

Abschlussbericht zum DBU – Projekt

Management und Resilienz verschiedener Gründachsysteme bei Starkregenereignissen und Trockenperioden im urbanen Raum - MaNuGrün

Az 37461/01 - 23

Verfasser

Bernhardt, Andrea	Leipziger Wasserwerke
Brinckmann-Lange, Antje	Bildungs- und Demonstrationszentrum Dezentrale Infrastruktur – BDZ e.V.
Friesen, Dr. Jan	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ
Stich, Dr. Gabriele	Bildungs- und Demonstrationszentrum Dezentrale Infrastruktur – BDZ e.V.
Milke, Prof. Hubertus	IWS - Institut für Wasserbau und Siedlungswasserwirtschaft / FTZ Forschungs- und Transferzentrum
Wensch, Friederike	IWS - Institut für Wasserbau und Siedlungswasserwirtschaft / FTZ Forschungs- und Transferzentrum

Leipzig, 30. März 2026

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Zusammenfassung	1
2 Einleitung.....	2
3 Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden.....	5
3.1 Planung und Bau der Versuchsanlage	5
3.1.1 Aufbau der Dächerkonstruktion	5
3.1.2 Planung und Aufbau der Beregnungsanlage	6
3.1.3 Errichtung von acht Gründachaufbauten	8
3.1.4 Kalibrierung der Abflussmessung	10
3.2 Langzeituntersuchungen verschiedener Starkregenereignisse an der Versuchsanlage	12
3.2.1 Versuchsbedingungen.....	12
3.2.2 Durchgeführte Versuche und Dokumentation.....	13
3.2.3 Entwicklung von Modellkurven	16
3.2.4 Volumenbetrachtung	17
4 Ergebnisse.....	19
4.1 Analyse der Regenwasserrückhaltekapazität der Gründächer	19
4.1.1 Dämpfung und Verzögerung	19
4.1.2 Abgeflossenes Volumen.....	22
4.2 Erstellung von Wasserbilanzen für die einzelnen Gründachtypen	24
4.2.1 Gründachmodellierung mit SWMM.....	24
4.2.2 Modellparameter	25
4.2.3 Ergebnisse Starkregen.....	26
4.2.4 Ergebnisse Langfristige Wasserbilanz.....	27
4.3 Analyse der Auswirkungen der Retentionsfähigkeit von Gründächern auf die Kanalhydraulik bei verschiedenen Niederschlagsereignissen	30
4.3.1 Zielstellung.....	30
4.3.2 Vorgehensweise.....	31
4.3.2.1 Bisheriger Stand der Technik	31

	Seite
4.3.2.2 Flächenskalierung	32
4.3.2.3 Berücksichtigung der Feldkapazität.....	32
4.3.2.4 Berücksichtigung der Verdunstung.....	33
4.3.2.5 Transformation des Gründaches als Modellelement.....	34
4.3.3 Ergebnisse für die Gründachaufbauten	36
4.3.3.1 Vorgehensweise bei Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse und Qualitätsbewertung	36
4.3.3.2 Kalibrierergebnisse und qualitative Bewertung der Gründächer	37
4.3.4 Zusammenfassende Bewertung der Retentionsfähigkeit und Wirkung auf die Kanalhydraulik von Gründächern am Beispiel der Umsetzung für die Simulationsmodelle KOSIM und HE	42
5 Bildung, Öffentlichkeitsarbeit, Präsentation	43
5.1 Öffentliche Einweihung der Gründachversuchsanlage	43
5.2 Führungen.....	44
5.3 Netzwerk.....	45
5.4 Handlungsleitfaden für Kommunen, Gemeinden und Planungsbüros zur Nutzung von Gründächern	46
6 Fazit.....	48
7 Literaturverzeichnis	49
8 Anhangsverzeichnis	50

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 1: Aufbau der Dachkonstruktion der Fachfirma Ralf Peukert, Zimmerei und Holzbau (Bild: Ralf Peukert)	6
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Beregnungsausrüstung (Bild: Leipziger Wasserwerke)	7
Abbildung 3: Drohnenaufnahme der Versuchsanlage zur Eröffnungsveranstaltung am 31.05.2025 (Foto: Leipziger Wasserwerke, Ergänzungen: Andrea Bernhardt) mit Dachbezeichnung	9
Abbildung 4: Durchflusskennlinien für die Kalibrierung der Abflussmessung	10
Abbildung 5: Ergebnis der Kalibrierung: Anlagenspezifische Kennlinie zur Ermittlung des Abflusses über die Thomson-Wehre	11
Abbildung 6: Übersicht über Temperatur und Niederschläge während des Versuchszeitraums, Juni bis September 2025	13
Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung der Steckbriefe je Versuch.	14
Abbildung 8: Beispiel für Versuche mit guter Übereinstimmung, hier: Dach 2, 1-jährliches Regenereignis und gesättigte Bedingungen	14
Abbildung 9: Beispiel für Versuche mit mäßiger Übereinstimmung, hier: Dach 1, 100-jährliches Regenereignis und gesättigte Bedingungen	15
Abbildung 10: Versuche auf Dach 1, 1-jährliches Regenereignis unter gesättigten Bedingungen unter Berücksichtigung der Lufttemperatur während des Versuchs	15
Abbildung 11: Modellkurve für Dach 4, 5-jährlicher Regen und teilegesättigte Bedingungen mit hoher Qualität	16
Abbildung 12: Modellkurve für Dach 5, 5-jährlicher Regen und gesättigte Bedingungen mit mäßiger Qualität	17
Abbildung 13: Betrachtung des abgeflossenen Volumens für Dach 10, einen 5-jährlichen Starkregen unter ungesättigten Bedingungen	18
Abbildung 14: Definition von Dämpfung und Verzögerung des Abflussmaximum	19
Abbildung 15: Darstellung der Abflussdämpfung und Abflussverzögerung je Dach unter Berücksichtigung jedes Settings	21
Abbildung 16: Abgeflossenes Volumen (Prozentstufen) im Verhältnis zum Zufluss der Beregnungsanlage (Betrachtungszeitraum: 0 bis 5.000 s; $t = 0$ s beschreibt den Startzeitpunkt des Beregnungsversuchs)	23

	Seite
Abbildung 17: LID-Querschnitt in SWMM nach Rossman & Huber (2016)	24
Abbildung 18: Exemplarische Bodensäule	25
Abbildung 19: Exemplarischer Gründachaufbau	26
Abbildung 20: Abfluss für das Ereignis mit einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren und einer Dauer von 72 Stunden	27
Abbildung 21: Zeitreihen von Niederschlag und Evapotranspiration im Modellzeitraum	28
Abbildung 22: Wasserhaushalt für Dach 1 für 10-Jahres-Simulation	29
Abbildung 23: Wasserhaushalt für Dach 2 für 10-Jahres-Simulation	29
Abbildung 24: Simulierte Abflussganglinien mit Standardparametern (gestrichelte Linien) verglichen mit den skalierten, gemessenen Dachabflüssen (durchgezogene Linien)	31
Abbildung 25: Wasserbilanzen der Gründach-Standardflächen (hellblau und grün) im Vergleich mit den Ersatzmodellen (dunkelblau), Ergebnisse einer 18-jährigen Langzeitsimulation (2007-2024) in KOSIM	34
Abbildung 26: Ersatzmodell eines Gründachs für die Simulation	35
Abbildung 27: Aufbau der Systemelemente zur Abbildung von Gründächern in KOSIM (links) und HYSTEM-EXTRAN (rechts)	35
Abbildung 28: Gütekriterien zur Beurteilung der Kalibrierung nach DWA-M 165-1	36
Abbildung 29: Inbetriebnahme und feierliche Eröffnung der Gründachversuchsanlage am 31. Mai 2024 am BDZ in Leipzig	43
Abbildung 30: Abschlussveranstaltung des 5. Leipziger Gründachkollegs und 1. Mitteldeutscher Gründachtag in der Alten Handelsbörse in Leipzig (24.01.2025)	46

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1: Übersicht über die einzelnen Dachaufbauten	8
Tabelle 2: Beispiele für Dämpfung und Verzögerung verschiedener Szenarien	20
Tabelle 3: Verwendete Parameter für Gründachmodell in SWMM	26
Tabelle 4: Unveränderte Parameter des Ersatzmodells; die blau gekennzeichneten Parameter wurden ausschließlich bei Dach 5 variiert (intensives Dach)	37
Tabelle 5: Bewertung der finalen Kalibrierung von Dach 1 für die neun Szenarien	38
Tabelle 6: Bewertung der finalen Kalibrierung von Dach 2 für die neun Szenarien	38
Tabelle 7: Bewertung der finalen Kalibrierung von Dach 3 für die neun Szenarien	39
Tabelle 8: Bewertung der finalen Kalibrierung von Dach 4 für die neun Szenarien	39
Tabelle 9: Bewertung der finalen Kalibrierung von Dach 5 für die neun Szenarien	40
Tabelle 10: Bewertung der finalen Kalibrierung von Dach 8 für die neun Szenarien	40
Tabelle 11: Bewertung der finalen Kalibrierung von Dach 9 für die neun Szenarien	41
Tabelle 12: Bewertung der finalen Kalibrierung von Dach 10 für die neun Szenarien	41

Formelverzeichnis

	Seite
Formel 1: Standard-Thomson-Wehrformel.....	11
Formel 2: Angepasste Wehrformel.....	12

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Einheit	Erklärung
DWD		Deutscher Wetterdienst
DYMAX		Maximalwertabweichung (Differenz des Spitzenwertes)
E ²		Effizienzkoeffizient
EPDM		Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (Abdichtungsbahn)
ESMR		Elektro-, Steuer-, Mess- und Regeltechnik
GD		Gründach
HE		HYSTEM-EXTRAN (hydrodynamisches Simulationsmodell zur Berechnung von Abfluss- und Transportprozessen in Kanalnetzen)
KOSIM		Kanal-Objekt-Simulationsmodell
KOSTRA		Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertung
LID		Low Impact Development
SWMM		Storm Water Management Model
VOL	%	Volumenabweichung
WB	mm l/m ² m ³	Wasserbilanz

1 Zusammenfassung

Durch die zunehmende Urbanisierung und Flächenversiegelung wird der natürliche Wasserhaushalt gestört: Niederschläge versickern schlechter, Abflussspitzen treten schneller und stärker auf und die Belastung der Kanalisation steigt. Dezentrale Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung gewinnen daher an Bedeutung. Gründächer spielen hierbei eine zentrale Rolle, deren Leistungsfähigkeit jedoch stark von Aufbau, Substrat und klimatischen Bedingungen abhängt, insbesondere bei Extremereignissen.

Das von der Deutsche Bundesstiftung Umwelt geförderte Projekt MaNuGrün (Az 37461/01 – 23) wurde gemeinsam mit den Praxispartnern Leipziger Wasserwerke und Stadtentwässerung Dresden sowie unter wissenschaftlicher Begleitung durch das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ und dem IWS - Institut für Wasserbau und Siedlungswasserwirtschaft durchgeführt. Das Projekt zielte darauf ab, die Rückhaltefähigkeit verschiedener Gründachsysteme unter unterschiedlichen Niederschlagsbedingungen zu untersuchen. Hierfür wurde eine Versuchsanlage mit zehn Dachtypen aufgebaut und eine Beregnungsanlage zur Simulation definierter Starkregenereignisse eingesetzt. Insgesamt wurden 222 Versuche unter variierenden Vorsättigungszuständen durchgeführt. Die Auswertung erfolgte über Modellkurven und eine quartilsbasierte Volumenbetrachtung.

Die Ergebnisse zeigen, dass Gründächer Abflussspitzen deutlich dämpfen und verzögern. Besonders intensive und gedrosselte Systeme erreichen hohe Dämpfungen, während extensive Dächer ebenfalls wirksam sind, jedoch stärker variieren. Das Rückhalteverhalten hängt wesentlich vom Systemaufbau ab. Modellierungen mit SWMM (Storm Water Management Model) bestätigen die Ergebnisse weitgehend. Langzeitsimulationen zeigen, dass 75 – 82 % des Niederschlags durch Evapotranspiration verloren gehen und nur 18 – 25 % abfließen, wobei die Substrattiefe entscheidend ist.

Für die Anwendung in Kanalnetzmodellen wurde ein verbessertes Ersatzmodell entwickelt, da bisherige Ansätze Abflüsse deutlich überschätzen. Das neue Modell bildet Speicher-, Abfluss- und Verdunstungsprozesse realitätsnäher ab und liefert überwiegend gute Ergebnisse, mit Einschränkungen bei komplexen intensiven Dächern.

Gründächer tragen somit wesentlich zur Reduzierung von Abflussspitzen und zur Stabilisierung des urbanen Wasserhaushalts bei und können mit geeigneten Modellen zuverlässig in Planungen integriert werden.

2 Einleitung

Ausgangssituation

Die fortschreitende Urbanisierung geht in vielen Städten mit einer stetigen Zunahme versiegelter Flächen einher. Diese Entwicklung verändert den natürlichen Wasserhaushalt erheblich und stellt die bestehende wasserwirtschaftliche Infrastruktur vor zunehmende Herausforderungen. Niederschlagswasser kann immer weniger versickern oder zwischengespeichert werden, wodurch höhere und schneller auftretende Abflussspitzen entstehen. Kanalisationen, Kläranlagen und Vorfluter werden stärker belastet, was das Risiko von Überlastungen und Überflutungen erhöht.

Darüber hinaus sind im Zuge des Klimawandels Veränderungen der Niederschlagsverhältnisse zu beobachten. Neben einer Zunahme kurzzeitiger, sehr intensiver Niederschlagsereignisse treten auch längere Trockenperioden häufiger auf. Diese Kombination aus Starkregen und Trockenphasen verstärkt die Belastungen des urbanen Wasserhaushalts zusätzlich. Gleichzeitig führen der Rückgang von Grün- und Wasserflächen sowie die hohe bauliche Dichte zur Ausbildung städtischer Wärmeinseln, zu ungünstigen Luftfeuchtigkeitsverhältnissen und zu einer Verschlechterung der Luftqualität.

Vor diesem Hintergrund gewinnen Maßnahmen der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung zunehmend an Bedeutung. Diese Maßnahmen sind ein zentraler Bestandteil sogenannter blau-grüner Infrastrukturen, die wasserwirtschaftliche und vegetationsbasierte Elemente miteinander verknüpfen. Ziel solcher Konzepte ist es, den natürlichen Wasserkreislauf im urbanen Raum möglichst nachzuahmen, indem Niederschläge vor Ort zurückgehalten, gespeichert, verdunstet oder zeitlich verzögert abgeleitet werden. Auf diese Weise können Abflussspitzen reduziert, Kanalnetze entlastet und gleichzeitig positive Effekte auf das Stadtklima erzielt werden.

Eng damit verbunden ist das Leitbild der Schwammstadt. Dieses verfolgt den Ansatz, Städte so zu gestalten, dass sie Niederschlagswasser wie ein Schwamm aufnehmen, zwischenspeichern und kontrolliert wieder abgeben können. Neben der Reduzierung von Überflutungsrisiken bei Starkregenereignissen trägt dieses Konzept auch zur Verbesserung der Wasserverfügbarkeit während Trockenperioden bei. Die multifunktionale Nutzung urbaner Flächen spielt dabei eine zentrale Rolle, da wasserwirtschaftliche Anforderungen mit ökologischen, klimatischen und städtebaulichen Zielen verknüpft werden.

Gründächer stellen innerhalb dieser Konzepte ein wesentliches Element dar. Sie ermöglichen die Nutzung von Dachflächen zur Regenwasserrückhaltung und Verdunstung, ohne zusätzlichen Flächenbedarf im Straßen- oder Freiraum zu erzeugen. Durch ihre Speicher- und Verzögerungswirkung können sie einen messbaren Beitrag zur Reduzierung von Abflussmengen leisten und zugleich zur Verbesserung des Mikroklimas beitragen. Damit nehmen Gründächer eine Schnittstellenfunktion zwischen technischer Infrastruktur und naturnahen Lösungen ein.

Die Wirksamkeit von Gründächern im Rahmen blau-grüner Infrastrukturen und der Schwammstadt hängt jedoch maßgeblich von ihrem Systemaufbau, den verwendeten Substraten sowie den vorherrschenden klimatischen Randbedingungen ab. Vor allem außergewöhnliche Niederschlagsereignisse in Kombination mit vorangegangenen Trockenphasen stellen hohe Anforderungen an die Funktionsfähigkeit dieser Systeme. Eine fundierte Bewertung ihrer Leistungsfähigkeit ist daher eine wesentliche Voraussetzung für ihre gezielte und verlässliche Integration in zukünftige Konzepte des urbanen Niederschlagswassermanagements.

Der Stand der Technik zeigt, dass das Regenrückhaltevermögen von Gründächern bereits Gegenstand zahlreicher Untersuchungen war. Ein Großteil dieser Studien wurde jedoch unter Laborbedingungen oder als Pilotprojekt durchgeführt. Die dabei gewonnenen Ergebnisse basieren auf definierten und weitgehend konstanten Randbedingungen, die die natürliche Variabilität realer Wetterereignisse nur eingeschränkt abbilden. Langzeituntersuchungen an realen Gründächern liefern wertvolle Erkenntnisse, erlauben jedoch meist keine gezielte Analyse seltener intensiver Niederschlagsereignisse.

Umweltrelevanz des Vorhabens

Das Vorhaben adressiert zentrale Fragestellungen des nachhaltigen Niederschlagswassermanagements und der klimaangepassten Stadtentwicklung. Durch die Verbesserung des Verständnisses der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Gründächern unter außergewöhnlichen Niederschlagsbedingungen leistet das Projekt einen Beitrag zur Reduzierung von Überflutungsrisiken und zur Entlastung städtischer Entwässerungssysteme.

Darüber hinaus unterstützt das Vorhaben die Entwicklung multifunktionaler, flächensparender Lösungen, die wasserwirtschaftliche, ökologische und stadtklimatische Anforderungen miteinander verbinden. Die gewonnenen Erkenntnisse sind sowohl für Kommunen und Entwässerungsbetriebe als auch für Planende, Bauträger und private Eigentümer von hoher Relevanz.

Ziel des Vorhabens

Ziel des Projektes MaNuGrün war es, belastbare Aussagen zum Rückhaltevermögen unterschiedlicher Gründachsysteme unter variierenden Niederschlagsbelastungen zu erarbeiten. Dabei sollten sowohl häufige als auch seltene Starkregenereignisse unterschiedlicher Intensität und Zeitdauer berücksichtigt werden.

Ergänzend dazu war es Ziel, wesentliche physikalische Eigenschaften der eingesetzten Substrate, wie Speicherkapazität und Porenvolumen, systematisch zu erfassen und in eine ganzheitliche Wasserbilanz verschiedener Gründachtypen zu integrieren.

Die Projektergebnisse sollten zudem eine fundierte Grundlage liefern, um Einsparpotenziale bei der Dimensionierung von Kanalisationen aufzuzeigen und Gründächer als Alternative oder Ergänzung bewerten zu können. Begleitend war die Entwicklung von Informations- und Beratungsgrundlagen für unterschiedliche Zielgruppen vorgesehen.

Aufgabenstellung und Vorgehensweise

Zur Erreichung der genannten Ziele wurden im Rahmen des Vorhabens zehn Gründächer mit unterschiedlichen Systemaufbauten errichtet und unter festgelegten Bedingungen untersucht.

Das Messprogramm beinhaltete die Erfassung von Niederschlagsmengen, Abflussraten, Speicherzuständen und weiteren relevanten Parametern. Die gewonnenen Messdaten wurden ausgewertet, miteinander verglichen und mit Ergebnissen aus Realobjekten sowie aus parallelen Forschungsprojekten abgeglichen. Auf dieser Grundlage erfolgte die Ableitung von Bewertungskriterien und Handlungsempfehlungen für den Einsatz von Gründächern.

Ergänzend dazu kamen Niederschlags-Abfluss-Modelle sowie das Regenwassermanagementmodell SWMM (Storm Water Management Model) zum Einsatz, mit denen die Abflussprozesse auf Gründächern und deren Auswirkungen auf das Kanalnetz unter variierenden Niederschlagsbedingungen simuliert und analysiert wurden.

Das Projekt gliederte sich in fünf Phasen: Planung, Aufbau der Versuchsanlage, Versuchsdurchführung, Datenauswertung und Wissenstransfer. Die erhobenen Messdaten wurden umfassend ausgewertet und in geeigneten Modellen abgebildet. Abschließend erfolgte der Transfer der Erkenntnisse durch einen Leitfaden, Netzwerkarbeit und Fachveranstaltungen.

Der ausführliche Arbeitsplan ist im Anhang A - 1 zu finden.

3 Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

3.1 Planung und Bau der Versuchsanlage

Die Leipziger Wasserwerke waren mit dem Aufbau der Versuchsanlage (Carports, Beregnungsanlage), der Installation der Gründächer sowie der vollständigen Versuchsdurchführung beauftragt.

3.1.1 Aufbau der Dächerkonstruktion

Für die Errichtung der Dachkonstruktion der Versuchsanlage war eine Vorlage zur Genehmigungsfreistellung beim Amt für Bauordnung und Denkmalpflege der Stadt Leipzig einzureichen.

Ein erstes Verfahren wurde im Jahr 2022 durchgeführt. Die dort dargestellte Lage der Versuchsanlage konnte nicht umgesetzt werden. Die Anlage kollidierte mit verschiedenen querenden Leitungen sowie einer permanent freizuhaltenden Zuwegung für ein Spülfahrzeug zur Bewirtschaftung der weiteren Anlagen der Leipziger Wasserwerke auf dem Gelände.

Im Jahr 2023 wurde ein weiteres Genehmigungsfreistellungsverfahren mit angepasster Lage der Versuchsanlage erfolgreich abgeschlossen. Diese Genehmigungsfreistellung umfasste Baulastverzeichnisse, eine detaillierte Baubeschreibung, Auszüge aus B-Plänen und städtebaulichen Verträgen, einen Brandschutznachweis und eine detaillierte Statik des Objektes. Die Unterlagen zur Genehmigungsfreistellung wurden durch das Ingenieurbüro Behr Ingenieure erarbeitet.

Mithilfe der Statischen Berechnungen des Ingenieurbüros erarbeiteten die Leipziger Wasserwerke eine Leistungsbeschreibung der Dachanlage. Im April 2023 wurden Angebote bei verschiedenen Zimmerei-Betrieben eingeholt. Nach Prüfung der abgegebenen Angebote im Juni 2023 wurde die Fachfirma Ralf Peukert – Zimmerei und Holzbau mit der Herstellung der Dächerkonstruktion beauftragt.

Die Holzbauarbeiten starteten im Juli 2023 und wurde im August 2023 fertiggestellt (Abbildung 1). Im Oktober erfolgte eine Nachbeauftragung der Blechabdeckung und Anstrich der gesamten Holzkonstruktion. Im Dezember 2023 wurde die Dächerkonstruktion final fertiggestellt.



**Abbildung 1: Aufbau der Dachkonstruktion der Fachfirma Ralf Peukert, Zimmerei und Holzbau
(Bild: Ralf Peukert)**

3.1.2 Planung und Aufbau der Beregnungsanlage

Die Leipziger Wasserwerke erarbeiteten die Planungsanforderungen an die Beregnungsanlage. Das Ingenieurbüro Temann + Schöpe Beratende Ingenieure Partnerschaft mbB wurde mit der Planung der Beregnungsausrüstung beauftragt. Folgende Anforderungen wurden definiert und zusammengestellt:

- Welche Daten sollen erhoben werden? Und in welchem Umfang?
- Erster Systementwurf Beschickungs- und Verteilungssystem
- Datenverarbeitung (Anbindung Leitsystem)
- Anforderungen an die einzelnen erhobenen Kenngrößen und Messbereiche

Ziel war die Verregnung eines Euler-II-Modellregens der Jährlichkeiten $T = 1a$, $T = 5a$ und $T = 100a$. Aus der Fläche der Dächer und den Daten des KOSTRA-Atlas konnten die Mindest- und Maximaldurchflüsse ermittelt werden, anhand derer die Beregnungsanlage ausgelegt wurde.

Das Planungsbüro erstellte auf Grundlage der Planungsanforderungen ein Lastenheft sowie ein dazugehöriges Leistungsverzeichnis für die Beregnungsausrüstung. Die Planungsleistung umfasste unter anderem:

- Entwicklung der Wasserkreisläufe entsprechend der Mindest- und Maximaldurchflüsse der zu simulierenden Regenereignisse
- Entwicklung eines Verdüsungssystems für die Wasserverteilung auf den Dächern
- Auslegung der Pumpen
- Wahl der Messgeräte/Messverfahren für Zu- und Abfluss

- Planung ESMR
- Planung Anschlüsse Wasser und Strom

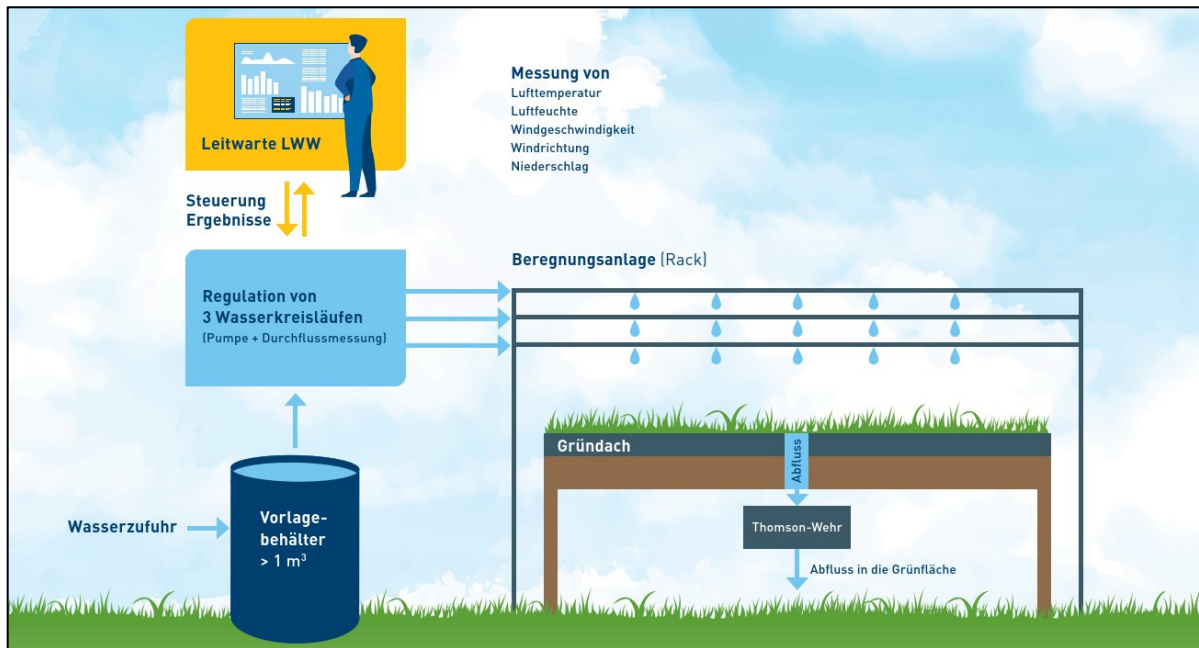


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Beregnungsausrüstung (Bild: Leipziger Wasserwerke)

Im Juni 2023 wurden auf Grundlage der Ausschreibungsunterlagen mehrere Angebote entsprechend den Vorgaben des Fördermittelgebers eingeholt. Nach deren Prüfung wurde die Firma PVS GmbH im August 2023 mit dem Bau der Beregnungsanlage (Abbildung 2) beauftragt.

Die Firma PVS errichtete dabei folgende Anlagenteile:

- Werkplanung auf Grundlage des Leistungsverzeichnisses und Lastenheftes
- Fertigung des Beregnungsrack und der Verdüsungsausrüstung
- Montage des Schienensystems für das Beregnungsrack an der Versuchsanlage
- Herstellung Schlauchsystem zum Wassertransport
- Fertigung der Thomsonwehre
- Schaltschrankbau sowie Programmierung der SPS

Die Abnahme der Beregnungsanlage erfolgte am 12.12.2025. Grund für die Verzögerung waren fehlende Dokumentationen sowie ausstehende Elektroprüfungen. Nach Rücksprache mit der ausführenden Firma konnten die Versuche bereits im Sommer 2025 beginnen.

3.1.3 Errichtung von acht Gründachaufbauten

Folgende Dachtypen wurden errichtet: ein Referenzdach (Schwarzdach mit EPDM-Abdichtungsbahn), ein Kiesdach mit 10 cm Aufbau sowie acht unterschiedliche, zum Zeitpunkt der Umsetzung am Markt verfügbare und praxisüblich ausgeführte Gründächer.

Im ersten Schritt wurde eine Marktrecherche durchgeführt. Dazu wurden die Webseiten der Gründachhersteller Bauder, Optigrün, ZinCo und Sempergreen sowie ausgewählte Baumarkt-Webseiten ausgewertet, um gängige Aufbauten zu identifizieren. Auf dieser Grundlage wählten die Projektpartner möglichst unterschiedliche Varianten aus.

Die unterschiedlichen Dachtypen sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Unterscheidung erfolgte nach Systematik, Begrünung, Art der Vegetationstragschicht, Mächtigkeit der Vegetationstragschicht, Dränage und Vorhandensein einer Drossel. Die Beschaffung der Materialien erfolgte durch die Leipziger Wasserwerke zu marktüblichen Konditionen.

Tabelle 1: Übersicht über die einzelnen Dachaufbauten

	Dach 1	Dach 2	Dach 3	Dach 4	Dach 5
Systematik	extensiv	intensiv	extensiv	extensiv	intensiv
Begrünung	Stauden-Sedum-Mix	Stauden	Sedum	Sedum	Stauden
Vegetationstragschicht	Substrat	Substrat	Substrat	Substrat	Substrat
Mächtigkeit Vegetationstragschicht [cm]	10	20	10	10	30
Dränage [cm]	4	6	8	3 (fließwegverlängernd)	6
Drossel	ja (aufgelegte Drossel)	nein	ja (gesteckte Drossel)	nein	ja (aufgelegte Drossel)
	Dach 6	Dach 7	Dach 8	Dach 9	Dach 10
Systematik	Kiesdach (10 cm)	Normaldach	extensiv	extensiv	extensiv
Begrünung			Sedum	Sedum	Sedum
Vegetationstragschicht			Mineralwollfasern	Mineralwollfasern	Substrat
Mächtigkeit Vegetationstragschicht [cm]			4	4	6
Dränage [cm]			2,5	4	2,5
Drossel	nein	nein	nein	nein	nein

Der Aufbau und die Bepflanzung der einzelnen Dächer wurden durch die Kolleginnen und Kollegen des Teams 3450, Unternehmensbereich Markt der Leipziger Wasserwerke

eigenverantwortlich umgesetzt. Für den Aufbau wurden im Vorfeld die Aufbau- und Verlegeanleitungen der einzelnen Bauteile herangezogen und die Montage eigenständig durchgeführt. Für die Begrünung der Dächer gab es verschiedene Möglichkeiten:

- Ausbringung von Sedum-Sprossen
- Vegetationsmatten mit Sedum-Mix
- Händisches Einpflanzen von Stauden



Abbildung 3: Drohnenaufnahme der Versuchsanlage zur Eröffnungsveranstaltung am 31.05.2025 (Foto: Leipziger Wasserwerke, Ergänzungen: Andrea Bernhardt) mit Dachbezeichnung

Die Sedum-Begrünungen wurden passend zum jeweiligen Dach über einen Gründachhersteller bezogen. Die Stauden stammten aus einer regionalen Berufsschule und gehören zur Pflanzgemeinschaft der Leipziger Gründachmischung.

Die Erfahrungen aus Aufbau und Begrünung wurden in der „Abschlussdokumentation zum Gründachaufbau einschließlich Anlagenteil“ (Andrea Bernhardt, 08.04.2024) festgehalten. Die zugehörigen Unterlagen sind sehr umfangreich (zwei Teile mit einem Gesamtumfang von 198 Seiten) und werden daher nicht im Anhang aufgeführt, sondern dem Abschlussbericht als gesonderte Anlage beigelegt.

Der Zustand der Begrünung wurde über den gesamten Versuchszeitraum regelmäßig dokumentiert. Die Luftbild-Aufnahme in Abbildung 3 bildet hierfür den Startschuss. Vor jedem Versuch wurde der Begrünungszustand mit Maßstab fotografiert und in der Versuchsdokumentation festgehalten.

3.1.4 Kalibrierung der Abflussmessung

Während des Probetriebs im Dezember 2024 gab es signifikante Abweichungen zwischen der Zuflussmessung im Schaltschrank (digitale Messung) und Abflussmessung (Thomson-Wehre). Daraufhin wurden durch die Leipziger Wasserwerke eine umfassende Nachkalibrierung der Abflussmessungen durchgeführt. Ziel der Kalibrierung war die Feinabstimmung der Zuflussmessung, sodass Zufluss und Abfluss übereinstimmen ($Q_{\text{Zufluss}} = Q_{\text{Abfluss}}$).

Mithilfe der Berechnungsanlage wurde jedes Thomson-Wehr mit den Durchflussskennlinien in Abbildung 4 beschickt, um die charakteristischen Füllstandshöhen im Thomson-Wehr zu erfassen. Die Füllstandshöhe [mm] wird mittels Radarsonde gemessen, vgl. Anhang A - 2.

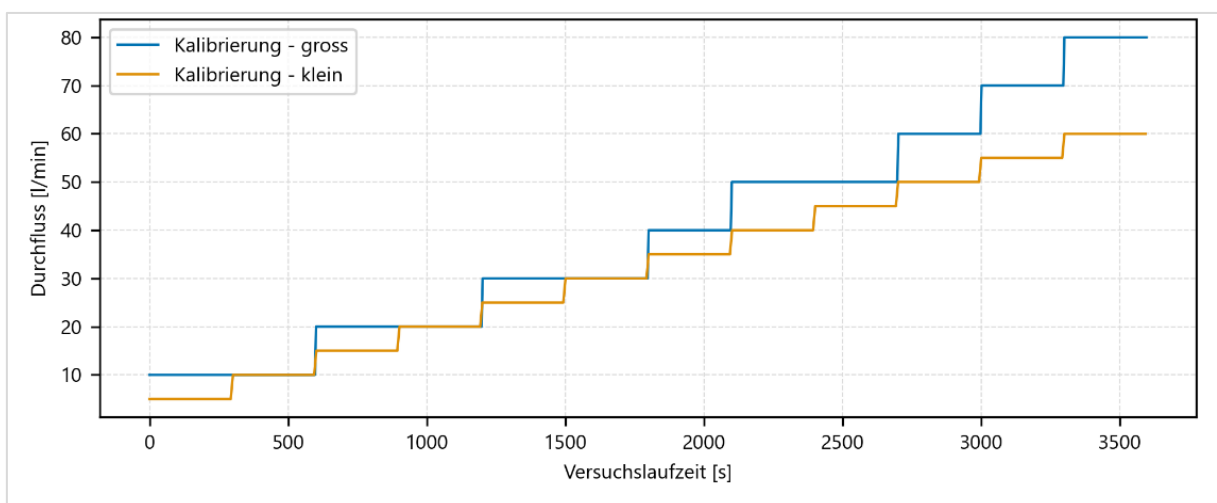


Abbildung 4: Durchflussskennlinien für die Kalibrierung der Abflussmessung

Anschließend wurde über die Standard-Thomson-Wehrformel die Überfallhöhe $H_{\text{Überfall}} = 0$ m ermittelt. Aufgrund der baulichen Ausführung der Kästen (Kugelhahn im Boden, Kasten entleert sich nicht bis zum Boden) kann $H_{\text{Überfall}} = 0$ m nicht einfach mittels Zollstocks ausgemessen werden.

Formel 1: Standard-Thomson-Wehrformel

$$Q = 2,363 \cdot \mu \cdot \tan\left(\frac{\alpha [\text{rad}]}{2}\right) \cdot H^{\frac{5}{2}}$$

Nach Abzug des Offsets (entspricht Füllstand im Kasten in mm bei $H_{\text{Überfall}} = 0$ m vom gemessenen Füllstand) konnte festgestellt werden, dass die zehn Thomson-Wehre annähernd baugleich sind. Bei den charakteristischen Durchflüssen aus den Kalibrierläufen stellten sich annähernd gleiche Füllstandshöhen ein. Aus den ermittelten Überfallhöhen wurde anschließend eine anlagenspezifische Kennlinie zur Ermittlung des Abflusses für die Thomson-Wehre entwickelt.

