häufig werden Auffangflächen gezielt angelegt, geglättet und kompaktiert oder mit Asphalt, Beton, Glas, Silikon, Wachsen, Gummi und Plastik- oder Metallfolien versiegelt, um Oberflächenabfluss und damit den Ertrag zu erhöhen (PRINZ, 1996).

In der landwirtschaftlichen Anwendung des Regenerntens wird eine Vielfalt an Techniken eingesetzt, welche die Mikrotopographie von Ackerflächen gezielt verändert, um Oberflächenabfluss zu erzielen und diesen direkt zur Ackerfrucht zu leiten (In-situ-Verfahren). Diese Verfahren spielen speziell in semi-ariden und ariden Klimaregionen eine Rolle und finden bisher keine Anwendung in den gemäßigten Klimazonen. Typische Landschaftsveränderungen umfassen z. B. Anlegen von Rillen, Konturkämmen oder Terrassierung sowie speziellere Formen wie Meskat, Vallerani und Negarim-Formationen auf den Ackerflächen (siehe FAO, 1991; PRINZ, 1994; MEKDASCHI STUDER & LINIGER, 2013; MEHL et al., 2017 für umfassende Fallbeispiele).

2.2 Speichersysteme von ex-situ-Systemen

Speichersysteme unterscheiden sich bezüglich Größe, Form, Art der Aufstellung und Material. Die Größe von geschlossenen Speichern, auch Zisternen genannt, hat eine große Spannweite

zwischen 0,1 bis 100 m³ (fbr, 2021). Offene Speichersysteme, wie z. B. künstlich angelegte Teiche, sind oft wesentlich größer; der Übergang zu Einordnung als Kleintalsperren ist fließend.

Geschlossene Speicher werden im Untergrund, unterhalb oder auf dem Dach installiert und werden als Einzelsystem mit einem Speicher pro Dachfläche, als Blockspeicher, an welchen mehrere Dächer angeschlossen sind, oder als Verbundsystem mit einem Netzwerk von mehreren Speichern (ANGRILL et al., 2012) geplant. Zisternen werden in Europa zumeist aus Kunststoff oder (Stahl)-Beton hergestellt. In anderen Weltregionen ist der Materialeinsatz diverser: Es kommen eher lokal verfügbare Rohstoffe zum Einsatz, wie z. B. Holz, Ton oder Keramik.

Für eine automatische Schmutzwasserabführung können den Zisternen Filter vorgeschaltet werden, um den stark verschmutzten Spülstoß (im Englischen "first flush" genannt) am Anfang eines Niederschlagsereignisses abzufangen. Weitere Reinigungsstufen oder ggf. ein Pumpsystem zur weiteren Verteilung des Wassers können nachgeschaltet werden (ESLAMIAN & ESLAMIAN, 2020).

2.3 Wasserqualitätsproblematiken beim Regenernten

Die Wasserqualität ist ausschlaggebend für die weiteren Nutzungsmöglichkeiten des geernteten Regens. Insgesamt variiert die Wasserqualität von aufgefangenem Regenwasser sowohl räumlich als auch zeitlich stark. Trinkwasserqualität ist im Normalfall nicht gegeben (ZABIDI et al., 2020). Kontaminationen von geerntetem Regenwasser haben im Allgemeinen drei Ursachen: 1) Kontaminationen des Regenwassers durch Auswaschen von Luftverschmutzungen, auch nasse atmosphärische Deposition

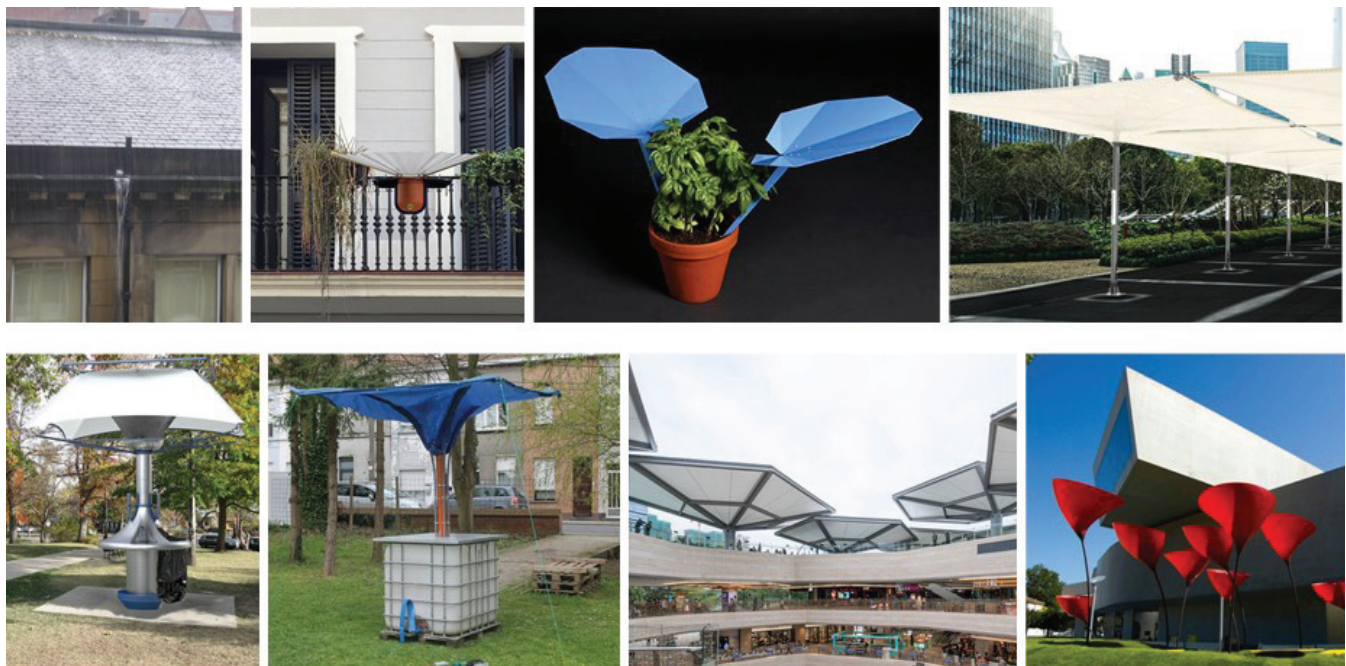


Abbildung 1

Mögliche Auffangflächen beim Regenernten: Klassische Dachfläche, Balkonsystem, Kleinstsystem, Parkplatzbeschattung, Wasserstelle, Schattenspendler und Kunstinstallation (MILLUV, 2022; RELEAF COLLECTOR, 2007; THINKPHI, 2022; TUVIE, 2022; GOETVINCK, 2022; INGAME, 2013).

Potential collection areas for rainwater harvesting: typical roof area, balcony systems leaf collector, shading systems, rainwater collectors for parks, large-scale shading systems and art installations with harvesting implementations (MILLUV, 2022; RELEAF COLLECTOR, 2007; THINKPHI, 2022; TUVIE, 2022; GOETVINCK, 2022; INGAME, 2013).

genannt, 2) Kontamination des ablaufenden Niederschlagswassers durch trockene Deposition und andere Schmutzstoffe auf oder in den Auffangflächen oder -leitungen und 3) Kontaminationen im Speicherkörper. Typische nasse und trockene Depositionen umfassten Stickstoff-, Sulfat- und Phosphorablagerungen (VET et al., 2014), Schwermetalle wie Pb, Zn, Cu, Cd und Cr (GÖBEL et al., 2007), Hg (LYNAM et al., 2016), PAHs (KIM & YOUNG, 2009) und mikrobielle Aerosole. Die abgelagerten Kontaminationen sind zumeist auf anthropogene Luftverschmutzungen durch Kraftwerke, Industrie, Heizungsanlagen und Verkehrsabgase zurückzuführen. Der Grad der Kontamination des ablaufenden Niederschlagswassers ist stark von der Art und Nutzung der Auffangflächen abhängig. Von Dachflächen sind insbesondere Metalldächer und Dachbeläge verantwortlich für eine Bandbreite an Schwermetallkontaminationen (z. B. Cd, Cu, Pb, Zi, Cr) und Pestiziden (POLKOWSKA et al., 2009). Weitere Verschmutzungsquellen von Auffangflächen ergeben sich durch Laubabwurf und durch Fäkalien von Vögeln oder anderen Kleintieren. Letztere können zu mikrobiologischen Verunreinigungen wie *Escherichia coli*, *Salmonella* u. a. führen (ABBASI & ABBASI, 2011). Ablaufendes Wasser von Straßenflächen ist darüber hinaus mit einer Vielzahl von weiteren Schadstoffen aus dem Kfz-Verkehr oder Müllablagerungen verschmutzt, welches dessen weitere Nutzung jedoch einschränkt oder ausschließt (umfassendes Literaturreview in PATON & HAACKE, 2021; Feldstudien zu urbanen Schmutzquellen in ANGRILL et al., 2017).

Die Vielfältigkeit der Kontaminationen und deren Quellen zeigt die Wichtigkeit einer automatischen Schmutzwasserabführung, um den häufig besonders stark verschmutzten ersten Spülstoß abzusondern. Eine verlässliche Behandlung in Bezug auf die vorherrschende Kontamination muss standortspezifisch und für die geforderte Nutzung angepasst werden (ABBASI & ABBASI, 2011; ANGRILL et al., 2017; ZABIDI et al., 2020). Hierfür kommen verschiedene Verfahren wie z. B. Reinigung durch Aktivkohlefilter oder einfache Sedimentation zur Anwendung und sind bereits Stand der Technik (STEC, 2020).

2.4 Regularien

Die Europäische Norm DIN EN 16941-1 (2018) legt Planung, Bemessung, Einbau und Wartung von Regenwassernutzungsanlagen zur Verwendung von Regenwasser und die Mindestanforderungen an solche Systeme fest. Eine Verwendung des Regenwassers als Trinkwasser, zur Zubereitung von Speisen oder zur Nutzung für die Körperhygiene ist nach dieser Norm in der EU nicht erlaubt.

Die DIN 1989-100 (2022) in Verbindung mit der DIN EN 16941-1 (2018) legt darüber hinaus Anforderungen und Prüfungen fest für 1) mechanisch wirkende Filter, die in den Zulauf von Regenwasserspeichern für Regenwassernutzungsanlagen eingebaut werden, 2) werkgefertigte monolithische Speicher, 3) werkgefertigte Speicher in Mehrteilbauweise und 4) für vor Ort erstellte Regenwasserspeicher.

Eventuell anfallendes überschüssiges Wasser kann durch eine Kopplung mit einer Versickerung vor Ort z. B. in Mulden oder mit der Ableitung in ein Oberflächengewässer abgeführt werden. Für die Niederschlagsversickerung müssen die Grundsätze des Arbeitsblattes DWA-A 138 (2006), für die Einleitung von Niederschlagswasser in Oberflächengewässer die technischen Regeln

der DWA-A 102 erfüllt werden. Diese Kombination ist z. B. im Hinweisblatt H 101 des Bundesverbands Betriebs- und Regenwassernutzung (fbr, 2016) beschrieben.

Die DIN EN 16941-1:2018 enthält des Weiteren zwei Beispiele für Berechnungsverfahren für die Speicherdimensionierung: einen vereinfachten und einen detaillierteren Ansatz mit kontinuierlicher Speichersimulationen, wie im nächsten Abschnitt beschrieben.

2.5 Dimensionierungsansätze für Regenerntesysteme

Die Dimensionierung eines Regenerntesystems ist nicht trivial, da hierbei jährliche und saisonale Niederschlagsschwankungen, Verbrauchsschwankungen und Anforderungen an die Versorgungssicherheit zu berücksichtigen sind. Ziel der Dimensionierung ist ein Speicher mit optimaler Größe für einen möglichst hohen Wasserertrag, welcher auch bei langanhaltenden Trockenphasen die Versorgungssicherheit gewährleistet und möglichst wenig Niederschlag durch unkontrolliertes Überlaufen während eines Starkregenereignisses verliert. Die im folgenden beschriebenen Dimensionierungsansätze beziehen sich ausschließlich auf die Ex-situ-Speicherung. Für die Quantifizierung der In-situ-Speicherung muss ein detailliertes Boden-Pflanzen-Wasser-Modell eingesetzt werden, welches in dieser Arbeit nicht behandelt wird.

Bei der Bestimmung der optimalen Speichergöße von Zisternen werden üblicherweise die klassischen Ansätze der Talsperrendimensionierung genutzt (MCMAHON & ADELOYE, 2005). Dabei ergeben sich jedoch zwei wesentliche Unterschiede der beiden Speichertypen: 1) der Skalensprung über mehrere Größenordnungen zwischen dem Volumen von Talsperren und Zisternen und 2) die temporale Skalierung des Zulaufs, welcher bei Talsperren durch einen kontinuierlichen Gerinneabfluß mit Hoch- und Niedrigwasserperioden bestimmt wird, bei Regenerntesystemen jedoch durch zeitlich diskontinuierliche Regenereignisse.

Bei Dimensionierungsmethoden unterscheidet man zwischen Ansätzen, welche die Speichergöße nach einem festgelegten Wasserbedarf bestimmen (engl. demand-side approach) und denen, die bestimmen, wieviel Wasser an einem Standort prinzipiell über einen bestimmten Zeitraum zur Verfügung steht und für diese Menge einen Speicher optimieren (engl. supply-side approach).