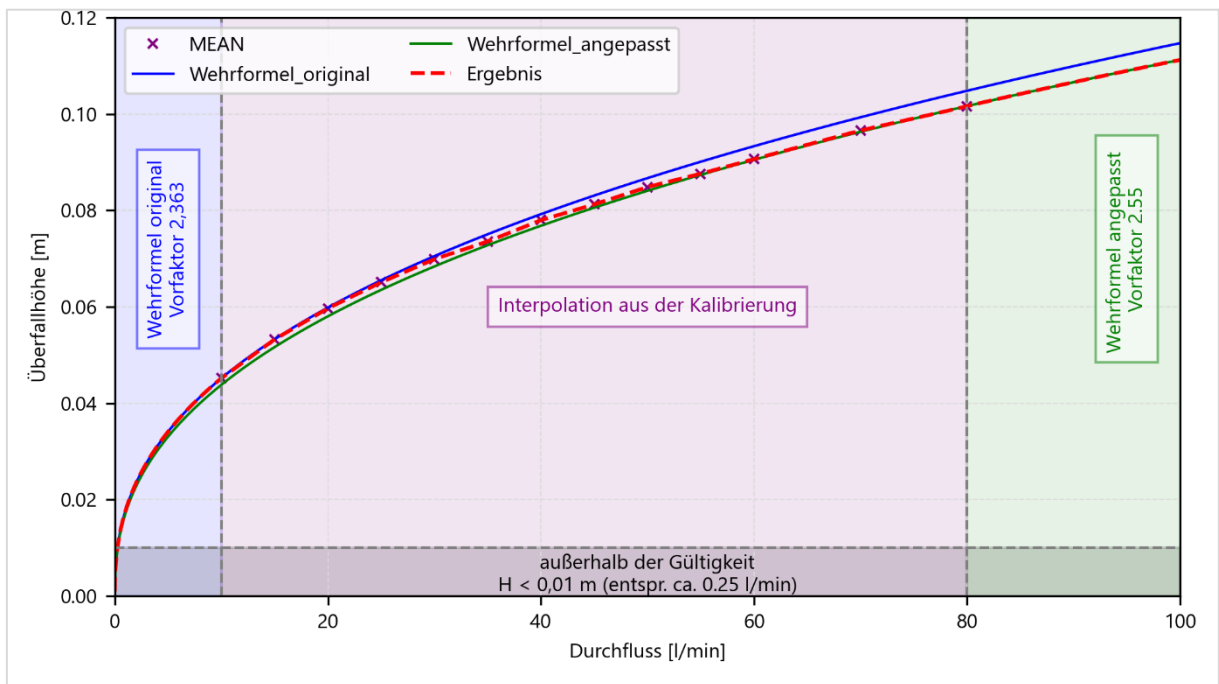


Abbildung 5: Ergebnis der Kalibrierung: Anlagenspezifische Kennlinie zur Ermittlung des Abflusses über die Thomson-Wehre

Die anlagenspezifische Kennlinie (rot strichliert) ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Kennlinie ist in unterschiedliche Bereiche untergliedert. Die Unterteilung beruht auf den Gültigkeitsgrenzen der Thomson-Wehrformeln und den durchgeführten Kalibrierläufen.

Der Durchflussbereich von ≈ 0 l/min bis 10 l/min (Bereich blau) wird mittels Standard-Thomsonwehr-Formel (vgl. Formel 1) abgebildet. Von 10 l/min bis 80 l/min (Bereich violett) wird auf die ermittelte Kennlinie aus der Kalibrierung zurückgegriffen. Sie besteht aus Stützpunkten der mittleren charakteristischen Überfallhöhe aller Thomson-Wehre. Ab 80 l/min (Bereich grün) greift eine angepasste Thomson-Wehrformel (vgl. Formel 2) die stufenlos an die Kennlinie der Kalibrierung anschließt.

Formel 2: Angepasste Wehrformel

$$Q = 2,55 \cdot \mu \cdot \tan\left(\frac{\alpha [\text{rad}]}{2}\right) \cdot H^{\frac{5}{2}}$$

3.2 Langzeituntersuchungen verschiedener Starkregenereignisse an der Versuchsanlage

3.2.1 Versuchsbedingungen

Die Versuchsreihen zur Untersuchung der Abflusswirkung der einzelnen Gründächer wurden von Juni bis September 2025 von den Leipziger Wasserwerken durchgeführt. Dabei sind verschiedene Vorsättigungsszenarien und Jährlichkeiten zum Einsatz gekommen. Insgesamt wurden 222 Versuche mit der Beregnungsanlage durchgeführt.

Folgende Starkregenereignisse wurden als Euler-II-Modellregen basierend auf dem DWD-2020-KOSTRA-Atlas (Rasterzelle 131176) mit der Beregnungsanlage simuliert (Modellkurven siehe Anhang A - 3):

- 1-jährlicher Regen (T1a)
- 5-jährlicher Regen (T5a)
- 100-jährlicher Regen (T100a)

Um dem möglichen Einfluss der Vorsättigung auf die Gründächer Rechnung zu tragen, wurden verschiedene Vorsättigungsszenarien mit den Projektpartnern abgestimmt. Vor dem eigentlichen Beregnungsversuch erfolgte eine Vorsättigung, bis das Dach tatsächlich abflusswirksam war (Anstieg Füllstand im Thomson-Wehr). Dann folgte ein fest definierter zeitlicher Abstand zwischen Vorsättigungs-Beregnung und eigentlichem Beregnungsversuch:

- für gesättigte Bedingungen: Versuch 1 h nach Vorsättigung (1h)
- für teilgesättigte Bedingungen: Versuch 4 h nach Vorsättigung (4h)
- für ungesättigte Bedingungen: Versuch 72 h nach Vorsättigung (72h)

Während der Versuche wurden die klimatischen Bedingungen anhand von Daten aus verschiedenen Quellen erfasst. Auf dem Gelände des BDZ befinden sich ein Regenmesser der Leipziger Wasserwerke sowie eine Klimastation des UFZ, die Lufttemperatur und Niederschlag misst. Ergänzend wurden Daten der DWD-Klimastation Leipzig/Halle zur Bewertung der Versuche und zur Wetterbeobachtung herangezogen.

Aufgrund der Witterungsbedingungen (niederschlagsreicher Sommer; vgl. Abbildung 6) erstreckte sich die Versuchsdurchführung bis in den September 2025. Am schwierigsten

gestaltete sich dabei die Durchführung der Versuche unter ungesättigten Bedingungen, da 72 Stunden kein Niederschlagsereignis auftreten durfte. Insbesondere im Juli konnte durch den häufigen Regen nur unter eingeschränkten Bedingungen Versuche durchgeführt werden.

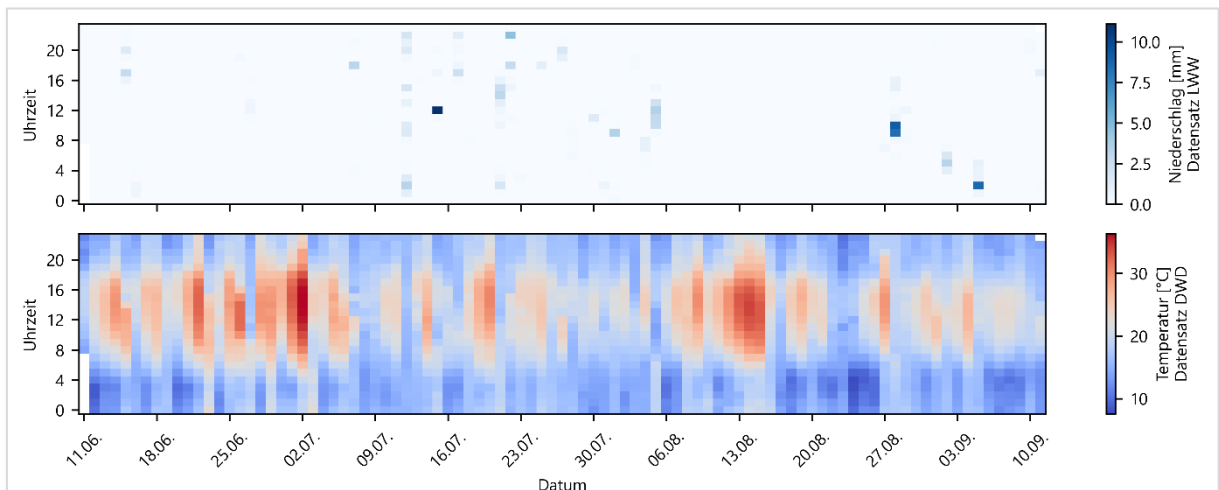


Abbildung 6: Übersicht über Temperatur und Niederschläge während des Versuchszeitraums, Juni bis September 2025

Neben den klimatischen Bedingungen gab es regelmäßig Verzögerungen im Versuchsplan durch Ausfall des Übertragungssystems. Der Schaltschrank stand direkt in der Sonne und bei hochsommerlichen Temperaturen überhitzte der Router und fiel kurzzeitig aus. In der Regel beschränkte sich der Datenverlust auf einige Minuten. Trat der Datenausfall zeitlich nach der Abflussspitze auf, wurde der Versuch berücksichtigt. Andernfalls erfolgte eine Wiederholung.

3.2.2 Durchgeführte Versuche und Dokumentation

Die Versuche wurden fortlaufend benannt und dokumentiert. Neben der Bezeichnung, der Jährlichkeit, dem Vorsättigungsszenario und dem Bewuchsgrad wurden auch die klimatischen Bedingungen zum Versuchszeitpunkt dokumentiert. Im Anhang A - 4 sind alle durchgeführten Versuche tabellarisch zusammengefasst.

Die Versuchsdokumentation liegt sowohl in tabellarischer Form als auch in Steckbriefform, vgl. Abbildung 7, einschließlich grafischer Aufbereitung vor. Jeder Steckbrief umfasst mehrere Seiten und enthält eine Übersicht der Pumpen-SOLL- und IST-Kurven, die Abflussganglinie, eine Betrachtung der Datenausfälle, die Klimadaten während der Vorsättigung, Klimadaten während des eigentlichen Beregnungsversuchs und ein Foto des Daches. Aufgrund des großen Umfangs (222 Versuche x 6 Seiten) ist im Anhang A - 5 ein Steckbrief exemplarisch aufgeführt. Die vollständigen Steckbriefe können bei Bedarf über die Leipziger Wasserwerke zur Verfügung gestellt werden.

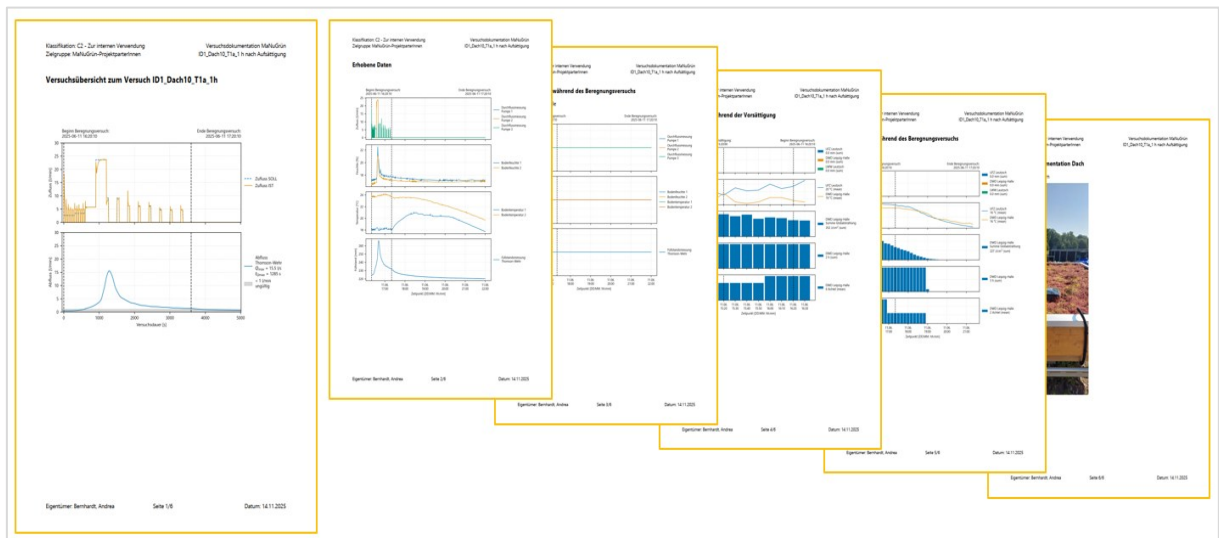


Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung der Steckbriefe je Versuch.

Auf jedem Dach wurden mindestens zwei Versuche je Jährlichkeits-Vorsättigungs-Kombination (= Set) durchgeführt (vgl. Abbildung 8). Ergaben sich deutliche Abweichungen in den Abflussganglinien, vgl. Abbildung 9, wurden weitere Versuche durchgeführt.

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass auf den Dächern mit Drossel deutlich häufiger Versuche wiederholt werden mussten. Auf Dächern ohne Drossel waren in der Regel lediglich zwei Versuche erforderlich.

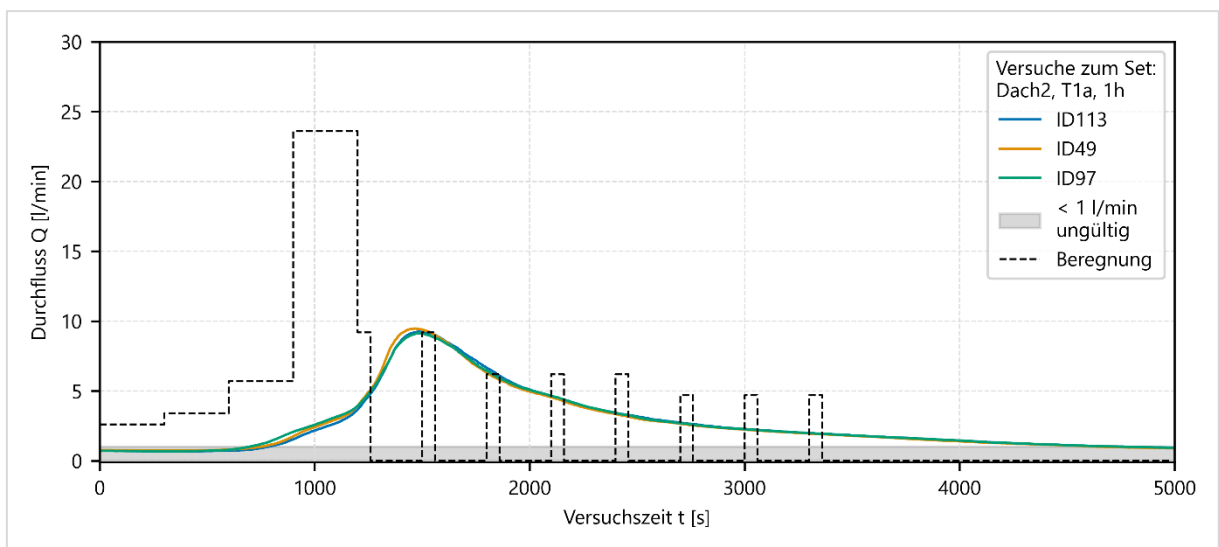


Abbildung 8: Beispiel für Versuche mit guter Übereinstimmung, hier: Dach 2, 1-jährliches Regenereignis und gesättigte Bedingungen

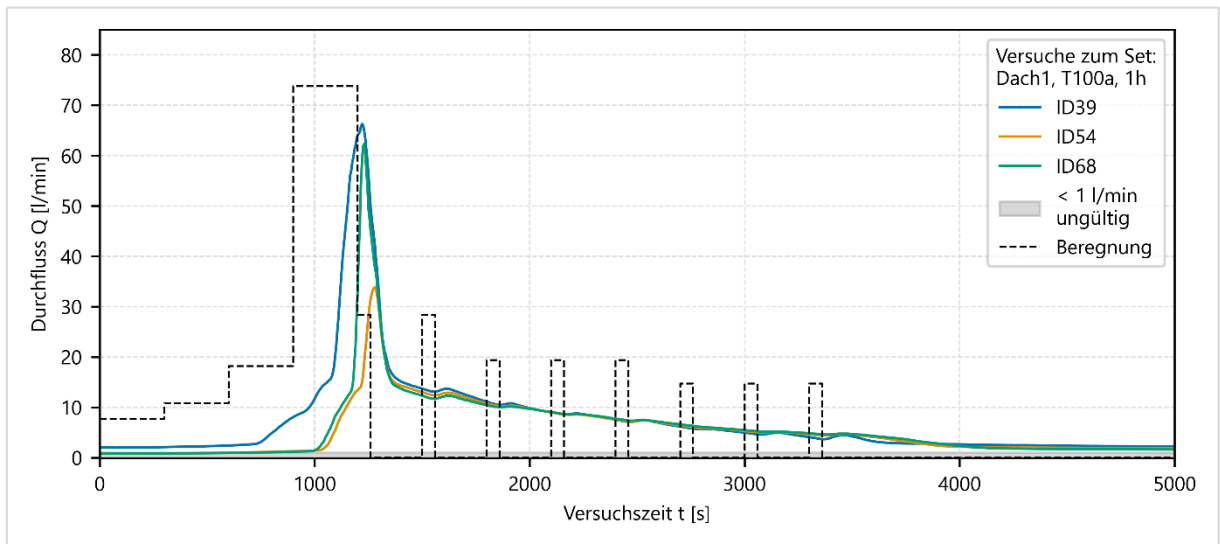


Abbildung 9: Beispiel für Versuche mit mäßiger Übereinstimmung, hier: Dach 1, 100-jährliches Regenereignis und gesättigte Bedingungen

Die Abflussganglinien aller Versuche sind dach- und setweise im Anhang A - 6 zusammengestellt.

Als mögliche Ursache für die Abweichungen zwischen den einzelnen Beregnungsversuchen unter identischen Versuchsbedingungen wurde die Lufttemperatur diskutiert. In der Abbildung 10 ist ein Set mit deutlich abweichenden Abflussganglinien dargestellt, obwohl zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung die Temperaturen recht ähnlich sind.

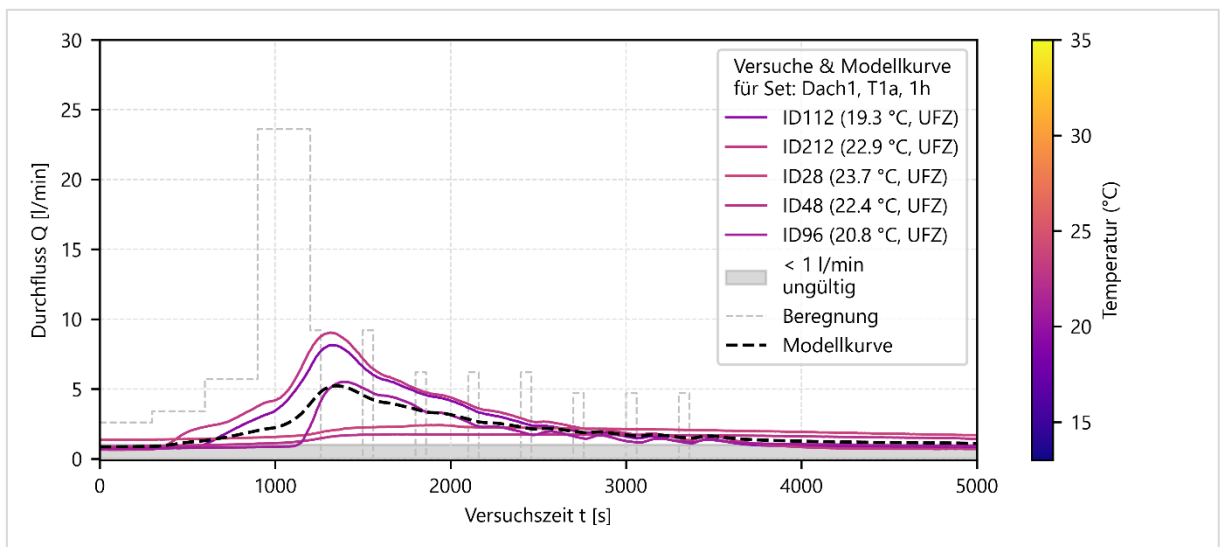


Abbildung 10: Versuche auf Dach 1, 1-jährliches Regenereignis unter gesättigten Bedingungen unter Berücksichtigung der Lufttemperatur während des Versuchs

Bei weiteren Versuchen, z. B. auf Dach 1 mit 5-jährlichem Regen und gesättigten Bedingungen, ist die Temperaturdifferenz zwischen den abweichenden Abflussganglinien größer. Ein abschließender Zusammenhang konnte jedoch nicht festgestellt werden.

Im Anhang A - 7 sind alle Versuche mit entsprechender Darstellung der Temperatur während des Beregnungsversuchs je Dach abgebildet.

3.2.3 Entwicklung von Modellkurven

Auf Grundlage der einzelnen Versuche wurden Modellkurven entwickelt, die jeweils ein Set sowie ein Dach repräsentieren. Durch die Verwendung dieser Modellkurven wird ein systematischer und vergleichbarer Ansatz geschaffen, der den Vergleich zwischen den unterschiedlichen Dächern und Sets erleichtert. Zudem ermöglichen die Modellkurven eine übergreifende Auswertung der Versuchsergebnisse.

Ein Teil der Modellkurven wurde darüber hinaus von den anderen Projektpartnern für weiterführende Analysen und Auswertungen genutzt.

Die Modellkurven wurden hinsichtlich ihrer Güte bewertet. Dabei erfolgte die Beurteilung der Abflussspitzen der einzelnen Versuche in Bezug auf ihre Höhe und den Zeitpunkt ihres Auftretens. Die meisten Modellkurven zeigten sehr niedrige Standardabweichungen, vgl. Abbildung 11.

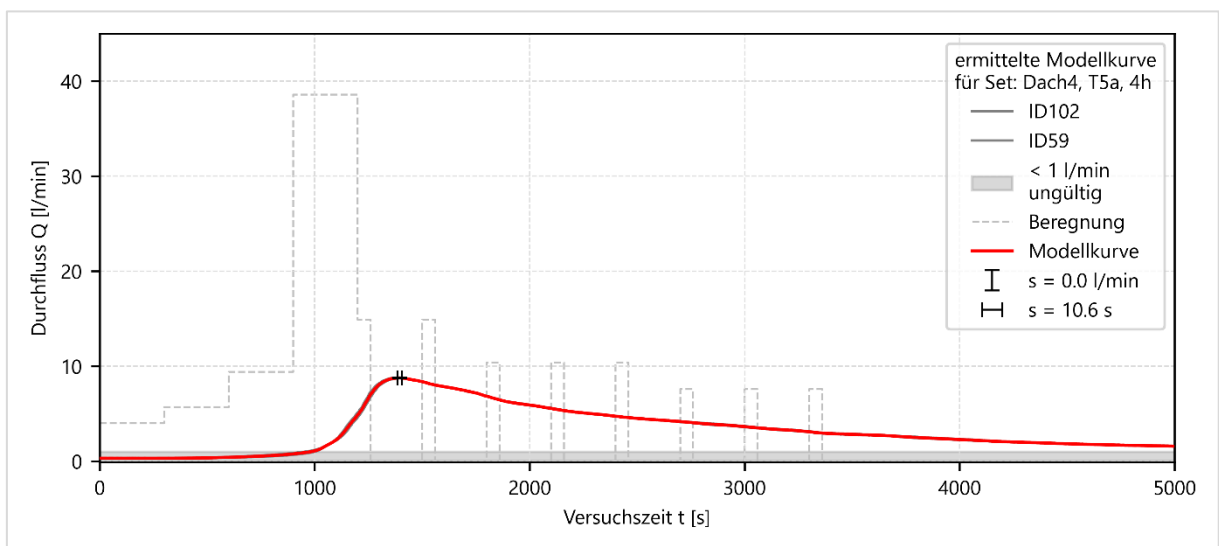


Abbildung 11: Modellkurve für Dach 4, 5-jährlicher Regen und teilegesättigte Bedingungen mit hoher Qualität

Die Dächer mit Drossel, dessen Abflussganglinien schwer reproduzierbar waren, zeigten infolgedessen auch recht hohe Standardabweichungen, vgl. Abbildung 12. Auch bei großen Abweichungen zwischen den einzelnen Versuchen eines Sets wurden in der Auswertung die Modellkurven unabhängig von ihrer Güte verwendet. Eine Gewichtung erfolgte nicht.

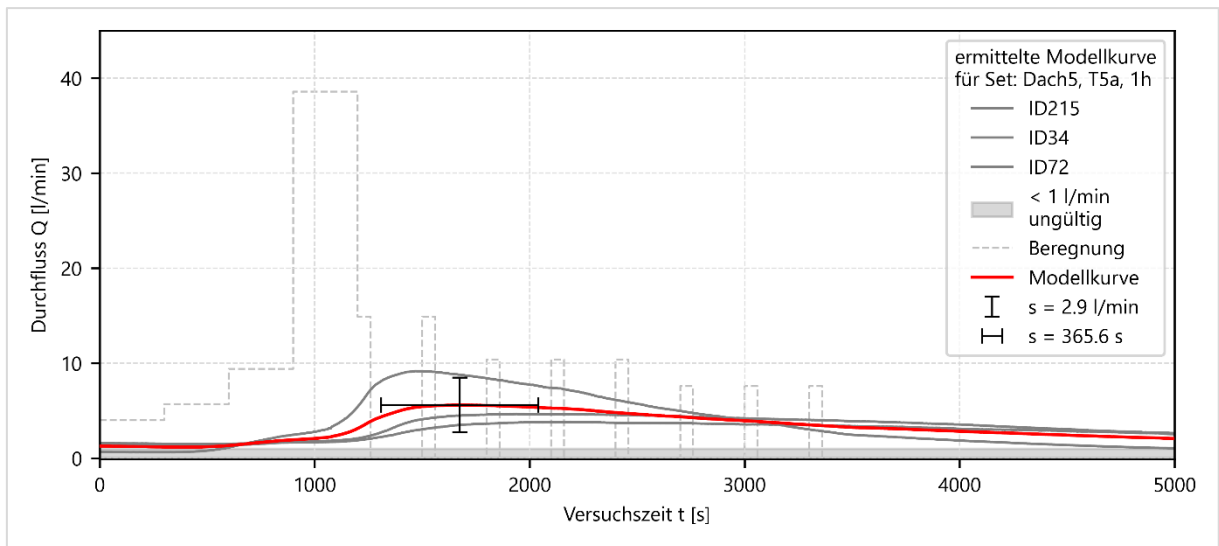


Abbildung 12: Modellkurve für Dach 5, 5-jährlicher Regen und gesättigte Bedingungen mit mäßiger Qualität

Alle Modellkurven sowie deren Standardabweichungen sind dach- und setweise im Anhang A - 8 abgebildet.

3.2.4 Volumenbetrachtung

Aus den gemessenen Durchflüssen wurden Summenkurven berechnet, die eine Einschätzung der abgeflossenen Volumina ermöglichen. In Abbildung 13 ist eine beispielhafte Summenkurve abgebildet. Bei starken Unterschieden in den Abflussganglinien der einzelnen Versuche eines Sets zeigten sich auch in den Summenkurven deutliche Abweichungen zwischen den Versuchen. In Abbildung 13 sind die Abweichungen für das Dach 10 sehr gering.

Der Betrachtungszeitraum für das abgeflossene Volumen wurde auf die ersten 5.000 Sekunden beschränkt, da bis dort in der Regel die erste Welle abgeklungen war. Die gesamte Versuchsanlage ist auf eine gute Abbildung der Abflussspitze kalibriert, so dass Kleinstmengen weniger zufriedenstellend abgebildet wurden.

Durch die spitz zulaufende Abflussform des Thomson-Wehrs und das flache Ausklingen der Abflussganglinien eines Gründachs konnten Messfehler über mehrere Stunden hinweg einen vermeintlich erhöhten Abfluss anzeigen, der tatsächlich jedoch nicht vorlag.

Durch dieses konstante „Eindrücken“ von Kleinstmengen stieg das abgeflossene Volumen über Stunden nach dem Versuch lt. Umrechnung des Füllstands an, bei manchen Versuchen teilweise über 100 % des verregneten Volumens. Eine vollständige Wasserbilanz war auf Grund dieser Rahmenbedingungen nicht aufstellbar.

Zur näherungsweisen Bestimmung des im Gründach verbliebenen Wassers wurden die ersten drei Quartile des Abflusses betrachtet. Konkret wurde ermittelt, zu welchen Zeitpunkten 25 %, 50 % und 75 % des zugeführten Volumens abgeflossen waren.

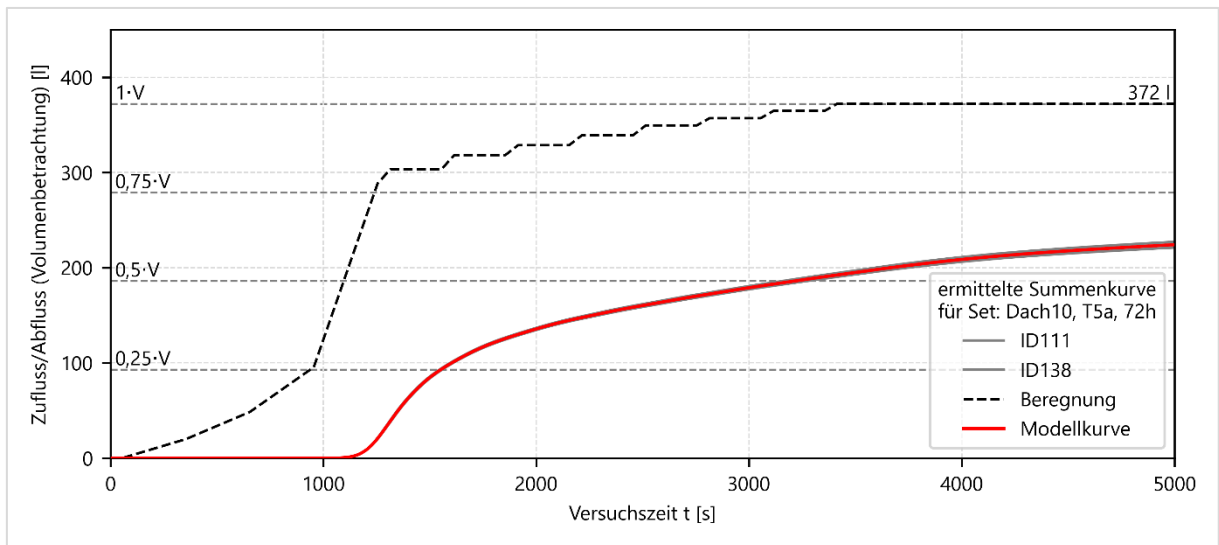


Abbildung 13: Betrachtung des abgeflossenen Volumens für Dach 10, einen 5-jährlichen Starkregen unter ungesättigten Bedingungen

Alle Modellkurven des Abflussvolumens liegen im Anhang A - 9 vor.

4 Ergebnisse

4.1 Analyse der Regenwasserrückhaltekapazität der Gründächer

4.1.1 Dämpfung und Verzögerung

Um die Abflusswirkung der Gründächer im Rahmen der Kanalhydraulik zu bewerten, ist die Dämpfung und Verzögerung ein ausschlaggebendes Kriterium. In der Abbildung 14 sind Dämpfung und Verzögerung grafisch dargestellt, dabei gelten für die Auswertung der Modellkurven im Fall des MaNuGrün-Projektes folgende Annahmen:

- **Dämpfung** = Reduzierung der Abflussspitze im Verhältnis zum Spitzenzufluss des Beregnungsversuchs
- **Verzögerung** = Zeitpunkt der Abflussspitze – 1.050 Sekunden (Mittlerer Zeitpunkt der Zuflussspitze)

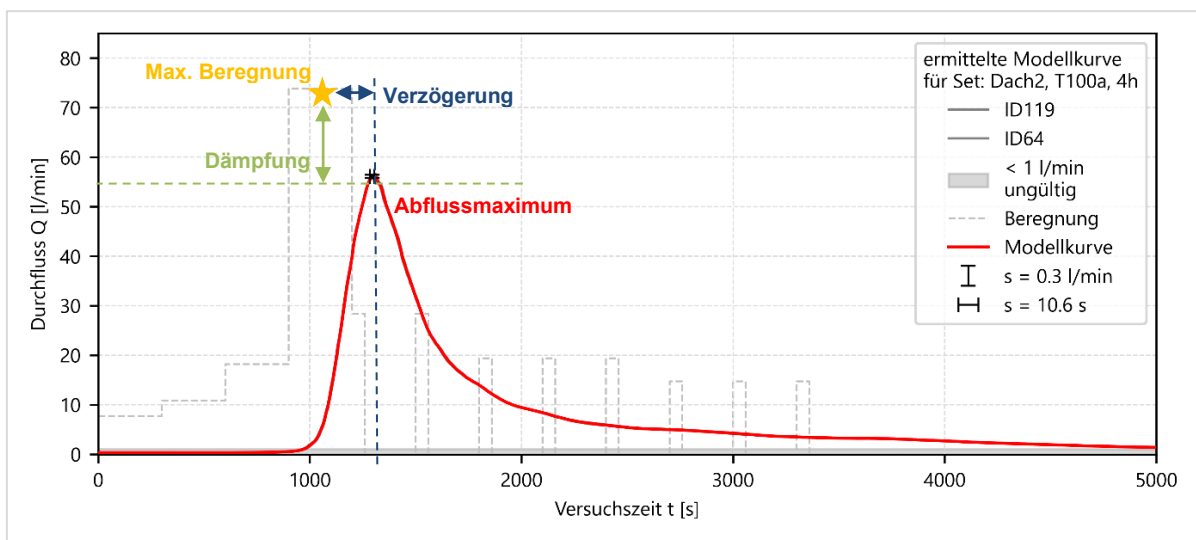


Abbildung 14: Definition von Dämpfung und Verzögerung des Abflussmaximum

Alle errechneten Ergebnisse der Dämpfung und Verzögerung sind im Anhang A - 10 tabellarisch dargestellt.

Die einfachste Betrachtung kann über die Auswahl des Daches erfolgen, welches je Jährlichkeits-Vorsättigungsszenario die größte Dämpfung und Verzögerung gebracht hat. In Tabelle 2 sind je Set die Dächer mit größter Verzögerung und Dämpfung dargestellt. Bis auf das Set „T1a_72h“ stimmt das Dach mit der größten Dämpfung auch mit dem Dach der größten Abflussverzögerung überein.

In den meisten Fällen hat Dach 5 die größten Effekte gebracht. Im Set „T5a_1h“ hat Dach 1 die größte Dämpfung und Verzögerung erzeugt. Neben Dach 1 taucht Dach 2 als Dach mit der größten Verzögerung im Set „T1a_72“ auf.

Tabelle 2: Beispiele für Dämpfung und Verzögerung verschiedener Szenarien

Szenario	Dach mit größte Dämpfung	Dach mit größter Verzögerung	größte Dämpfung [%]	größte Verzögerung [s]
T5a_4h	Dach5	Dach5	91,4	1255
T5a_1h	Dach5	Dach5	85,5	625
T5a_72h	Dach1	Dach1	98,4	2960
T1a_4h	Dach5	Dach5	90,5	1060
T1a_1h	Dach5	Dach5	90,1	950
T1a_72h	Dach1	Dach2	98,7	5150
T100a_4h	Dach5	Dach5	84,3	390
T100a_1h	Dach5	Dach5	80,0	360
T100a_72h	Dach5	Dach5	92,7	1215

Die Zusammenstellung in Tabelle 2 ist eine sehr vereinfachte Betrachtung der Untersuchungsergebnisse.

Um jedem durchgeführten Set Rechnung zu tragen und die Komplexität der Ergebnisse verständlich darzustellen, ist in Abbildung 15 je Dach jedes Jährlichkeits-Vorsättigungsszenario über verschiedene Signaturen abgebildet. Über die Verteilung der einzelnen Sets im Dämpfungs-Verzögerungs-Diagramm je Dach ist die Ableitung von verschiedenen Abflusstypen möglich.