Drei gängige Dimensionierungsverfahren werden im Weiteren kurz beschrieben:

1. Einfache Speicherdimensionierung für festgelegten Verbrauch (demand-side approach)

Dieser Ansatz wird zumeist für die Dimensionierung einer Zisterne zur Gartenbewässerung benutzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass ausreichend Regenmenge und Auffangfläche zur Verfügung stehen. Die benötigte Speichergöße kann nach der Größe des Verbrauchs und der durchschnittlichen Länge der Trockenperiode berechnet werden:

$$S = VP \cdot n \cdot D \quad \text{Gleichung 1}$$

mit S als benötigtes Speichervolumen in Liter, VP als Verbrauch in Liter/Person/Tag oder Verbrauch in Liter/m² Gartenfläche, n als

Anzahl an Personen im Haushalt oder m² Gartenfläche und D als Dauer einer durchschnittlichen Trockenperiode in Tagen.

Bei Nutzung zur Gartenbewässerung wird oft eine Trockenperiode von 21 Tagen angesetzt. Diese Methode wird nur zur groben Größeneinschätzung eines Speichers benutzt und sollte nicht verwendet werden, wenn die Versorgungssicherheit für Brauchwassernutzung zu gewährleisten ist.

2. Speicherdimensionierung mit dem kumulativen Verfahren unter Berücksichtigung des monatlich potenziell möglichen Verbrauchs (supply-side approach)

Bei diesem in der Vergangenheit weit verbreitetem Ansatz wird für durchschnittliche, monatliche Niederschlagszeitreihen berechnet, wieviel Wasser in den regenreicheren Monaten gespeichert werden muss, um in regenärmeren Perioden ausreichend Wasser zur Verfügung zu haben. Zunächst wird das jährlich zur Verfügung stehende Wasserdargebot auf alle Monate gleichmäßig verteilt, um das monatlich mögliche Wasserdargebot zu erhalten. Im nächsten Schritt wird das so abgeleitete, monatlich mögliche Wasserdargebot in kumulativer Form grafisch mit der tatsächlichen kumulativen Regenerntemenge verglichen. Aus der größten Differenz zwischen den beiden kumulativen Summenlinien ergibt sich so die notwendige Speichergröße (im Englisch bekannt als "mass curve analysis", ALRAYESS et al., 2017). Dieser Ansatz wird zumeist für eine grobe erste Dimensionierung eines Speichers genutzt. Monatliche Bedarfsvariationen, Jahreschwankungen oder Klimavariabilität können mit diesem Ansatz nicht berücksichtigt werden. Des Weiteren können keine Angaben zur Versorgungssicherheit über längere Zeitperioden abgeleitet werden.

3. Speicherdimensionierung mit kontinuierlichen Simulationsmethoden (supply-side approach)

Kontinuierliche Simulationsmethoden werden angewendet, um die Größe eines Speichers unter Berücksichtigung der saisonalen und jährlichen Verteilung von Niederschlag und Trockenperioden zu optimieren (DIN EN 16941-1:2018, Appendix 2.2; ADELOYE, 2012). Hierbei werden alle Zu- und Abflüsse des Speichersystems betrachtet und die Speicheränderung auf täglicher Basis simuliert. Dieses Verfahren, international als YAS-Methode (Yield After Spillage) bekannt, berechnet den tatsächlich verfügbaren Ernteertrag als die Menge, welche seit dem vorherigen Berechnungsschritt noch im Speicher ist, plus die zu erntende Niederschlagsmenge des aktuellen Zeitschrittes oder dem anvisierten Ernteertrag – je nachdem welche Menge kleiner ist (FEWKES & BUTLER, 2000). Eingangsdaten von mindestens 5 Jahren (DIN EN 16941-1:2018) oder 15 bis 30 Jahren (FEWKES & WARM, 2000) sind zu benutzen, um die Niederschlagsvariabilität ausreichend berücksichtigen zu können. Bei diesem Verfahren können auch variable Nutzungsmuster berücksichtigt werden, wie z. B. eine saisonale Nutzung von Regenwasser oder ein gedrosselter Verbrauch in Trockenperioden.

Die drei vorgestellten Ansätze zeigen ein breit gefächertes Spektrum von Systembeschreibungen und Datenerfordernis bei der Speicherdimensionierung. Wird ein Erntesystem als Backup-System genutzt, genügt der erste, einfache Ansatz, wird es jedoch in der Primärversorgung der Haushalte eingesetzt,

müssen raum-zeitliche Niederschlagsvariabilitäten mithilfe des wesentlich umfangreicheren, dritten Simulationsansatzes bei der Speicherdimensionierung berücksichtigt werden.

2.6 Einfluss von Klimavariabilität und Klimawandel

Regenernten hat das Potenzial, Wasserengpässe aufgrund von längeren Trockenzeiten bedingt durch den Klimawandel abzuf puffern, gleichzeitig hängt die mögliche Erntemenge direkt von jährlichen und saisonalen Niederschlagsveränderungen ab. Negative Trends im Jahresniederschlag in Deutschland sind laut dem DWD (DWD Climate Data Center, 2022) für die letzten Dekaden nicht signifikant. Man verzeichnet aber, mit räumlich deutlichen Unterschieden, eine Zunahme von Niederschlägen im Winterhalbjahr. Gleichzeitig nehmen Trockenperioden vor allem im Sommer zu (MANNING et al. 2019). Die Zunahme von kurzen Starkregen in Deutschland wird derzeit viel diskutiert, ist jedoch aufgrund von fehlenden Langzeitdaten nur mäßig belegbar. Die Autoren PENDERGRASS & HARTMANN (2014a, 2014b) bestätigten in ihren globalen Studien die Veränderungen der Niederschlagsfrequenz hin zu mehr trockenen Tagen und häufigeren kurzen Starkregen aufgrund der globalen Erwärmung – ein Trend, welcher durch die Persistenz von Großwetterlagen noch verstärkt werden könnte (MANN et al. 2018). Die Auswirkungen dieser Frequenzverschiebung auf das Potenzial des Regenerntens wurden bisher noch nicht systematisch untersucht. Regionale Studien zum Regenerntepotenzial unter Klimawandel in Polen (GWOICIZIEJ-MAZUR et al., 2022), Australien (HAQUE et al., 2017), Südafrika (KAHINDA et al., 2010) oder USA (ALAMDARI et al., 2018) zeigen ein recht heterogenes Bild, mit keinen prognostizierten Veränderungen für Polen und einer reduzierten, saisonalen Wasserverfügbarkeit in den anderen Gebieten. In einer globalen Studie nach MUSAYEV et al. (2018) wurde gezeigt, dass für verschiedene Klimazonen der Klimawandel nur einen kleinen Einfluss auf das Regenerntepotenzial hat und dass das Regenernten das Potenzial besitzt, Unsicherheiten der Wasserverfügbarkeit zu reduzieren. Die Autoren KAHINDA et al. (2010) unterstreichen in ihrem Review die Wichtigkeit, bei der Speicherdimensionierung für langfristig ausgelegte Speicherinfrastrukturen zukünftige, mögliche Niederschlagsregime-Veränderungen explizit zu berücksichtigen.

3 Methodenbeschreibung

3.1 Datengrundlage und Trendanalyse

Die Analyse wird für Regenreihen mit täglicher Auflösung für 43 über das gesamte Bundesgebiet verteilte Messstationen aus dem DWD Climate Data Center (DWD, 2023) durchgeführt (Abb. 2). Bei der Auswahl der Stationen wurden ausschließlich Stationen ausgewählt, welche keine Datenlücken von mehr als insgesamt 30 Tagen (< 0,2 %) und weniger als 10 Fehlwerte am Stück über den Zeitraum 1980 bis 2020 aufweisen. Diese Einschränkung wurde eingeführt, da eine falsche Korrektur (z. B. auf null setzen von Fehlwerten) als extrem lange Trockenphasen in die Berechnung eingehen könnten und somit einen großen Einfluss auf die Speicherdimensionierung haben könnten. Diese Ausschlusskriterien beschränkten die Auswahl an Stationen in einigen Regionen erheblich, sodass sowohl ländliche als auch urbane Standorte ausgewählt wurden, um eine relativ homogene Abdeckung des Bundesgebietes sicherzustellen. In Anhang 1 sind die zugehörigen DWD Stations-ID für jede Station gelistet (DWD, 2023).

**Abbildung 2**

Lage der untersuchten Messstationen.
Location of rainfall stations.

Trendanalysen über jährliche Ernteertragsmengen, Defizit- und Überflusstage wurden mit dem Mann-Kendall-Test mit der Routine mannken des wql-Pakets und der Routine mk.test des trend-Pakets in R Cran (HIPEL & MCLEOD, 2005) durchgeführt (statistisch signifikanter Trend mit p-Wert von 0,05). Die gleiche Routine berechnet außerdem die Steigung der Trendgerade nach der Theil-Sen Schätzung (HELSEL & HIRSCH, 2002).

3.2 Ermittlung der Erntemenge

Die nutzbare Niederschlagsmenge ist abhängig von der verfügbaren Auffangfläche, saisonalen und jährlichen Niederschlagschwankungen sowie vier Verlustfaktoren.

Der erste Verlustfaktor ist durch einen minimalen Schwellenwert für den Niederschlag gesetzt, weil Niederschläge mit sehr gerin-

gen Niederschlagsintensitäten nicht zum Abfluss führen bzw. direkt verdunsten. Der Abfluss ist des Weiteren abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit und dem Gefälle der Auffangfläche, wofür ein Abflusskoeffizient nach DIN EN 16941-1:2018 anzusetzen ist (Tab. 1). Der Ernteeffizienzfaktor berücksichtigt den hydraulischen Wirkungsgrad der zwischengeschalteten Filtersysteme und Zuleitungen, welche zu einer weiteren Verringerung der nutzbaren Regenmengen führen können (Tab. 2). Als viertes ist der Verlust durch den Spülstoß anzusetzen, also der als besonders stark verschmutzte Anteil des Niederschlags am Anfang des Ereignisses, welcher abgesondert werden sollte.

Die tägliche Regenernte pro Quadratmeter Auffangfläche an Tagen mit Niederschlag lässt sich damit berechnen mit:

$$NE_t = (N_t - N_{\min}) \cdot C_{\text{Abfluss}} \cdot C_{\text{Ernte}} - NS_{\text{Spül}} \quad (\text{für } N_t > N_{\min}) \quad \text{Gleichung 2}$$

mit NE_t als erzielbare, tägliche Regenernte (mm/d bzw. l/d) am Tag t , N_t als täglicher Niederschlag (mm/d), $N_{\min}$ als Schwellenwert für Niederschlag (mm/d), C_{Abfluss} als Abflusskoeffizient der Auffangfläche (-), C_{Ernte} als Ernteeffizienzfaktor (-) und $NS_{\text{Spül}}$ als Menge des Spülstoßes (mm/d).

Diese Gleichung weicht von der Bestimmungsgleichung in der DIN EN 16941-1:2018 (Gl. 1, Absatz 6.1.2) ab, welche weder einen Schwellenwert für Niederschlag noch den Spülstoß berücksichtigt. Der mögliche Wertebereich und die hier benutzten Werte der einzelnen Faktoren bzw. Schwellenwerte sind in Tabelle 1 gegeben. Für den Abflusskoeffizient wurde hier der höchste mögliche Wert ausgewählt für eine Fläche, welche zum Abflusssammeln optimiert wurde. Das nutzbare Wasserdargebot NE bezieht sich hierbei auf eine Auffangfläche von einem Quadratmeter. Für größere Flächen ist die erzielbare Regenernte NE dementsprechend mit der Flächengröße zu multiplizieren.

Niederschlag in Form von Schnee wird in diesem Artikel nicht betrachtet. Es ist jedoch davon auszugehen, dass er an nival geprägten Standorten eine nicht zu vernachlässigende Komponente für die Erntemenge und die Speicherdimensionierung spielt.

3.3 Simulationsmethode zur Speicherdimensionierung

Das kontinuierliche Simulationsverfahren nach der YAS-Methode (Yield After Spillage) wird genutzt, um die benötigte Speichergröße für einen bestimmten Standort iterativ abzuleiten.

Für die gegebenen Niederschlagszeitreihen wird mit einem täglichen Zeitschritt der tatsächliche Ernteertrag Y , das aktuelle Speichervolumen V und die mögliche Verlustmenge durch Über-

Tabelle 1

Verlustfaktoren, welche das nutzbare Wasserdargebot beeinflussen, einschließlich typischer Wertebereiche und der hier verwendeten Faktoren.
Loss factors, influencing the rainwater availability including typical ranges for coefficients and values used in this study.

Verlustparameter	Einheit	Wertebereich	Diese Studie	Referenz
$N_{\min}$: Schwellenwert für Niederschlag	mm/d	0,1 – 2	1	HAACKE (2022)
C_{Abfluss} : Abflusskoeffizient der Auffangfläche	[-]	0,3 – 0,95	0,95	EU-Norm EN 16941-1:2018
C_{Ernte} : Ernteeffizienzfaktor	[-]	0,8 – 1	1	EU-Norm EN 16941-1:2018*
$NS_{\text{Spül}}$: Spülstoß	mm	1	1	DIJK et al. (2020)

* dort hydraulischer Effizienzfaktor genannt

laufen des Speichers O mit den folgenden drei Formeln nach der DIN-Norm EN 16941-1:2018 berechnet:

$$TY_t = \min(AY_t, V_{t-1}) \quad \text{Gleichung 3}$$

$$V_t = \min(V_{t-1} + NE_t - TY_t, S_{\max}) \quad \text{Gleichung 4}$$

$$O_t = \max(V_{t-1} + NE_t - S_{\max}, 0) \quad \text{Gleichung 5}$$

mit TY als tatsächlich verfügbarem und AY als anvisiertem Ernteertrag (l/d), O als Überlaufmenge (l/d), V als aktuelle Speicherbefüllung (l) und $S_{\max}$ als maximales Speichervolumen (l) und t als Zeitintervall (Tag).