Abflusstyp rot: Dach 7 (Normaldach) und Dach 6 (Kiesdach) zeigen eine ähnliche Verteilung der Sets innerhalb des Dämpfungs-Verzögerungs-Diagramms. Alle Sets liegen auf einer Linie nahe 0 Sekunden Abflussverzögerung und zwischen ca. 10 % und max. 50 % Dämpfung.

Abflusstyp gelb: Die Sets der Dächer 8, 9, und 10 (einfach extensive Gründächer, ungedroselt) befinden sich ebenfalls auf einer Linie nahe 0 Sekunden Abflussverzögerung. Die Dämpfung zwischen den einzelnen Sets variiert zwischen fast 0 % bis ca. 90 % Abflusssdämpfung. Dach 9 zeigt selbst für den 100-jährlichen Regen unter teilgesättigten und gesättigten Bedingungen eine Dämpfung von mind. 15 %. Die Sets der Dächer 8 und 10 reichen bis nahe 0 % Dämpfung. Aufgrund der weiteren Spreizung hinsichtlich der Dämpfung grenzen sie sich deutlich vom Abflusstyp rot ab.

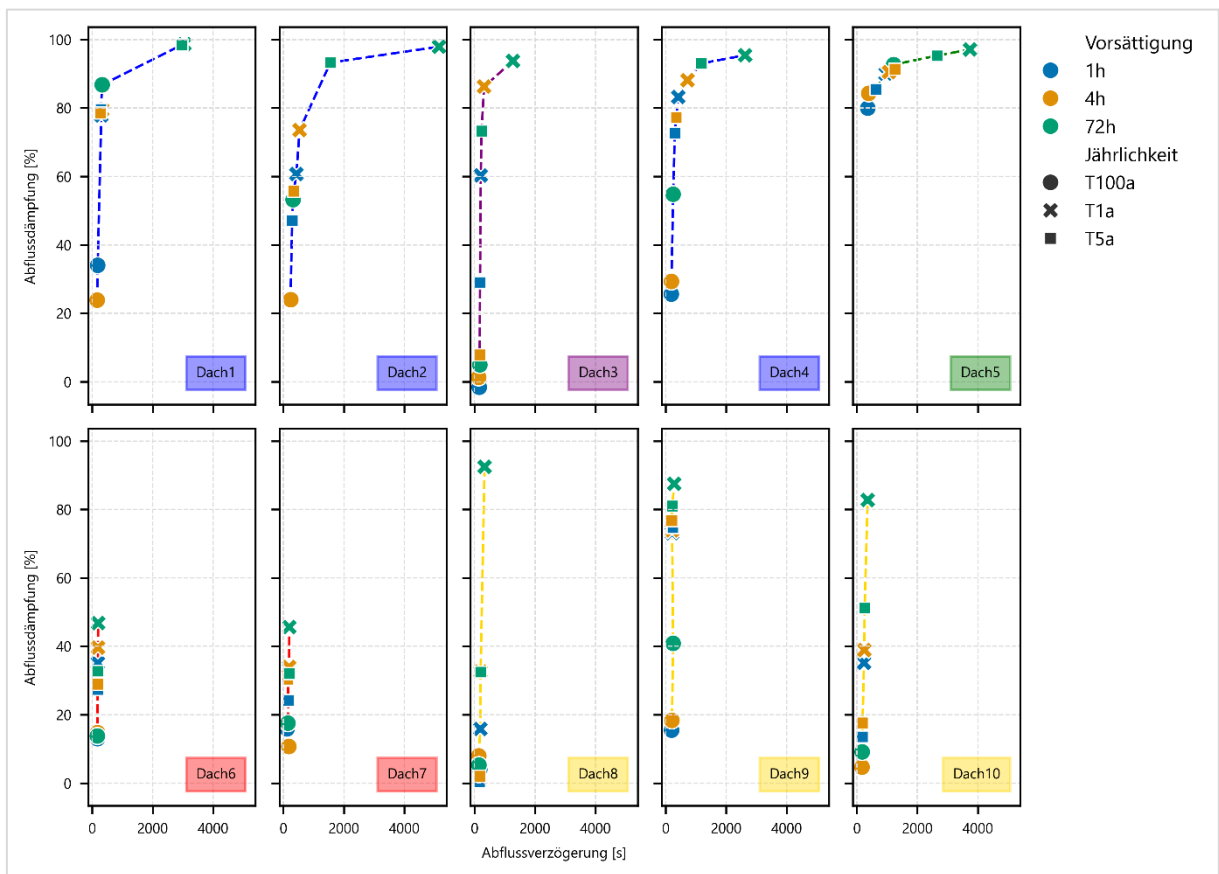


Abbildung 15: Darstellung der Abflusssdämpfung und Abflussverzögerung je Dach unter Berücksichtigung jedes Settings

Abflusstyp lila: Die Sets von Dach 3 (extensives Gründach, gedrosselt, hoher Dauerstau im Gründach) zeigen für die 1-jährlichen Regen eine leichte Abflussverzögerung und eine Dämpfung von bis zu 95 %. Die 100-jährlichen Regen werden kaum gedämpft oder verzögert.

Abflusstyp blau: Die Dächer 1 (extensives Gründach, gedrosselt, niedriger Dauerstau durch nicht ganz verschlossenen Abfluss), 2 (intensives Gründach, ungedrosselt) und 4 (extensives Gründach, ungedrosselt, fließwegverlängernde Drainage) bilden den Abflusstyp blau. Die niedrigste Dämpfung aller Sets liegt bei ca. 25 %. Es werden deutliche Verzögerungen erreicht, wesentlich größer als bei den Dächern des Abflusstyps lila.

Abflusstyp grün: Das Dach 5 (intensives Gründach, gedrosselt, geringer Dauerstau) zeigt für jedes Jährlichkeits-Vorsättigungsszenario eine Dämpfung von mindestens 80 %. Die verzögernden Effekte sind vergleichbar mit den Dächern des Abflusstyps blau.

Folgende Erkenntnisse zur Abflusswirkung von Gründächer im Rahmen der Kanalhydraulik können abgeleitet werden:

- Das Kiesdach zeigt keine besseren Abflusseigenschaften hinsichtlich der Dämpfung und Verzögerung als ein Normaldach.
- Jedes Gründach zeigt im Vergleich zu Normal- und Kiesdach ein deutliches Potential zur Abflusssdämpfung, selbst das Dach mit einer geringen Substratdicke von 6 cm (Dach 10).
- Gedrosselte Dächer zeigen je nach Höhe des Dauerstaus unterschiedliche hydraulische Eigenschaften. Bei einem hohen Dauerstau im Retentionsraum des Gründachs (Dach 3) fällt die Verzögerung geringer aus. Die Dämpfung verhält sich ähnlich, bis auf den Rückhalt bei einem 100-jährlichen Regenereignis.
- Gründächer mit fließwegverzögernder Drainage sowie ungedrosselte intensive Gründächer können hinsichtlich Dämpfung und Verzögerung mit einem gedrosselten Gründach mithalten.
- Ein gedrosseltes, intensives Gründach bietet in jedem Szenario eine hohe Dämpfung und deutliche Abflussverzögerung.

Ausführlichere Informationen zur Umsetzung einer Einleitbegrenzung in die öffentliche Kanalisation oder in ein Gewässer sind im Handlungsleitfaden für Kommunen, Gemeinden, Planungsbüros zur Nutzung von Gründächern dargestellt, siehe Kapitel 5.4.

4.1.2 Abgeflossenes Volumen

Zur Annäherung an eine Volumenbilanz wurde der Zeitpunkt bestimmt, wann 25 %, 50 % und 75 % des Berechnungsvolumens von den Dächern abgeflossen ist. Diese Prozentsätze entsprechen dem ersten, zweiten (Median) und dritten Quartil.

In Abbildung 16 sind die Durchgänge der vorgesehenen Quartile abgebildet. Die Datengrundlage befindet sich im Anhang A - 11.

Die Dächer 6 und 7 zeigen wie bei Dämpfung und Verzögerung ein ähnliches Verhalten. Die ersten 25 % des Abflusses kommen in fast allen Sets fast zeitgleich nach ca. 1.000 Sekunden. Die 50 % und 75 % Volumenmarken werden etwas gespreizter erreicht. Die ungesättigten Szenarien benötigen in der Regel am längsten bis zum Durchgangszeitpunkt.

Deutlich weiter sind bei allen Quartilen und Settings die Dächer 8, 9 und 10. Bei 25 % Durchgangsvolumen hebt sich der 1-jährliche Regen unter ungesättigten Bedingungen deutlich ab. Im 50 % und 75 %-Quartil wird die Abflussmenge teilweise nicht mehr vor 5.000 Sekunden erreicht. Daraus lässt sich schon für die einfach extensiven Dächer eine deutliche Volumenreduzierung ableiten.

Die Dächer 2, 3 und 4 zeigen eine ähnliche Volumenentwicklung. Alle Settings sind innerhalb der Quartile weit verteilt hinsichtlich des Durchgangszeitpunkt.

Bei Dach 1 erreicht kein Setting einen Volumendurchgang von 75 %.

Dach 5 weist den spätesten Durchgangszeitpunkt auf; hier erreicht jedoch ein Setting 75 % des abgeflommenen Volumens.

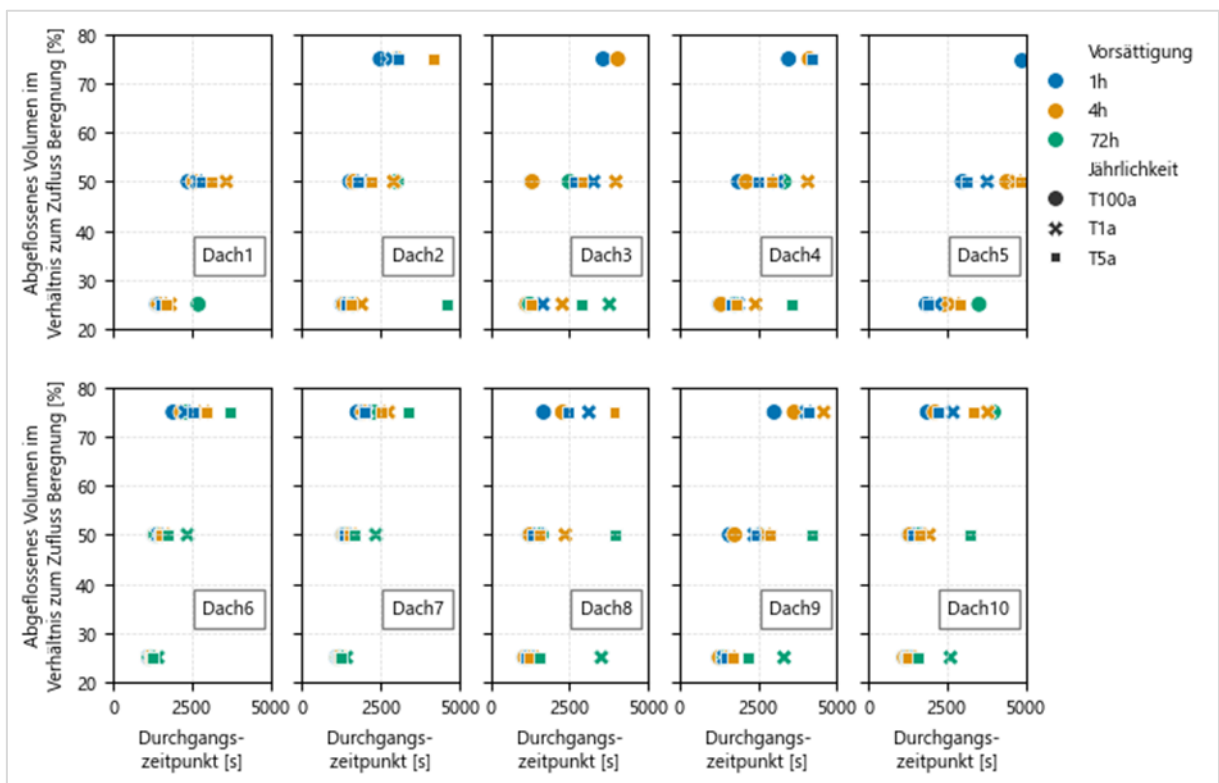


Abbildung 16: Abgeflommenes Volumen (Prozentstufen) im Verhältnis zum Zufluss der Beregnungsanlage (Betrachtungszeitraum: 0 bis 5.000 s; t = 0 s beschreibt den Startzeitpunkt des Beregnungsversuchs)

Einzelne Typen lassen sich analog zur Dämpfungs- und Verzögerungsbetrachtung wiedererkennen. Für die Dächer 1 bis 5 ergibt sich jedoch eine neue Einteilung.“

Jedes Gründach zeigt eine deutliche Volumenreduzierung. Der Großteil der einzelnen Sets fließt durchweg erst nach dem tatsächlichen Beregnungsversuch ab. Die deutlichste Volumenmengenreduzierung und damit auch der größte Rückhalt zeigen die Dächer 1 bis 5, wobei die Dächer 1 und 5 hier auch am deutlichsten hervorstechen.

4.2 Erstellung von Wasserbilanzen für die einzelnen Gründachtypen

Für die Modellierung der Gründächer wurde das Storm Water Management Model (SWMM) genutzt und mit einem am UFZ entwickelten Bewässerungsmodul gekoppelt. Ziel war es zum einen, die Gründächer für klassischen Starkregen zu parametrisieren und zu modellieren und im Folgenden dann langjährige Wasserbilanzen aufzustellen, um Verdunstung aber auch Bewässerung abzuschätzen. Exemplarisch wurde das für Dach 1 und Dach 2 durchgeführt.

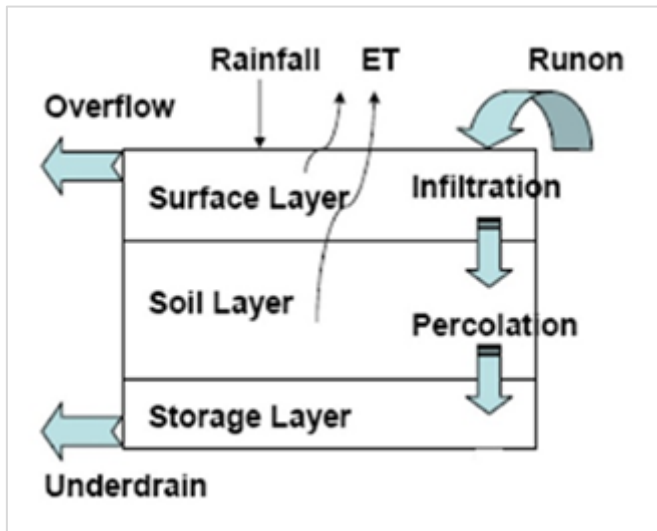


Abbildung 17: LID-Querschnitt in SWMM nach Rossman & Huber (2016)

4.2.1 Gründachmodellierung mit SWMM

In SWMM werden Gründächer und andere grüne Infrastrukturen als Low-Impact-Development (LID) modelliert (vgl. Abbildung 17), basierend auf den Niederschlägen, die in die Bodenschicht bzw. das Gründachsubstrat versickern [Ros16]. Die Rückhaltekapazität des Substrats wird durch seine Porosität, Feldkapazität und den Welkepunkt bestimmt, bevor es schließlich in die Speicher- oder Drainageschicht versickert [Jef22]. Der Abfluss aus der Drainageschicht wird unter Berücksichtigung der hydraulischen Breite des Unterbettes mit der Manning-Gleichung modelliert. Bei der Modellierung eines einzelnen Sturms wird die Verdunstung in der Regel übersehen, aber für eine kontinuierliche Analyse über mehrere Monate oder Jahre ist es entscheidend, die Feuchtigkeitsbedingungen vor jedem Ereignis zu berücksichtigen [Jef22]. Für die Analyse mehrjähriger Wasserbilanzen wurde daher die SWMM UrbanEVA Version [Hör20] genutzt.

Für die Modellierung der Bewässerung wurde ein Bewässerungsmodul entwickelt, dass sich mit SWMM UrbanEVA koppeln lässt. Das Bewässerungsmodul arbeitet auf der Grundlage eines definierten Schwellenwerts für den Bodenfeuchtegehalt. Es ermöglicht die Sammlung des

anfallenden Abflusses in einem virtuellen Speicher. Wenn der Bodenfeuchtegehalt unter den Schwellenwert fällt, wird die Bewässerung aktiviert, vgl. Abbildung 18.

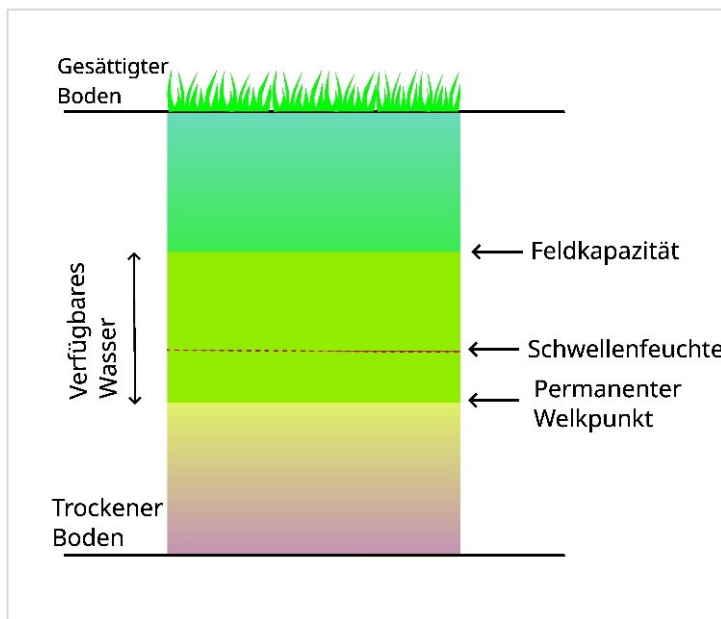


Abbildung 18: Exemplarische Bodensäule

Die Schwellenfeuchte ergibt sich aus dem permanenten Welkepunkt zzgl. des Verbrauchsfaktors multipliziert mit der verfügbaren Wasserkapazität. Die Bewässerungsmenge kann je nach Bedarf bis zur Feldkapazität des natürlichen Bodens oder Gründachsubstrats angepasst werden. Sie wird als Produkt aus dem Bewässerungskoeffizienten und der Feldkapazität abzüglich der Schwellenfeuchte berechnet.

4.2.2 Modellparameter

Die typischen Komponenten von Gründächern sind in Abbildung 19 dargestellt. Die Eigenschaften der Oberflächenschicht werden für alle Gründach-Szenarien als gleich angesehen. Die Eigenschaften des Bodens werden für beide Dächer als gleich angesehen. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Bodens wird mit 10⁻⁴ m/s (360 mm/h) angenommen, was für Gründachsubstrat typisch ist. Die Dicke der Boden- und Drainageschicht für beide Dächer ist unterschiedlich, wie in Tabelle 3 dargestellt.

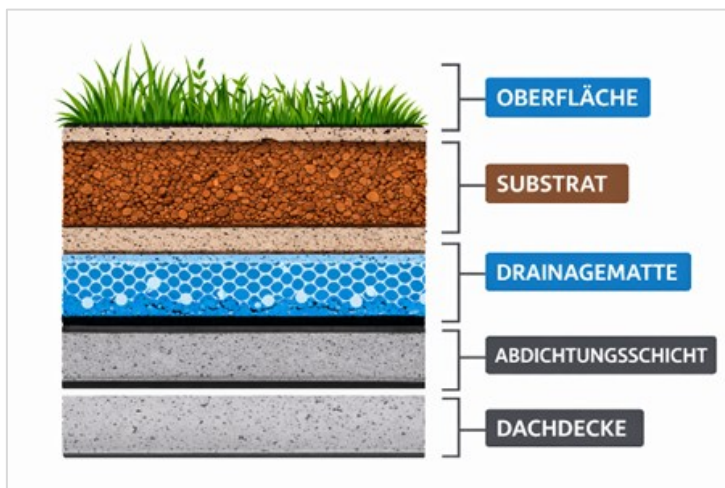


Abbildung 19: Exemplarischer Gründachaufbau

Tabelle 3: Verwendete Parameter für Gründachmodell in SWMM

Parameter	Dach 1	Dach 2
Oberflächenschicht		
Tiefe	1 mm	1 mm
Bodenschicht		
Tiefe	100 mm	200 mm
Porosität	0.40	0.40
Feldkapazität	0.20	0.20
Permanenter Welkpunkt	0.0.05	0.05
Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (Kf)	360 mm/hr	360 mm/hr
Dränmatte		
Tiefe	40 mm	60 mm
Vratio (Porenverhältnis)	0.5	0.5
Rauheit	0.10	0.10

4.2.3 Ergebnisse Starkregen

Das SWMM-Modell wurde für das Experiment von Dach 2 für eine Auslegungsdauer von 72 Stunden und eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren eingerichtet, um die experimentellen und modellierten Abflussergebnisse zu vergleichen. Abbildung 20 vergleicht den vom SWMM-Modell simulierten Abfluss mit dem experimentell gemessenen Abfluss.

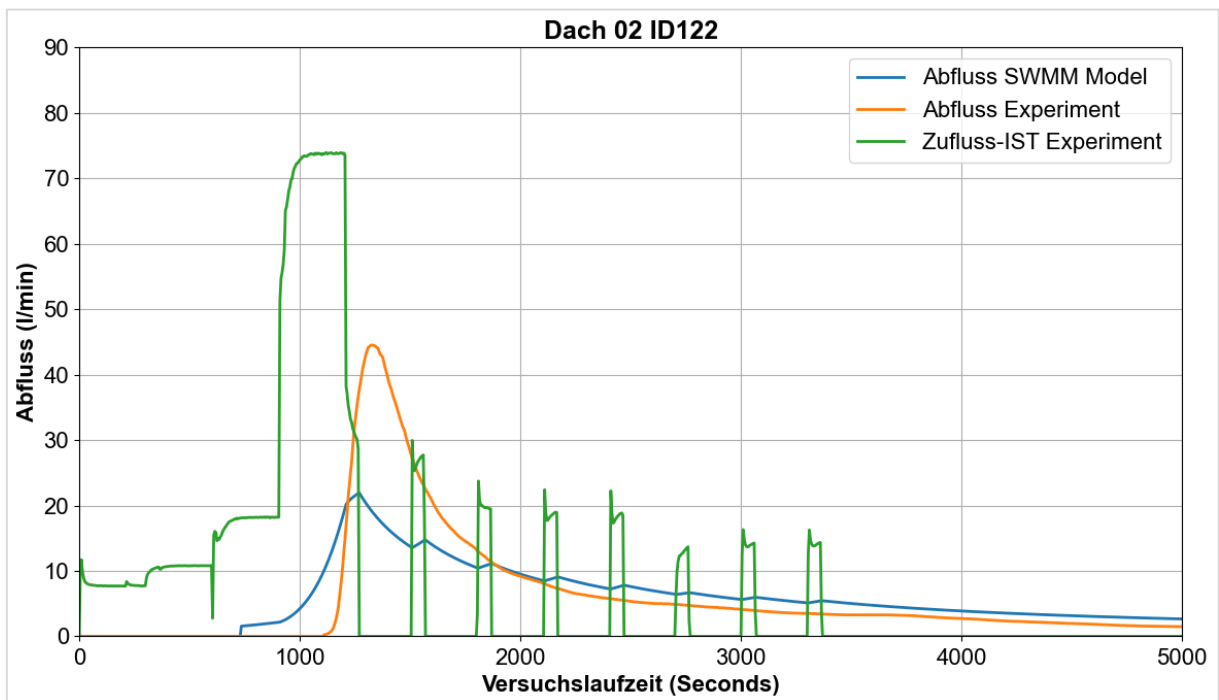


Abbildung 20: Abfluss für das Ereignis mit einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren und einer Dauer von 72 Stunden

Der experimentelle Abfluss zeigt eine verzögerte Reaktion, steigt schnell auf einen Spitzenabfluss von etwa 45 Litern/Minute an und nimmt dann im Laufe der Zeit allmählich ab. Das allgemeine Muster der Abflussreaktion wird in der SWMM-Modellsimulation nachgebildet, jedoch wird ein glatterer, niedrigerer Spitzenwert von etwa 22 Litern/Minute geschätzt. Das Modell unterschätzt den im Experiment beobachteten Spitzenabfluss, obwohl es den Zeitpunkt der Reaktion und das allgemeine Rücklaufmuster genau erfasst. Diese Diskrepanz lässt sich durch Vereinfachungen bei der Darstellung der physikalischen Prozesse innerhalb des Dachsystems sowie durch Unsicherheiten bei einer Reihe von Modellparametern, Boden- und Entwässerungseigenschaften und Infiltrationsparametern erklären.

4.2.4 Ergebnisse Langfristige Wasserbilanz

Nach dem Vergleich und der Beobachtung mit experimentellen Daten ergab das Gesamtmodell einen vergleichbaren Abflusstrend. Eine Langzeitsimulation wurde durchgeführt, um den Wasserhaushalt über einen längeren Zeitraum zu visualisieren. Für dieses Modell wird ein Zeitraum von 10 Jahren vom Beginn des Jahres 2015 bis zum Ende des Jahres 2024 berücksichtigt, vgl. Abbildung 21. Die Niederschlags- und Evapotranspirationsdaten für diese 10 Jahre stammen von der Wetterstation Nummer 02932 (Leipzig-Halle).

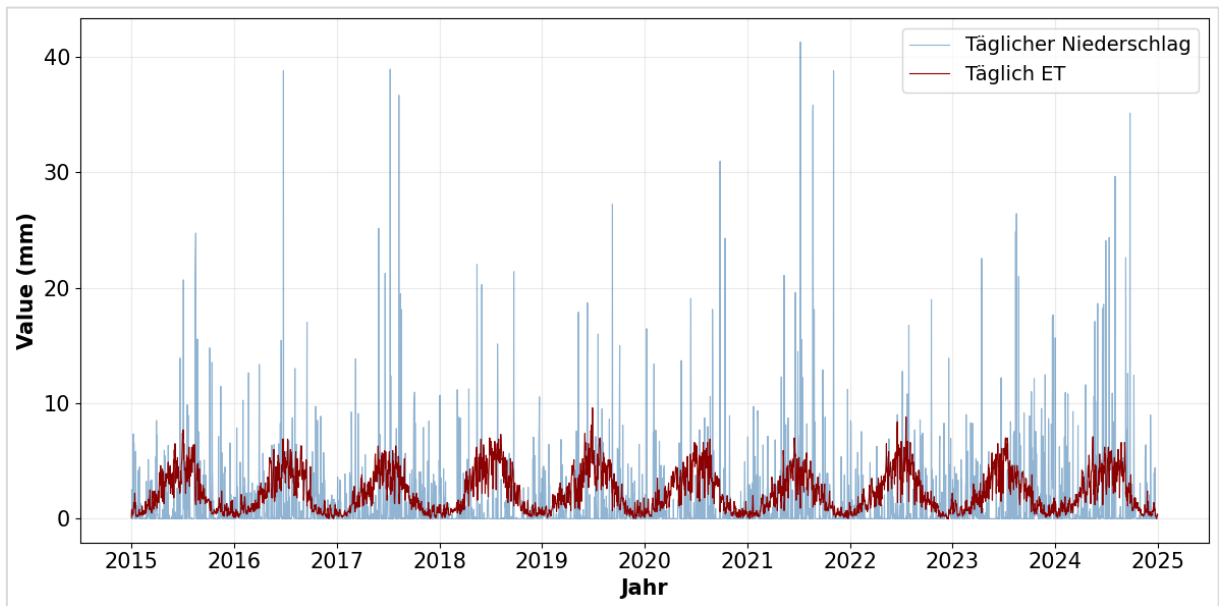


Abbildung 21: Zeitreihen von Niederschlag und Evapotranspiration im Modellzeitraum

Die Langzeitsimulation wurde für zwei Dächer über einen Zeitraum von 10 Jahren durchgeführt, um den Wasserhaushalt mit und ohne Bewässerung zu untersuchen. Die Gesamtniederschlagsmenge für beide Dächer ist mit 70 m^3 gleich, da beide Dächer die gleiche Fläche haben.

Bei Dach 1 (Abbildung 22) verlassen etwa 25 % der Niederschläge das System als Abfluss, während die restlichen 75 % durch Evapotranspiration verloren gehen. Der gesammelte Abfluss wird anschließend zur Bewässerung des Gründachs wiederverwendet, sobald die Bodenfeuchte unter den festgelegten Schwellenwert fällt. Um den Gesamtbewässerungsbedarf zu ermitteln, wird davon ausgegangen, dass ausreichend Wasser im Speicher verfügbar ist und zugeführt wird, wenn der allein vom Dach gesammelte Abfluss nicht ausreicht, um den Bewässerungsbedarf zu decken. In diesem Fall werden für Dach 1 etwa 18 m^3 zusätzliches Wasser aus dem Speicher benötigt, um den Bewässerungsbedarf des Daches über den 10-jährigen Simulationszeitraum zu decken.

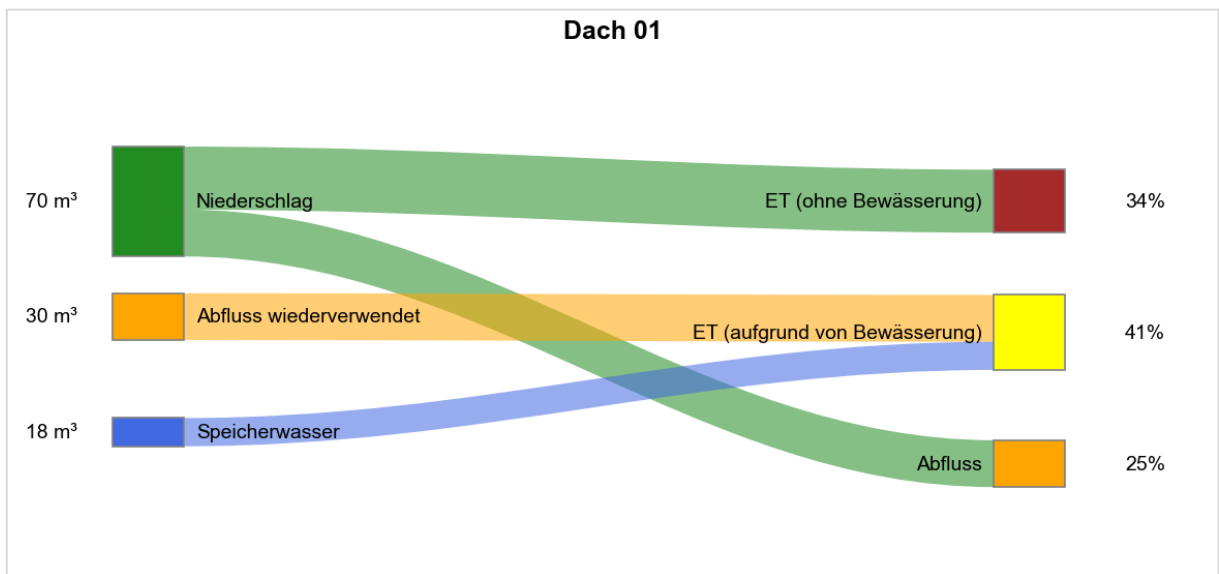


Abbildung 22: Wasserhaushalt für Dach 1 für 10-Jahres-Simulation

Bei Dach 2 (Abbildung 23) verlassen etwa 18 % der Niederschläge das System als Abfluss, während die restlichen 82 % durch Evapotranspiration verloren gehen. Im Fall von Dach 2 werden etwa 24 m³ zusätzliches Wasser aus dem Speicher benötigt, um den Bewässerungsbedarf des Daches über den 10-jährigen Simulationszeitraum zu decken. Insgesamt besteht die Evapotranspiration zu 41 % aus Niederschlag ohne Bewässerung und zu 39 % aus Bewässerung, was den bedeutenden Beitrag der Bewässerung zur gesamten Evapotranspiration des Systems unterstreicht.

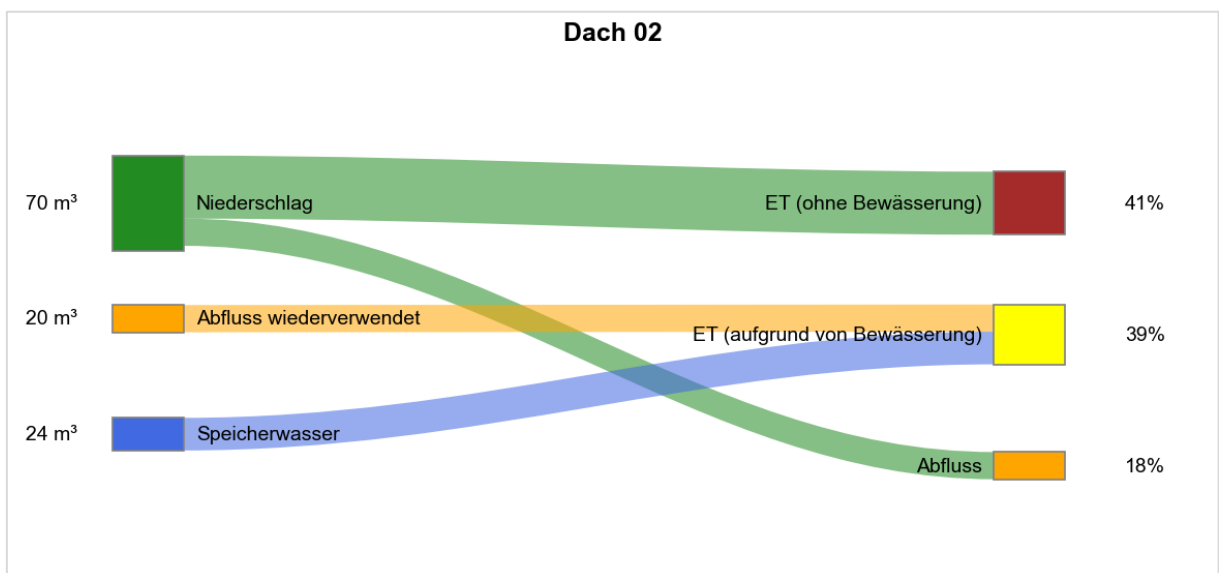


Abbildung 23: Wasserhaushalt für Dach 2 für 10-Jahres-Simulation

Dach 1 erzeugt mehr Abfluss als Dach 2, nämlich 25 % der Niederschlagsmenge, während Dach 2 nur 18 % erzeugt. Verantwortlich für diesen Unterschied ist die Substrattiefe der Gründachsysteme. Das tiefere Substrat von Dach 2 ermöglicht es, dass mehr Wasser in der Bodenschicht gespeichert wird und dann durch Evapotranspiration verloren geht, was die Menge des produzierten Abflusses verringert. Darüber hinaus wird mehr Wasser benötigt, um den Bewässerungsbedarf zu decken.

4.3 Analyse der Auswirkungen der Retentionsfähigkeit von Gründächern auf die Kanalhydraulik bei verschiedenen Niederschlagsereignissen

4.3.1 Zielstellung

Für die Modellsimulation von Entwässerungssystemen im Rahmen von Hydrodynamischen Kanalnetz- und Hydrologischen Schmutzfrachtberechnungen werden im Freistaat Sachsen und darüber hinaus überwiegend die Simulationsprogramme HYSTEM-EXTRAN und KOSIM verwendet. Auch die beteiligten Partner Stadtentwässerung Dresden und Kommunale Wasserwerke Leipzig nutzen diese Programmsysteme für die Niederschlag - Abfluss - Simulation ihrer Kanalnetze (N-A-Simulation). Für die Abbildung des N-Abfluss-Prozesses von Gründächern wurden bisher in den o.g. Programmen Standard Abflussbildungs- und Abflusskonzentrationsansätze verwendet, welche die Realität nur unzureichend wiedergeben.

Abbildung 24 zeigt die Abflussganglinien bei Zugrundelegung von Standardparametern unterschiedlicher Gründachaufbauten mit den gemessenen Abflussganglinien der Beregnungsversuche des ungesättigten 1-jährigen Modellregens an den Gründächern. Der „skalierte Abfluss“ liegt der modellbedingten Skalierung zugrunde und wird in Kapitel 4.3.2.2 erläutert.