Die in den Gleichungen 3 bis 5 beschriebenen Ertragsmengen und Speichergrößen sind als Volumina in Litern angegeben und beziehen sich jeweils auf eine Auffangfläche von einem Quadratmeter.

In dieser Studie wird als anvisierter Ernteertrag AY ein täglich konstantes Tagesmittel benutzt, welches sich aus der Summe aller täglichen Regenernten NE_t geteilt durch die Gesamtanzahl der Tage D der gesamten Untersuchungsperiode 1980 bis 2020 ergibt:

$$AY_t = (\sum_1^D NE_t) / D \quad \text{Gleichung 6}$$

Die Dimensionierung des benötigten Speichervolumens $S_{\max}$ erfolgt iterativ, indem für unterschiedliche Werte von $S_{\max}$ die Gleichungen 3 bis 5 für den gesamten Untersuchungszeitraum angewendet werden. Für jeden verwendeten Wert von $S_{\max}$ wird die Versorgungssicherheit mit der folgenden Metrik R_V berechnet (XU et al., 2020):

$$R_V = \frac{\sum_1^D AY_t}{\sum_1^D TY_t} \cdot 100 \quad \text{Gleichung 7}$$

Für den kleinsten Wert von $S_{\max}$, bei welchem für jeden Tag der Untersuchungsperiode der anvisierte Ernteertrag gedeckt werden kann, ergibt sich eine Versorgungssicherheit von 100 %. Würde ein kleineres Speichervolumen ausgewählt werden, ist keine hundertprozentige Versorgungssicherheit gegeben. Nach HANSON & VOGEL (2014) sollten neben einer hundertprozentigen auch niedrigere Versorgungssicherheiten untersucht werden. Dadurch kann zum einen das maximal benötigte Speichervolumen erheblich reduziert werden. Zum anderen können kritische Perioden an Defizit- und Überflusphasen im Jahresverlauf identifiziert werden. Angelehnt an die Studie von HANSON & VOGEL (2014) werden in dieser Studie die zugehörigen Speicher nicht nur für eine Versorgungssicherheit von 100 %, sondern auch für eine von 95 % iterativ abgeleitet.

Das Speichergröße-Ernte-Verhältnis ist für größere Talsperren ein breit erforschtes Gebiet (MCMAHON & ADELOYE, 2005; MORAN, 1959). Es ergeben sich jedoch neue Herausforderungen bei der Dimensionierung der wesentlich kleineren Regenspeicher, da eine erheblich größere Diskontinuität des Zulaufs zu verzeichnen ist: einzelne Niederschlagsereignisse beim Regenernten versus kontinuierlichen Zufluss durch einen Vorfluter bei großen Talsperren (NDIRITU et al., 2017). Des Weiteren spielen saisonale Frequenzveränderungen des Niederschlags, also das Verhältnis von Trockenperioden versus Starkregenereignisse, eine größere

Rolle bei der Regenspeicherung im Vergleich zur klassischen Talsperrenbewirtschaftung.

Eine hundertprozentige Ausnutzung des geernteten Niederschlags führt oft zu überproportional großen Speichergrößen. Aus diesem Grund wird als Faustformel oft nur 50 bis 80 % der Regenernte genutzt. In den meisten Fällen ist die wichtigste und zugleich schwierigste Entscheidung, welche Niederschlagsausnutzung, der sich daraus ergebene Ernteertrag und die zugehörige Speichergröße man letztendlich auswählt (HANSON & VOGEL, 2014; LIAW & TSAI, 2004). Die zur Verfügung stehende Auffangfläche und die benötigte Stellfläche für ein Speichersystem sind hierbei gerade im innerstädtischen Bereich in den meisten Fällen der limitierende Faktor beim Regenernten.

In dieser Studie wird das YAS-Simulationsverfahren im Weiteren eingesetzt, um Speichervolumina für zwei Versorgungssicherheiten (95 und 100 %) und Regenausnutzungsraten von 10 bis 100 % (in Zehnerschritten) zu optimieren. Für ausgewählte Großstädte (Hamburg, Köln-Bonn, Frankfurt, Stuttgart und München) wird das gesamte Speichergröße-Ernte-Verhältnis abgeleitet. Für alle anderen Städte werden aus Platzgründen Speicher nur für die beiden genannten Versorgungssicherheiten und die üblichen Regenausnutzungen von 50 %, 80 % und 100 % iteriert und interpretiert. Des Weiteren werden die Ganglinien bezüglich der Länge von Defizitphasen (aktuelles Speichervolumen V aus Gleichung 4 deckt nicht den anvisierten Demand) und Überflusphasen (Überlaufmenge O aus Gleichung 5 ist größer null) pro Jahr für alle Stationen auf Trendverhalten untersucht.

4 Quantifizierung des Regenernte-Potenzials, Speichergrößen und Versorgungssicherheiten in Deutschland

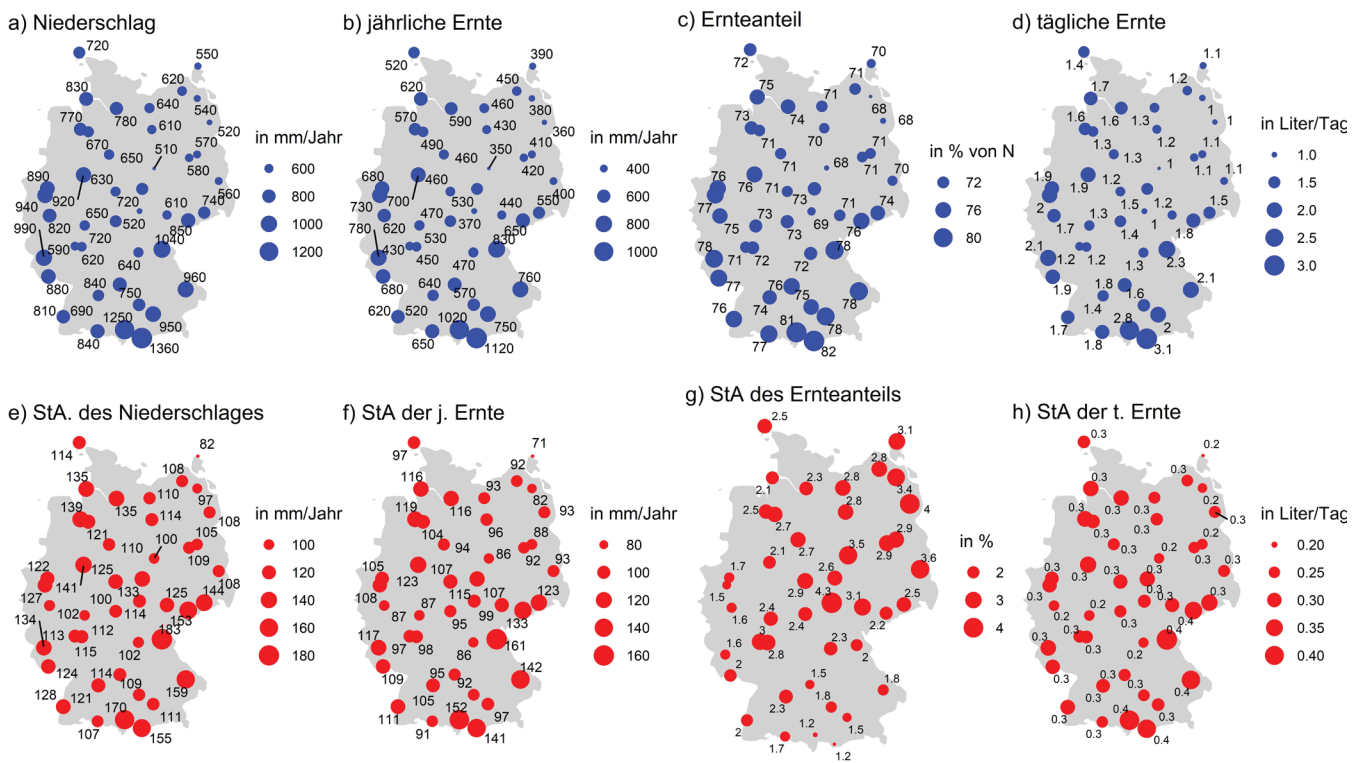
4.1 Bestimmung des Regenerntepotenzials

Die jährlichen mittleren Ernteertragswerte nehmen wie der mittlere Jahresniederschlag von Norden nach Süden und von Osten nach Westen zu (Abb. 3 a, b, d) und zeigen eine große Spannweite von 350 Millimeter pro Jahr in Magdeburg und 1.120 Millimeter pro Jahr in Garmisch-Partenkirchen. Die sich daraus ergebenden täglichen, mittleren Erntemengen variieren in den nördlichen und zentralen Regionen zwischen 1 und 2 Liter, im Süden bei ausgewählten Stationen wie Kempten und Garmisch-Partenkirchen bis zu Werten von 3 und 4 Liter pro Tag und Quadratmeter.

Um eine "reale" Erntemenge zu bekommen, sind die dargestellten Werte jeweils mit der tatsächlich verfügbaren Auffangfläche zu multiplizieren: Bei einer Dachfläche von 100 Quadratmetern könnten im Schnitt z. B. in List 140 Liter ($1,4 l/100 m^2$, rechte Spalte Abb. 3) und in Garmisch-Partenkirchen 310 Liter pro Tag ($3,1 l/100 m^2$) geerntet werden.

Aufgrund der vier Verlustfaktoren (Tab. 2) kann nur ein Anteil von 68 bis 82 % des Jahresniederschlags für die Regenernte genutzt werden (Abb. 3c), mit den kleinsten Werten an den Stationen im Nordosten und einer relativ homogenen Verteilung im restlichen Bundesgebiet.

Die zugehörigen Standardabweichungen (Abb. 3 e, f, g, h) zeigen generell eine hohe jährliche Variabilität des Niederschlags und

**Abbildung 3**

a) Mittlerer Jahresniederschlag, b) mittlerer jährlicher Ernteertrag, c) Ernteanteil des mittleren Jahresniederschlages, welcher maximal für die Regenern- te genutzt werden kann und d) zugehörige mittlere tägliche Ernte für 43 ausgewählte Messstationen in Deutschland, e – h) dazugehörige Standardab- weichungen. Werte sind gemittelt über den Zeitraum 1980 bis 2020 und bezogen auf einen Quadratmeter Auffangfläche.

a) Mean annual precipitation, b) mean annual harvest amount, c) fraction of the mean annual precipitation and d) mean daily harvest amount, which could maximally be used for rainwater harvesting for 43 stations across Germany and e – h) the corresponding standard deviations. Values were averaged over the time period 1980 to 2020 and given for one square meter collection area.

die daraus resultierende hohe Variabilität der jährlichen bzw. täglichen Ernte. Der Anteil des Ernteanteils variiert jedoch im Ver- hältnis zu seinem absoluten Mittelwert zeitlich wenig.

Die jährliche Variabilität des täglichen Regenernteertrags (Abb. 4) lässt kein klares Trendverhalten erkennen. Insgesamt gab es in den Jahren 1980 bis 2000 für die meisten Stationen in den ersten zwei Dekaden eher höherer Werte als in den zwei letz- teren. Ein statistisch signifikanter, negativer Trend konnte unter Anwendung des Mann-Kendall-Tests für den Zeitraum 1980 bis 2020 für sechs Stationen in Zentraldeutschland detektiert wer- den (rot markierte Mittelwerte in der rechten Spalte der Abbil- dung). Die abgeleiteten Steigungen der Trendgeraden nach der Theil-Sen-Schätzung waren für fünf dieser Stationen mit < 0,5 bis 0,9 % eher gering; für die Station Brand lag sie bei minus 1,2 %.

4.2 Bestimmung und Vergleich der benötigten Speichergößen

Für eine Ernteausnutzung von 100, 80 und 50 % sind in Abbil- dung 5 die resultierenden täglichen Nutzmengen (a – c) und die benötigten Speichergößen (d – f) dargestellt. Man erkennt, dass für eine hundertprozentige Ausnutzung sehr große Speicher vorzuhalten sind, welche zwischen 420 (Bamberg) und 1.460 (Garmisch-Partenkirchen) Liter pro m² angeschlos- sene Auffangfläche variieren. Es sind keine klaren räumlichen

Muster zu erkennen, sehr hohe Speichergößen sind über das ganze Bundesgebiet verteilt und liegen z. B. auch in Hamburg (1.060 l/m²), Oldenburg (1.100 l/m²), Prenzlau (1.220 l/m²), Südharz (1.240 l/m²) oder Erfurt (1.140 l/m²) sehr hoch.

Bei einer Reduzierung der Regenernteausnutzung auf 80 bzw. 50 % geht der benötigte Speicherraum sprunghaft zurück und variiert zwischen 140 und 280 bzw. 43 und 110 Liter.