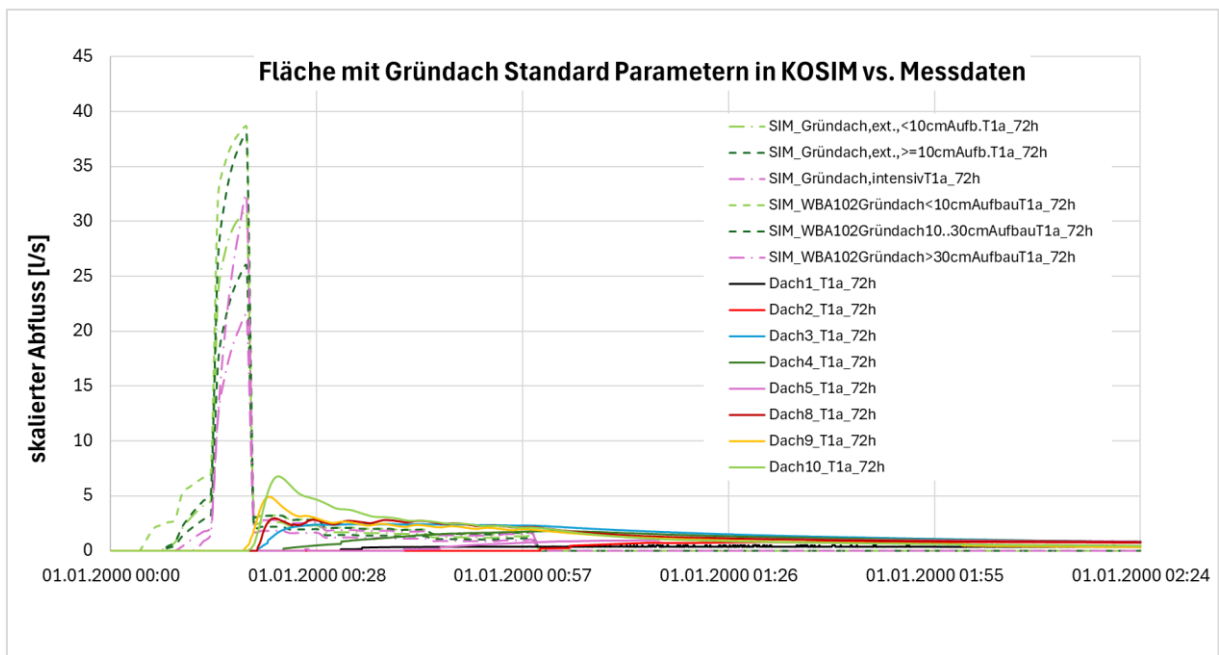


Abbildung 24: Simulierte Abflussganglinien mit Standardparametern (gestrichelte Linien) verglichen mit den skalierten, gemessenen Dachabflüssen (durchgezogene Linien)

Dabei zeigt sich, dass derzeit die Abflüsse von Gründächern bis zu 8-fach größer angesetzt werden, als sie tatsächlich bei den Berechnungsversuchen auftreten. Das unterstreicht die Notwendigkeit, neue Ansätze für die Modellbildung bei Simulationsmodellen zu definieren.

Ziel der Untersuchung war es daher, Ansätze für die Modellsimulation abzuleiten, welche das Abflussverhalten hinsichtlich der Abflussverzögerung und des Einflusses der Verdunstung bei den unterschiedlichen Gründächern im Projekt möglichst realitätsnah abbilden. Da für die anzustrebende Ähnlichkeit sowohl die Abflussspitzen (insbesondere Kanalhydraulik) als auch die Abflussverzögerung (insbesondere Entlastungsverhalten bei Schmutzfrachtberechnungen) maßgebend sind, soll die Anwendung sowohl für HYSTEM-EXTRAN (HE) als auch KOSIM einsetzbar sein.

4.3.2 Vorgehensweise

4.3.2.1 Bisheriger Stand der Technik

Gründächer sind Elemente blaugrüner Infrastrukturen, die Wasser speichern, verdunsten und verzögert ableiten können. Die Abbildung in den gängigen Niederschlags-Abfluss-Programmen, wie z.B. HE und KOSIM erfolgt nach aktuellem Stand als befestigte Fläche. Hierfür sind Abflussbildungsparameter für befestigte Flächen hinterlegt, welche aus den anerkannten Regelwerken abgeleitet wurden. Im Modell KOSIM beispielsweise sind sechs verschiedene

Abflussbildungsparametersätze hinterlegt, sodass extensive und intensive Dächer berücksichtigt werden können.

Die Abflussbildung wird standardmäßig bei befestigten Flächen über Benetzungs- und Muldenverluste sowie Anfangs- und Endabflussbeiwert berücksichtigt. Für die Abflusskonzentration, die zeitliche Verzögerung des abflusswirksamen Niederschlags als Abfluss, werden gegenwärtig in HE und KOSIM bei befestigten Flächendefinitionen (Straßen, Dächer, Gründach) einheitliche Parameter ermittelt. Der Assistent zur Abflusskonzentrationsbildung ermittelt somit für eine 100 m² große Straße dieselben Abflusskonzentrationsparameter wie für eine 100 m² große Gründachfläche.

4.3.2.2 Flächenskalierung

Die N-A-Programme geben den Abfluss in m³/s mit vier Nachkommastellen aus. Bei einer Dachfläche von 14,2 m² entstehen bei Modellregen bei T = 1a als Zufluss dadurch in neun von zwölf Regenintervallen ein Zufluss von 0,0000 m³/s. Deshalb wurde eine Skalierung der Fläche um Faktor 100 für eine Modellsimulation vorgenommen.

Für eine hochaufgelöste Ermittlung der Abflussdaten wird somit die 100-fache Gründachfläche berücksichtigt, d.h. es wird im Simulationsmodell ein Element mit der Flächengröße 0,1420 ha angelegt. Die Abflussdaten des Elements entsprechen damit auch den 100-fachen Abflussdaten. Die Messdaten werden zum Vergleich ebenfalls um Faktor 100 skaliert.

4.3.2.3 Berücksichtigung der Feldkapazität

Die nutzbare Feldkapazität eines Bodens gibt das Wasserspeichervermögen zwischen der vollständigen Wassersättigung und dem permanenten Welkepunkt an. Der permanente Welkepunkt ist dabei die „Restwassermenge“ im Boden, die entgegen der Schwerkraft im Boden verbleibt, gleichzeitig aber auch nicht mehr pflanzenverfügbar ist. Die maximal nutzbare Feldkapazität bzw. das maximale Speichervermögen im Boden wird etwa nach mindestens 72 Stunden (h) seit dem letzten Regenereignis erreicht. Um bei den Beregnungsversuchen die unterschiedliche Wirkung der nutzbaren Feldkapazität zu berücksichtigen, wurde eine Trockenzeit zwischen Vorsättigung und Beregnungsversuch von 1h, 4h und 72h eingehalten. Das Speichervermögen und das gedrosselte Entleerungsverhalten des Gründaches wurden daher modelltechnisch als Einzelspeicher berücksichtigt. Praktisch wurde dieser umgesetzt als Speicherelement mit gedrosselter Ableitung.

Da einige Gründachaufbauten über zusätzliche Dränelementespeicher verfügen, können diese ebenfalls mit adäquaten Rückhaltespeichervolumen berücksichtigt werden.

Für die Definition der gedrosselten Ableitung aus dem Rückhaltespeicher wurde eine Kennlinie für jede Gründachvariante aus den Messungen entwickelt. Diese entstand aus der Kalibrierung bei unterschiedlichen Modellregen ($T = 1a, 5a, 100a$) sowie den o.g. Trockenzeiten zwischen den Regenereignissen zur Berücksichtigung der variierenden Feldkapazität (Entleerungszeit). Somit bildeten immer 9 unterschiedliche Versuchsergebnisse die Grundlage für die Kalibrierung der Abflusskennlinie eines Gründachtyps.

Für die Berücksichtigung der Vorsättigung wurde der Beckenparameter „Stauziel über Sohle“ gewählt, sodass zu Beginn der Simulation der Beckenspeicher mehr oder weniger teilgefüllt simuliert werden kann.

4.3.2.4 Berücksichtigung der Verdunstung

Gründächer werden bei den bisher gesetzten Standardparameter als befestigte Flächen mit entsprechenden Benetzungs- und Muldenverlusten abgebildet. Die Verdunstung wird in den genannten Simulationsmodellen auch für befestigte Flächen berücksichtigt, indem die Anfangsverluste in Abhängigkeit von der jährlichen potenziellen Verdunstungshöhe sowie vom Jahres- und Tagesgang der Verdunstung angesetzt werden. Die Berücksichtigung der Verdunstung ist primär bei Langzeitkontinuumssimulationen (meist mit KOSIM) relevant, da für eine Einzelereignissimulation (i.d.R. mit HE) die Verdunstung auf Grund der geringen Simulationszeit nicht ins Gewicht fällt. Bei der Verdunstung unterscheidet KOSIM nicht zwischen Transpiration und Evaporation. Die Abbildung der Verdunstung im Ersatzsystem entspricht daher durch die Abbildung als offenes Becken mit einer Grundfläche, die der Gründachfläche entspricht, annähernd der Abbildung mit dem Ansatz in HE und KOSIM.

Abbildung 25 zeigt die simulierten Ergebnisse, die der Standardparameteransatz bei der Abflussbildung berechnet, im Vergleich mit den Ergebnissen für die Ersatzmodelle. Dargestellt ist der Verdunstungsanteil in % der Wasserbilanz von 100 %. Im Ergebnis liegen die Verdunstungsanteile der Ersatzmodelle zwischen dem Standardparameter „WBA102 10...30 cm“ und dem Standardparameter „GD ext. ≥ 10 cm“. Die Verdunstungsanteile unter den sechs Standardparametern variieren zudem stärker als die Anteile der acht Ersatzmodelle. Dennoch liegen alle Verdunstungsanteile der Standardparameter-Gruppe „Gründach“ (GD) höher als die Verdunstungsanteile der Standardparameter-Gruppe „Wasserbilanz“ (WB). Da zum aktuellen Zeitpunkt mit den vorliegenden Langzeit - Messdaten keine belastbaren Wasserbilanzen ermittelt werden können, bleibt der Abgleich mit den Messdaten hier aus.

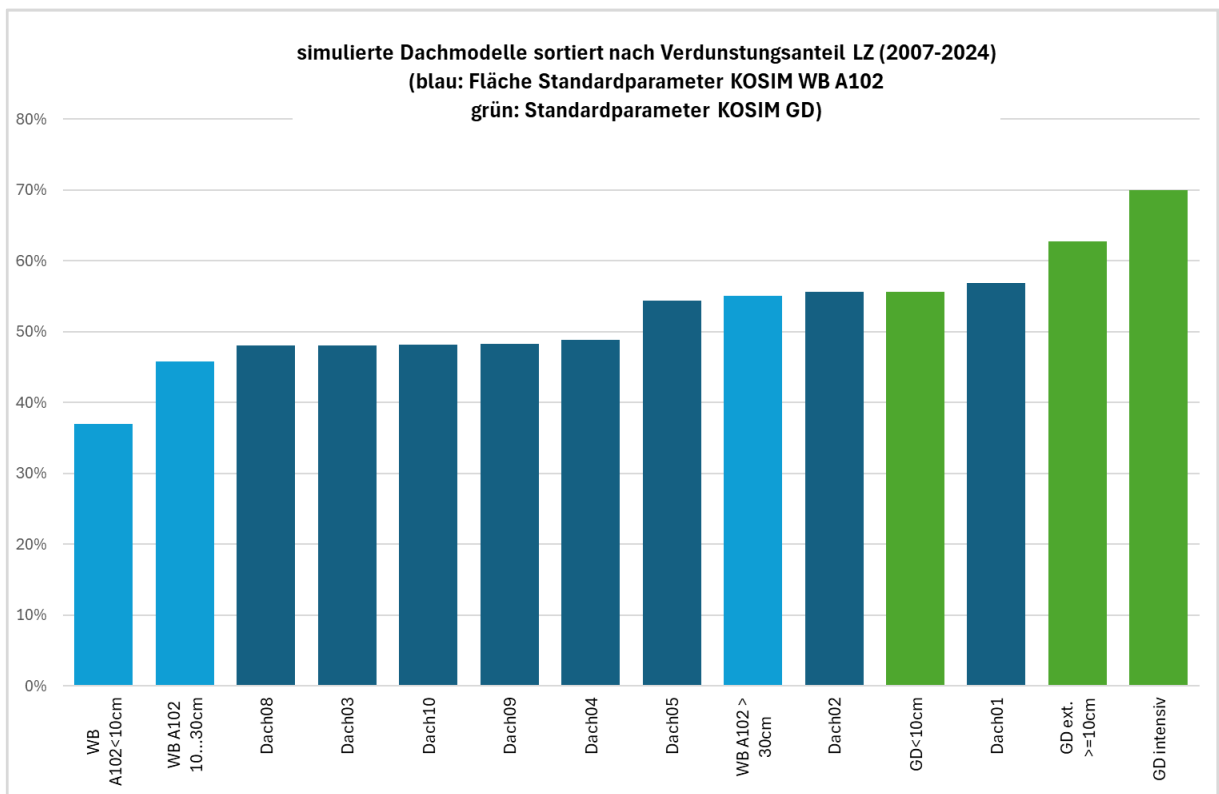


Abbildung 25: Wasserbilanzen der Gründach-Standardflächen (hellblau und grün) im Vergleich mit den Ersatzmodellen (dunkelblau), Ergebnisse einer 18-jährigen Langzeitsimulation (2007-2024) in KOSIM

4.3.2.5 Transformation des Gründaches als Modellelement

Abbildung 26 zeigt das Grundprinzip des Modellelementes eines Gründaches für KOSIM oder HE für die Nutzung eines kontinuierlichen Simulationsansatzes. Das Ersatzmodell wird schließlich in den Systemelementen von KOSIM und HE wie in Abbildung 27 umgesetzt.

Die Grundfläche des Speichers entspricht dabei der Grundfläche des zu untersuchenden Gründaches. Das Speichervermögen des Gründaches, bestehend aus Dränelement, nutzbarer Feldkapazität des Substrats und ggf. auch zusätzlicher Aufstaumöglichkeit, wird über das nutzbare Volumen des Speichers abgebildet. Die Wirkung der Abflussverzögerung und damit die Form der Abflussganglinie, wird schließlich durch die kalibrierte Drosselkennlinie wiedergegeben. Sollte das Speichervermögen vollständig erschöpft sein, erfolgt zusätzlich die unge-drosselte Ableitung über den Wehrüberlauf.

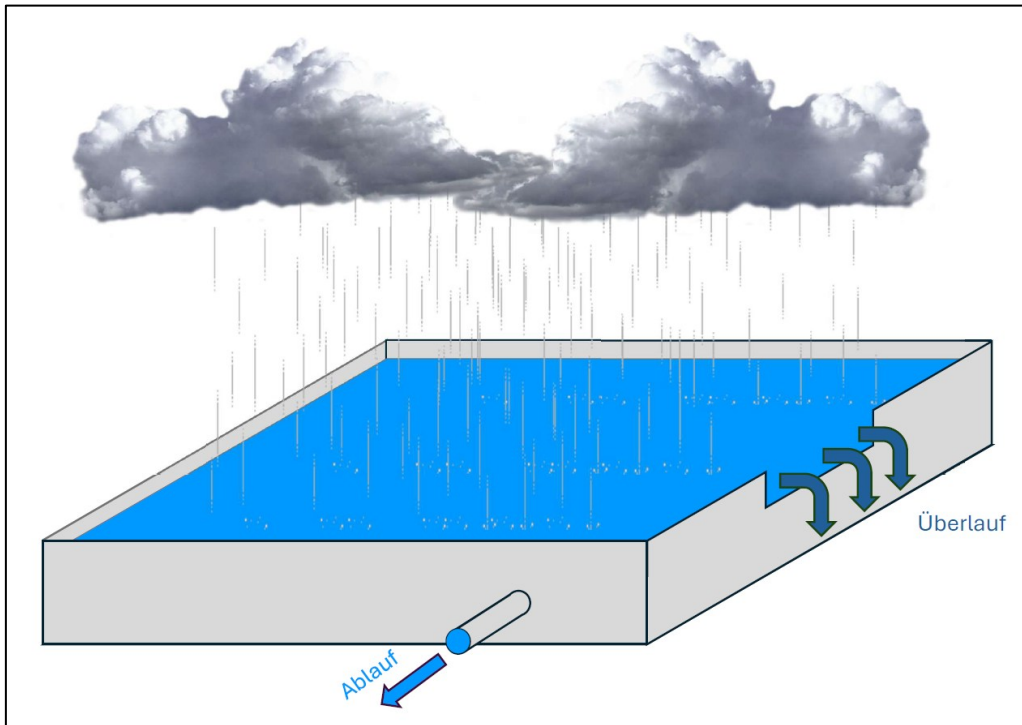


Abbildung 26: Ersatzmodell eines Gründachs für die Simulation

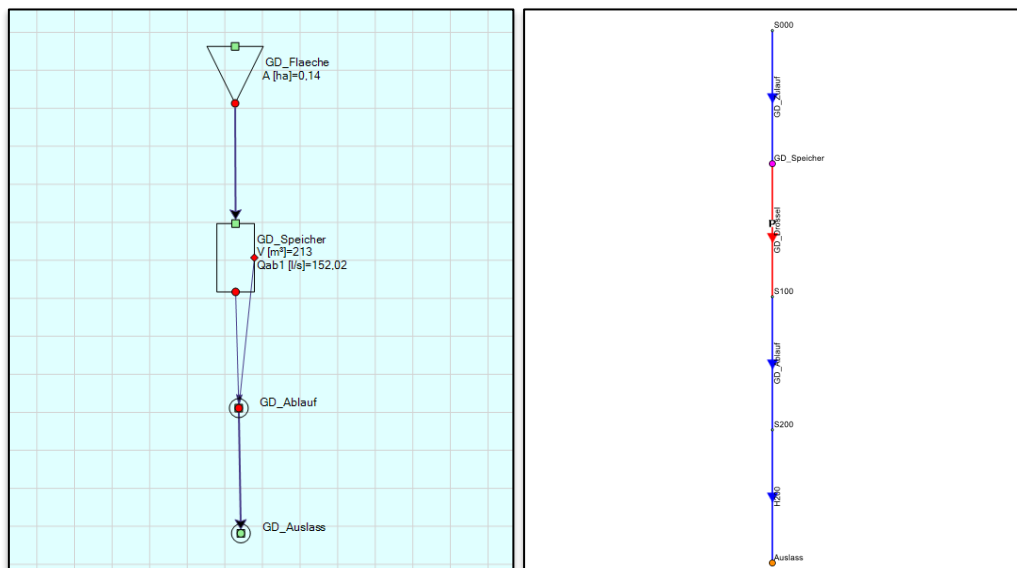


Abbildung 27: Aufbau der Systemelemente zur Abbildung von Gründächern in KOSIM (links) und HYSTEN-EXTRAN (rechts)

Eine Transportstrecke mit Translation ermöglicht zudem die Verzögerung des auf der Fläche anfallenden Abflusses durch Berücksichtigung einer Fließzeit. Die kalibrierten Fließzeiten betragen zwei oder drei Minuten, sodass das Modell auch vereinfacht werden kann, indem die Fläche und das Transportelement entfallen.

Die Berechnung kann dann gleichmäßig erfolgen. Bei Berücksichtigung der Fließzeit über die extra Fläche und das Transportelement muss dem ersten im Modell angelegten Regenschreiber ein Nullregen zugeordnet werden, welcher dann automatisch den Speicher (nicht) berechnet. So wird ein doppeltes Berechnen von Fläche und Speicher verhindert.

Eine Ausnahme hierzu bildet das intensive Dach 5, in dem eine zusätzliche Abflussverzögerung mittels hoher Speicherkonstante sowie variabler Speicherkonstante je Regenintensität verwendet wurde. Hier ist die Verwendung der Fläche nach aktuellem Kenntnisstand unerlässlich.

4.3.3 Ergebnisse für die Gründachaufbauten

4.3.3.1 Vorgehensweise bei Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse und Qualitätsbewertung

Die Drosselkennlinie wurde in Anlehnung an die Wasserstands-Durchfluss-Beziehung der Dächer aus den Messdaten ermittelt. Um den Wasserstand fiktiv zu ermitteln, wurde die Differenz aus Zulaufvolumen und Abflussvolumen der Zeitschritte gebildet und anschließend durch die Fläche geteilt.

Die Bewertung der Qualität der Kalibrierung erfolgte in der groben Kalibrierung vor allem optisch durch die Bearbeiterin. Für die Feinkalibrierung wurden die drei Gütekriterien nach DWA-M 165-1 [DWA21] herangezogen: So wurden eine gute bis sehr gute Volumenabweichung $VOL < 10 \%$, eine Maximalwertabweichung $DYMAX < 15 \%$ und ein Effizienzkoeffizient $E_2 > 0,7$ (Optimum = 1,0) angestrebt. Für eine Vielzahl von Dächern konnte die Güte noch über diese Grenzwerte hinaus deutlich verbessert werden. In Abbildung 28 sind die Grenzwerte der Gütekriterien dargestellt.

Prüfgröße	Einheit	Bewertung		
		gut	mittel	unbefriedigend
<i>VOL</i>	%	< 10	10 – 20	> 20
<i>DYMAX</i>	%	< 15	15 – 25	> 25
<i>E₂</i>	–	> 0,7	0,4 – 0,7	< 0,4

Abbildung 28: Gütekriterien zur Beurteilung der Kalibrierung nach DWA-M 165-1

Nachfolgende Tabelle 4 zeigt die unveränderten Parameter der Gründachmodell-Elemente. Die dachspezifischen Parameter werden in der Auswertung der einzelnen Dächer genannt. Die Zahlenwerte der Drosselkennlinien liegen als Tabelle im Anhang A - 12 vor.

Tabelle 4: Unveränderte Parameter des Ersatzmodells; die blau gekennzeichneten Parameter wurden ausschließlich bei Dach 5 variiert (intensives Dach)

Element	Parameter	Eingabewert	Einheit	Bemerkung
Fläche	Flächenart	befestigt	-	
	Fläche	0,142	ha	exakte Gründachfläche
	Abflusskonzentration	Speicherkonstante	-	
	Anzahl Speicher	1	-	
	Speicherkonstante	0,01	min	
	Speicherkonstante konstant	Ja		-
	Benetzungsverlust	0	mm	
	Muldenverlust	0	mm	
	Anfangsabflussbeiwert	1	-	
	Endabflussbeiwert	1	-	
Speicher	Länge x Breite	1.420	m ²	exakte Gründachfläche
	Böschungsneigung	0	[1:]	Vorgabe für Beckenvolumen
	Offenes Becken	Ja	-	Vorgabe für Verdunstung
	Tiefe	0,15	m	angenommene Höhe Dachüberstand
	Länge Überlauf Schwelle	2	m	Standardwert (nicht validiert)
	Überfallbeiwert	0,65	-	Standardwert (nicht validiert)
	kf-Wert Sohle und Böschung	0	m/s	Vorgabe für Speicherung
	Typ Drosselabfluss	entfällt durch Drossel-KL	-	
	Rohrsohle über Beckensohle	entfällt durch Drossel-KL	m	
	Drosselleistung	entfällt durch Drossel-KL	l/s	

4.3.3.2 Kalibrierergebnisse und qualitative Bewertung der Gründächer

Die Kalibrierergebnisse der zehn untersuchten Gründachaufbauten zeigten unterschiedliche Modellgüten bei der Abbildung des Abflussverhaltens. Die Bewertung erfolgte anhand der Gütekriterien Volumenabweichung (VOL), Maximalwertabweichung (DYMAX) und Effizienzkoeffizient (E^2) für neun Szenarien (drei Regenereignisse und drei Vorsättigungszustände). Die ausführlichen Ergebnisse sind im Anhangsverzeichnis ab Anhang A - 13 zusammengefasst.

Nachfolgend eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse:

Dach 1: Das Modell konnte das Abflussverhalten dieses Daches nur eingeschränkt reproduzieren. Die Ergebnisse zeigen überwiegend unbefriedigende Maximalwertabweichungen und teilweise deutliche Unterschätzungen der Abflussvolumina, insbesondere beim einjährigen Regen. Der Effizienzkoeffizient liegt teilweise im mittleren Bereich, erreicht aber nicht durchgehend gute Werte (Tabelle 5). Insgesamt konnte keine Parameterkombination gefunden werden, die alle Szenarien zuverlässig abbildet, weshalb die Modellgüte als unzureichend bewertet wird, vgl. Anhang A - 13.

Tabelle 5: Bewertung der finalen Kalibrierung von Dach 1 für die neun Szenarien

Ganglinie	VOL	DYMAX	E ₂
T1_72h	-21%	-37%	0,71
T1_4h	-38%	-73%	0,07
T1_1h	-23%	-48%	0,47
T5_72h	0%	25%	0,72
T5_4h	-15%	-37%	0,68
T5_1h	-7%	22%	0,72
T100_72h	4%	-3%	0,99
T100_4h	2%	-53%	0,55
T100_1h	2%	-35%	0,68

Dach 2: Dach 2 zeigt mit Ausnahme des E₂ für den ungesättigten Zustands des einjährigen und fünf-jährigen Regens gute und sehr gute Ergebnisse der Kalibrierung. Die ungenügenden Ergebnisse für diese Ereignisse liegen darin begründet, dass hier selbst das Ersatzmodell die Verzögerung nicht ausreichend abbilden kann. Die Zeitpunkte von Abflussbeginn und Abflussmaximum werden überschätzt, das heißt der Abfluss wird zu früh simuliert. Die Verzögerung bei geringen Wasserständen abzubilden, scheint weiterhin eine Schwachstelle des Modells zu sein. Diese Abweichung stellt jedoch eine hinnehmbare Überschätzung dar., vgl. Tabelle 6 und Anhang A - 14.

Tabelle 6: Bewertung der finalen Kalibrierung von Dach 2 für die neun Szenarien

Ganglinie	VOL	DYMAX	E ₂
T1_72h	-9%	-11%	0,08
T1_4h	1%	3%	0,71
T1_1h	-4%	-1%	0,89
T5_72h	7%	-9%	0,35
T5_4h	3%	7%	0,90
T5_1h	5%	3%	0,98
T100_72h	-2%	-8%	0,95
T100_4h	3%	-12%	0,97
T100_1h	3%	-8%	0,98

Dach 3: Für dieses Dach erreicht das Modell durchgehend gute bis sehr gute Ergebnisse. Nur in einem Szenario (teilgesättigter Zustand beim fünfjährigen Regen) treten höhere Maximalwertabweichungen auf, vgl. Tabelle 7). Insgesamt stimmen simulierte und gemessene

Abflussganglinien sehr gut überein, weshalb das Ersatzmodell dieses Dach sehr zuverlässig darstellen kann (Anhang A - 15).

Tabelle 7: Bewertung der finalen Kalibrierung von Dach 3 für die neun Szenarien

Ganglinie	VOL	DYMAX	E ₂
T1_72h	2%	-15%	0,86
T1_4h	-6%	11%	0,91
T1_1h	-1%	6%	0,86
T5_72h	5%	5%	0,90
T5_4h	2%	-22%	0,79
T5_1h	7%	15%	0,87
T100_72h	7%	-8%	0,92
T100_4h	3%	-5%	0,89
T100_1h	3%	-7%	0,91

Dach 4: Auch bei Dach 4 zeigt die Kalibrierung überwiegend gute bis sehr gute Modellgüte. Lediglich beim ungesättigten einjährigen Regen treten mittlere Abweichungen auf. Die Effizienzkoeffizienten liegen meist im hohen Bereich von $\geq 0,88$, was darauf hinweist, dass das Modell die Dynamik der Abflussganglinie gut reproduzieren kann, vgl. Tabelle 8 und Anhang A - 16.

Tabelle 8: Bewertung der finalen Kalibrierung von Dach 4 für die neun Szenarien

Ganglinie	VOL	DYMAX	E ₂
T1_72h	-10%	-15%	0,50
T1_4h	6%	9%	0,88
T1_1h	11%	13%	0,89
T5_72h	2%	-1%	0,91
T5_4h	1%	-12%	0,96
T5_1h	4%	-8%	0,98
T100_72h	0%	-16%	0,97
T100_4h	3%	-7%	0,98
T100_1h	2%	-3%	0,98

Dach 5: Dieses Dach weist aufgrund der größeren Substratdicke ein komplexeres Abflussverhalten auf. Daher mussten zusätzliche Modellparameter berücksichtigt werden (z. B. mehrere Speicher und variable Speicherkonstanten), vgl. Anhang A - 17.

Dach 5 zeigt überwiegend gute Kalibrierungsergebnisse. Allerdings treten in drei Szenarien unbefriedigende Volumenabweichungen, in vier Szenarien mittlere Abweichungen sowie in zwei Szenarien sowohl mittlere als auch unbefriedigende Abweichungen auf und es ist das einzige intensive Dach unter den untersuchten Gründächern. Es wird vermutet, dass das Ersatzmodell hier an seine Grenzen stößt, da die hohe Substratdicke ein stärker nichtlineares Abflussverhalten bewirkt., vgl. Tabelle 9.

Tabelle 9: Bewertung der finalen Kalibrierung von Dach 5 für die neun Szenarien

Ganglinie	VOL	DYMAX	E ₂
T1_72h	-30%	-1%	0,16
T1_4h	-5%	-24%	0,77
T1_1h	25%	22%	0,50
T5_72h	9%	-19%	0,83
T5_4h	-4%	7%	0,94
T5_1h	7%	1%	0,87
T100_72h	21%	20%	0,89
T100_4h	5%	-4%	0,83
T100_1h	9%	-5%	0,89

Dach 8: Die Kalibrierung (Tabelle 10) zeigt sehr gute Ergebnisse in fast allen Szenarien. Nur vereinzelt treten mittlere Volumenabweichungen auf. Besonders der hohe Effizienzkoeffizient (meist $\geq 0,94$) zeigt, dass das Modell die gemessenen Abflussverläufe sehr gut nachbildet, vgl. Anhang A - 18.

Tabelle 10: Bewertung der finalen Kalibrierung von Dach 8 für die neun Szenarien

Ganglinie	VOL	DYMAX	E ₂
T1_72h	1%	-14%	0,82
T1_4h	15%	15%	0,94
T1_1h	10%	2%	0,98
T5_72h	6%	-10%	0,98
T5_4h	17%	-5%	0,94
T5_1h	0%	-7%	0,96
T100_72h	5%	-1%	0,97
T100_4h	7%	5%	0,97
T100_1h	-2%	1%	0,98

Dach 9: Auch dieses Dach wird durch das Modell überwiegend gut bis sehr gut abgebildet. Es zeigt mit Ausnahme einiger unbefriedigender Maximalwertabweichungen gute und sehr gute Ergebnisse der Kalibrierung. Die Unterschätzung des einjährigen Abflussmaximums im ungesättigten Szenario um -34% stellt die größte Schwachstelle dieses Modells dar. Der Effizienzkoeffizient von $\geq 0,86$ zeigt allerdings, dass das Ersatzmodell dieses Dach gut abgebildet werden kann, vgl. Tabelle 11 und Anhang A - 19.

Tabelle 11: Bewertung der finalen Kalibrierung von Dach 9 für die neun Szenarien

Ganglinie	VOL	DYMAX	E ₂
T1_72h	9%	-34%	0,91
T1_4h	-4%	-6%	0,95
T1_1h	3%	4%	0,90
T5_72h	1%	-4%	0,96
T5_4h	9%	28%	0,86
T5_1h	5%	27%	0,89
T100_72h	5%	5%	0,95
T100_4h	4%	-5%	0,97
T100_1h	-2%	-5%	0,97

Dach 10: Dach 10 kann in allen neun Belastungsszenarien gute bis sehr gute Kalibrierergebnisse erreichen, was sowohl die Abflussganglinien (vgl. Anhang A - 20) als auch die ermittelten Gütekriterien in Tabelle 12 zeigen. Besonders der Effizienzkoeffizienten E₂, welcher stets über 0,90 liegt, ist hier hervorzuheben und zeigt eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung.

Tabelle 12: Bewertung der finalen Kalibrierung von Dach 10 für die neun Szenarien

Ganglinie	VOL	DYMAX	E ₂
T1_72h	-4%	1%	0,91
T1_4h	-1%	-4%	0,95
T1_1h	-1%	-2%	0,96
T5_72h	3%	-1%	0,93
T5_4h	5%	-13%	0,97
T5_1h	1%	-14%	0,97
T100_72h	1%	-8%	0,99
T100_4h	1%	-7%	0,98
T100_1h	-1%	-7%	0,98

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass das entwickelte Ersatzmodell das Abflussverhalten der meisten extensiven Gründächer gut bis sehr gut beschreibt. Besonders zuverlässig funktioniert das Modell für die Dächer 3, 4, 8, 9 und 10. Schwächen treten hauptsächlich bei sehr kleinen Regenereignissen oder bei komplexeren Dachsystemen auf. Intensive Gründächer wie Dach 5 zeigen ein komplexeres hydrologisches Verhalten, wodurch die Modellabbildung schwieriger wird. Insgesamt bestätigt die Kalibrierung jedoch die Eignung des Modellansatzes zur realistischen Simulation von Gründachabflüssen. Für die Dächer 6 und 7 liegen in diesem Abschnitt keine Auswertungsergebnisse vor, da sie nicht Teil der Modellanalyse waren.

4.3.4 Zusammenfassende Bewertung der Retentionsfähigkeit und Wirkung auf die Kanalhydraulik von Gründächern am Beispiel der Umsetzung für die Simulationsmodelle KOSIM und HE

Es kann festgestellt werden, dass bisher die Wirkung von Gründächern, insbesondere hinsichtlich des Spitzenabflusses mit den Modellansätzen von befestigten Flächen in KOSIM und HE zum Teil deutlich überschätzt wurde.

Mit dem vorgeschlagenen Modellansatz unter Zugrundelegung eines offenen Regenrückhaltebeckens mit gedrosselter Ableitung und Überlauf wird sowohl die Abflussdämpfung als auch der verzögerte Gründachabfluss bei den meisten Gründachaufbauten bei den Modellregen $T = 1a, 5a$ und $100a$ und unterschiedlichen Trockenzeiten vor dem Regenereignissen, d.h. unterschiedlich gefüllten Speicher, gut abgebildet.

Im Gegensatz zum Programm KOSIM, indem die Vorsättigung über das „Stauziel über der Sohle“ abgebildet wurde, ist in HE die Abbildung der gesättigten Szenarien nach aktuellem Stand nicht möglich.

Die Messdaten wurden für Dächer mit einem Ablaufelement und einer Fläche von $14,2 \text{ m}^2$ erhoben. Der Einfluss der Dachflächengröße auf das Abflussverhalten wurde hier nicht getestet. Die Übertragung des Ersatzmodells erfolgt somit zunächst unter der Prämisse, dass das Verhältnis von Ablauf zu Fläche auch $1:14,2$ beträgt. Für weitere Skalierungen kann nur vermutet werden, dass sich Gründächer ohne Drosseln nahezu linear abhängig von der Flächen-größe skalieren lassen, die Drosselkennlinie jedoch bei Dächern mit Drosseln nicht linear skalierbar ist.

Weiterhin geplant ist die Ermittlung der gründachspezifischen Wasserbilanz aus Langzeit-Messdaten und deren Abgleich mit den berechneten Verdunstungsanteilen der Modelle sowie die Validierung der Modelle mit natürlichen Abfluss-Messdaten.

5 Bildung, Öffentlichkeitsarbeit, Präsentation

5.1 Öffentliche Einweihung der Gründachversuchsanlage

Ein zentraler Bestandteil des Projektes MaNuGrün war die begleitende Öffentlichkeitsarbeit sowie der Wissenstransfer in Fachpraxis, Verwaltung und Behörde. Mit der Inbetriebnahme der Gründachversuchsanlage am 31. Mai 2024 am BDZ in Leipzig wurde ein Meilenstein gesetzt und die Anlage offiziell der Fachöffentlichkeit vorgestellt. An der Eröffnungsveranstaltung nahmen rund 80 Personen aus Verwaltung, Wissenschaft, Planungspraxis und Wasserwirtschaft teil (Abbildung 29).

Die Veranstaltung wurde durch Grußworte der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), der Stadt Leipzig sowie der Leipziger Wasserwerke eröffnet. In den Beiträgen wurde die Bedeutung belastbarer Datengrundlagen für die klimaangepasste Stadtentwicklung, die Rolle von Gründächern in der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung sowie die Relevanz interkommunaler und wissenschaftlicher Zusammenarbeit hervorgehoben.

Im Anschluss stellte Andrea Bernhardt (Leipziger Wasserwerke) den Versuchsaufbau und die verschiedenen Gründachaufbauten vor. Dabei erläuterte sie die Zielstellung des Projekts, das geplante Messkonzept und den gewünschten Erkenntnisgewinn für die Entwässerungsplanung. Eine Führung über die Versuchsanlage bildete den praktischen Abschluss der Veranstaltung und ermöglichte den Teilnehmenden einen direkten Einblick in Aufbau, technische Ausstattung und Funktionsweise der Anlage. Damit wurde gegenüber Fachpublikum und Medien die praxisnahe Ausrichtung des Projektes deutlich gemacht.



Abbildung 29: Inbetriebnahme und feierliche Eröffnung der Gründachversuchsanlage am 31. Mai 2024 am BDZ in Leipzig

Hierzu wurde auch eine Pressemitteilung zur offiziellen Inbetriebnahme der Versuchsanlage veröffentlicht. Darin wurden die Zielstellungen des Projektes im Kontext zunehmender Starkregenereignisse und der Anforderungen an eine klimaangepasste, wassersensible Stadtentwicklung erläutert. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der fachlichen Einordnung des Projektes. Hervorgehoben wurde die Bedeutung belastbarer, unter realitätsnahen Bedingungen erhobener Messdaten für die Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Gründachsysteme.

5.2 Führungen

Im Projektzeitraum wurde die Versuchsanlage regelmäßig im Rahmen von Fachveranstaltungen vorgestellt. Dabei standen neben der Wirkungsweise auch die praktischen Ableitungen für Planung und Genehmigung im Fokus.

Durchgeführt wurden unter anderem:

- Vortrag im Rahmen des BuGG-Tages der Forschung und Lehre „Gebäudegrün 2024“ im Leipziger KUBUS (26.09.2024)
- Vortrag und Exkursion im Netzwerk Baukultur Leipzig der Ingenieurkammer Sachsen (10.10.2024)
- Vortrag und Exkursion im Rahmen des LEADER-Projektes „Starkregenvorsorge und Schutz vor Bodenerosion“ (16.10.2024)
- Mitwirkung beim 5. Leipziger Gründachkolleg (22.10.2024–24.01.2025) mit Vortrag und Führung
- Teilnahme am 1. Mitteldeutschen Gründachtag (24.01.2025) mit Poster und Ausstellung
- Informationsveranstaltung „Wassersensible Kommunen“ (20.08.2025)
- Informationsveranstaltungen zur nachhaltigen Regenwasserbewirtschaftung im Landkreis Leipzig (28.08.2025) und Landkreis Meißen (28.10.2025)
- Exkursion im Rahmen des Studium Generale der HTWK Leipzig (03.12.2025)

Neben Fachführungen wurden Exkursionen im Rahmen universitärer Lehrveranstaltungen durchgeführt. Studierende erhielten die Möglichkeit, den Versuchsaufbau, die Messtechnik sowie die Datenauswertung praxisnah kennenzulernen. Die Kombination aus Simulation von Starkregenereignissen, kontinuierlicher Datenerhebung und Vergleich unterschiedlicher Dachsysteme ermöglicht eine anschauliche Vermittlung komplexer wasserwirtschaftlicher Zusammenhänge. Damit leistete das Projekt einen Beitrag zur akademischen Ausbildung im Bereich Siedlungswasserwirtschaft, Stadtklima und nachhaltiger Infrastrukturplanung.

Die Gründachanlage wird zukünftig weiter als Lern- und Demonstrationsort genutzt. Für Fachleute aus Verwaltung, Ingenieur- und Planungsbüros sowie für kommunale Vertreterinnen und Vertreter werden weiterhin Führungen und Informationsveranstaltungen angeboten. Ziel ist es, die Funktionsweise unterschiedlicher Gründachaufbauten, deren hydraulische Wirkungsweise sowie die Bedeutung für die Regenwasserbewirtschaftung anschaulich zu vermitteln.

5.3 Netzwerk

Die Netzwerkaktivitäten des Projektes wurden maßgeblich durch die Mitwirkung im Think Tank Gründach des Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) in Leipzig unterstützt und begleitet. Der Think Tank fungiert als fachübergreifendes Austauschformat, in dem Akteure aus verschiedenen Wissenschaftsbereichen, Planungsbüros und kommunalen Ver- und Entsorgern regelmäßig zusammenkommen, um aktuelle Fragestellungen rund um wassersensible Stadt- und Regionalentwicklung zu diskutieren.

Im Rahmen dieser Plattform wurden die Projektergebnisse vorgestellt, die methodischen Ansätze erörtert und Anforderungen aus der kommunalen Praxis gespiegelt. Dadurch konnten die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse frühzeitig in einen fachlichen Diskurs eingebracht und praxisrelevante Fragestellungen weiter diskutiert werden. Die Beteiligung am Think Tank stärkte die Vernetzung über die unmittelbaren Projektpartner hinaus, unterstützte den Wissenstransfer zwischen Forschung und Anwendung und erhöhte die Sichtbarkeit des Projektes im regionalen und fachlichen Netzwerk.

Ergänzend zur Mitwirkung im Think Tank wurde das Projekt auch im Rahmen des 5. Leipziger Gründachkollegs sichtbar eingebunden. Das Gründachkolleg ist ein interdisziplinär angelegtes Wettbewerbsformat für Studierende und Auszubildende, bei dem begrünte Dachflächen unter dem Leitbild einer multifunktionalen Nutzung geplant werden. Neben der Vermittlung von Grundlagenwissen sind Exkursionen Bestandteil des Programms. Die Auftaktveranstaltung fand am 22.10.2024 auf dem Gelände des MDR statt, das Abschlussevent am 24.01.2025 in der Alten Börse in Leipzig. Die Abschlussveranstaltung des 5. Leipziger Gründachkollegs war zugleich als 1. Mitteldeutscher Gründachtag konzipiert. Durch die Zusammenführung von Wettbewerbsabschluss und Fachveranstaltung wurde eine breite Fachöffentlichkeit aus Kommunen, Planung, Wissenschaft, Verbänden und Unternehmen erreicht. Neben der Würdigung der im Wettbewerb entstandenen Entwürfe bot der Gründachtag Raum für fachliche Beiträge, Austausch und Diskussionen zur Rolle von Gründächern in der klimaangepassten Stadtentwicklung (Abbildung 30).



Abbildung 30: Abschlussveranstaltung des 5. Leipziger Gründachkollegs und 1. Mitteldeutscher Gründachtag in der Alten Handelsbörse in Leipzig (24.01.2025)

Insgesamt hat MaNuGrün durch die gezielte Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation der Forschungstätigkeit nach außen wesentlich dazu beigetragen, die Bedeutung leistungsfähiger Gründachsysteme für eine klimaresiliente und wassersensible Stadtentwicklung sichtbar zu machen und die Akzeptanz sowie Anwendung in der Praxis zu fördern.

5.4 Handlungsleitfaden für Kommunen, Gemeinden und Planungsbüros zur Nutzung von Gründächern

Ziel des Leitfadens ist es, die im Projekt MaNuGrün gewonnenen Erkenntnisse zur hydraulischen Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Gründachsysteme in eine praxisorientierte Handlungsempfehlung zu überführen. Aufbauend auf den durchgeführten Berechnungsversuchen und der Auswertung der Abflusssdämpfung und -verzögerung soll der Leitfaden eine fachlich belastbare Grundlage für die Auswahl geeigneter Gründachsysteme im Rahmen der Regenwasserbewirtschaftung bieten.

Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, unter welchen Randbedingungen und mit welchem Dachaufbau definierte Einleitbeschränkungen (gedrosselt, zeitverzögert oder kombiniert) umgesetzt werden können. Die im Projekt gewonnenen Ergebnisse bilden die Grundlage des Leitfadens und ermöglichen eine Zuordnung von Gründachtypen zu den jeweiligen Anforderungen der Entwässerungsplanung.

Im Leitfaden werden folgende Ergebnisse veröffentlicht:

- Vergleich des Abflussverhaltens von konventionellen Dächern und verschiedenen extensiven sowie intensiven Gründachsystemen
- Quantifizierung von Abflusssdämpfung und Zeitverzögerung unter unterschiedlichen Regenintensitäten und Vorsättigungszuständen
- Einteilung der untersuchten Dachaufbauten in Wirkungskategorien mit klarer Aussage zur Eignung für bestimmte Einleitbeschränkungen
- Ableitungen zur praktischen Umsetzung gedrosselter, zeitverzögerter oder kombinierter Einleitstrategien
- Hinweise zu statischen und planerischen Randbedingungen

Damit werden erstmals systematisch erhobene Messdaten aus einer realitätsnah betriebenen Versuchsanlage in eine anwendungsorientierte Bewertungsstruktur überführt. Somit hat der Leitfaden das Potenzial, als Hilfsmittel zu dienen, indem er bei vorgegebenen Einleitbeschränkungen geeignete Maßnahmen vorgibt, Lösungen für vollständig überbaute Grundstücke aufzeigt und eine fachlich fundierte Argumentationsgrundlage gegenüber Genehmigungsbehörden oder politischen Entscheidungsträgern bietet.

Er ersetzt keine objektspezifische Bemessung oder statische Prüfung, bietet jedoch eine strukturierte Entscheidungsgrundlage und eine belastbare Argumentationshilfe.

Der vollständige Handlungsleitfaden ist im Anhang A - 21 zu finden.

6 Fazit

Die Untersuchungen zeigen, dass Gründächer ein wirksames Instrument zur klimaangepassten Regenwasserbewirtschaftung im urbanen Raum darstellen. Vor dem Hintergrund zunehmender Flächenversiegelung und häufigerer Starkregenereignisse leisten sie einen wesentlichen Beitrag zur Entlastung von Kanalisation und Gewässern.

Die durchgeführten Versuche belegen, dass Gründächer Abflussspitzen deutlich dämpfen und zeitlich verzögern können. Besonders intensive und gedrosselte Systeme erreichen hohe Rückhaltungswirkungen, während auch einfache extensive Aufbauten relevante Effekte zeigen. Die hydraulische Leistungsfähigkeit hängt dabei maßgeblich vom Systemaufbau ab, insbesondere von Substrattiefe, Drainage und Drosselung.

Die Ergebnisse verdeutlichen zudem, dass ein erheblicher Anteil des Niederschlags nicht direkt abfließt, sondern im System gespeichert und zeitverzögert abgegeben oder durch Evapotranspiration umgesetzt wird. Langfristige Betrachtungen zeigen, dass der überwiegende Teil des Wassers im System verbleibt bzw. verdunstet.

Die Modellierungen bestätigen diese Erkenntnisse grundsätzlich, zeigen jedoch auch, dass bestehende Standardansätze die Abflussbildung von Gründächern häufig überschätzen. Das im Projekt entwickelte Ersatzmodell ermöglicht eine deutlich realitätsnähere Abbildung des Abflussverhaltens und ist für die Anwendung in gängigen Kanalnetzmodellen geeignet.

Insgesamt wird deutlich, dass Gründächer einen signifikanten Beitrag zur Reduzierung von Abflussspitzen, zur Verzögerung des Abflusses und zur Stabilisierung des urbanen Wasserhaushalts leisten können, jedoch in Abhängigkeit von ihrer Ausführung. Für eine zuverlässige Integration in die Planung ist eine differenzierte Betrachtung der Systemparameter sowie eine angepasste Modellierung erforderlich.

Die im Projekt generierten Daten schaffen hierfür eine fundierte Grundlage für Entwässerungsbetriebe, Kommunen sowie Planungs- und Ingenieurbüros, um den Einsatz von Gründächern fachlich zu beurteilen und in Planungs- und Genehmigungsprozesse zu integrieren.

7 Literaturverzeichnis

- [DWA21] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Merkblatt DWA-M 165-1 Niederschlag-Abfluss- und Schmutzfrachtmodelle in der Siedlungsentwässerung – Teil 1: Anforderungen, ISBN 978-3-96862-092-3, Hennef, Mai 2021.
- [Hör20] Hörschemeyer, B., Henrichs, M., & Uhl, M. (2020). SWMM-UrbanEVA: A model for the evapotranspiration of urban vegetation. *Water*, 12(10), 3089.
- [Jef22] Jeffers, S., Garner, B., Hidalgo, D., & Warmerdam, O. (2022). Insights into green roof modeling using SWMM LID controls for detention-based designs. *Journal of Water Management Modeling*, 30, C484. <https://doi.org/10.14796/JWMM.C484>.
- [Ros16] Rossman, L. A., & Huber, W. C. (2016). Storm Water Management Model reference manual: Volume III – Water quality (EPA/600/R-16/093). U.S. Environmental Protection Agency.

8 Anhangsverzeichnis

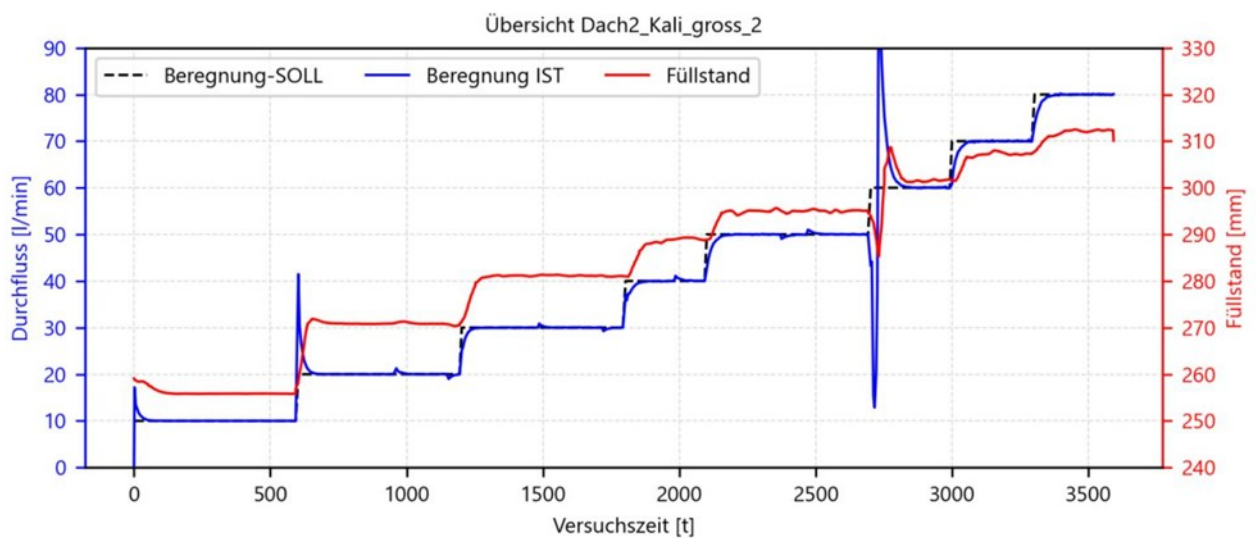
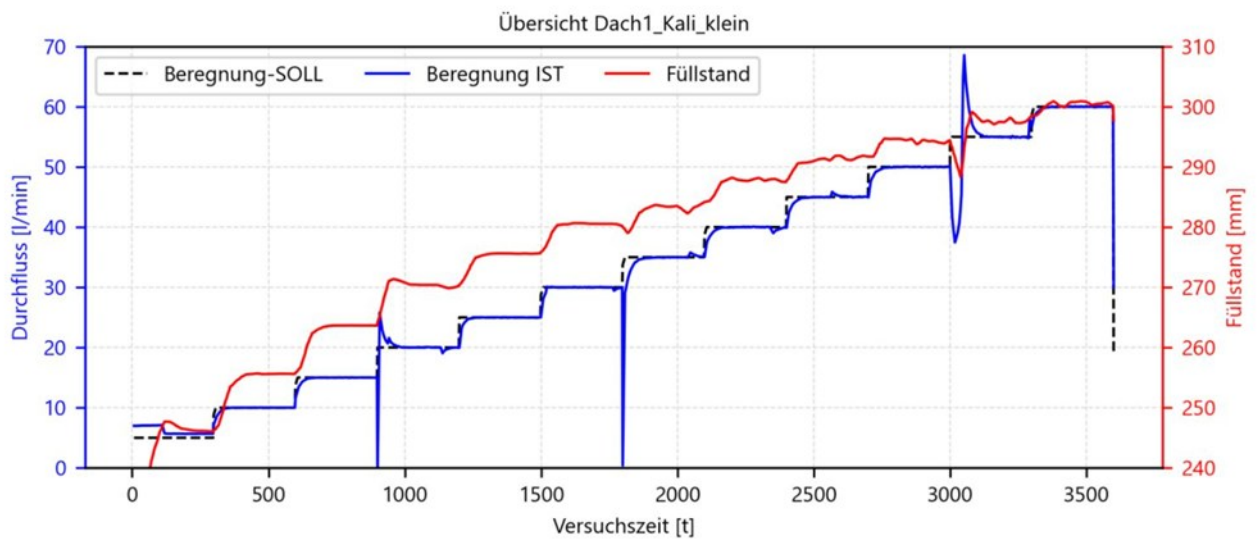
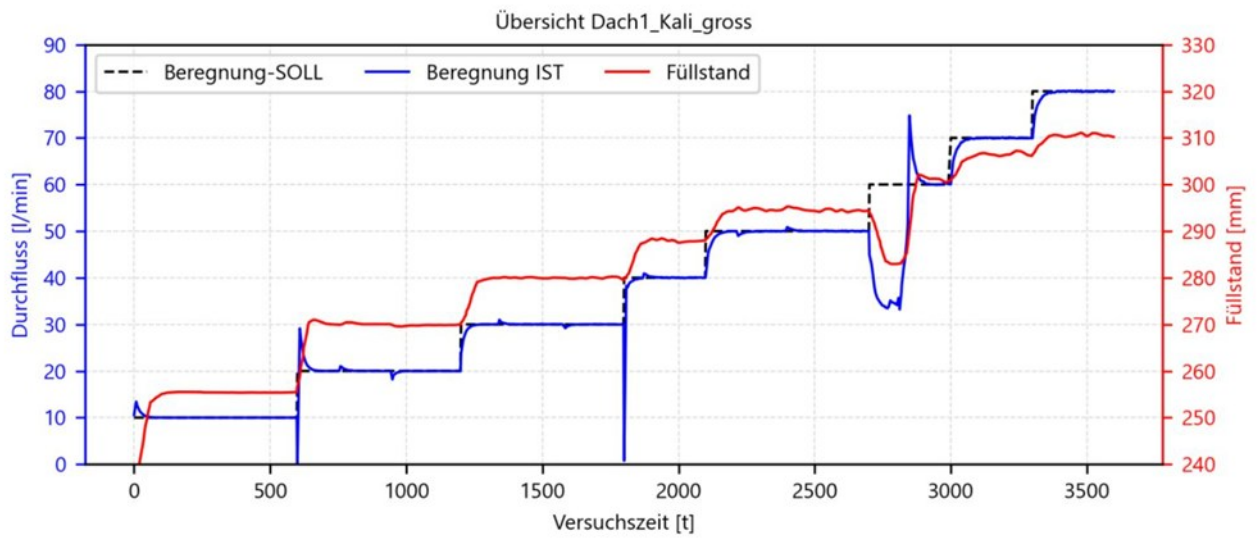
	Seite
Anhang A - 1: Arbeitsplan DBU AZ 37461/01 – 23.....	51
Anhang A - 2: Durchgeführte Kalibrierläufe	53
Anhang A - 3: Modellregen	60
Anhang A - 4: Tabellarische Dokumentation der Versuche	61
Anhang A - 5: Beispielhafter Versuchssteckbrief.....	67
Anhang A - 6: Versuchsübersicht je Dach – Durchflüsse	73
Anhang A - 7: Versuchsübersicht je Dach – Durchflüsse und Temperatur	84
Anhang A - 8: Modellkurven je Dach – Durchflüsse	95
Anhang A - 9: Modellkurven je Dach – Volumenbetrachtung	106
Anhang A - 10: Tabellarische Übersicht Dämpfung und Verzögerung.....	117
Anhang A - 11: Tabellarische Übersicht Volumenbetrachtung	120
Anhang A - 12: Drosselkennlinie in Abhängigkeit des Wasserstands.....	123
Anhang A - 13: Kalibrierergebnis und qualitative Bewertung für Dach 1.....	127
Anhang A - 14: Kalibrierergebnis und qualitative Bewertung für Dach 2.....	130
Anhang A - 15: Kalibrierergebnis und qualitative Bewertung für Dach 3.....	133
Anhang A - 16: Kalibrierergebnis und qualitative Bewertung für Dach 4.....	136
Anhang A - 17: Kalibrierergebnis und qualitative Bewertung für Dach 5.....	139
Anhang A - 18: Kalibrierergebnis und qualitative Bewertung für Dach 8.....	142
Anhang A - 19: Kalibrierergebnis und qualitative Bewertung für Dach 9.....	145
Anhang A - 20: Kalibrierergebnis und qualitative Bewertung für Dach 10.....	148
Anhang A - 21: Handlungsleitfaden für Kommunen, Gemeinden und Planungsbüros zur Nutzung von Gründächern	151

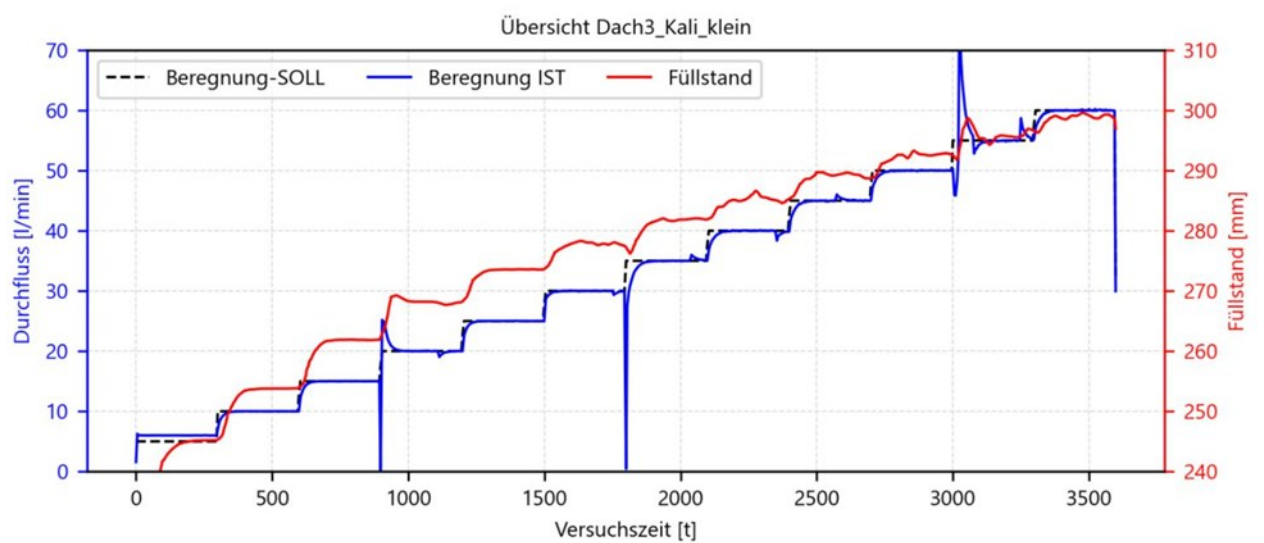
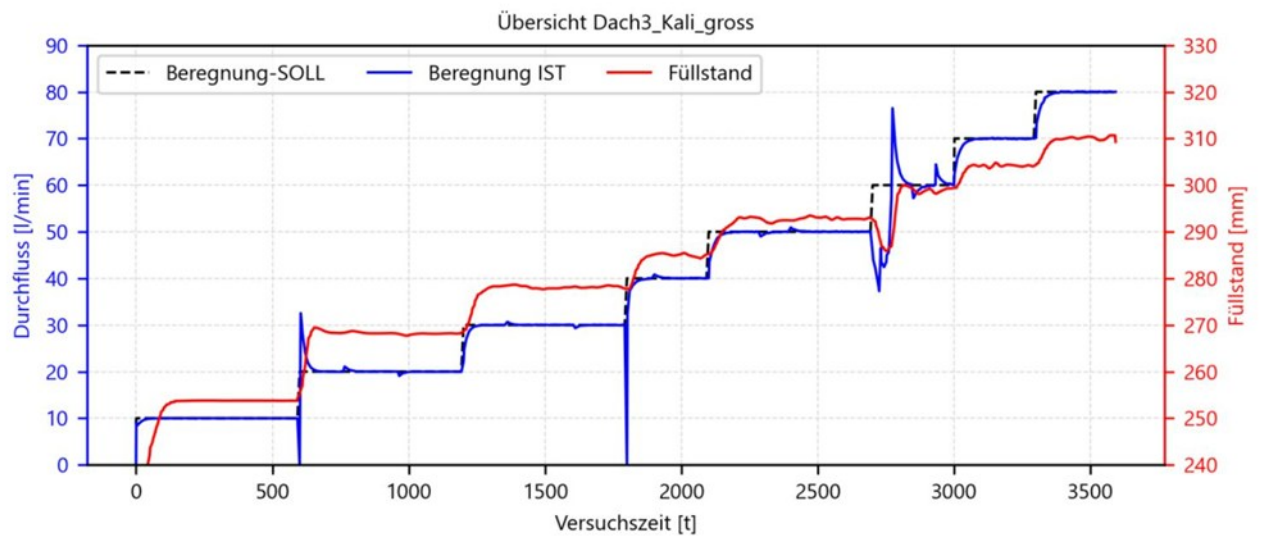
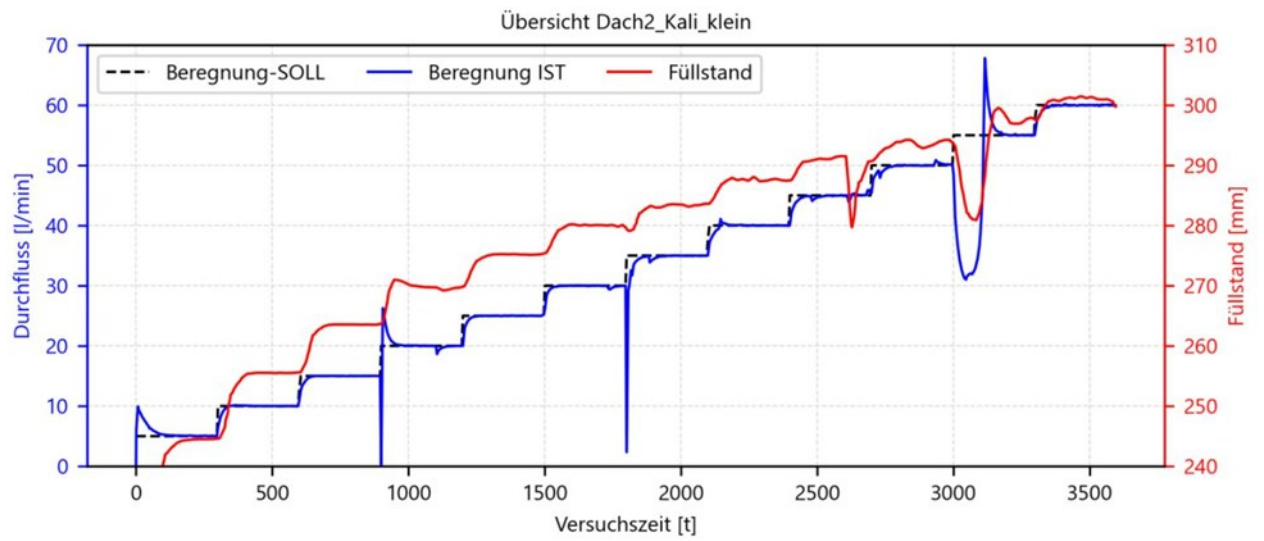
Anhang A - 1: Arbeitsplan DBU AZ 37461/01 – 23

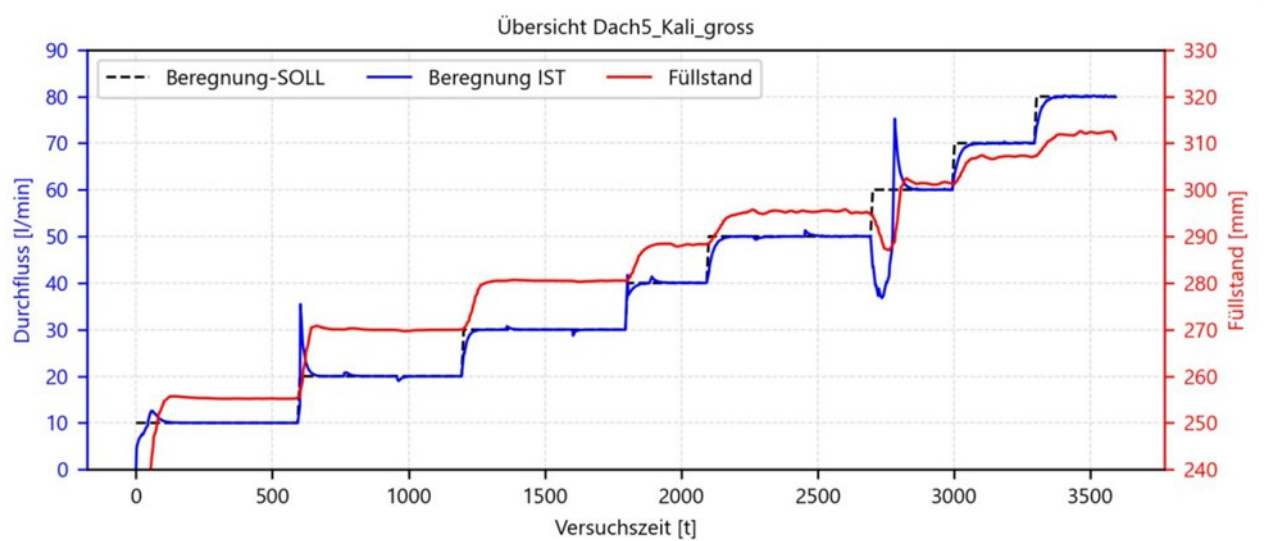
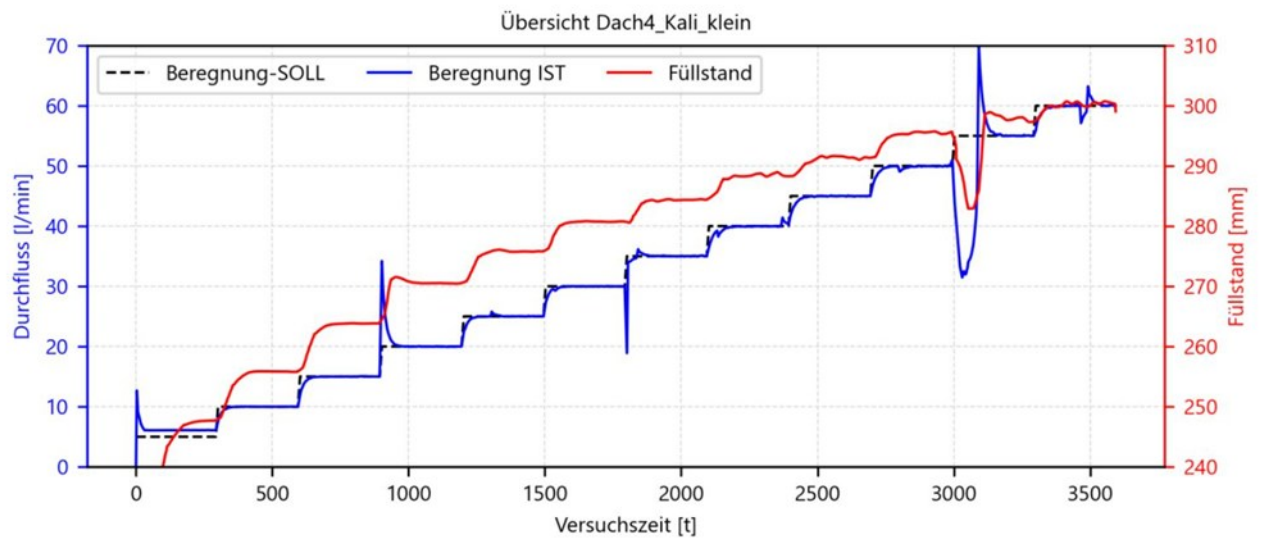
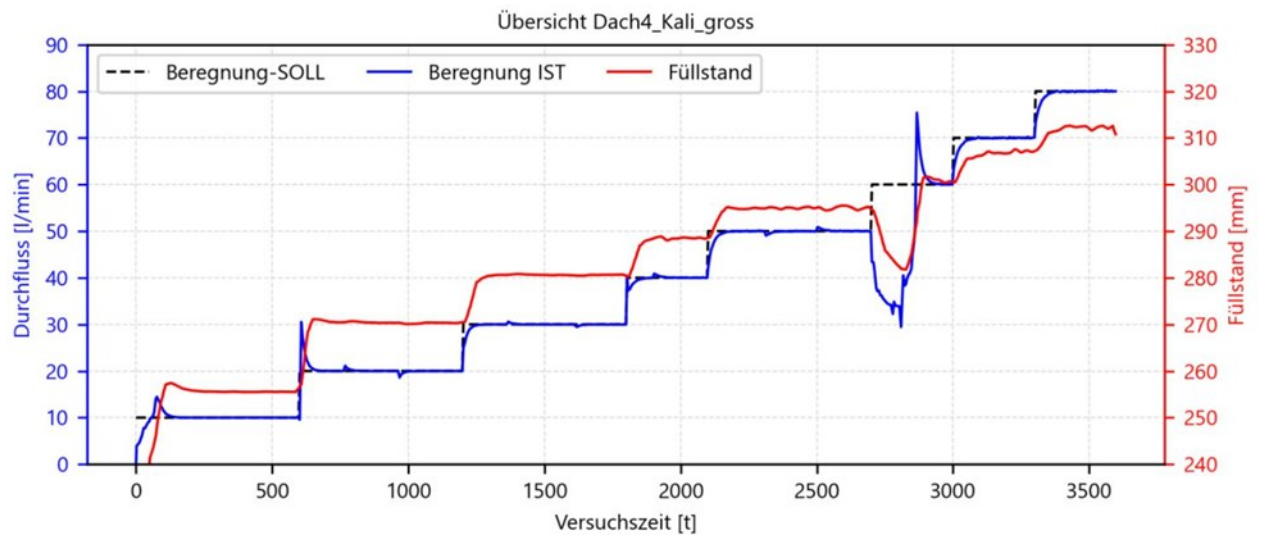
Arbeitspakete Angepasster Arbeitsplan Stand 21.03.2023	Termine
AP 1.1 Planung des Aufbaus der Gründächer	Juni 2023
AP 1.2 Planung und Auslegung der Beregnungsanlage	März 2023
AP 1.3 Planung der Versuchsdurchführung	März 2023
AP 2.1 Aufbau der Dächerkonstruktion	Juli 2023
AP 2.2 Fertigung der Beregnungsanlage	Dezember 2023
AP 2.3 Errichtung von zehn Gründachaufbauten	August 2023
AP 2.4 Ausstattung der Dächer mit entsprechender Messtechnik	März 2024
AP 2.5 Installation und Kalibrierung der Beregnungsanlage	März 2024
AP 2.6 = Meilenstein 1 Inbetriebnahme der Versuchsanlage	April 2024
AP 3.1 Befüllung der Gründachaufbauten mit verschiedenen Substraten	Oktober, November 2023
AP 3.2 Beregnung der Substrate mit Niederschlägen unterschiedlicher Intensität	Nicht relevant, da die Gründächer teilweise schon begrünt geliefert wurden.
AP 3.3 Bepflanzung der Gründächer	Oktober, November 2023