Für alle Stationen wurden für unterschiedliche Ernteausnutzun- gen von 30 bis 100 % die dazugehörigen Speichergößen itera- tiv für eine Versorgungssicherheit von 100 und 95 % bestimmt. Exemplarisch ist das Speichergöße-Ernteertrags-Verhältnis in Abbildung 6 für fünf Großstädte gezeichnet, wobei der Ernte- ertrag als prozentualer Anteil der maximal möglichen Menge (Abb. 6a) und als absoluter täglicher bzw. jährlicher Ernteertrag (Abb. 6b und c) dargestellt ist. Die senkrechten Linien zeigen die drei Ernteausnutzungen an. Für alle Stationen ergibt sich eine extrem große Spannbreite der benötigten Speichergößen. Eine hundertprozentige Ernteausnutzung mit gleichzeitiger hundert- prozentiger Versorgungssicherheit führt bei allen Stationen zu unrealistischen Speichergößen von 560 Liter pro Quadratmeter für Berlin bis zu 760 Liter pro Quadratmeter für Köln-Bonn. Es ist zu erkennen, dass bei einer Reduzierung der Versorgungssiche- rheit von nur 5 % für alle untersuchten Stationen ein erheblich kleinerer Speicher benötigt werden würde.

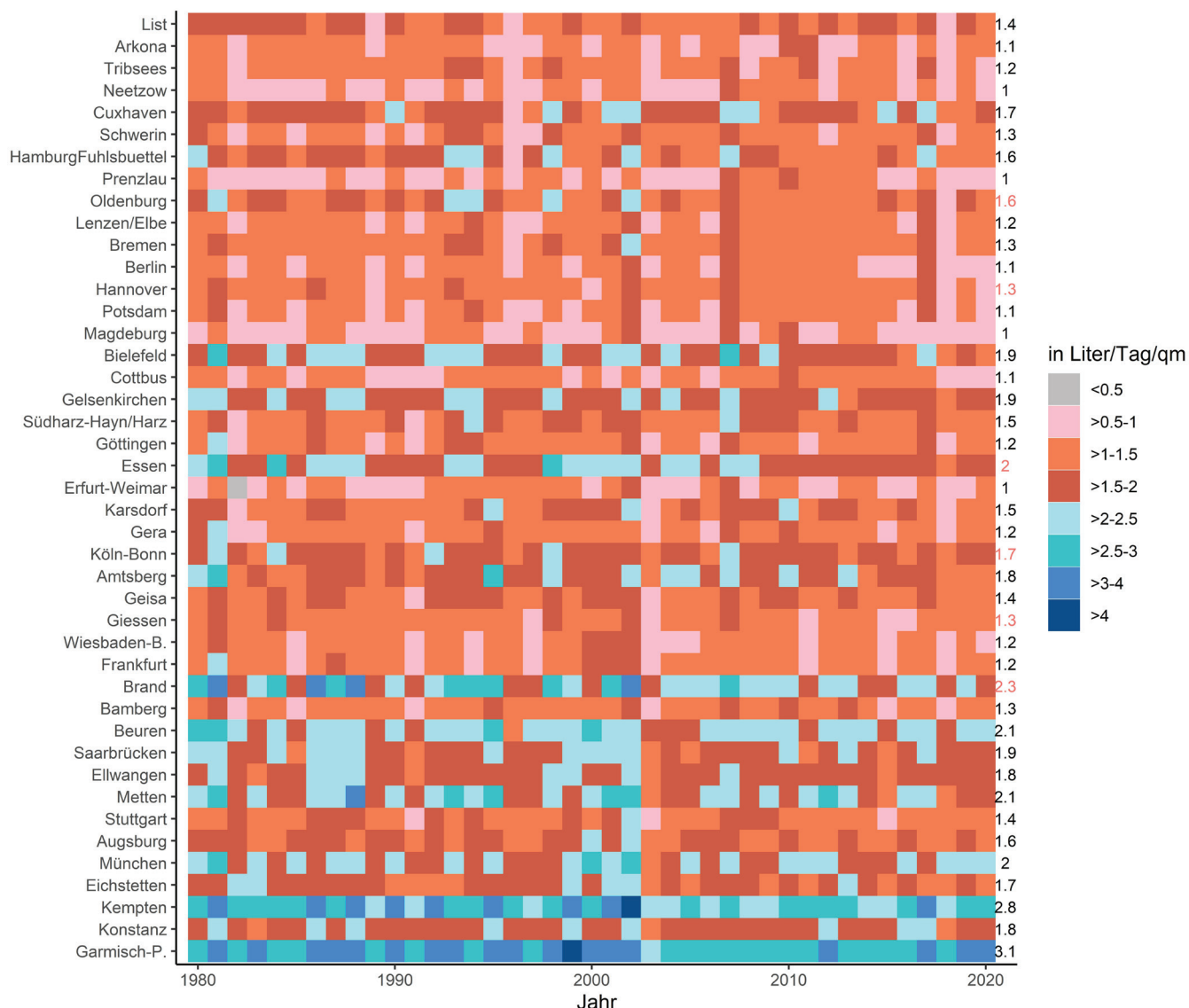


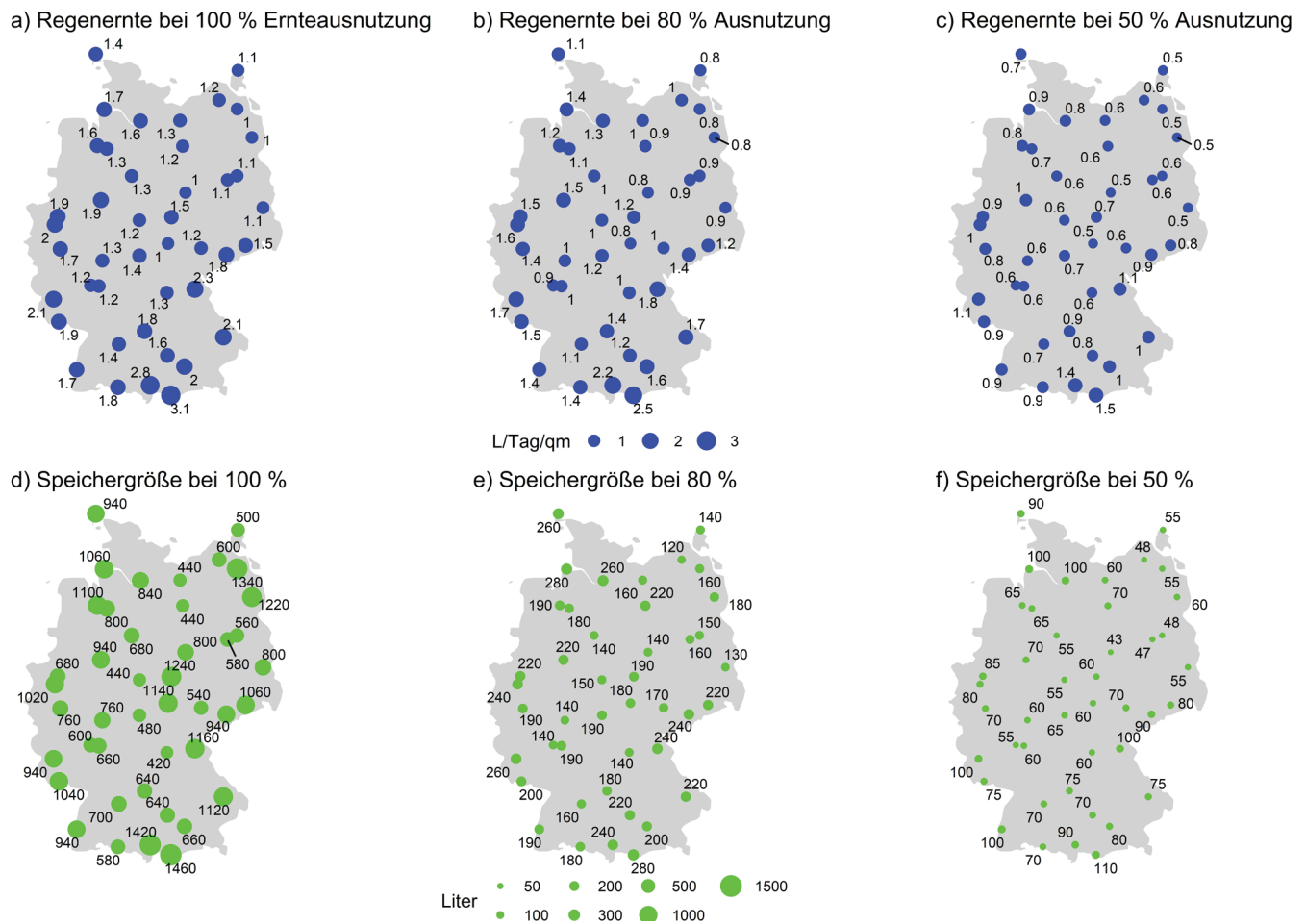
Abbildung 4

Jährliche Variabilität des potenziell maximal möglichen täglichen Ernteertrags bezogen auf Liter pro Tag und Quadratmeter Auffangfläche Regenmenge über den Zeitraum 1980 bis 2020 für 43 Messstationen in Deutschland. Stationen sind sortiert von Nord nach Süd. Einzelwerte in der rechten Spalte sind mittlere Jahresdurchschnittswerte in Liter pro Tag und Quadratmeter (in rot Stationen mit negativem Trend).

Annual variability of potentially maximum possible rainwater harvest in litre per day and square meter of collection area for the time period 1980 to 2020 for 43 station across Germany. Stations sorted from north to south. Individual values in the right-hand column are mean values in litre per day and square meter (red stations exhibit a negative trend).

Die Angaben von Ernteausnutzung und Versorgungssicherheit können zunächst verwirrend sein, es sind jedoch letztendlich Stellschrauben, an welchen man drehen kann, um die Speichergröße nicht astronomisch groß werden zu lassen. Je geringer die prozentuale Ernteausnutzung ist (x-Achse in Abb. 6a) oder je geringer die Versorgungssicherheit angesetzt wird (farbige Linien mit 100 bzw. 95 % Versorgungssicherheit in Abb. 6), desto kleiner kann der Speicher dimensioniert sein. Letztendlich setzen beide Stellschrauben an, den Einfluss von Niederschlagsvariabilität, also die Verteilung von eher trockenen und eher nassen Jahren sowie längeren Trockenphasen innerhalb des Gesamtzeitraums, auf eine Überdimensionierung des Speichers abzufedern.

In Abbildung 7 sind für die zwei untersuchten Versorgungssicherheiten (95 und 100 %) und die drei Ausnutzungsraten (100, 80, 50 %) die benötigten Speicher für alle Stationen dargestellt (alle dazugehörigen Zahlenwerte sind in Tab. 1 gelistet). Im Gesamtvergleich aller untersuchten Stationen erkennt man einen klaren Speicher-Größensprung von einer 100%igen Versorgungssicherheit (grün) im Vergleich zu einer 95%igen (rot). Dieser Größensprung ist bei einer Regenausnutzung von 100 % besonders ausgeprägt: So würde sich beispielsweise der Speicher für die Stadt Frankfurt z. B. von 660 auf 170 Liter pro Quadratmeter verkleinern, für die Station in Hamburg sogar von 840 auf 200 Liter pro Quadratmeter. Für alle untersuchten Stationen führt eine Reduzierung der Versorgungssicherheit von 100 auf 95 % zu

**Abbildung 5**

Tägliche Ertragsmengen bei a) 100 %, b) 80 % und c) 50 % Ausnutzung und d – f) dazugehörige Speichergrößen pro Quadratmeter Auffangfläche für 43 ausgewählte Messstationen in Deutschland bei 100 % Versorgungssicherheit. Alle Werte ergeben sich aus Langzeitsimulationen über den Zeitraum 1980 bis 2020.

Daily rainfall harvest for a) 100 %, b) 80 % and c) 50 % usage of available rainwater and d – f) corresponding storage sizes per square meter of collection area for 100 % water supply efficiency. Values derived from long-term simulations over the time period 1980 to 2020 for 43 stations across Germany.

einer sehr großen Reduzierung der benötigten Speichergrößen. Die benötigte Speichergröße reduziert sich um eine Größenordnung zwischen einer Ausnutzung und Versorgungssicherheit von 100 % im Vergleich zu einer 80%igen Ausnutzung und Versorgungssicherheit von 95 %. Wieder am Beispiel Frankfurt und Hamburg dargestellt ergäbe sich eine Reduzierung des Speichers von 660 auf 60 bzw. 840 auf 70 Liter pro Quadratmeter.

Eine 100%ige Versorgungssicherheit bedeutet letztendlich, dass es in dem gesamten Untersuchungszeitraum 1980 bis 2022 nicht einen einzigen Tag zu einem Versorgungsengpass kommen würde. Dieser Versorgungsanspruch ist für manche Wassernutzungen legitim, gäbe es jedoch eine Alternativversorgung, wäre eine niedrigere Versorgungssicherheit, wie hier gerechnet mit 95 %, gerade für den urbanen Raum eine ökonomischere Lösung, da sich dadurch wesentlich kleinere Speichereinrichtungen ergeben würden.

Für einen Speicher, welcher für eine reduzierte Versorgungssicherheit von 95 % und eine Regenausnutzung von 80 % dimensioniert wurde (Tab. 1), wurden am Beispiel der Städte Berlin und

München die sich ergebenden Defizit- und Überflussphasen mit der YAS-Methode abgeleitet. In Abbildung 8 sind die Zeiträume von Tagen bzw. Wochen mit leerem Speicher und die einzelnen Tagen mit großen Überlaufmengen bei Starkregen für den gesamten Untersuchungszeitraum dargestellt. Für beide Städte treten die Defizitphasen hauptsächlich in den Frühjahrsmonaten auf. Für einige Jahre, z. B. 2015, reichen die Defizitphasen bis weit in den Monat Mai hinein. Defizite treten in München in den Sommermonaten gar nicht auf, dafür sind z. B. in den Jahren 1999 und 2018 in Berlin längere Defizitphasen von bis zu 60 Tagen im Spätsommer bis Herbst zu erkennen. In dem besonders trockenen Jahr 2018 sind in Berlin ab Herbst eine lange Defizitphase zu verzeichnen, welche sich weit bis in das Frühjahr 2019 fortsetzt, wohingegen in München keine ausgeprägten Defizite verzeichnet wurden.