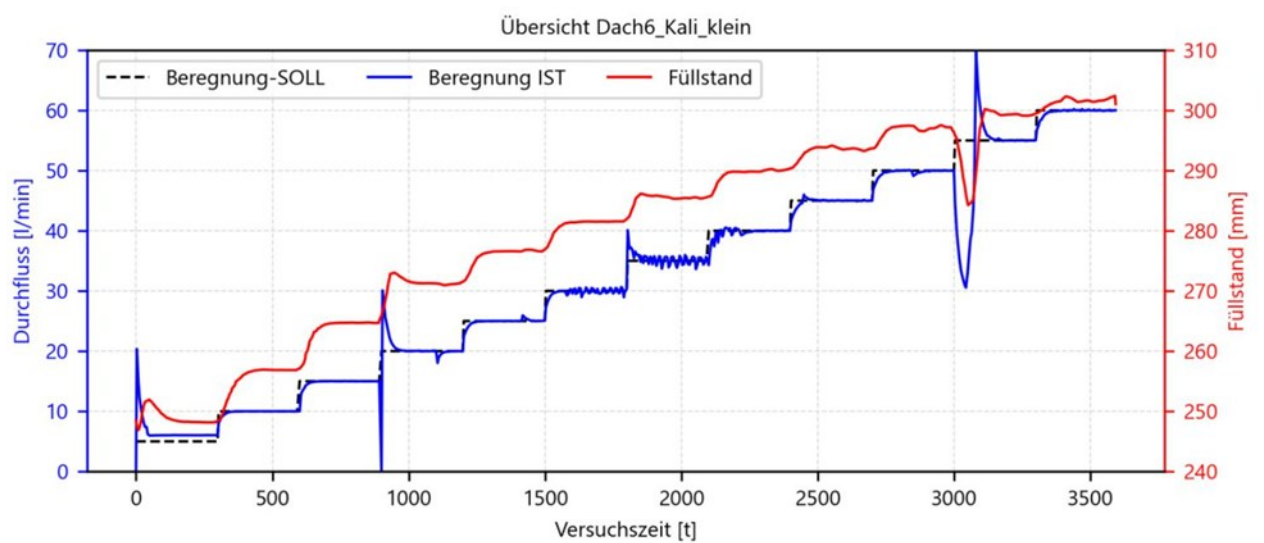
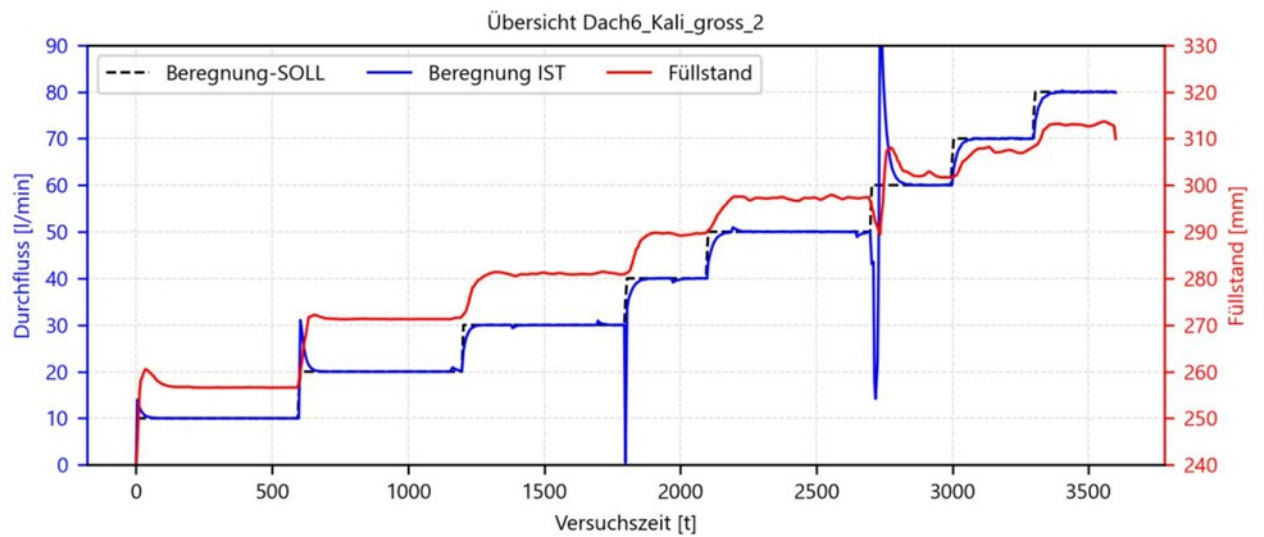
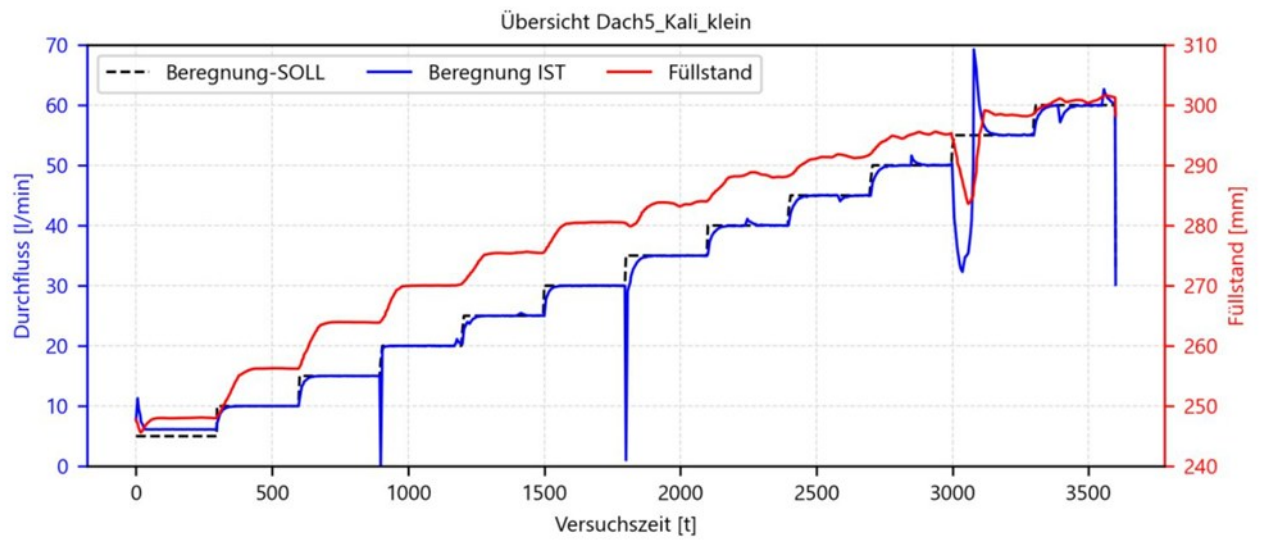
AP 5.1: Analyse der Regenwasserrückhaltekapazität der Gründächer (Leipziger Wasserwerke) AP 5.2: Erstellung von Wasserbilanzen für die einzelnen Gründachtypen - Speicherkapazitäten, Ablaufmengen, pflanzenverfügbarer Wassergehalt im Substrat (UFZ) AP 5.3: Analyse der Auswirkungen der Retentionsfähigkeit von Gründächern auf die Kanalhydraulik bei verschiedenen Niederschlagsereignissen (HTWK)	Januar 2025 - Dezember 2025
AP 6.1: Führungen für Fachleute und Bürgern über das Demonstrationsfeld „Gründach“ (laufend) AP 6.2: Tag der offenen Tür im BDZ zur Thematik Gründach	Seit April 2024 Mai 2026
AP 7.1: Aufbau eines sächsischen Netzwerks „Gründach“ AP 7.2: Vorstellung und Diskussion der Zwischenergebnisse des Projekts mit ausgewählten Fachleuten AP 7.2: Erstellung eines Handlungsleitfadens für Kommunen, Gemeinden und Planungsbüros zur Nutzung von Gründächern	Seit Januar 2023 November 2025 März 2026
AP 8.1: Organisation und Durchführung eines Workshops „Gründach“ für Vertreter von Verwaltung, Behörden, Planungs- und Ingenieurbüros mit Vorstellung der Projektergebnisse	März 2026

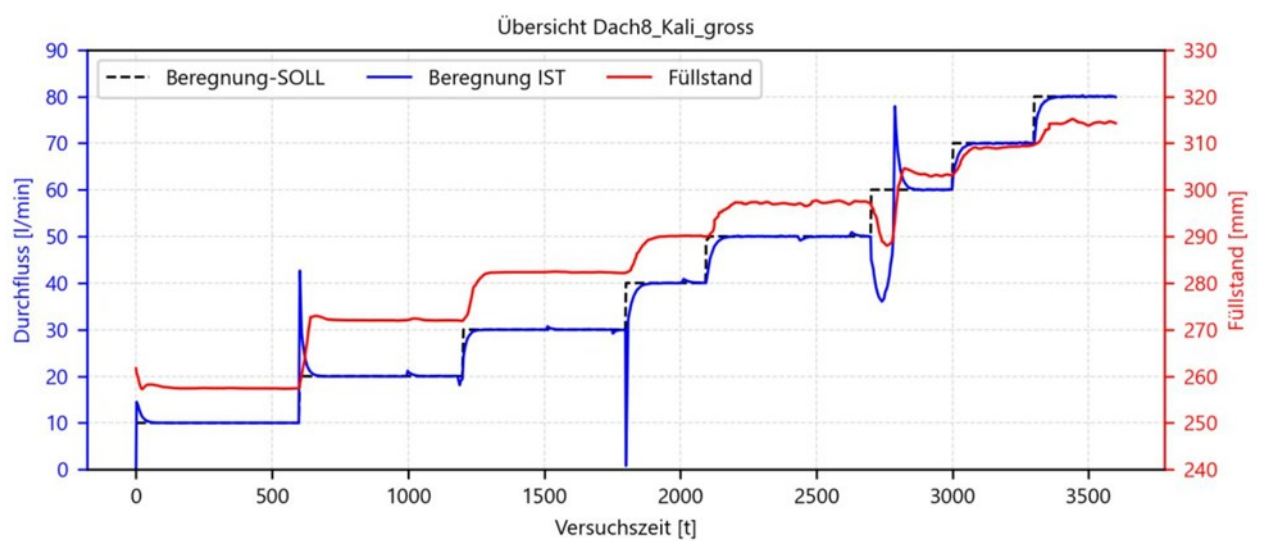
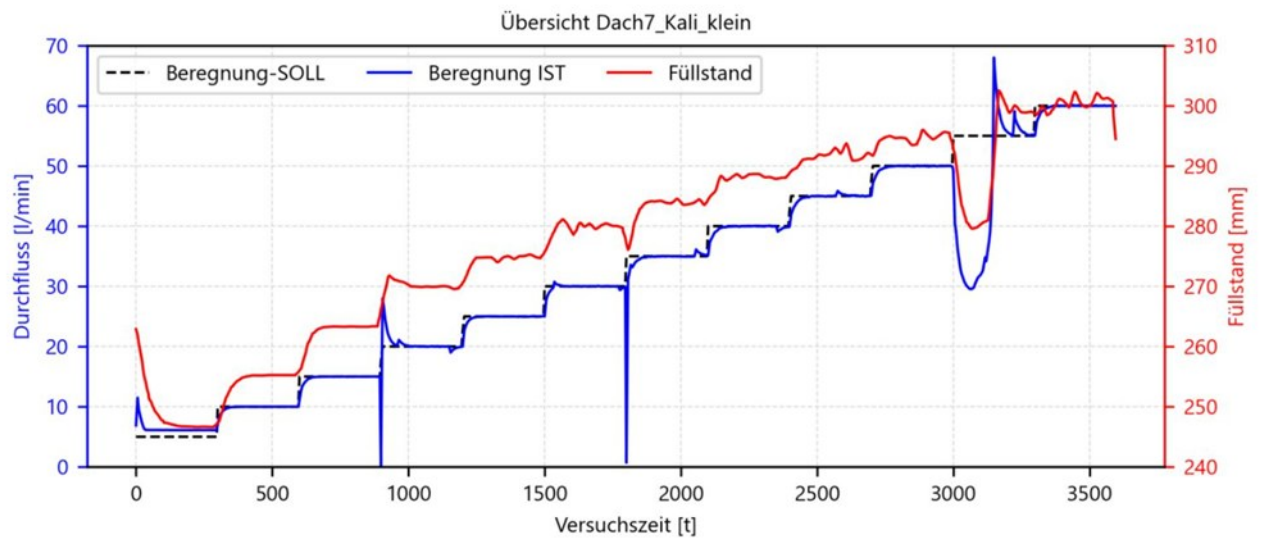
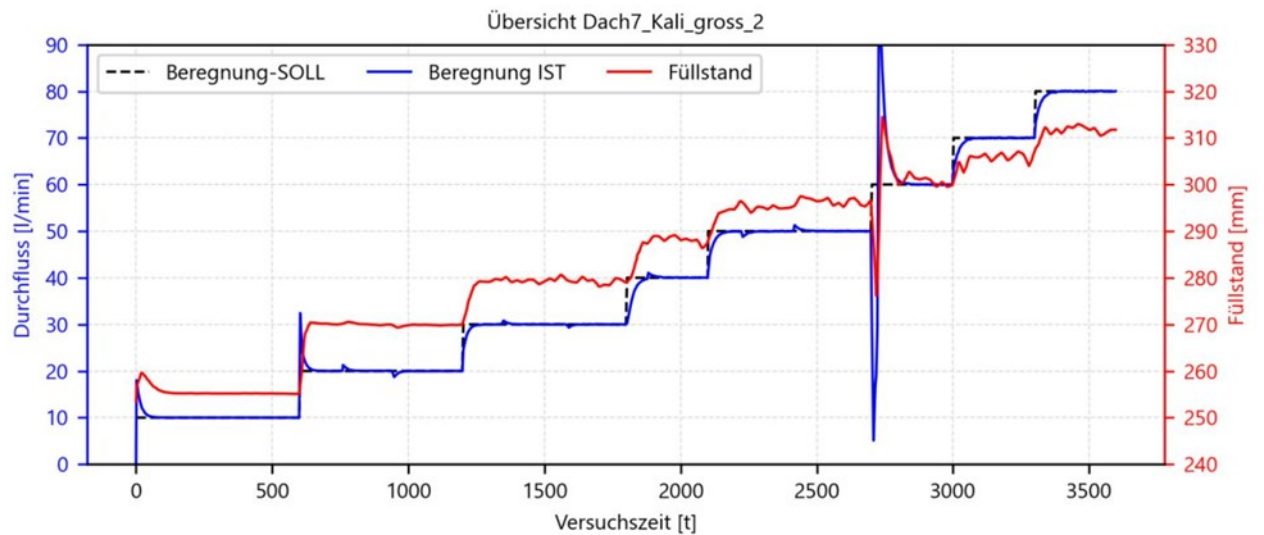
Anhang A - 2: Durchgeführte Kalibrierläufe

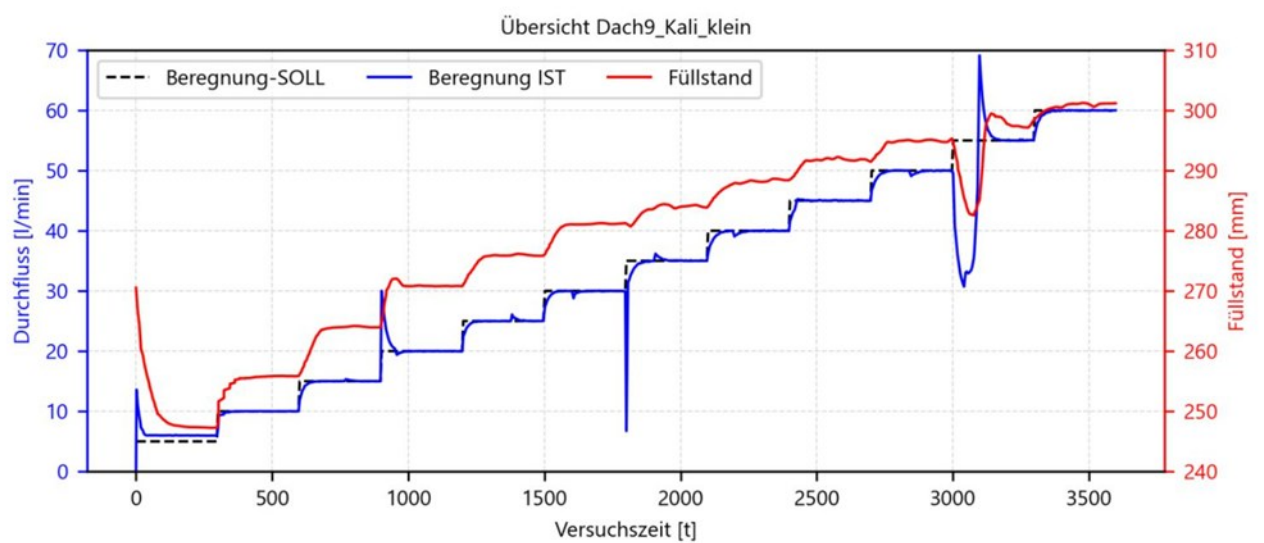
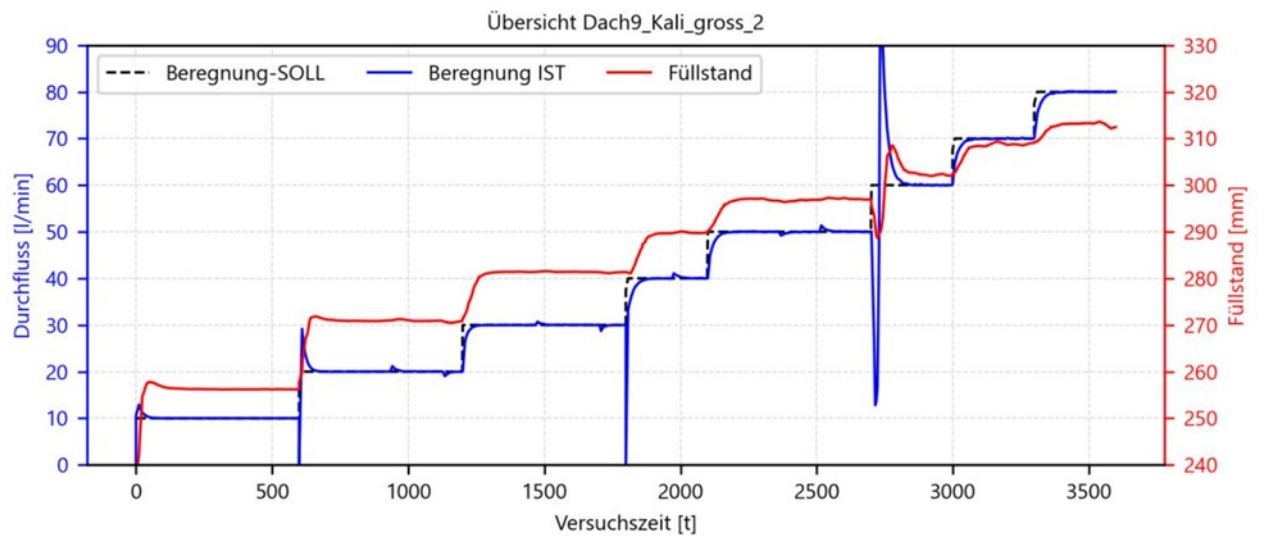
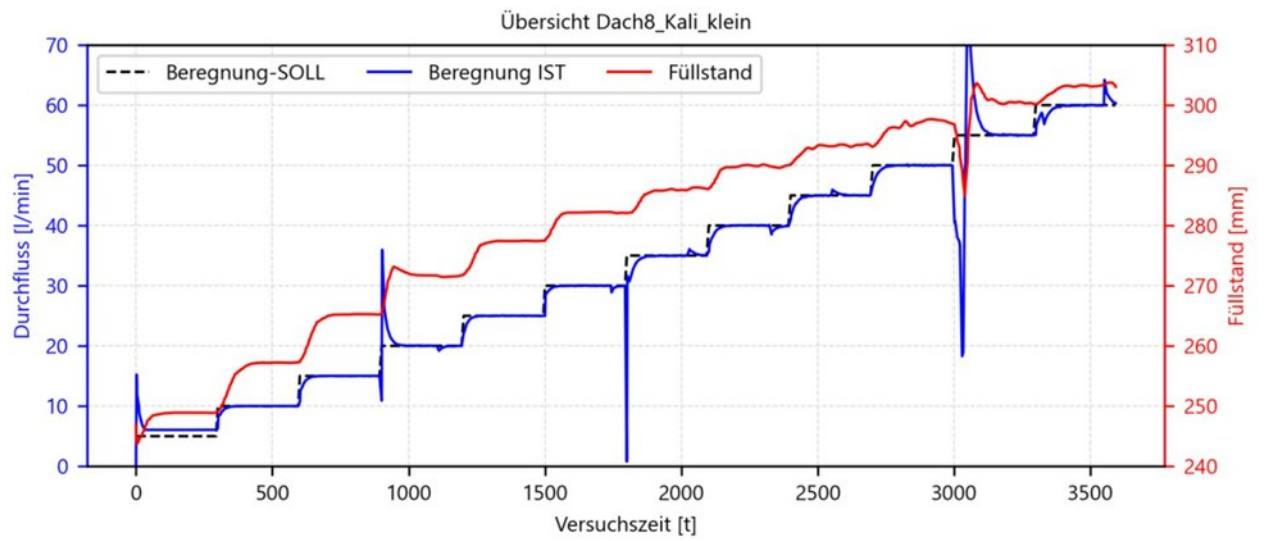


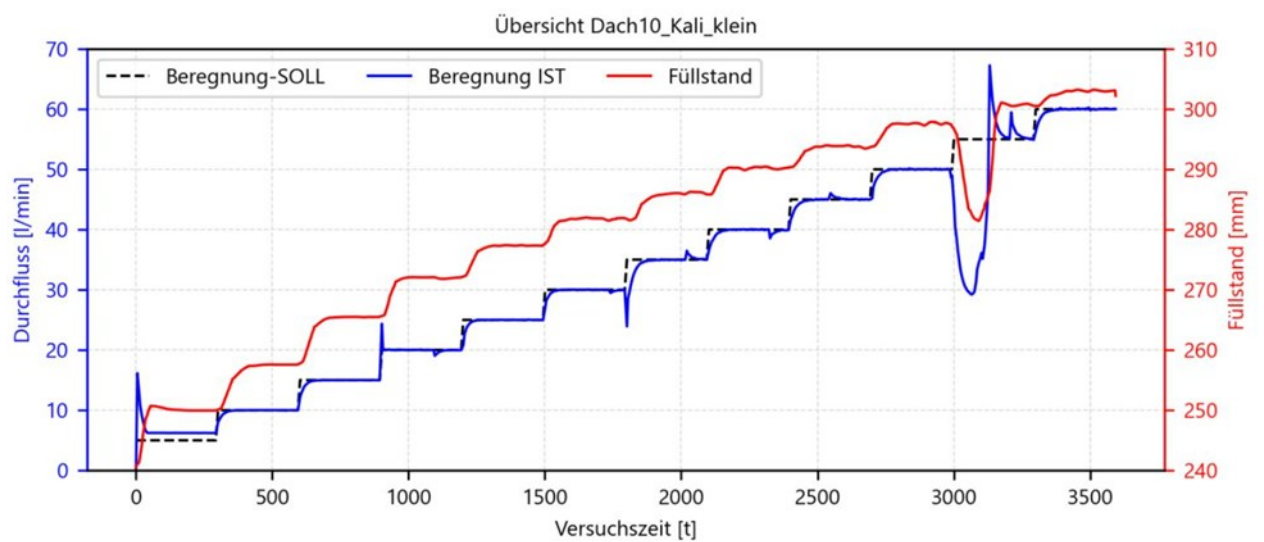
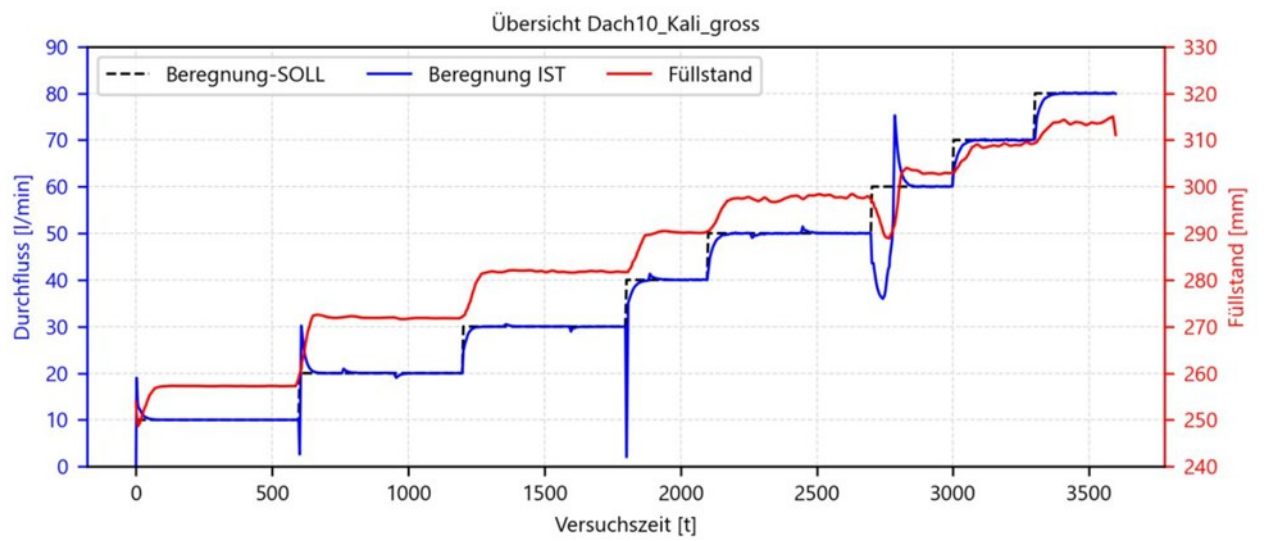






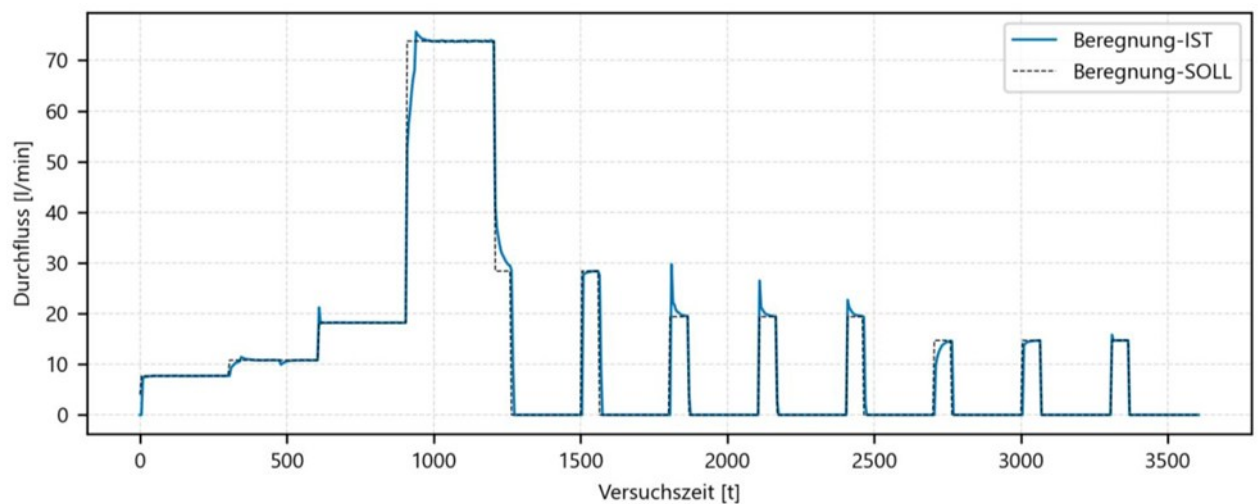
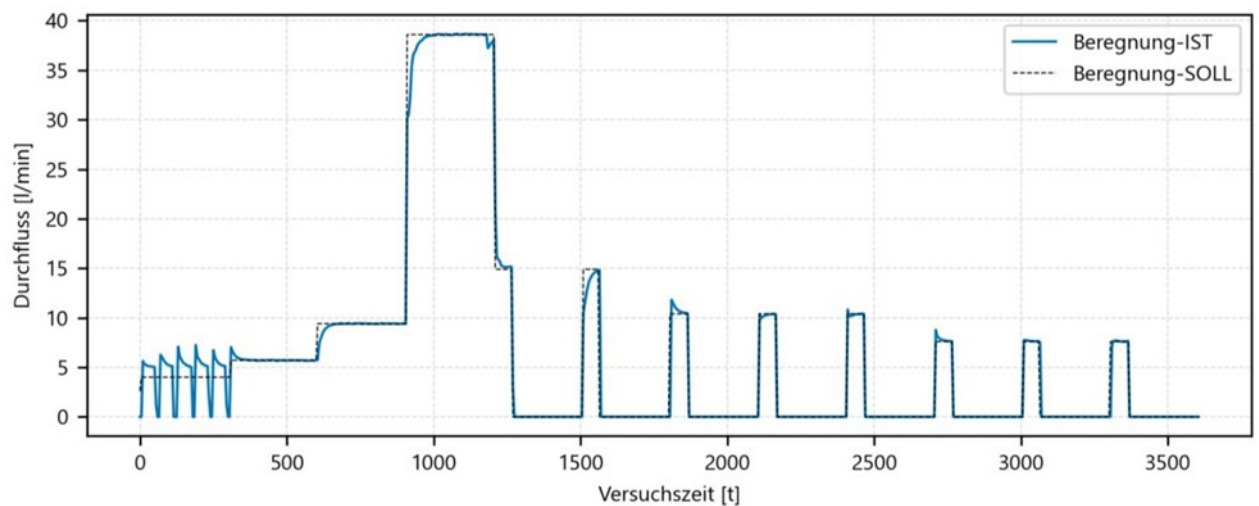
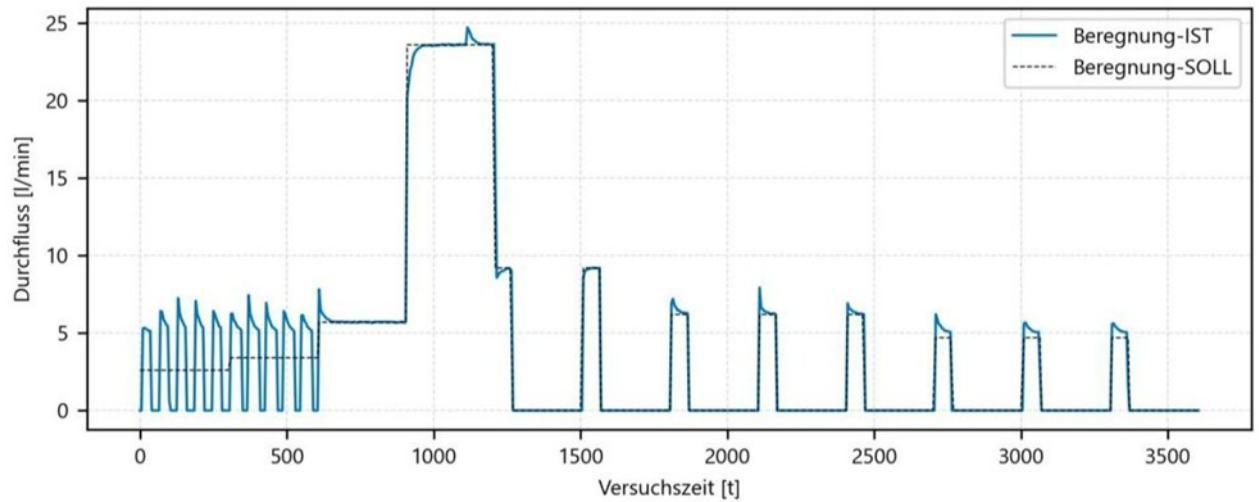






Anhang A - 3: Modellregen

oben: 1-jährlicher Modellregen, mittig: 5-jährlicher Modellregen, unten: 100-jährlicher Modellregen



Anhang A - 4: Tabellarische Dokumentation der Versuche

#ID	Dach	Beregnungs- versuch	Vorsättigungs- szenario	Ende Vorsättigung	Startzeitpunkt Beregnungsversuch	Bewuchshöhe [cm]	Bemerkung	Datenverluste		
								vorhanden?	Datenverlust [%]	Beregnungs- versuch betroffen?
1	10	T1a	1h	11.06.2025 15:20	11.06.2025 16:20	5		nein		
2	6	T1a	1h	12.06.2025 08:22	12.06.2025 09:22			nein		
3	7	T1a	1h	12.06.2025 09:19	12.06.2025 10:24			nein		
4	8	T1a	1h	12.06.2025 10:23	12.06.2025 11:33	10		nein		
5	9	T1a	1h	12.06.2025 11:31	12.06.2025 12:34	5		ja	6,1	nein
6	10	T5a	1h	12.06.2025 12:45	12.06.2025 13:45	5		ja	6,1	nein
7	6	T5a	1h	12.06.2025 13:39	12.06.2025 14:56			ja	1,0	nein
8	7	T5a	1h	16.06.2025 11:01	16.06.2025 12:01			nein		
9	8	T5a	1h	16.06.2025 11:56	16.06.2025 13:06	25		nein		
10	9	T5a	1h	16.06.2025 13:03	16.06.2025 14:12	10		nein		
11	10	T100a	1h	16.06.2025 14:08	16.06.2025 15:16	5		nein		
12	6	T1a	4h	17.06.2025 07:57	17.06.2025 11:58			nein		
13	7	T1a	4h	17.06.2025 08:55	17.06.2025 12:57			ja	7,3	nein
14	8	T1a	4h	17.06.2025 09:55	17.06.2025 13:56	35		ja	6,0	nein
15	9	T1a	4h	17.06.2025 10:55	17.06.2025 14:55	10		ja	7,2	nein
16	10	T1a	4h	17.06.2025 11:56	17.06.2025 15:56	5		ja	6,0	nein
17	6	T100a	1h	18.06.2025 11:39	18.06.2025 12:39			ja	11,8	nein
18	8	T100a	1h	18.06.2025 13:42	18.06.2025 14:43	35		ja	34,5	nein
19	9	T100a	1h	18.06.2025 14:43	18.06.2025 15:44	10		ja	41,1	nein
20	9	T1a	72h	20.06.2025 12:28	23.06.2025 12:28	10		ja	20,3	nein
21	10	T1a	72h	20.06.2025 13:30	23.06.2025 13:30	5		ja	20,4	nein
22	7	T5a	4h	24.06.2025 07:57	24.06.2025 11:57		Bild fehlt	nein		
23	6	T5a	4h	24.06.2025 08:58	24.06.2025 12:58			nein		
24	8	T5a	4h	24.06.2025 09:58	24.06.2025 13:58	35		nein		
25	9	T5a	4h	24.06.2025 10:58	24.06.2025 14:58	10		nein		
26	10	T5a	4h	24.06.2025 11:55	24.06.2025 15:58	5	leichter Nieselregen	nein		
27	7	T100a	1h	25.06.2025 10:15	25.06.2025 11:15		Bild fehlt	nein		
28	1	T1a	1h	07.07.2025 10:25	07.07.2025 11:27	5	letzter Beregnungsstoß fehlt, Bild danach gemacht	ja	0,7	ja
30	3	T1a	1h	07.07.2025 12:36	07.07.2025 13:30	15	Bild danach gemacht	ja	0,4	nein
31	4	T1a	1h	07.07.2025 13:25	07.07.2025 14:34	10	Bild danach gemacht	ja	0,5	nein
32	5	T1a	1h	07.07.2025 14:33	07.07.2025 15:32	20	Bild danach gemacht	ja	0,5	nein
33	4	T5a	1h	08.07.2025 07:52	08.07.2025 08:53	10		nein		
34	5	T5a	1h	08.07.2025 08:52	08.07.2025 09:54	20		nein		
35	3	T5a	1h	08.07.2025 09:53	08.07.2025 10:57	15		nein		
36	2	T5a	1h	08.07.2025 10:57	08.07.2025 12:00	20		nein		
37	1	T5a	1h	08.07.2025 11:58	08.07.2025 13:00	5	Bild nach dem Versuch gemacht	nein		
38	2	T100a	1h	09.07.2025 08:19	09.07.2025 09:20	20		ja	0,1	nein
39	1	T100a	1h	09.07.2025 09:16	09.07.2025 10:20	5		ja	0,1	nein
40	3	T100a	1h	09.07.2025 10:19	09.07.2025 11:21	15		ja	0,1	ja
41	4	T100a	1h	09.07.2025 11:20	09.07.2025 12:23	4	Datenausfall nur 15 s, ls der vsparn auf 1, damit Fehler sichtbar ist	ja	0,1	nein
42	5	T100a	1h	09.07.2025 12:22	09.07.2025 13:21	20		ja	0,1	nein
43	1	T1a	4h	10.07.2025 08:14	10.07.2025 12:14	5		ja	3,9	nein

#ID	Dach	Beregnungs- versuch	Vorsättigungs- szenario	Ende Vorsättigung	Startzeitpunkt Beregnungsversuch	Bewuchshöhe [cm]	Bemerkung	Datenverluste		
								vorhanden?	Datenverlust [%]	Beregnungs- versuch betroffen?
82	6	T100a	4h	23.07.2025 12:04	23.07.2025 16:09			nein		
83	10	T5a	1h	25.07.2025 07:58	25.07.2025 08:58	5		ja	16,6	nein
84	9	T5a	1h	25.07.2025 08:52	25.07.2025 09:59	15		ja	17,8	nein
85	8	T5a	1h	25.07.2025 09:57	25.07.2025 10:56	30		ja	12,2	nein
86	3	T1a	72h	22.07.2025 23:00	25.07.2025 13:53	10	Vorsättigung durch Regen, 72 Stunden nicht eingehalten	ja	8,9	nein
87	4	T1a	72h	22.07.2025 23:00	25.07.2025 14:52	10	Vorsättigung durch Regen, 72 Stunden nicht eingehalten	ja	8,9	nein
88	5	T1a	72h	22.07.2025 23:00	25.07.2025 15:52	30	Vorsättigung durch Regen, 72 Stunden nicht eingehalten	ja	10,1	nein
89	6	T1a	4h	24.07.2025 08:13	24.07.2025 12:15		Datenverlust am Beginn der Beregnungskurve + am Ende, mit anderer T1a-Beregnungskurve aufgefüllt	ja	20,8	ja
91	8	T1a	4h	24.07.2025 10:09	24.07.2025 14:11	5		ja	12,0	nein
92	9	T1a	4h	24.07.2025 11:07	24.07.2025 15:10	15		ja	13,7	nein
93	10	T1a	4h	24.07.2025 12:10	24.07.2025 16:07	30		ja	24,7	ja
94	4	T1a	4h	29.07.2025 11:40	29.07.2025 15:41	4		nein		
95	5	T1a	4h	29.07.2025 12:44	29.07.2025 16:40	15		nein		
96	1	T1a	1h	28.07.2025 13:26	28.07.2025 14:27	10		ja	3,4	nein
97	2	T1a	1h	28.07.2025 14:23	28.07.2025 15:29	15		ja	3,0	ja
98	3	T100a	1h	28.07.2025 15:28	28.07.2025 16:35	5		ja	2,5	ja
99	3	T1a	4h	29.07.2025 08:41	29.07.2025 12:47	5		ja	0,2	ja
100	2	T1a	4h	29.07.2025 09:40	29.07.2025 13:45	15		ja	0,1	nein
101	1	T1a	4h	29.07.2025 10:40	29.07.2025 14:43	10		ja	0,1	ja
102	4	T5a	4h	30.07.2025 07:10	30.07.2025 11:10	5		ja	4,4	nein
103	5	T5a	4h	30.07.2025 08:08	30.07.2025 12:09	15		ja	4,6	nein
104	3	T5a	4h	30.07.2025 09:07	30.07.2025 13:07	3		ja	4,6	ja
105	2	T5a	4h	30.07.2025 10:05	30.07.2025 14:05	15		ja	5,6	ja
106	1	T5a	4h	30.07.2025 11:02	30.07.2025 15:03	10		ja	5,4	nein
107	6	T5a	72h	27.07.2025 21:06	31.07.2025 07:43			ja	0,0	nein
108	7	T5a	72h	28.07.2025 09:12	31.07.2025 08:41			ja	0,0	nein
109	8	T5a	72h	25.07.2025 10:49	31.07.2025 09:39	30		ja	0,0	nein
110	9	T5a	72h	25.07.2025 09:57	31.07.2025 10:37	15		ja	0,3	nein
111	10	T5a	72h	25.07.2025 08:48	31.07.2025 11:35	15		ja	0,0	nein
112	1	T1a	1h	31.07.2025 12:45	31.07.2025 13:45	10		ja	0,4	nein
113	2	T1a	1h	31.07.2025 13:40	31.07.2025 14:46	15		ja	0,4	ja
114	3	T1a	1h	31.07.2025 14:45	31.07.2025 15:48	10		ja	0,4	nein
115	4	T1a	1h	31.07.2025 15:47	31.07.2025 16:45	10		ja	0,4	nein
116	5	T100a	4h	01.08.2025 07:55	01.08.2025 11:56	15		ja	1,9	nein
117	4	T100a	4h	01.08.2025 08:52	01.08.2025 12:54	5		ja	2,0	nein
118	3	T100a	4h	01.08.2025 09:50	01.08.2025 13:53	5		ja	2,1	nein
119	2	T100a	4h	01.08.2025 10:49	01.08.2025 14:52	15		ja	2,2	nein
121	1	T100a	72h	01.08.2025 16:11	04.08.2025 07:48	10		ja	2,3	nein

#ID	Dach	Beregnungs- versuch	Vorsättigungs- szenario	Ende Vorsättigung	Startzeitpunkt Beregnungsversuch	Bewuchshöhe [cm]	Bemerkung	Datenverluste		
								vorhanden?	Datenverlust [%]	Beregnungs- versuch betroffen?
122	2	T100a	72h	01.08.2025 15:15	04.08.2025 08:48	20		ja	2,5	nein
124	4	T100a	72h	01.08.2025 13:16	04.08.2025 10:42	5		nein		
125	5	T100a	72h	01.08.2025 12:20	04.08.2025 11:40	15		nein		
126	6	T100a	72h	01.08.2025 09:18	04.08.2025 12:44			nein		
127	7	T100a	72h	01.08.2025 09:11	04.08.2025 13:56			nein		
128	8	T100a	72h	01.08.2025 09:19	04.08.2025 14:53	30		nein		
129	9	T100a	72h	01.08.2025 09:18	04.08.2025 15:50	10		nein		
130	10	T100a	72h	01.08.2025 09:17	04.08.2025 16:48	5		nein		
131	10	T100a	1h	05.08.2025 07:46	05.08.2025 08:46	5		nein		
132	9	T100a	1h	05.08.2025 08:42	05.08.2025 09:46	10		nein		
133	8	T100a	1h	05.08.2025 09:45	05.08.2025 10:45			nein		
134	6	T5a	72h	05.08.2025 10:43	08.08.2025 08:32		Bild danach, Vorsättigung durch Regenereignis	nein		
135	7	T5a	72h	05.08.2025 10:29	08.08.2025 09:29		Vorsättigung durch Regenereignis	nein		
136	8	T5a	72h	05.08.2025 09:42	08.08.2025 10:26	35	Vorsättigung durch Regenereignis	nein		
137	9	T5a	72h	05.08.2025 08:27	08.08.2025 11:24	10	Vorsättigung durch Regenereignis	nein		
138	10	T5a	72h	05.08.2025 07:42	08.08.2025 12:21	5	Vorsättigung durch Regenereignis	nein		
139	1	T5a	72h	05.08.2025 10:30	08.08.2025 13:25	10	Vorsättigung durch Regenereignis	nein		
140	2	T5a	72h	05.08.2025 10:36	08.08.2025 14:23	15	Vorsättigung durch Regenereignis	nein		
141	3	T5a	72h	05.08.2025 10:39	08.08.2025 15:20		Vorsättigung durch Regenereignis	nein		
142	6	T1a	72h	08.08.2025 00:00	11.08.2025 07:40			nein		
143	7	T1a	72h	08.08.2025 00:00	11.08.2025 08:37			nein		
144	8	T1a	72h	08.08.2025 00:00	11.08.2025 09:35	10		nein		
145	9	T1a	72h	08.08.2025 00:00	11.08.2025 10:33	10		nein		
146	10	T1a	72h	08.08.2025 00:00	11.08.2025 11:30	5		nein		
147	1	T1a	72h	08.08.2025 00:00	11.08.2025 12:30	10		nein		
148	2	T1a	72h	08.08.2025 00:00	11.08.2025 13:27	20		nein		
149	3	T1a	72h	08.08.2025 00:00	11.08.2025 14:24	5		nein		
150	4	T1a	72h	08.08.2025 00:00	11.08.2025 15:21	5		nein		
151	5	T1a	72h	08.08.2025 00:00	11.08.2025 16:18	20		nein		
152	6	T5a	4h	12.08.2025 08:27	12.08.2025 12:27	5		nein		
153	7	T5a	4h	12.08.2025 09:25	12.08.2025 13:25			nein		
154	8	T5a	4h	12.08.2025 10:23	12.08.2025 14:23	10		nein		
155	9	T5a	4h	12.08.2025 11:20	12.08.2025 15:21	10		nein		
156	10	T5a	4h	12.08.2025 12:16	12.08.2025 16:18	5		nein		
157	1	T100a	72h	12.08.2025 10:34	15.08.2025 07:22	25		ja	16,6	nein
158	3	T100a	72h	12.08.2025 10:47	15.08.2025 09:42	10		ja	12,8	nein
159	4	T100a	72h	12.08.2025 10:53	15.08.2025 10:41	10		ja	13,5	nein
160	5	T100a	72h	12.08.2025 11:01	15.08.2025 11:41	35		ja	14,2	nein
161	6	T100a	72h	12.06.2025 12:16	15.08.2025 12:45		Bild danach gemacht	ja	15,1	nein
162	7	T100a	72h	12.08.2025 13:30	15.08.2025 13:42			ja	16,0	nein
163	8	T100a	72h	12.08.2025 14:30	15.08.2025 14:39	35		ja	15,9	nein
164	9	T100a	72h	12.08.2025 15:18	15.08.2025 15:36	15		ja	18,1	nein
165	10	T100a	72h	12.08.2025 16:06	15.08.2025 16:34	5		ja	18,0	nein

#ID	Dach	Beregnungs- versuch	Vorsättigungs- szenario	Ende Vorsättigung	Startzeitpunkt Beregnungsversuch	Bewuchshöhe [cm]	Bemerkung	Datenverluste		
								vorhanden?	Datenverlust [%]	Beregnungs- versuch betroffen?
166	6	T1a	72h	15.08.2025 12:48	18.08.2025 07:38			ja	0,2	nein
167	7	T1a	72h	15.08.2025 13:43	18.08.2025 08:35			ja	0,2	nein
168	8	T1a	72h	15.08.2025 14:51	18.08.2025 09:33	35		ja	0,2	nein
169	9	T1a	72h	15.08.2025 15:44	18.08.2025 10:31	10		ja	0,2	nein
170	10	T1a	72h	15.08.2025 16:45	18.08.2025 11:31	5		ja	0,2	nein
171	1	T1a	72h	15.08.2025 07:38	18.08.2025 12:30	25		ja	0,2	nein
172	2	T1a	72h	15.08.2025 08:19	18.08.2025 13:53	35		nein		
173	4	T5a	72h	15.08.2025 10:46	18.08.2025 15:04	10		nein		
174	5	T5a	72h	15.08.2025 11:56	18.08.2025 16:04	35	Bodenfeuchtesensor komplett ausgefallen, daher großer Fehler, aber restliche Werte i.O.	ja	100,0	ja
175	6	T100a	4h	19.08.2025 08:48	19.08.2025 12:44		Korrigiert mit Ringspeicher	ja	2,1	nein
176	7	T100a	4h	19.08.2025 09:47	19.08.2025 13:41			ja	2,2	nein
177	8	T100a	4h	19.08.2025 10:44	19.08.2025 14:39	5	Korrigiert mit Ringspeicher	nein		
178	9	T100a	4h	19.08.2025 11:41	19.08.2025 15:36	10		nein		
179	10	T100a	4h	19.08.2025 12:42	19.08.2025 16:35	5		nein		
180	6	T5a	1h	20.08.2025 08:30	20.08.2025 09:30			nein		
181	7	T5a	1h	20.08.2025 11:58	20.08.2025 12:58		Bild fehlt	nein		
182	6	T100a	1h	21.08.2025 08:30	21.08.2025 09:29			nein		
183	7	T100a	1h	21.08.2025 09:28	21.08.2025 10:31			nein		
184	8	T5a	1h	21.08.2025 10:30	21.08.2025 11:30	25		nein		
185	1	T5a	72h	19.08.2025 08:37	22.08.2025 07:35	15		nein		
186	2	T5a	72h	19.08.2025 08:29	22.08.2025 08:33	35		nein		
187	3	T5a	72h	19.08.2025 08:20	22.08.2025 09:30	5		nein		
188	4	T5a	72h	19.08.2025 08:11	22.08.2025 10:32	5		nein		
189	5	T5a	72h	19.08.2025 08:02	22.08.2025 11:30	30	Bodenfeuchtesensor komplett ausgefallen, daher großer Fehler, aber restliche Werte i.O.	ja	100,0	ja
190	1	T1a	72h	22.08.2025 07:25	25.08.2025 08:13	25		nein		
191	2	T100a	72h	22.08.2025 07:38	25.08.2025 09:11	35		nein		
192	3	T100a	72h	22.08.2025 07:39	25.08.2025 10:08	5		nein		
193	4	T100a	72h	22.08.2025 07:25	25.08.2025 11:06	5		nein		
194	5	T1a	72h	22.08.2025 07:39	25.08.2025 12:06	30		ja	83,9	ja
195	7	T100a	72h	22.08.2025 12:21	25.08.2025 13:11			nein		
196	8	T1a	72h	22.08.2025 12:20	25.08.2025 14:09	10		nein		
197	9	T100a	72h	22.08.2025 12:38	25.08.2025 15:10	10		nein		
198	10	T1a	72h	22.08.2025 12:38	25.08.2025 16:11	5		nein		
199	8	T100a	4h	26.08.2025 08:37	26.08.2025 12:34	10		nein		
200	7	T1a	4h	26.08.2025 09:35	26.08.2025 13:32			nein		
201	6	T100a	4h	26.08.2025 10:35	26.08.2025 14:30			nein		
202	8	T1a	4h	27.08.2025 07:22	27.08.2025 11:22	10		nein		
203	5	T1a	4h	27.08.2025 08:20	27.08.2025 12:22	30		ja	0,1	nein
204	2	T1a	4h	27.08.2025 09:14	27.08.2025 13:20	35		nein		
205	1	T1a	4h	27.08.2025 10:13	27.08.2025 14:20	25		nein		

Klassifikation: C1 - Öffentlich
Zielgruppe: MaNuGrün-Projekt

Versuchsdokumentation

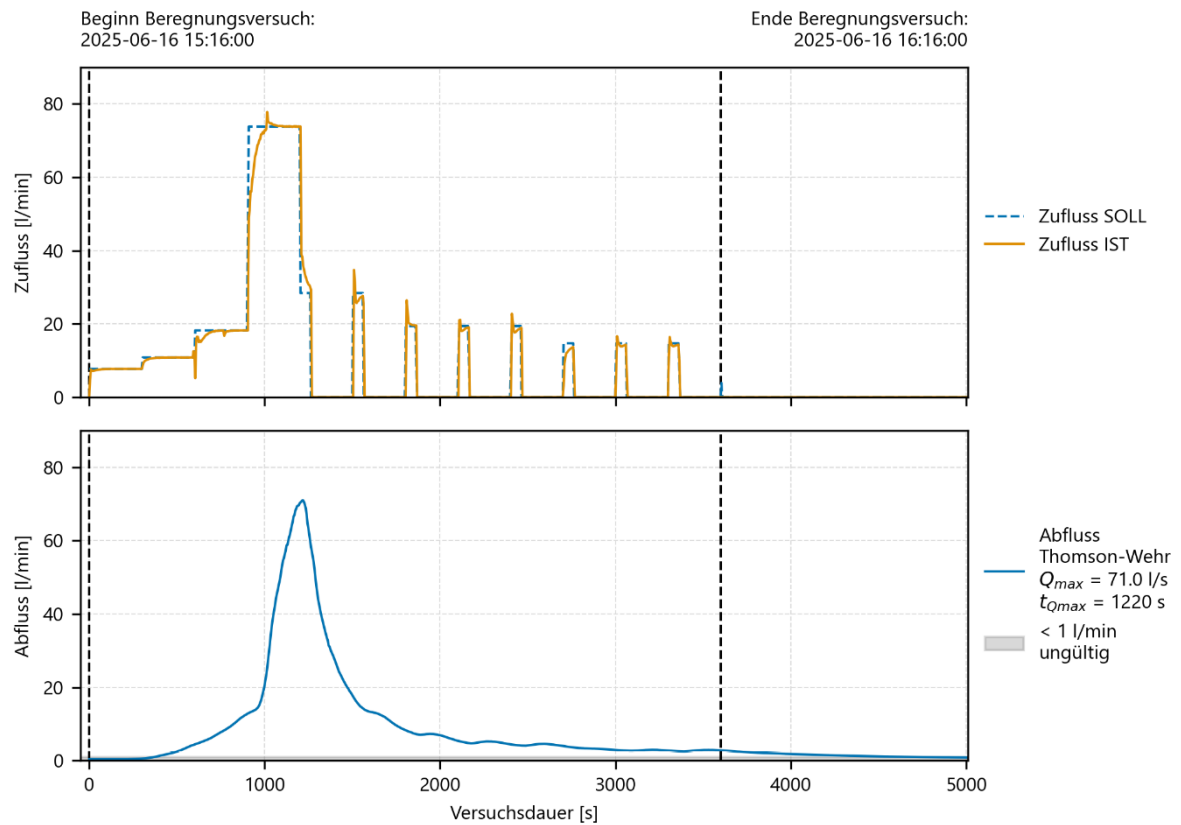
#ID	Dach	Beregnungs- versuch	Vorsättigungs- szenario	Ende Vorsättigung	Startzeitpunkt Beregnungsversuch	Bewuchshöhe [cm]	Bemerkung	Datenverluste		
								vorhanden?	Datenverlust [%]	Beregnungs- versuch betroffen?
206	1	T5a	4h	29.08.2025 08:58	29.08.2025 12:58	30		nein		
207	5	T5a	4h	29.08.2025 09:58	29.08.2025 13:58	30		ja	13,5	nein
208	1	T100a	4h	01.09.2025 08:51	01.09.2025 12:51	30		nein		
209	2	T100a	72h	29.08.2025 12:38	01.09.2025 10:07	35		nein		
210	3	T5a	72h	29.08.2025 12:41	01.09.2025 11:06	5		nein		
211	5	T100a	4h	01.09.2025 09:51	01.09.2025 13:51	30		nein		
212	1	T1a	1h	02.09.2025 10:28	02.09.2025 11:29	30		nein		
213	5	T1a	1h	02.09.2025 09:30	02.09.2025 10:30	30		nein		
214	1	T5a	1h	03.09.2025 09:50	03.09.2025 10:50	30		nein		
215	5	T5a	1h	03.09.2025 10:47	03.09.2025 11:48	30		nein		
216	3	T5a	72h	05.09.2025 02:45	08.09.2025 09:27	5	Vorsättigung durch Regenereignis	ja	1,5	ja
217	4	T100a	72h	05.09.2025 02:03	08.09.2025 10:27	5	Vorsättigung durch Regenereignis	nein		
218	1	T100a	4h	08.09.2025 09:25	08.09.2025 13:25	30		nein		
219	1	T5a	1h	09.09.2025 09:12	09.09.2025 10:12	30		nein		
220	5	T1a	1h	09.09.2025 11:13	09.09.2025 12:13	35		nein		
221	4	T100a	72h	08.09.2025 10:30	11.09.2025 09:49	5		nein		
222	3	T5a	1h	11.09.2025 09:47	11.09.2025 10:47	5		nein		