Die meisten Überlaufphasen lassen sich für München in den Monaten Juni bis Oktober beobachten, während sich für Berlin eine Verteilung auf den gesamten Jahresverlauf zeigt. Die Anzahl der jährlichen Defizit- und Überflusstage, dargestellt als Zahlenkolonne am rechten Rand der Einzelabbildungen in

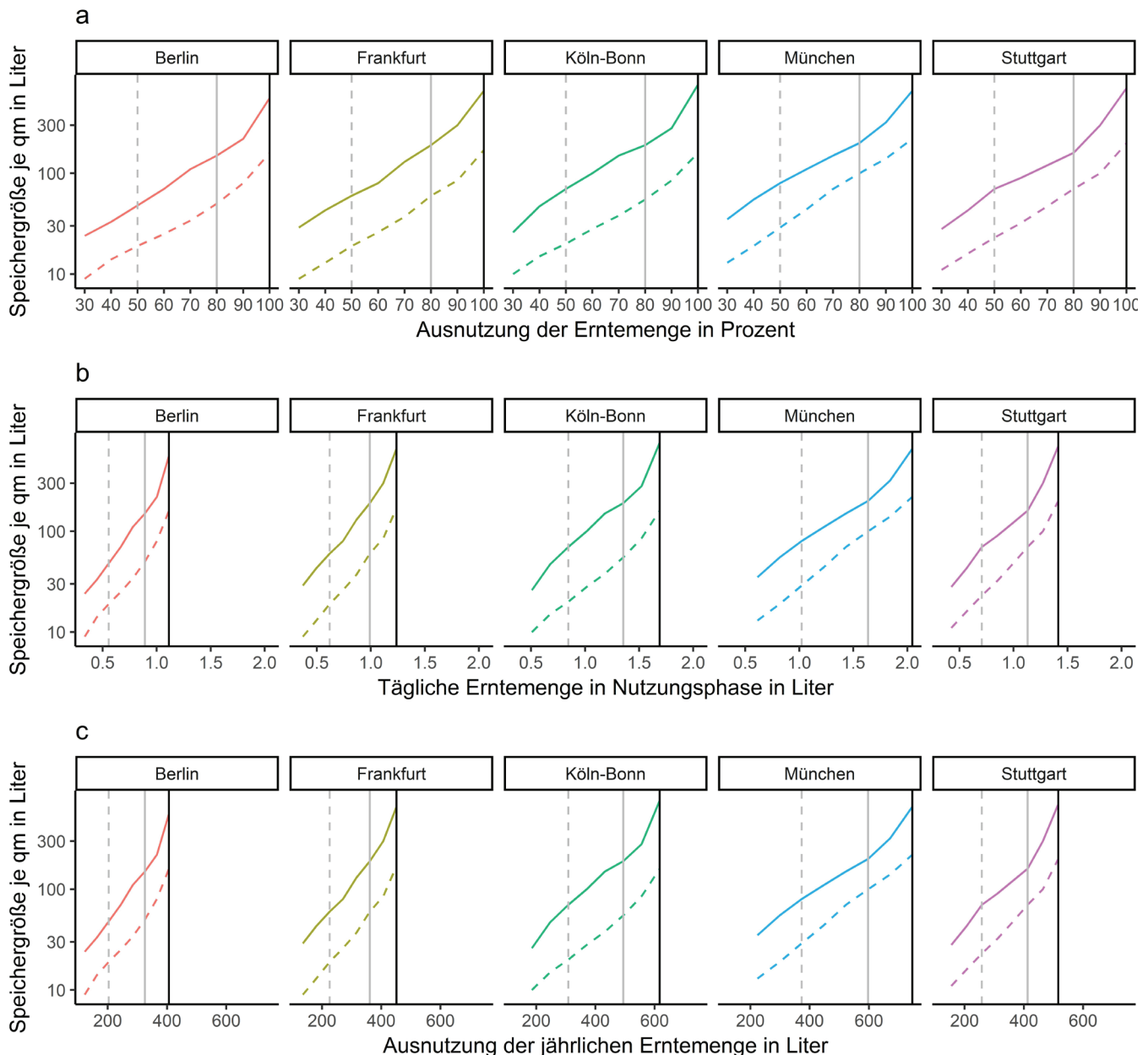


Abbildung 6

Speichergröße-Ernte-Verhältnis für Versorgungssicherheiten R_v von 95 (gestrichelte Linien) und 100 % (normale Linien) für ausgewählte Städte in Deutschland a) relativ als prozentuale Ernteausnutzung und b) absolut bezogen auf die erzielbare Erntemenge pro Tag und c) pro Jahr. Die senkrechten schwarzen und grauen Linien markieren Ernteausnutzungen in Prozent von 100 (schwarz), 80 (grau) und 50 (grau, gestrichelt).

Storage size-yield-relationship for water supply efficiencies R_v of 95 and 100 % for selected cities in Germany a) as a function of fraction of available water used as percentages and as a function of b) daily harvest and c) annual harvest in litres. The grey and black vertical lines mark typical harvest usages in percent: 100 (black), 80 (grey) and 50 (grey, dashed).

Abbildung 8, zeigen nach dem Mann-Kendall-Test kein Trendverhalten.

Das über jeden Tag im Jahr gemittelte, saisonale Auftreten von Defizit- und Überflusphasen ist in Abbildung 9 für alle Stationen zusammengefasst. Abgebildet ist die Summe aller Defizit- bzw. Überflusstage am 1. Januar für die Jahre 1980 bis 2020 geteilt durch die Anzahl der Jahre und das Gleiche für den 2. Januar etc. Die zugehörigen Speichergrößen sind in Tabelle 1 gelistet. Man erkennt, dass bei den südlichen Stationen Garmisch bis Metten

Defizitphasen hauptsächlich in den ersten drei Monaten im Jahr auftreten, wohingegen die Überflusphasen sich hauptsächlich auf die Sommermonate Juli bis September konzentrieren. Die anderen Teile von Deutschland zeigen ein heterogenes Auftreten sowohl der Defizitphasen als auch der Überflusphasen, gleichzeitig sind die meisten Defizitphasen auch dort in den Frühlingsmonaten verankert. Für 12 der Stationen wurde eine statistisch signifikante Zunahme der Defizittage pro Jahr, für zwei Stationen eine statistisch signifikante Abnahme der großen Überflusmengen pro Jahr detektiert (rote bzw. blaue Sterne am rechten Rand

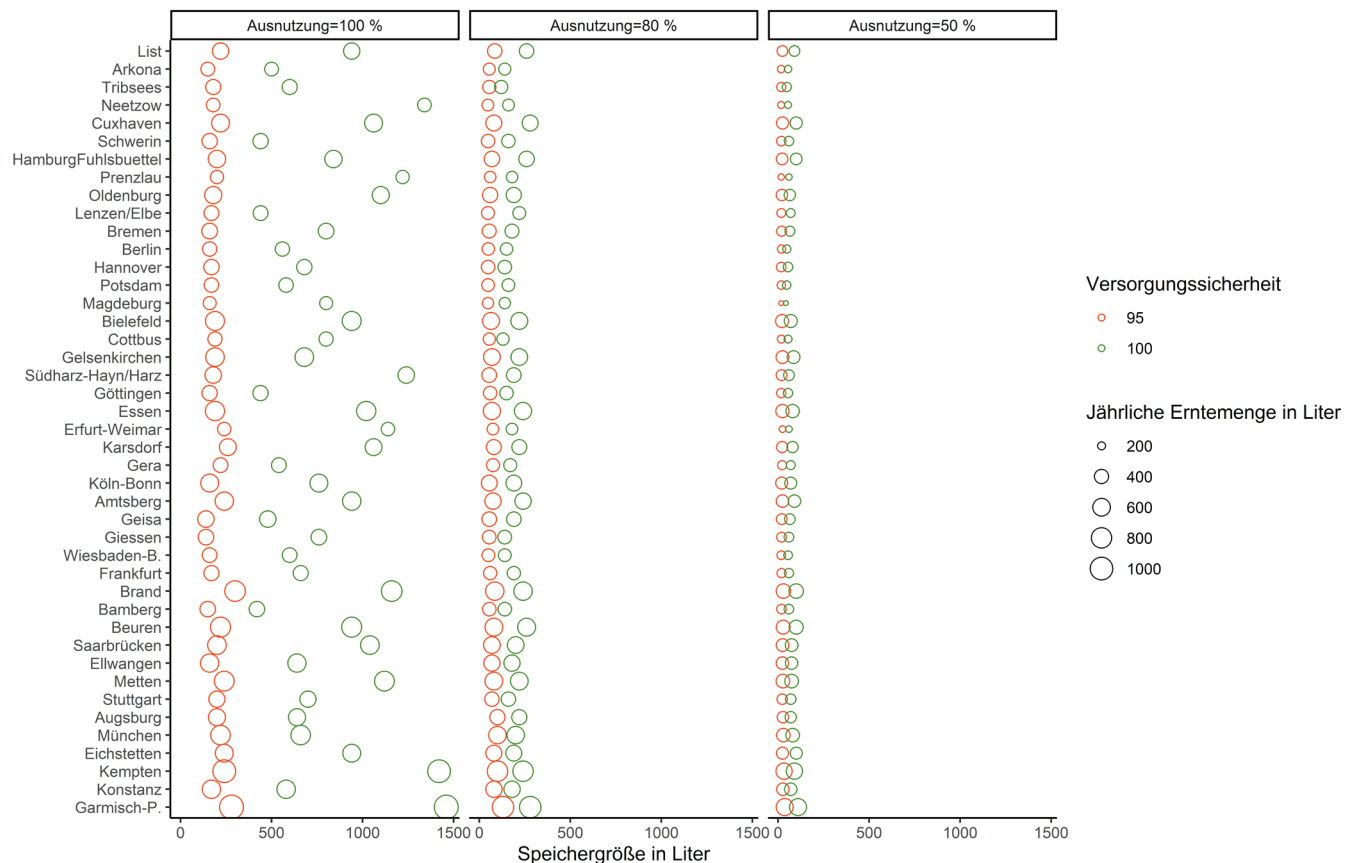


Abbildung 7

Benötigte Speichergröße je Quadratmeter Auffangfläche für Versorgungssicherheiten von 95 % und 100 % bei üblicher Ernteaussnutzung von 100 %, 80 % und 50 % für 43 Standorte in Deutschland (Stationen sortiert von Nord nach Süd, die Blasengröße indiziert die durchschnittliche, jährliche Erntemenge).

Required storage sizes per square meter collection area for water supply efficiencies of 95 % and 100 % for typical harvest usages of 100 %, 80 % and 50 % for 43 stations across Germany (Stations sorted from north to south, bubble sizes indicate annual mean harvest amount).

in Abb. 9). Die gesamte Phasenbetrachtung bezieht sich auf eine täglich konstante Nutzmenge, eine Regenausnutzung von 80 % und einen Speicher dimensioniert für eine Versorgungssicherheit von 95 %.

5 Diskussion und Schlussfolgerung

Die Studie hat aufgezeigt, wie divers die Einflussfaktoren beim Regenernten sind, angefangen von neuartigen Auffangflächen im städtischen Raum bis hin zu Wasserqualitätsansprüchen und -zuständen, unterschiedlichen Berechnungsverfahren zur Speicherdimensionierung und ungeklärten Frequenzabhängigkeiten von zukünftigen Niederschlagsregimen unter dem Einfluss des Klimawandels.

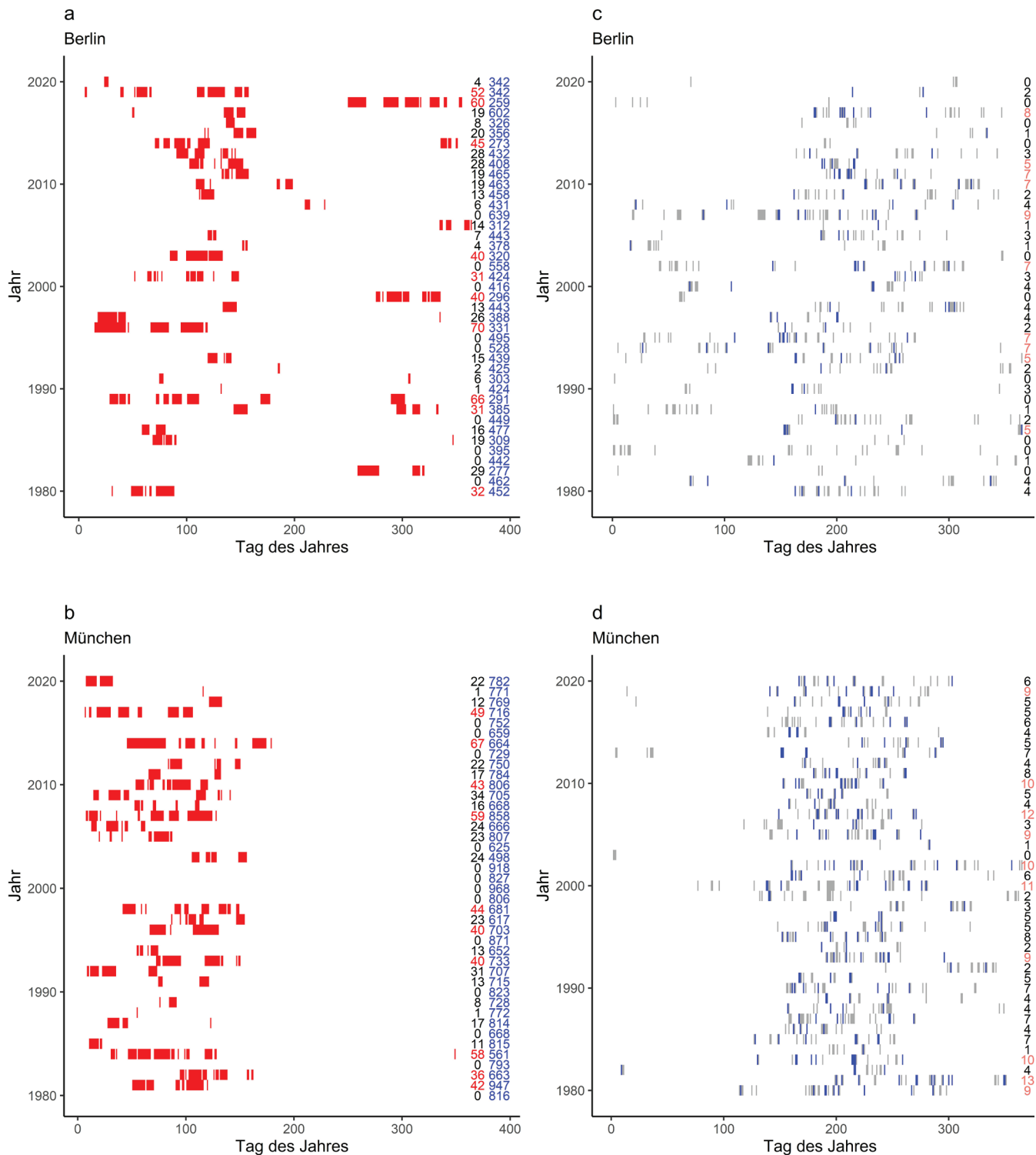
Die deutschlandweite Betrachtung des Regenerntepotenzials ergab ein heterogenes Bild bezüglich der prozentual möglichen Ausnutzung von jährlichen Niederschlagsmengen. Es kann nicht der gesamte Niederschlag genutzt werden, sondern nur ein Anteil als Funktion von verschiedenen Verlustfaktoren und einer festzusetzenden Ernteaussnutzungsrate. Der Wertebereich der Verlustfaktoren (Tab. 2) könnte auch zu wesentlich geringeren Ernteertragsmengen führen, wenn z. B. der Abflusskoeffizient herabgesetzt würde. In dieser Berech-

nung wurde jedoch von einer optimalen Auffangfläche ausgegangen.

Es gibt bisher nur wenige Feldstudien, welche untersucht haben, wie groß letztendlich die Erntemenge von unterschiedlichen Auffangflächen ist. In der Studie von LIA & TSAI (2004) wurde dies für rund 100 Niederschlagsereignisse für drei typische Dachformen bestimmt. Feldstudien zur Ableitung einer optimalen Größe des Spülstoßes oder des Schwellenwertes für Niederschlag stehen noch aus.

Es war mit wenigen Ausnahmen kein statistisch signifikanter Trend bezüglich der Änderung der verfügbaren Regenwasserernte innerhalb der letzten 40 Jahre zu verzeichnen. Eine Stadt-raumanalyse zur Standortssuche von Auffangflächen und Aufstellflächen von Speichersystemen sowie ökonomische Betrachtungen bezüglich Neubau-, Nachrüst- oder Unterhaltungskosten geht über den Rahmen dieser Studie hinaus. Die Ableitung von benötigten Speichergrößen stellt jedoch hierfür eine wichtige Eingangsgröße bereit.

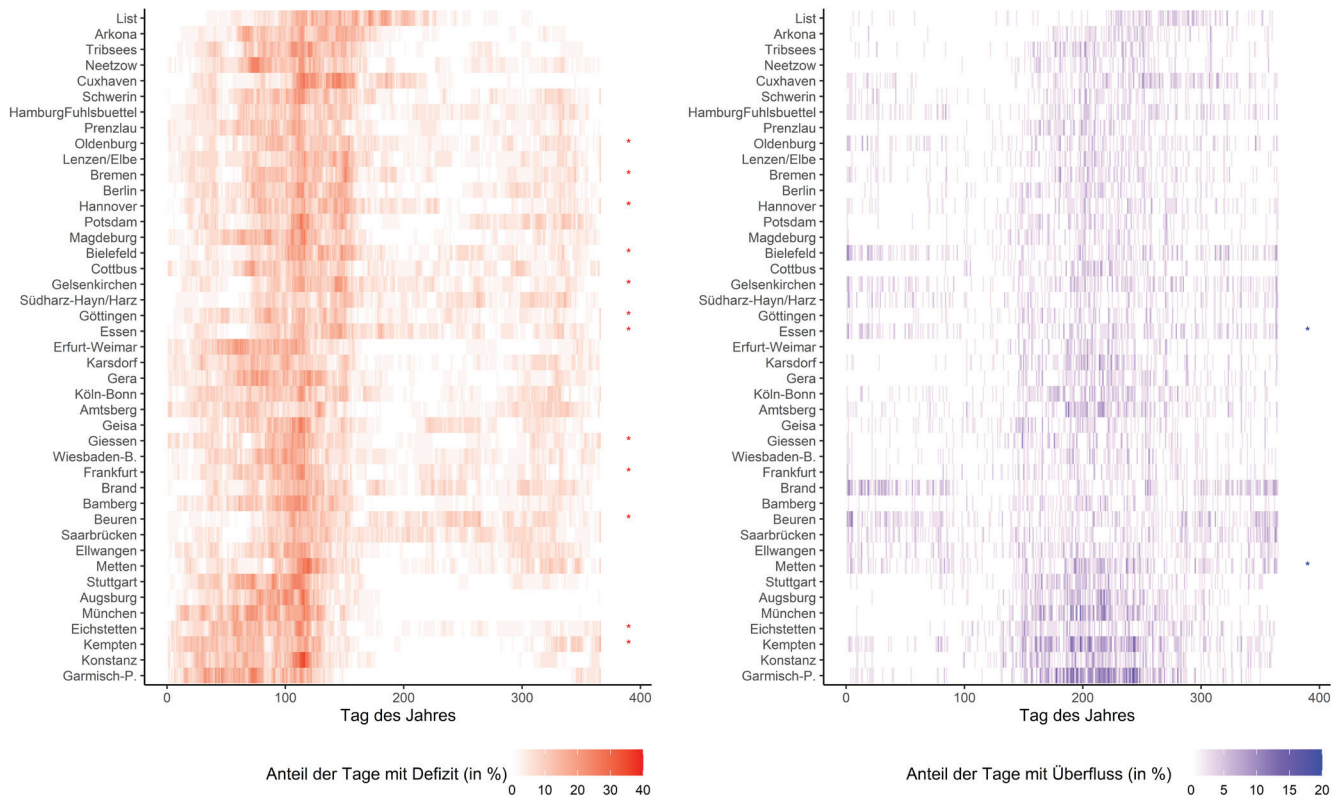
Die Speicherberechnungen haben gezeigt, dass eine Nutzung der vollständigen Menge des jährlichen Ernteertrags zu unrealistisch großen Speichern von 420 bis 1.460 Liter pro Quadrat-


Abbildung 8

a, b) Tage mit Wasserdefizit und c, d) Tage, an denen der Speicher überläuft; in grau: jede Überlaufmenge, in blau: größere Überlaufmengen ab 10 Millimeter pro Quadratmeter und Tag für den Zeitraum 1980 bis 2020; dargestellt für eine Versorgungssicherheit von 95 % und Ernteausnutzung von 80 %, exemplarisch für die Stationen Berlin (oben) und München (unten).

a, b): schwarze Zahlen: Anzahl der Defizittage, wobei rot die 10 höchsten Werte markiert; blaue Zahlen: geerntete Wassermenge in Liter pro Jahr; c, d): schwarze Zahlen: Anzahl der Tage mit Überlauf größer 10 Millimeter pro Quadratmeter Auffangfläche, wobei rot die 10 höchsten Jahreswerte markiert. a, b) days with water deficit and c, d) days with overflow of storage (in grey: all overflow, in blue: overflow larger than 10 mm/sqm and day) for the time period 1980 to 2020. Visualised for water supply efficiency of 95 % and fraction of available rainwater used of 80 %, exemplarily for stations Berlin (top) and Munich (bottom).

a, b): columns at the right: black numbers give the number of deficit days per year, whereby the red numbers mark the 10 largest deficits; blue numbers give the rainwater amount harvested in litre per square meter and year; c, d): black numbers give the number of days with overflow larger than 10 millimeters per square meter and day, whereby the red numbers mark the 10 largest annual number of overflow days.

**Abbildung 9**

Mittleres, saisonales Auftreten von Defizitphasen (links) und Überflusssphasen (rechts) (gemittelt über jeden Tag der Jahre 1980 bis 2020) für 43 Stationen in Deutschland für die gleiche Speicherdimensionierung wie in Abbildung 8. Sterne am rechten Rand der Abbildungen markieren die Stationen mit einer statistisch signifikanten Zunahme von Defizittagen pro Jahr (rot) bzw. Abnahme an Überflusstagen im Jahr (blau).

Average, seasonal occurrence of days with water deficit (left) and excess water (right) (averaged over every day of the years 1980 to 2020) for 43 stations in Germany for the same storage dimensions as in Figure 8. Stars in the right columns mark those stations that show a statistical significant increase of deficit days per year (red) or reduction of excess days per year (blue).

meter Auffangfläche führt. So wäre z. B. für eine Speichergröße von 500 Liter pro Quadratmeter Auffangfläche für ein 100 Quadratmeter großes Einfamilienhaus eine Zisterne von 50 Kubikmeter, für ein 250 Quadratmeter großes Mehrfamilienhaus eine Zisterne mit einer Größe von 125 Kubikmeter vorzuhalten. Gerade in dicht besiedelten urbanen Gebieten wird dieser Platzbedarf, auch unterirdisch, nicht einfach zu decken sein. Daraus lässt sich schließen, dass eine hohe Versorgungssicherheit gepaart mit hoher prozentualer Regenausnutzung zumindest für den urbanen Raum wenig sinnvoll ist. Bei kleineren Ernteausnutzungen des Niederschlags ergeben sich Nutzmengen von 1 bis 3 Liter pro Tag und Quadratmeter Auffangfläche und dazugehörige Speichergrößen von 43 bis 280 Liter pro Quadratmeter Auffangfläche – Größenordnungen, welche auch für den urbanen Raum weitaus realistischer erscheinen. Eine Reduktion der Versorgungssicherheit von nur 5 % von 100 auf 95 % führt ebenfalls zu einer drastischen Reduzierung der benötigten Speichergröße.

Insgesamt lässt sich sagen, dass die Ableitung von langfristig verfügbarer Wassermenge und benötigtem Speicherraum nicht trivial ist, da diese nicht nur vom mittleren Jahres- oder Monatsniederschlag abhängig ist, sondern auch vom Verhältnis von Niederschlagsdefiziten bzw. Trockenphasen und Starkniederschlägen. Bei einem Drittel der Stationen nehmen die Defizittage im Jahr (bei konstanter Nutzmenge und Versorgungssicherheit von 95 %) zu. Ein Einfluss auf die Wasserverfügbarkeit durch die der-

zeit viel besprochene Frequenzverschiebung des Niederschlagsregimes hin zu mehr Starkregen und/oder längeren Dürrephasen (PENDERGRASS et al., 2014b) ist damit bei einigen Stationen erkennbar und muss bei einer zukünftigen Speicherdimensionierung berücksichtigt werden. Es besteht Forschungsbedarf, wie regional angepasste Nutzungsmuster – abgestimmt auf die unterschiedlichen Muster der Defizit- und Überflusssphasen – entwickelt werden können und inwiefern diese von aktuellen Frequenzverschiebungen im Niederschlagsregime deutschlandweit beeinflusst werden.

Ein Speicher kann eine wesentlich höhere Versorgungssicherheit gewährleisten, wenn in Perioden mit ungewöhnlichen Niederschlagsdefiziten das Nutzungsverhalten angepasst wird. Bisher gibt es jedoch noch keine Zeitreihenanalysen für Regenerntesysteme, welche die saisonalen Dynamiken und Anpassungsmaßnahmen bei Versorgungsempfängen untersuchen. In dieser Studie wurde von einer täglich konstanten Nutzmenge ausgegangen, welche jedoch den bestehenden Defizitphasen in den Frühjahrsmonaten (bei allen Stationen) nicht gerecht wird. Eine intelligente Steuerung und Anpassung der Verbrauchsmuster an aktuelle und prognostizierte Niederschlagsmengen könnten das System effektiver und verlässlicher machen. Zukünftige Studien sollten daher darauf abzielen, die Potenziale von intelligenten Kontrollalgorithmen zu untersuchen, welche den Verbrauch automatisch an die jeweilige Wasserverfügbarkeit anpassen und

ggf. mit Wetterprognosen abgleichen, wie es in einigen wenigen internationalen Studien bereits umgesetzt wurde (XU et al., 2020; OBERASCHER et al., 2021). Für eine direkte Kopplung von Regenerntesystemen mit anderen blau-grünen Infrastrukturen zur Klimaanpassung in der Stadt, z. B. mit Fassadenbegrünung (PRENNER et al., 2021) oder Dachbegrünung (ZABIDI et al., 2020), müsste die Speicherleistung darüber hinaus an die Optimierung der Pflanzenversorgung und gleichzeitig an die Maximierung der Kühlungsleistung angepasst werden.

Weitere zukünftige, innovative Entwicklungen im Regenerntebereich umfassen die Entwicklung von digitalen Zwillingen zur Überwachung und Validierung der YAS-Methode und eine Smart-Grid-Anwendung mit multiplen vernetzten Speichersystemen sowie die Verknüpfung mit anderen Technologien des "Internet der Dinge" (IOT) (OBERASCHER et al., 2021) wie z. B. LoRaWan-gesteuerte Speicherfüllstandsüberwachung via automatisierter Sensorik. Des Weiteren sollte in der EU über einen Paradigmenwechsel von der zentralen zur dezentralen Wasserversorgung nachgedacht werden, um so unter bestimmten Umständen auch eine Nutzung von Regenwasser als Trinkwasser zu ermöglichen.

Abschließend lässt sich sagen, dass das Regenernten in Deutschland durchaus ein Potenzial hat, Trink- oder Brauchwasser zu substituieren, jedoch nur wenn ausreichend auf regionale Unterschiede, mögliche Zunahmen von Defizitphasen und daran angepasste Nutzungsmuster berücksichtigt werden.

Discussion and Conclusion

The review sections of this study have highlighted how diverse the influencing factors are in rain harvesting, ranging from novel types of collection areas in cities to water quality demands and conditions, different dimensioning methods for storage sizing, and unresolved frequency dependencies of future rainfall regimes under climate change.

The Germany-wide analysis of the rainfall harvest potential showed a heterogeneous distribution with regard to the possible exploitation of annual precipitation amounts. Not all of the precipitation can be utilized, but only a portion as a function of various loss factors. The range of values of the loss factors (Table 1) could also lead to significantly lower harvest amounts, if, for example, the runoff coefficient were to be lowered (in this calculation, an optimal collection area was assumed).

There have been few field studies to date that have investigated what the ultimate harvest size of different catchment areas is. In the study by LIA & TSAI (2004), this was determined for about 100 rainfall events for three typical roof shapes. Field studies to derive an optimal size of first flash magnitude or minimal threshold for precipitation amount are still pending.

With few exceptions, there was no statistically significant trend in terms of change in available stormwater harvest within the last 40 years. An urban land use analysis for potential collection areas and areas for storage systems, as well as economic considerations regarding new construction, retrofit, or maintenance costs, is beyond the scope of this study. However, the derivation of required storage sizes provides an important input variable for this purpose.

The storage calculations have shown that using the full amount of the annual harvest results in unrealistically large storage tanks of up to 420-1460 litres per square metre of collection area. For example, for a storage size of 500 litres per square metre of collection area, a cistern of 50 m³ would have to be provided for a 100 sq. m. single-family house, and a cistern of 125 m³ for a 250 sq. m. multi-family house. Especially in densely populated urban areas, this space requirement, even underground, will not be easy to meet. From this it can be concluded that high supply security coupled with high per cent rainfall utilization makes little sense, at least for urban areas. Smaller harvest exploitation rates result in daily harvest amounts of 1-3 litres per day per square metre of collection area and associated storage sizes of 43-280 litres per square metre of collection area, storage sizes which seem far more realistic for urban areas. A reduction in supply reliability of only 5% from 100 to 95% also leads to a drastic reduction in the required storage size.

Overall, it can be said that the derivation of long-term available water quantity and required storage space is not trivial, since it depends not only on the mean annual or monthly precipitation, but also on the ratio of precipitation deficits or dry spells and heavy precipitation events. At one third of the stations, the deficit days increase in the year (at constant usable quantity and supply reliability of 95%). An influence on water availability due to the currently much discussed frequency shift of the precipitation regime towards more heavy rainfall and / or longer drought phases (PENDERGRASS et al. 2014b) is thus recognizable at some stations and must be considered in future storage dimensioning. There is a need for research on how regionally adapted usage patterns – matched to the different patterns of deficit and overflow phases – can be developed and to what extent these are influenced by current frequency shifts in the precipitation regime across Germany.

A storage system can provide much greater supply security if usage patterns are adjusted during periods of unusual precipitation deficits. To date, however, there have been no time-series analyses of rain harvesting systems that examine seasonal dynamics and adaptation measures during supply shortages. In this study, a constant daily usage rate was assumed, which, however, does not account for the current deficit phases in the spring months (for all stations). Intelligent control systems and adjustment of consumption patterns to current and forecasted precipitation amounts could make the system more effective and reliable. Future studies should therefore aim to investigate the potentials of intelligent control algorithms that automatically adapt consumption to the respective water availability and, if necessary, match it with weather forecasts, as has been implemented in only a few international studies (XU et al. 2020, OBERASCHER et al., 2021). For a direct coupling of rain harvesting systems with other blue-green infrastructures for climate adaptation in the city, e.g. with facade greening (Prenner et al. 2021) or roof greening (ZABIDI et al., 2020), the storage capacity would furthermore have to be adapted to optimize plant supply and simultaneously maximize cooling capacity.

Further future innovative developments in the rain harvesting sector include the development of digital twins for monitoring and validation of the YAS method and a smart grid application with multiple networked storage systems as well as the linkage with other technologies of the "Internet of Things" (IOT)

(OBERASCHER et al., 2021) such as LoRaWAN controlled storage level monitoring via automated sensor technology. Furthermore, a paradigm shift from centralized to decentralized water supply should be considered in the EU, thus enabling the use of rainwater as drinking water under certain circumstances.

In conclusion, it can be said that rain harvesting in Germany definitely has a great potential to substitute drinking or service water, but only if sufficient attention is paid to regional differences, the changing dynamics of deficit phases, and patterns of use adapted to these.

Erklärung zur Datenverfügbarkeit

Die während der aktuellen Studie entwickelten und angewendeten Analyseskripte können bei den Autor/innen angefragt werden.

Anschrift der Verfasser

Eva Paton
Laura Tams
Björn Kluge
Pedro Alencar
Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie
FG Ökohydrologie
Ernst-Reuter-Platz 1, 10587 Berlin
eva.paton@tu-berlin.de
l.tams@tu-berlin.de
bjoern.kluge@tu-berlin.de
pedro.alencar@campus.tu-berlin.de

Literaturverzeichnis

- ADELOYE, A.J. (2012): Hydrological Sizing of Water Supply Reservoirs. In: Bengtsson, L., Herschy, R.W., Fairbridge, R.W. (Eds) Encyclopedia of Lakes and Reservoirs. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-1-4020-4410-6_92.
- ABBASI, T. & S.A. ABBASI (2011): Sources of Pollution in Rooftop Rainwater Harvesting Systems and Their Control. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(23): 2097-2167. DOI: 10.1080/10643389.2010.497438.
- ADELOYE, A.J. & M. MONTASERI (1999): Predicting critical period to characterise over-year and within-year reservoir systems. *Water Resources Management*, 13(6): 383-407. DOI: 10.1023/a:1008185304170.
- ALAMDARI, N., D.J. SAMPLE, J. LIU & A. ROSS (2018): Assessing climate change impacts on the reliability of rainwater harvesting systems. *Resources Conservation and Recycling*, 132: 178-189. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.12.013.
- ALRAYESS, H., U. ZEYBEKOGHU & A. ULKE (2017): Different design techniques in determining reservoir capacity. *EWRA European Water* 60: 107-115.
- ANGRILL, S., R. FARRENY, C.M. GASOL, X. GABARRELL, B. VIÑOLAS, A. JOSA & J. RIERADEVALL (2012): Environmental analysis of rainwater harvesting infrastructures in diffuse and compact urban models of Mediterranean climate. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(1): 25-42. DOI: 10.1007/s11367-011-0330-6.
- ANGRILL, S., A. PETIT-BOIX, T. MORALES-PINZÓN, A. JOSA, J. RIERADEVALL & X. GABARRELL (2017): Urban rainwater runoff quantity and quality - A potential endogenous resource in cities? *Journal of Environmental Management*, 189: 14-21. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.12.027.
- BLUEGREENSTREETS (2022): BlueGreenStreets Toolbox – Teil A. Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere, März 2022, Hamburg. Erstellt im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme "Ressourceneffiziente Stadtquartiere für die Zukunft" (RES:Z).
- CORTESI, L., E. PRASAD & M.P. ABHIYAN (2009): Rainwater harvesting for management of watershed ecosystems. In UNEP (Hrs.) Rainwater harvesting: A lifeline for human well-being, A report prepared for UNEP by Stockholm Environmental Institute. Job No. DEP/1162/NA ISBN: 978-92-807-3019-7.
- DIN 1989-100:2022-07 (2022): Regenwassernutzungsanlagen – Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 16941-1. DIN Norm.
- DWA-A 102 (2022): Arbeitsblatt Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer – Teil 1: Allgemeines – Dezember 2020; Stand: korrigierte Fassung April 2022. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. ISBN 978-3-96862-044-2.
- DWA-A 138 (2006): Arbeitsblatt Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser – April 2005; Stand: korrigierte Fassung März 2006. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. ISBN 978-3-937758-66-4.
- DWD Climate Data Center (2022): Historical daily station observations for rainfall for Germany, version v007. Onlineressource: <https://cdc.dwd.de/portal>.
- DWD Climate Data Center (CDC), (2023): Historical station observations of daily rainfall for Germany, version v007. Onlineressource: <https://cdc.dwd.de/portal>.
- EN 16941-1:2018 (2018): Vor-Ort Anlagen für Nicht-Trinkwasser – Teil 1: Anlagen für die Verwendung von Regenwasser; Deutsche Fassung EN 16941-1:2018. DIN Norm. DOI: 10.31030/2658300.
- ESLAMIAN, S. & F. ESLAMIAN (Eds) (2020): Handbook of Water Harvesting and Conservation: Basic Concepts and Fundamentals. Wiley, 528 p.
- FAO (1991): A Manual for the Design and Construction of Water Harvesting Schemes for Plant Production. Water harvesting (AGL/MISC/17/91). <https://www.fao.org/3/u3160e/u3160e00.htm#Contents>.
- fbr (2016): Hinweisblatt H 101: Kombination der Regenwassernutzung mit der Regenwasserversickerung. fbr-Dialog GmbH, Darmstadt, 32 Seiten, ISBN: 978-3-9811727-6-8.
- fbr (2021): fbr – Marktübersicht. Regenwassernutzung und Regenwasserbewirtschaftung Hrsg. fbr – Bundesverband für Betriebs- und Regenwasser e. V.
- FEWKES, A. & D. BUTLER (2000): Simulating the performance of rainwater collection and reuse systems using behavioural models. *Proc. CIBSEA Building Serv. Eng. Res. Technol.* 21: 99-106.
- FEWKES, A. & P. WARM (2000): Method of modelling the performance of rainwater collection systems in the United Kingdom. *Proc. CIBSEA Building Serv. Eng. Res. Technol.* 21: 257-265.
- GARDNER, T. & A. VIERITZ (2010): The role of rainwater tanks in Australia in the twenty first century. *Architectural Science Review*, 53(1): 107-125. DOI: 10.3763/asre.2009.0074.
- GOBEL, P., C. DIERKES, & W.C. COLDEWEY (2007): Storm water runoff concentration matrix for urban areas. *Journal of Contaminant Hydrology*, 91(1-2): 26-42. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2006.08.008.
- GOETVINCK (2022): Stand-alone rainwater collector. Instructable outside. <https://www.instructables.com/Stand-alone-rain-collector/>.
- GWOICIZIEJ-MAZUR, J., P. JADWISZCZAK, B. KAŻMIERCZAK, K. KÓZKA, J. STRUK-SOKOŁOWSKA, K. WARTALSKA & M. WDOWIKOWSKI (2022): The impact of climate change on rainwater harvesting in households in Poland. *Applied Water Science*, 12(2). DOI: 10.1007/s13201-021-01491-5.

- HANSON, L.S. & R.M. VOGEL (2014): Generalized storage-reliability-yield relationships for rainwater harvesting systems. *Environmental Research Letters*, 9(7). DOI: 10.1088/1748-9326/9/7/075007.
- HAQUE, M.M., A. RAHMAN & B. SAMALI (2016): Evaluation of climate change impacts on rainwater harvesting. *Journal of Cleaner Production*, 137: 60-69. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.038.
- HIPEL, K.W. & A.I. MCLEOD (2005): Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems. Electronic reprint of our book originally published in 1994. Elsevier Science eBook. ISBN: 9780080870366.
- HELSEL, D.R. & R.M. HIRSCH (2002): Statistical Methods in Water Resources. Chapter A3. Book 4, Hydrologic Analysis and Interpretation. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Suwanee River Basin, Florida.
- INGAME (2013): Longcheng Plaza Wankeli Roof Sunshade Design Online Quelle: <https://www.archdaily.com/919601/longcheng-plaza-wankeli-roof-sunshade-design-ingame>.
- KAHINDA, J.M., A.E. TAIGBENU & R.J. BOROTO (2010): Domestic rainwater harvesting as an adaptation measure to climate change in South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 35(13-14): 742-751. DOI: 10.1016/j.pce.2010.07.004.
- KIM, D. & T.M. YOUNG (2009): Significance of Indirect Deposition on Wintertime PAH Concentrations in an Urban Northern California Creek. *Environmental Engineering Science*, 26(2): 269-277. DOI: 10.1089/ees.2007.0277.
- KÖNIG, K.W. & E. NOLDE (2021): Straßenablaufwasser wird im Haus genutzt. Wie ein altes, noch funktionierendes Projekt in Berlin-Lankwitz, Siedlung Belß-Lüdeckestraße heute noch an Bedeutung zunimmt. *Fbr-wasserspiegel. Zeitschrift der Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung e. V.* 1/21, S. 46-51.
- LASPRILLA & KASSAYE (2017): Literature Review on the Rainwater Harvesting Research Landscape, In-Situ and Domestic Design Examples and Best Practice Projects in China and Brazil, in: Schaldach & R Otterpohl (eds), RUVIVAL Publication Series, vol. 2, Hamburg, pp. 19-35, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:830-88217957>.
- LIAW, C.H. & Y.L. TSAI (2004): Optimum storage volume of rooftop rain water harvesting systems for domestic use. *Journal of the American Water Resources Association*, 40(4): 901-912. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2004.tb01054.x.
- LYNAM, M.M., J.T. DVONCH, J.A. BARRES, M.S. LANDIS & A.S. KAMAL (2016): Investigating the impact of local urban sources on total atmospheric mercury wet deposition in Cleveland, Ohio, USA. *Atmospheric Environment*, 127: 262-271. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.12.048.
- MANN, M.E., S. RAHMSTORF, K. KORNHUBER, B.A. STEINMAN, S.A. MILLER, S. PETRI. & D. COUMOU (2018): Projected changes in persistent extreme summer weather events: The role of quasi-resonant amplification. *Science Advances*, 4(10). DOI: 10.1126/sciadv.aat3272.
- MANNING, C., M. WIDMANN, E. BEVACQUA, A.F. VAN LOON, D. MARAUN & M. VRAC (2019): Increased probability of compound long-duration dry and hot events in Europe during summer (1950-2013). *Environmental Research Letters*, 14(9). DOI: 10.1088/1748-9326/ab23bf.
- MCAHON T.A. & A.J. ADELOYE (2005): Water Resources Yield. Littleton, CO: Water Resources Publications.
- MEHL, V, A. OLORUNTOBA, A. GONZALEZ ALVAREZ, J. MÖLLER, S.Y. HO, A. AL BAFF & R.B. KASSAYE (2017): A Review of Land-Based Rainwater Harvesting Systems for Micro and Macro-Catchments. In R. Schaldach & R. Otterpohl (eds), RUVIVAL Publication Series, vol. 2, Hamburg, pp. 36-49, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:830-88217957>.
- MEKDASCHI STUDER, R. & H. LINIGER (2013): Water Harvesting: Guidelines to Good Practice. Centre for Development and Environment (CDE), Bern; Rainwater Harvesting Implementation Network (RAIN), Amsterdam; MetaMeta, Wageningen; The International Fund for Agricultural Development (IFAD), Rom.
- MILLUV (2022): Rainwater collector. Behance Project. Online Quelle https://www.behance.net/gallery/66802973/MILLUV-Rainwater-collector?locale=de_DE.
- MORAN, P.A.P. (1959) The theory of storage. London: Methuen.
- MUSAYEV, S., E. BURGESS & J. MELLOR (2018): A global performance assessment of rainwater harvesting under climate change. *Resources Conservation and Recycling*, 132: 62-70. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.01.023.
- NDIRITU, J., Y. MOODLEY, Y. & M. GULIWE (2017): Generalized Storage-Yield-Reliability Relationships for Analysing Shopping Centre Rainwater Harvesting Systems. *Water*, 9(10). DOI: 10.3390/w9100771.
- OVERASCHER, M., C. KINZEL, U. KASTLUNGER, M. KLEIDORFER, C. ZINGERLE, W. RAUCH & R. SITZENFREI (2021): Integrated urban water management with micro storages developed as an IoT-based solution – The smart rain barrel. *Environ. Model. Softw.* 139, 105028.
- PATON, E. (2022): Intermittency analysis of dry spell magnitude and timing using different spell definitions, *Journal of Hydrology*, 608. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127645.
- PATON, E. & N. HAACKE (2021): Merging patterns and processes of diffuse pollution in urban watersheds: A connectivity assessment. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Water*, 8(4). DOI: 10.1002/wat2.1525.
- PENDERGRASS, A.G. & D.L. HARTMANN (2014a): Changes in the Distribution of Rain Frequency and Intensity in Response to Global Warming. *Journal of Climate*, 27(22): 8372-8383. DOI: 10.1175/jcli-d-14-00183.1.
- PENDERGRASS, A.G. & D.L. HARTMANN (2014b): Two Modes of Change of the Distribution of Rain. *Journal of Climate*, 27(22): 8357-8371. DOI: 10.1175/jcli-d-14-00182.1.
- PINA, C.L. & R.B. KASSAYE (2017): Literature Review on the Rainwater Harvesting Research Landscape, In-Situ and Domestic Design Examples and Best Practice Projects in China and Brazil in R. Schaldach & R Otterpohl (eds), RUVIVAL Publication Series, vol. 2, Hamburg, pp. 19-35. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:830-88217957>.
- POLKOWSKA, Z., M. TOBISZEWSKI, T. GORECKI & J. NAMIESNIK (2009): Pesticides in rain and roof runoff waters from an urban region. *Urban Water Journal*, 6(6): 441-448. DOI:10.1080/15730620902972405.
- PRENNER, F., B. PUCHER, I. ZLUWA, U. PITHA & G. LANGERGRABER (2021): Rainwater Use for Vertical Greenery Systems: Development of a Conceptual Model for a Better Understanding of Processes and Influencing Factors. *Water* 2021, 13, 1860. DOI: 10.3390/w13131860.
- PRINZ, D. (1996): Water Harvesting: Past and Future. In: Pereira, L. S. (ed.), Sustainability of Irrigated Agriculture. Proceedings, NATO Advanced Research Workshop, Vimeiro, 21- 26.03.1994, Balkema, Rotterdam, 135-144.
- RELEAF (2007): Rain Collector by Fulgoro INHABITAT Online Quelle: <https://inhabitat.com/environment/>.
- SOLER, N.G., T. MOSS & O. PAPASOZOMENOU (2018): Rain and the city: Pathways to mainstreaming rainwater harvesting in Berlin. *Geoforum*, 89: 96-106. DOI: 10.1016/j.geoforum.2018.01.010.
- STEC, A. (2020): Sustainable water management in buildings. Case Studies from Europe. Water Science and Technology Library, Vol 90 Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-35959-1.
- THINKPHI (2022): Shading the world against Climate Change. <https://www.thinkphi.com/halo-walk>.

- TUVIE (2022): Urban rainwater collector project. <https://www.tuvie.com/urban-rainwater-collector-collects-and-filters-rain-water-into-drinkable-water/>.
- UHL, M. (2022): Europäische Städte sind keine Schwämme. fbr-wasser-spiegel 1/22, herausgegeben vom Bundesverband für Betriebs- und Regenwasser e.V.
- UNEP (2009): Rainwater harvesting: a lifeline for human well-being. A report prepared for UNEP by Stockholm Environmental Institute. Job No. DEP/1162/NA ISBN: 978-92-807-3019-7.
- VET, R. et al. (2014): A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus. *Atmospheric Environment*, 93: 3-100. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.10.060.
- WENDT, S., D. PAQUET & A. SCHNEIDER (2020) Durch Mücken übertragbare Erkrankungen. In: CME 17, S. 51–70. DOI: 10.1007/s11298-020-7976-y.
- WILKING H, R. OFFERGELD & R. LACHMANN (2019): Erster in Deutschland durch Stechmücken übertragene Fall einer West-Nil-Virus-Infektion. *Epid Bull* 2019; 40: 415–16. DOI: 10.25646/630.
- XU, W.D., T. D. FLETCHER, M.J. BURNS & F. CHERQUI (2020): Real Time Control of Rainwater Harvesting Systems: The Benefits of Increasing Rainfall Forecast Window. *Water Resources Research*, 56(9). DOI: 10.1029/2020wr027856.
- ZABIDI, H.A., H.W. GOH, C.K. CHANG, N.W. CHAN & N.A. ZAKARIA (2020): A Review of Roof and Pond Rainwater Harvesting Systems for Water Security: The Design, Performance and Way Forward. *Water*, 12(11). DOI: 10.3390/w12113163.

Anhang 1

Nutzmenge und zugehörige Speichergröße für 43 Stationen in Deutschland iteriert mit der YAS-Methode für 100%, 80 % und 50 % Ernteausnutzung und Versorgungssicherheiten von 100 % und 95 %.

Station	DWD Stations-ID	100 % Ausnutzung, 100 % Sicherheit		80 % Ausnutzung, 100 % Sicherheit		50 % Ausnutzung, 100 % Sicherheit		100 % Ausnutzung, 95 % Sicherheit		80 % Ausnutzung, 95 % Sicherheit		50 % Ausnutzung, 95 % Sicherheit	
		AY	S	AY	S	AY	S	AY	S	AY	S	AY	S
Amtsberg	5436	1.8	940	1.4	240	0.9	90	1.8	240	1.4	75	0.9	24
Arkona	183	1.1	500	0.8	140	0.5	55	1.1	150	0.8	55	0.5	17
Augsburg	232	1.6	640	1.2	220	0.8	70	1.6	200	1.2	100	0.8	27
Bamberg	282	1.3	420	1	140	0.6	60	1.3	150	1	55	0.6	19
Berlin	433	1.1	560	0.9	150	0.6	48	1.1	160	0.9	50	0.6	19
Beuren	14303	2.1	940	1.7	260	1.1	100	2.1	220	1.7	80	1.1	28
Bielefeld	488	1.9	940	1.5	220	1	70	1.9	190	1.5	65	1	22
Brand	647	2.3	1.160	1.8	240	1.1	100	2.3	300	1.8	85	1.1	30
Bremen	691	1.3	800	1.1	180	0.7	65	1.3	160	1.1	55	0.7	19
Cottbus	880	1.1	800	0.9	130	0.5	55	1.1	190	0.9	55	0.5	18
Cuxhaven	891	1.7	1.060	1.4	280	0.9	100	1.7	220	1.4	80	0.9	25
Eichstetten	1162	1.7	940	1.4	190	0.9	100	1.7	240	1.4	80	0.9	24
Ellwangen	1197	1.8	640	1.4	180	0.9	75	1.8	160	1.4	70	0.9	24
Erfurt-Weimar	1270	1	1.140	0.8	180	0.5	60	1	240	0.8	75	0.5	24
Essen	1303	2	1.020	1.6	240	1	80	2	190	1.6	70	1	24
Frankfurt	1420	1.2	660	1	190	0.6	60	1.2	170	1	60	0.6	19
Garmisch-P.	1550	3.1	1.460	2.5	280	1.5	110	3.1	280	2.5	130	1.5	37
Geisa	1573	1.4	480	1.2	190	0.7	65	1.4	140	1.2	55	0.7	20
Gelsenkirchen	1595	1.9	680	1.5	220	0.9	85	1.9	190	1.5	70	0.9	24
Gera	1612	1.2	540	1	170	0.6	70	1.2	220	1	75	0.6	22
Giessen	1639	1.3	760	1	140	0.6	60	1.3	140	1	55	0.6	19
Göttingen	1691	1.2	440	1	150	0.6	55	1.2	160	1	60	0.6	18
Hamburg-Fuh.	1975	1.6	840	1.3	260	0.8	100	1.6	200	1.3	70	0.8	23
Hannover	2014	1.3	680	1	140	0.6	55	1.3	170	1	49	0.6	18
Karsdorf	2530	1.5	1.060	1.2	220	0.8	80	1.5	260	1.2	80	0.8	23
Kempten	2559	2.8	1.420	2.2	240	1.4	90	2.8	240	2.2	100	1.4	33
Köln-Bonn	2667	1.7	760	1.4	190	0.8	70	1.7	160	1.4	55	0.8	20
Konstanz	2712	1.8	580	1.4	180	0.9	70	1.8	170	1.4	80	0.9	26
Lenzen/Elbe	2951	1.2	440	0.9	220	0.6	70	1.2	170	0.9	48	0.6	18
List	3032	1.4	940	1.1	260	0.7	90	1.4	220	1.1	85	0.7	24
Magdeburg	3126	1	800	0.8	140	0.5	43	1	160	0.8	48	0.5	17
Metten	3271	2.1	1.120	1.7	220	1	75	2.1	240	1.7	80	1	27
München	3379	2	660	1.6	200	1	80	2	220	1.6	100	1	29
Neetzow	2765	1	1.340	0.8	160	0.5	55	1	180	0.8	47	0.5	17
Oldenburg	2355	1.6	1.100	1.2	190	0.8	65	1.6	180	1.2	60	0.8	21
Potsdam	3987	1.1	580	0.9	160	0.6	47	1.1	170	0.9	49	0.6	18
Prenzlau	3995	1	1.220	0.8	180	0.5	60	1	200	0.8	60	0.5	17
Saarbrücken	4336	1.9	1.040	1.5	200	0.9	75	1.9	200	1.5	70	0.9	25
Schwerin	4625	1.3	440	1	160	0.6	60	1.3	160	1	49	0.6	18
Stuttgart	4931	1.4	700	1.1	160	0.7	70	1.4	200	1.1	70	0.7	23
Südharz-Hayn	2073	1.5	1.240	1.2	190	0.7	60	1.5	180	1.2	55	0.7	19
Tribsees	5097	1.2	600	1	120	0.6	48	1.2	180	1	55	0.6	18
Wiesbaden-B.	5542	1.2	600	0.9	140	0.6	55	1.2	160	0.9	50	0.6	18

AY: tatsächlich verfügbarer, über das Jahr konstanter Ernteertrag in Liter pro Tag pro Quadratmeter Auffangfläche

S: Speichergröße in Liter pro Quadratmeter Auffangfläche