Eigentümer: Andrea Bernhardt
Datum: 23.02.2026

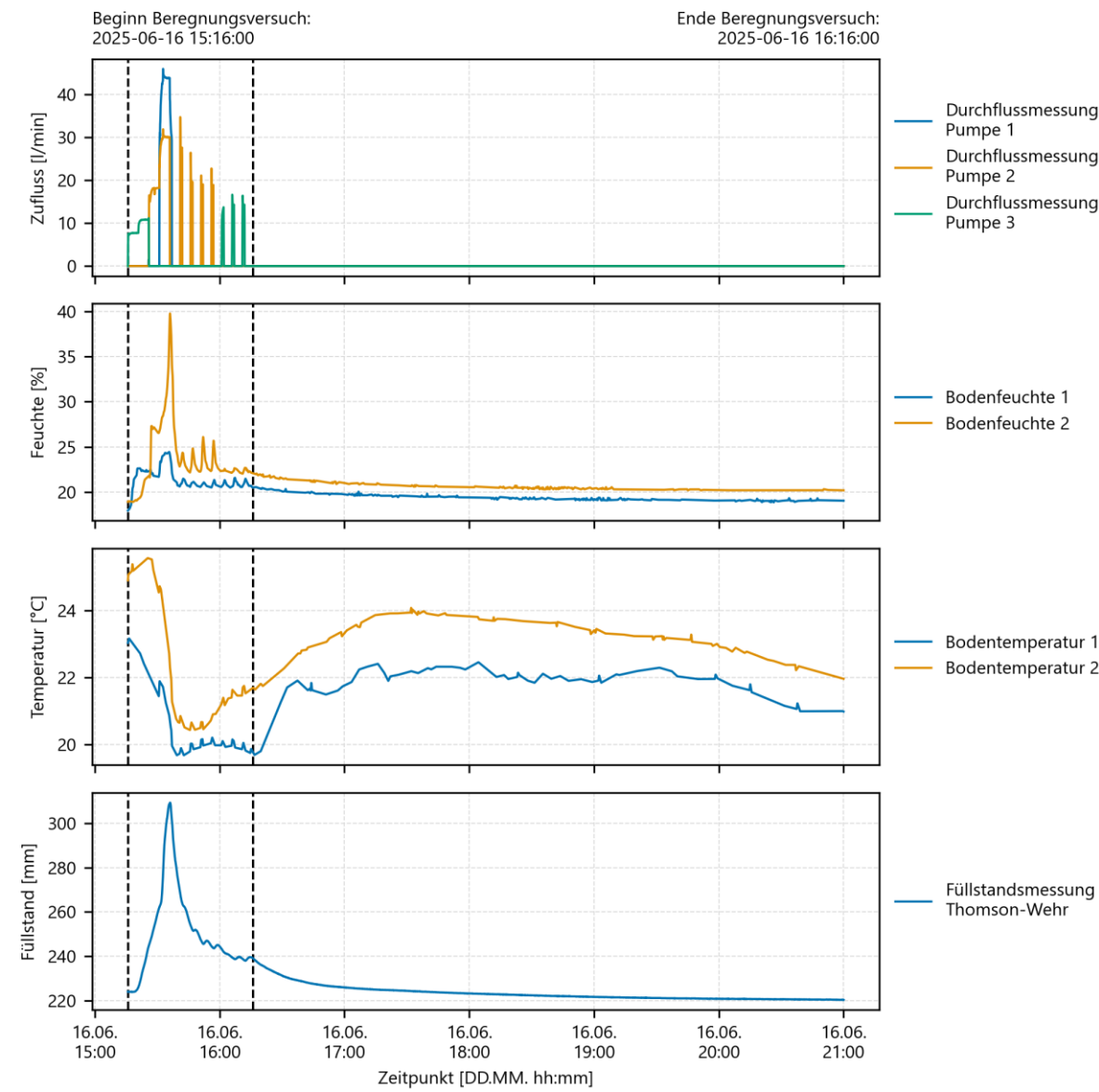
Seite 6 von 6

Anhang A - 5: Beispielhafter Versuchssteckbrief

Versuchsübersicht zum Versuch ID11_Dach10_T100a_1h

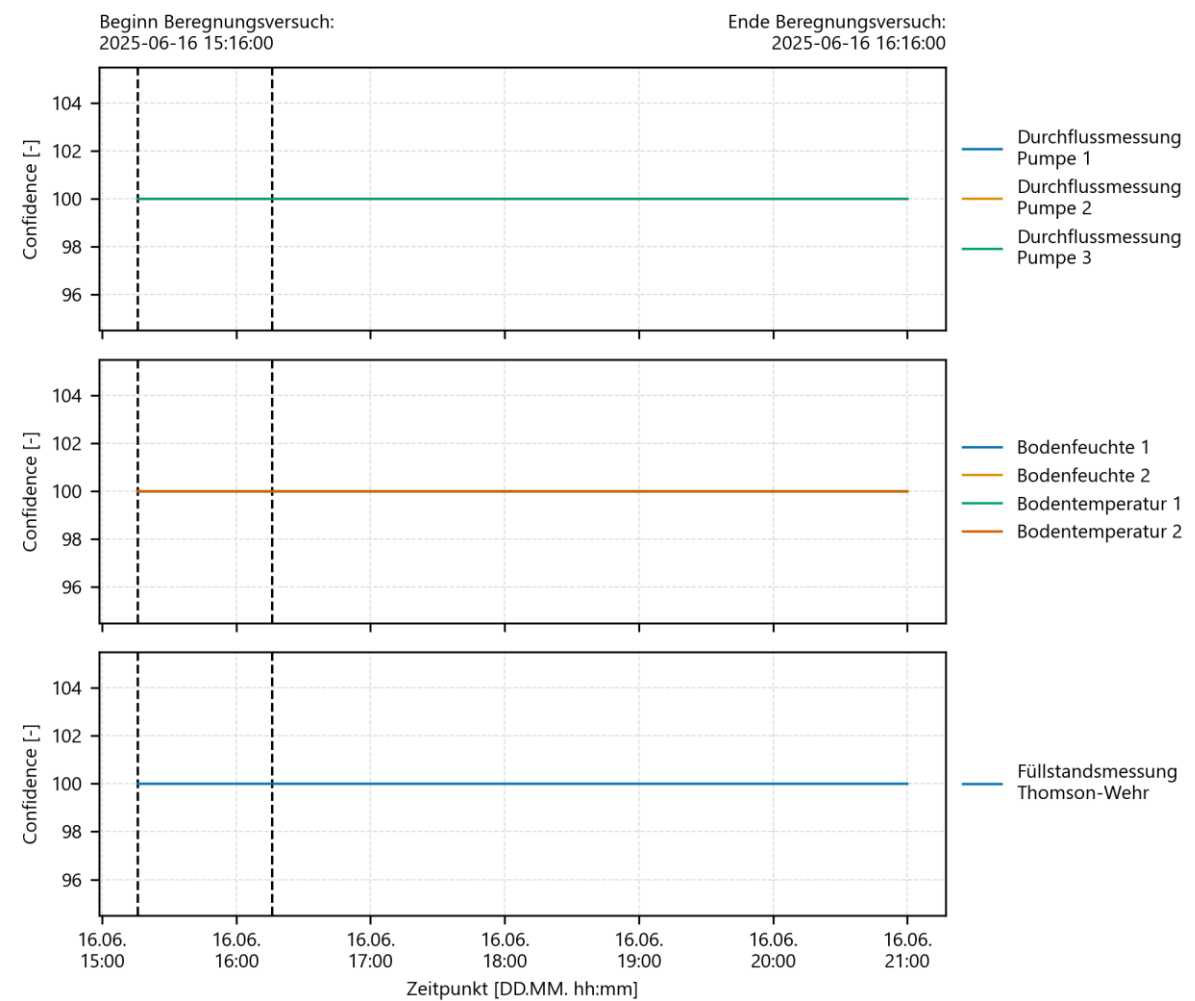


Erhobene Daten

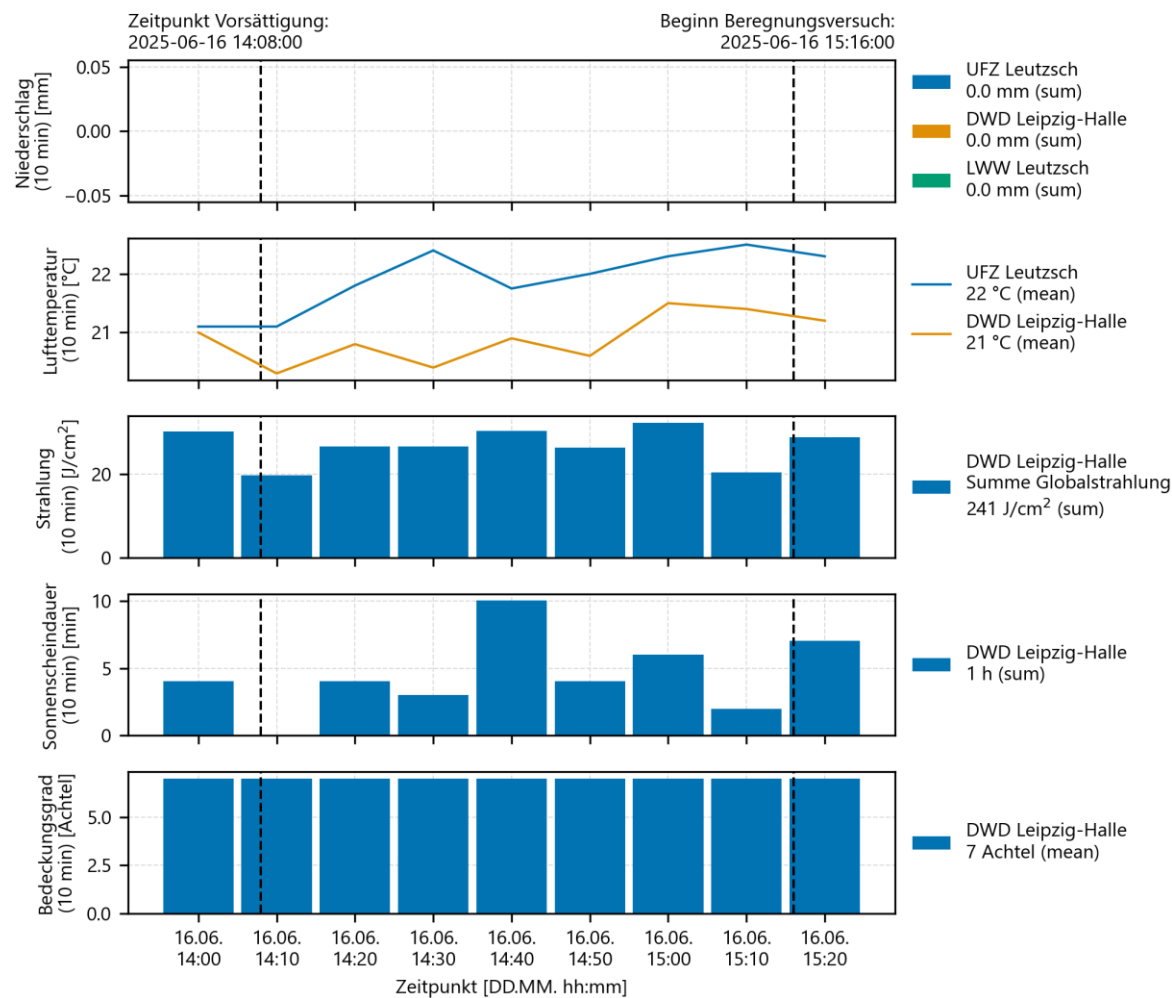


Datenausfälle während des Beregnungsversuchs

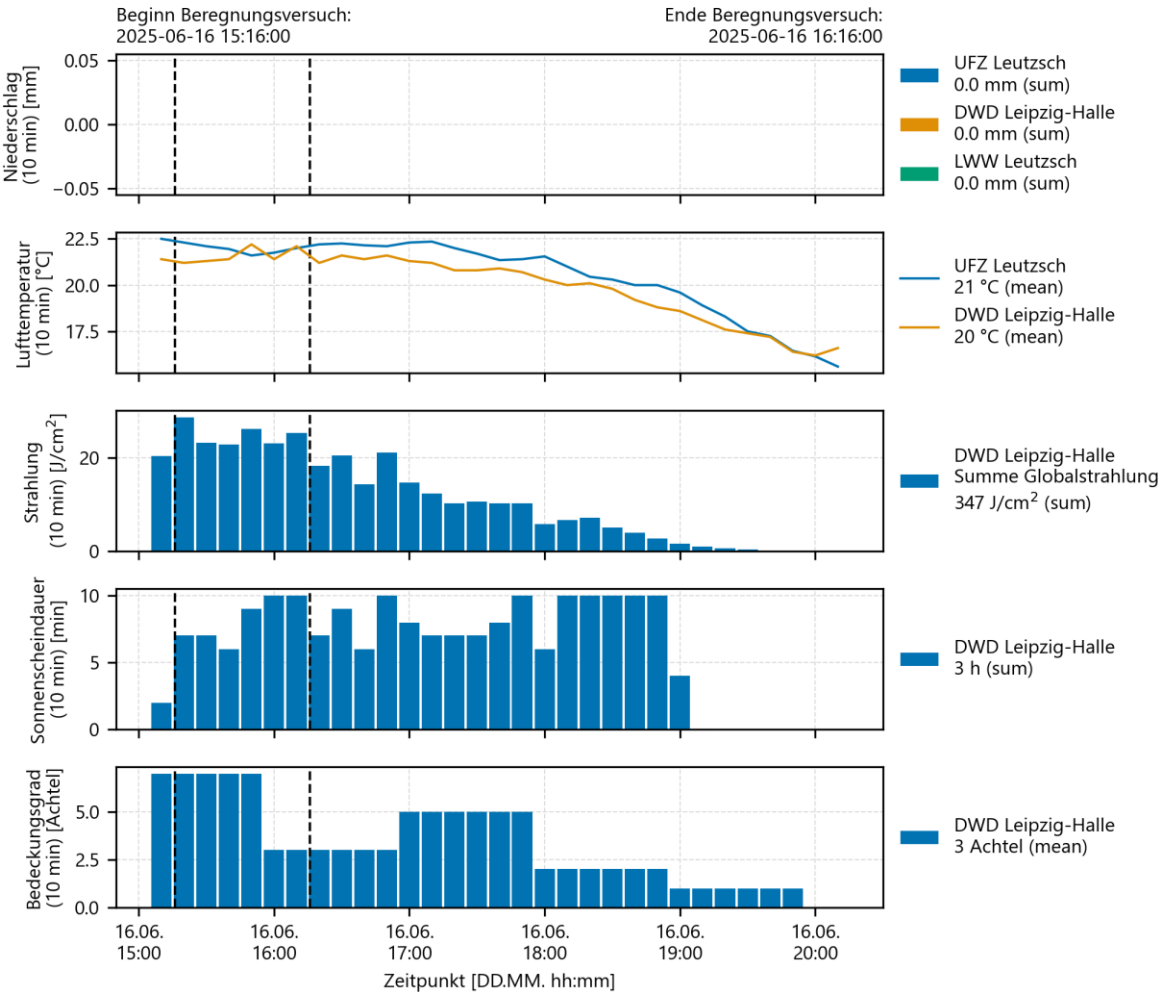
Keine Datenausfälle



Klimadaten während der Vorsättigung



Klimadaten während des Beregnungsversuchs

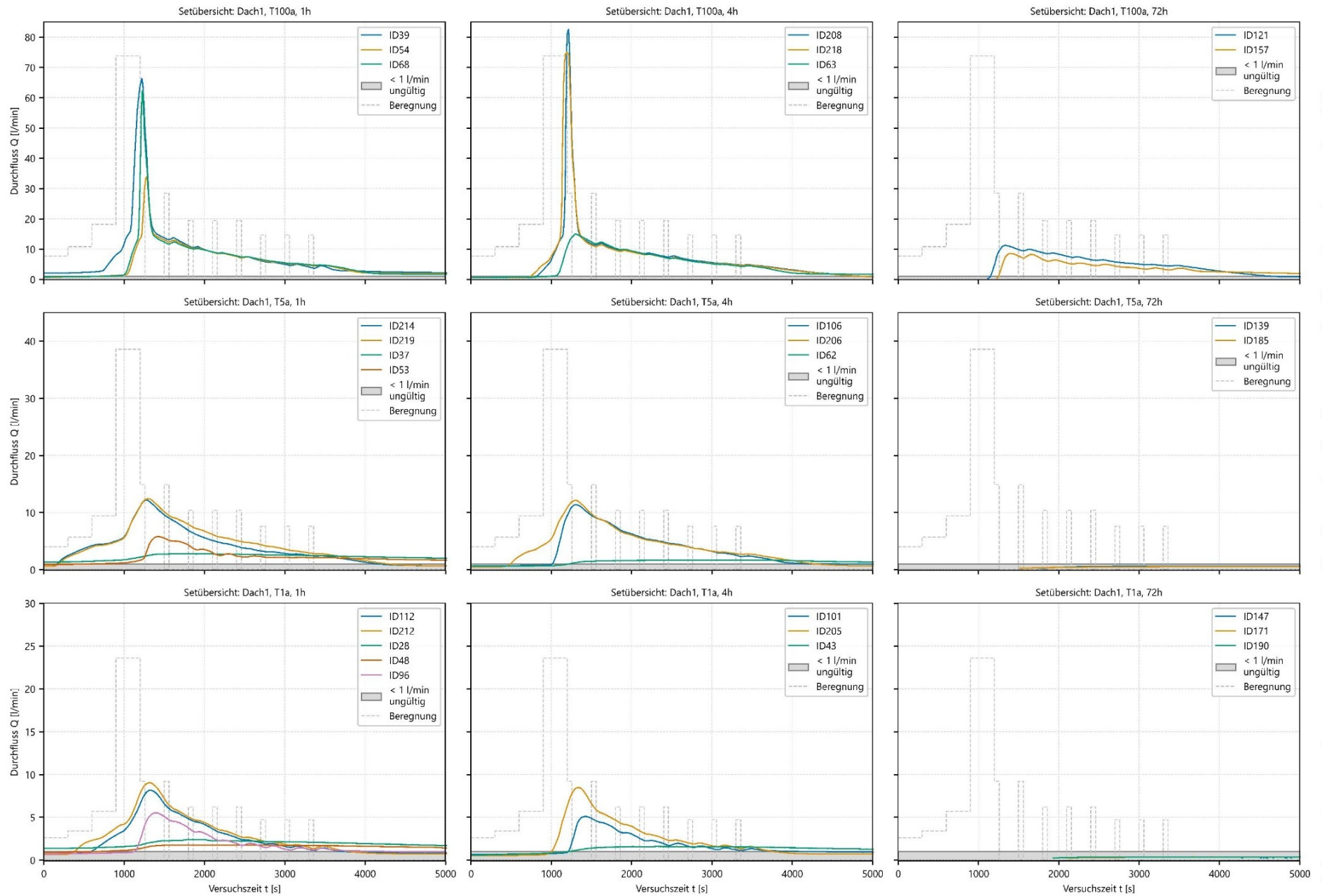


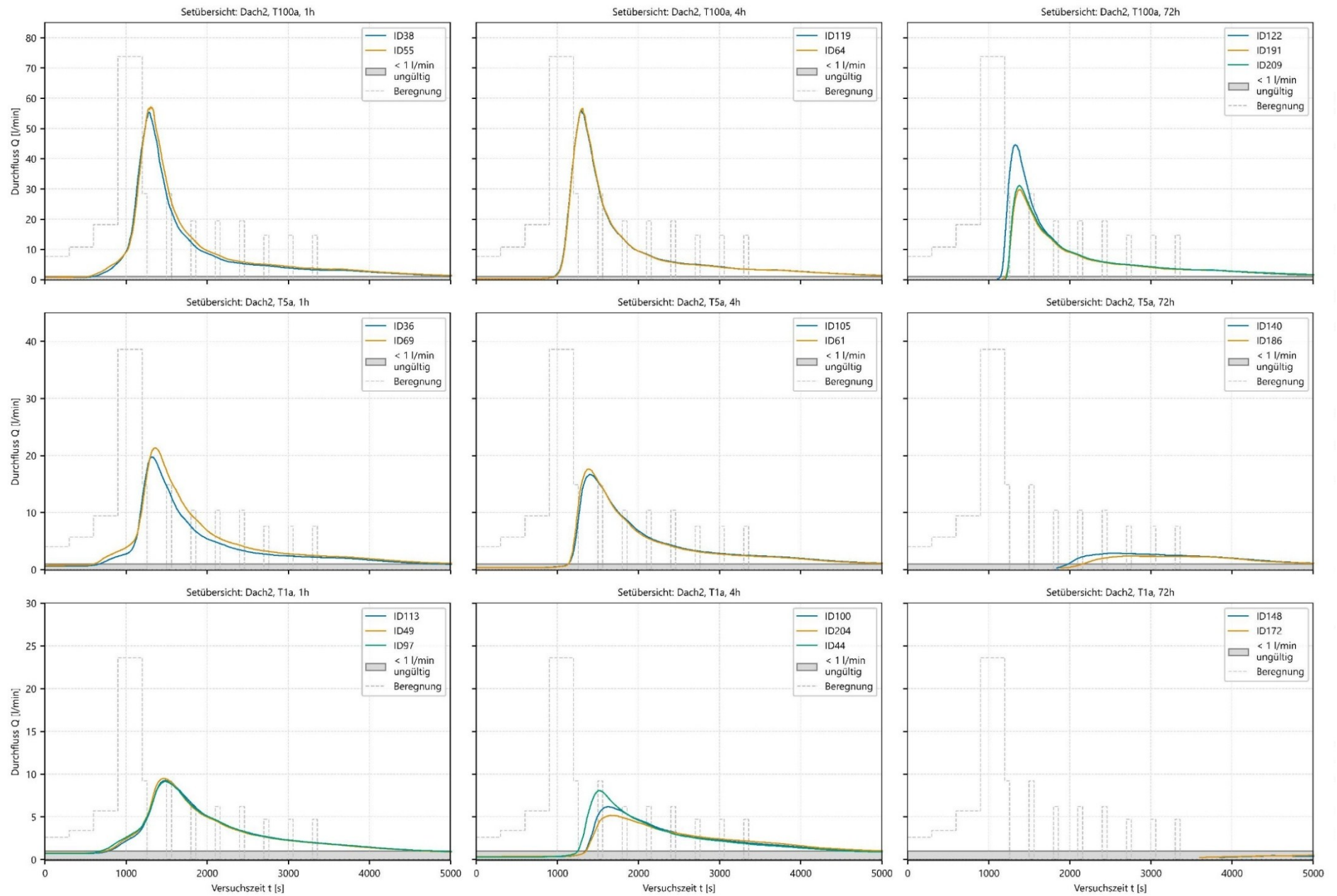
Zustandsdokumentation Dach

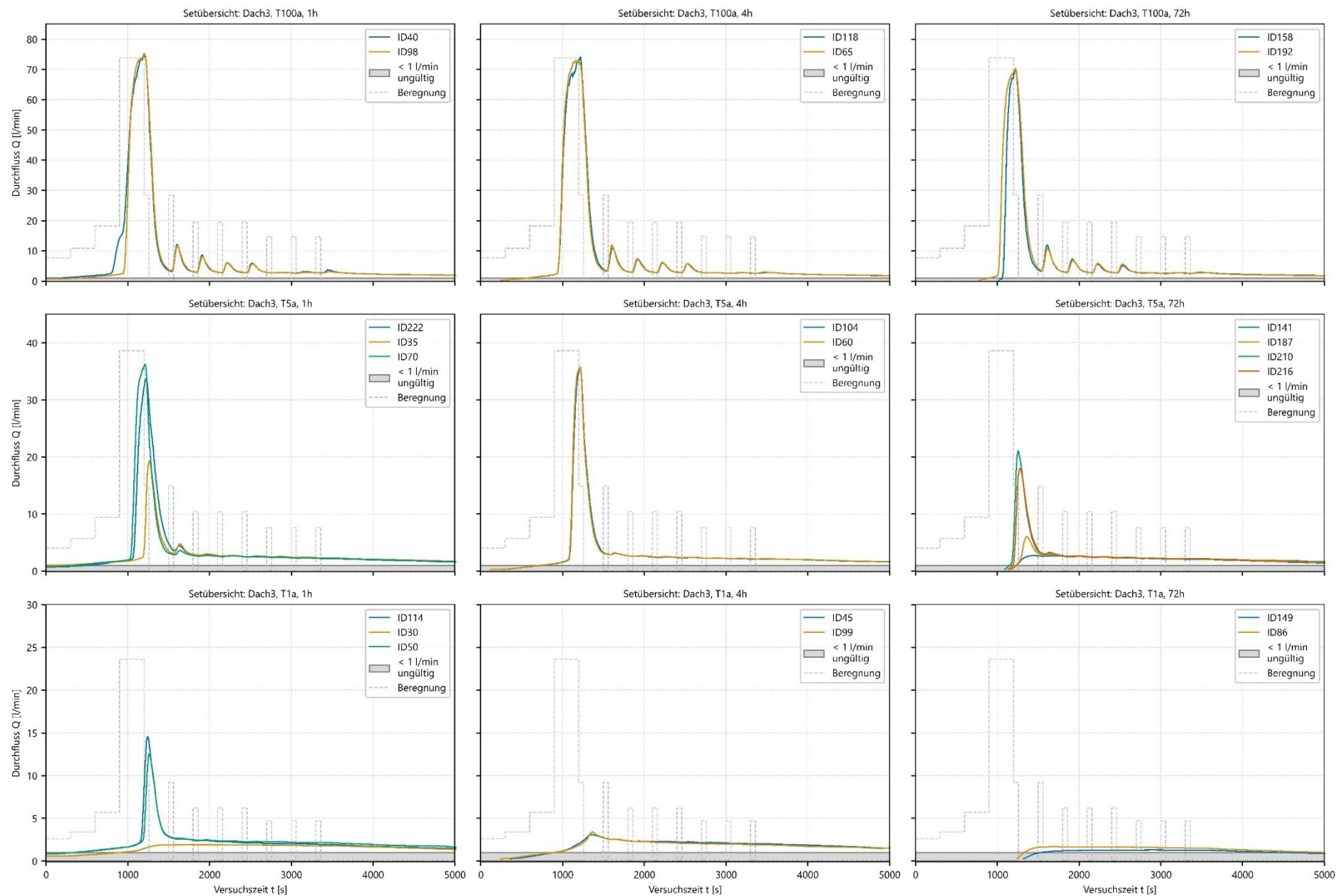
Bewuchshöhe: 5 cm

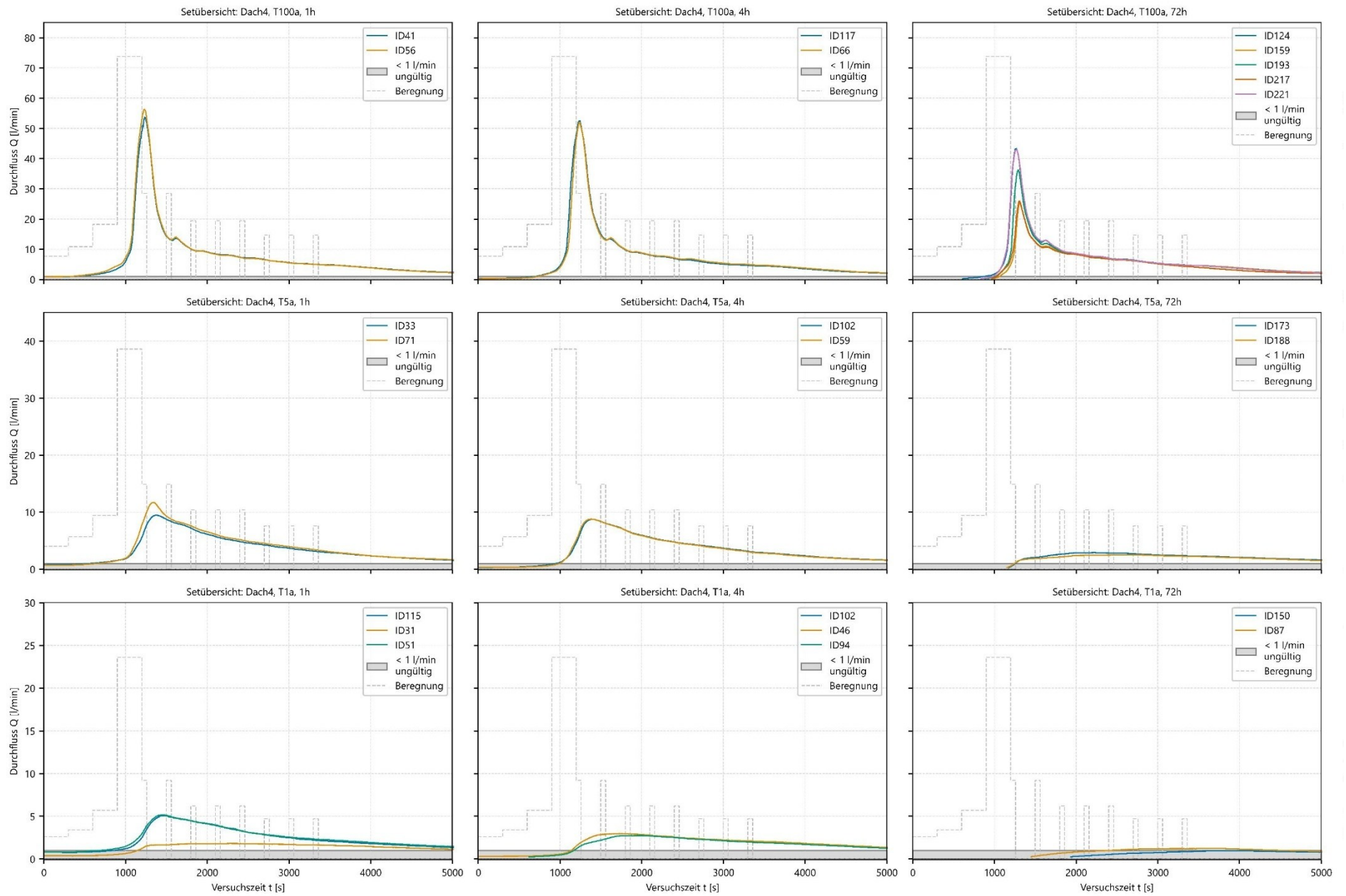


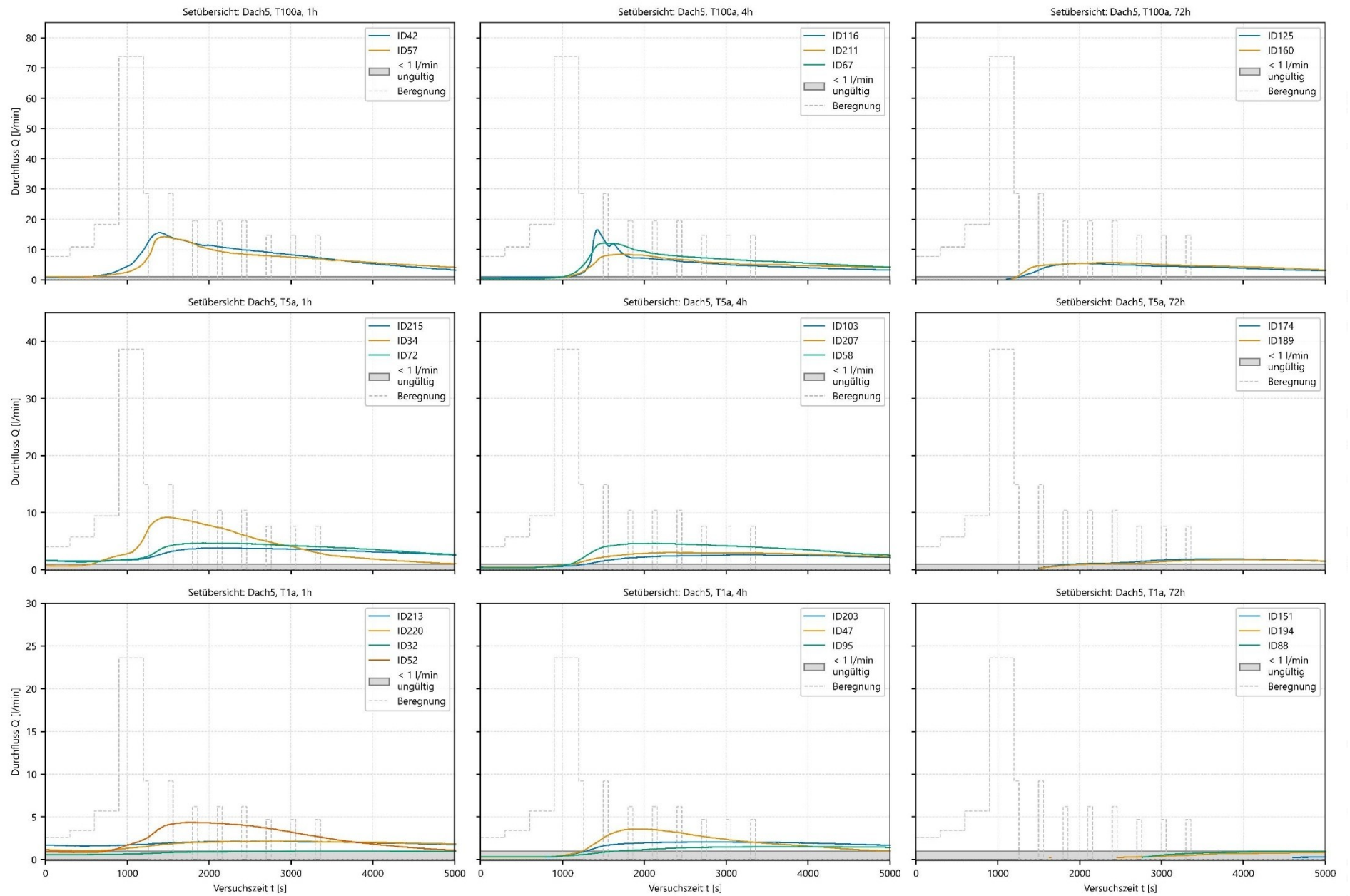
Anhang A - 6: Versuchsübersicht je Dach – Durchflüsse

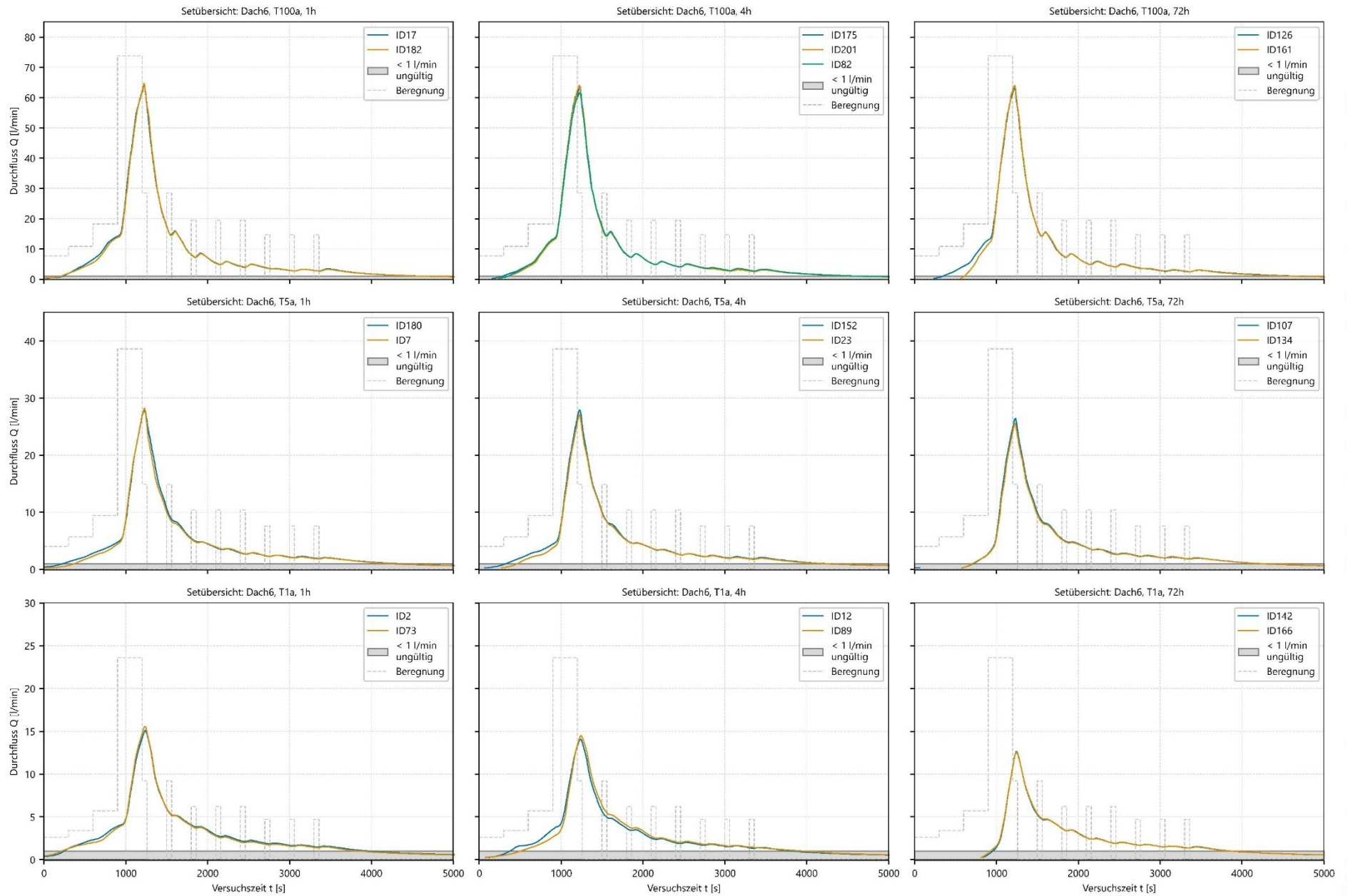


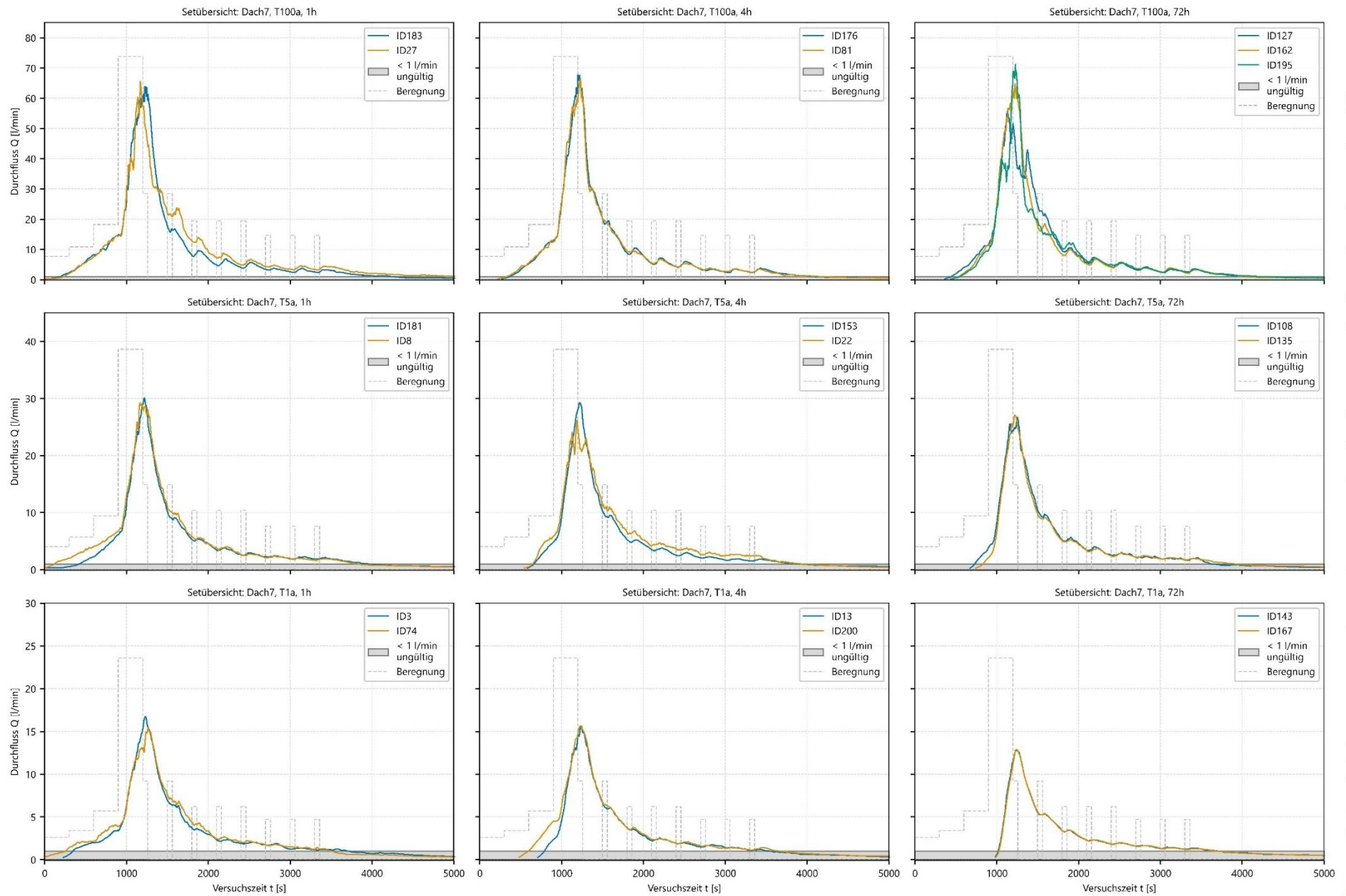


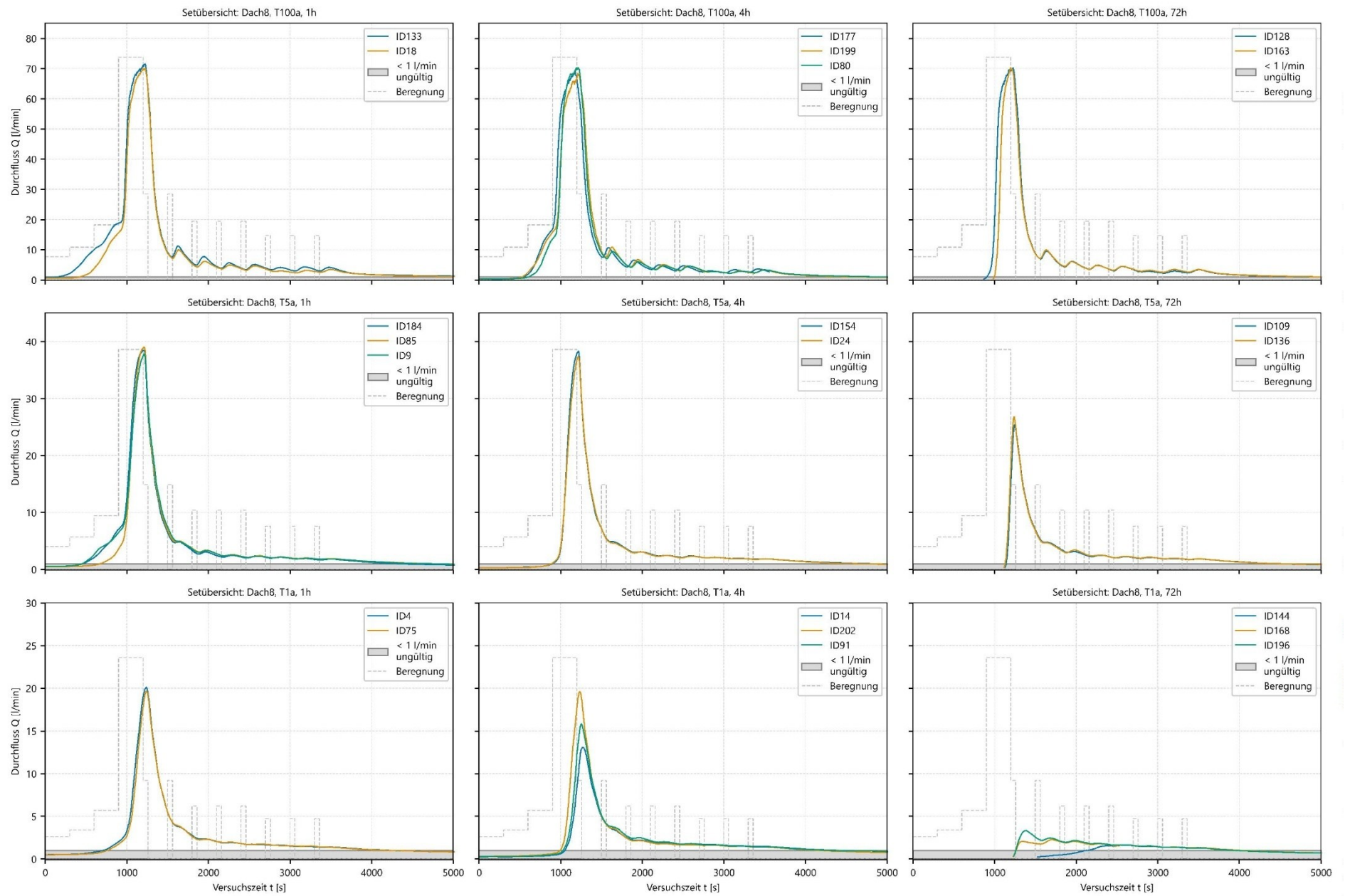


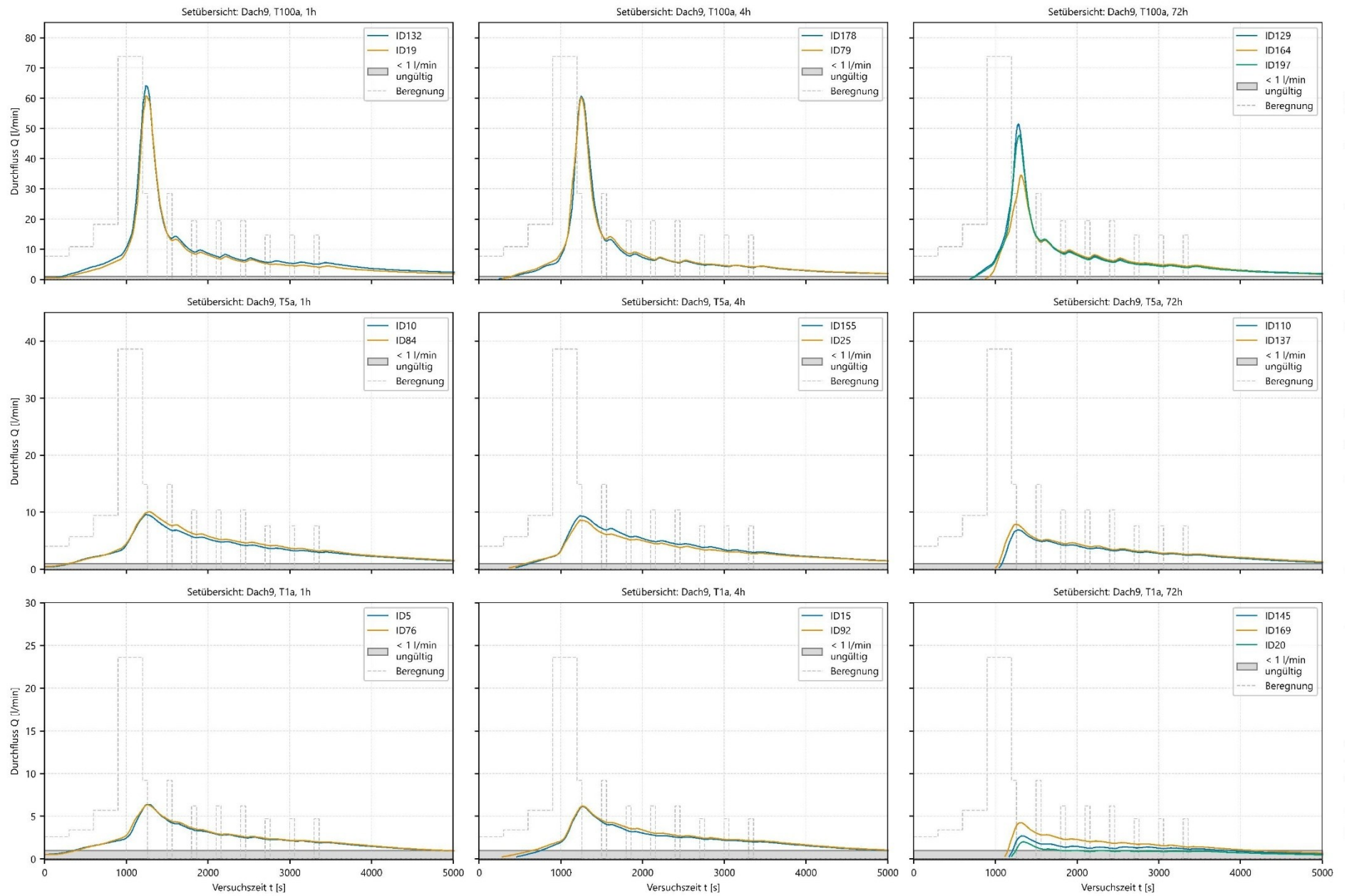


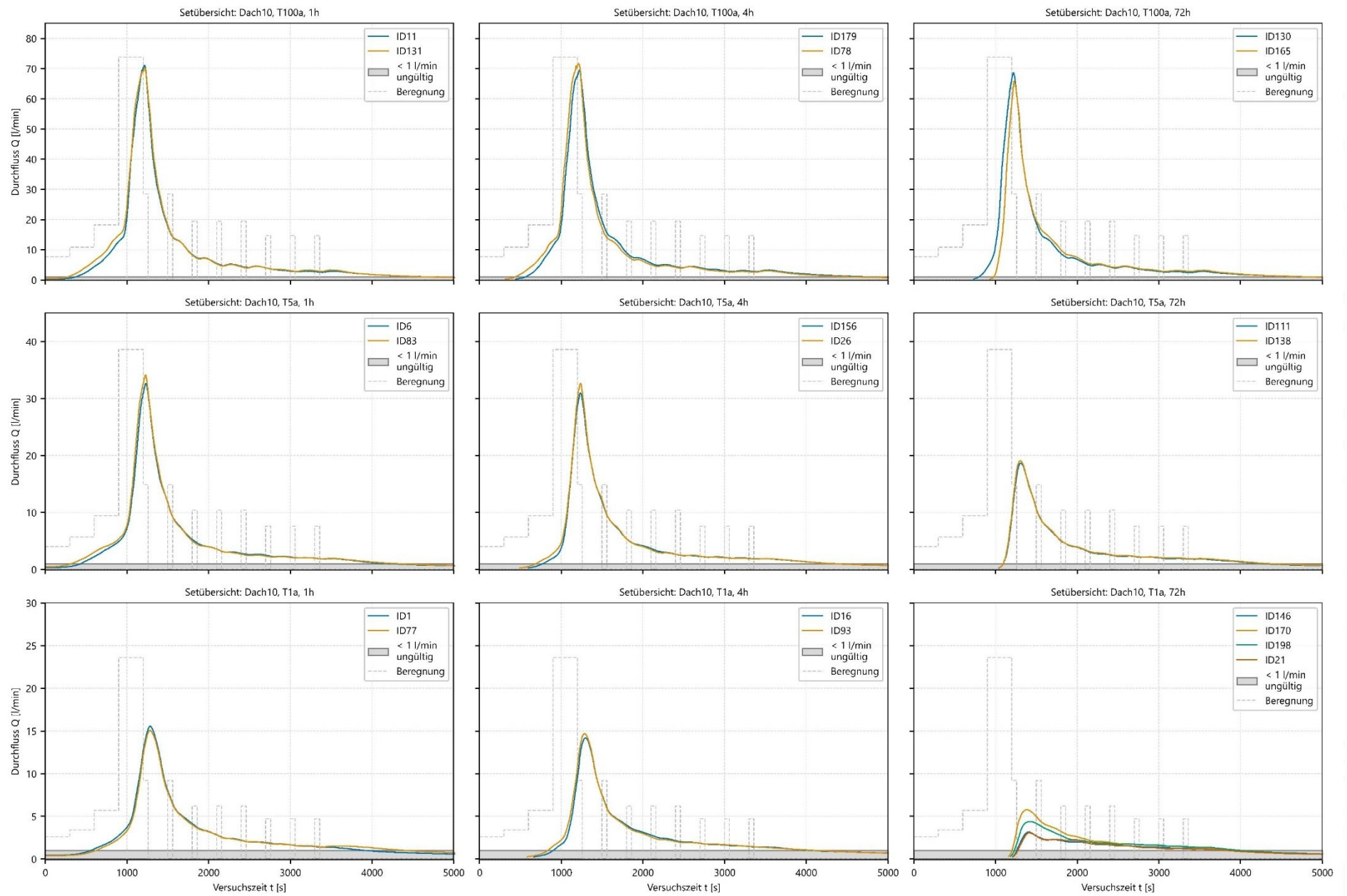




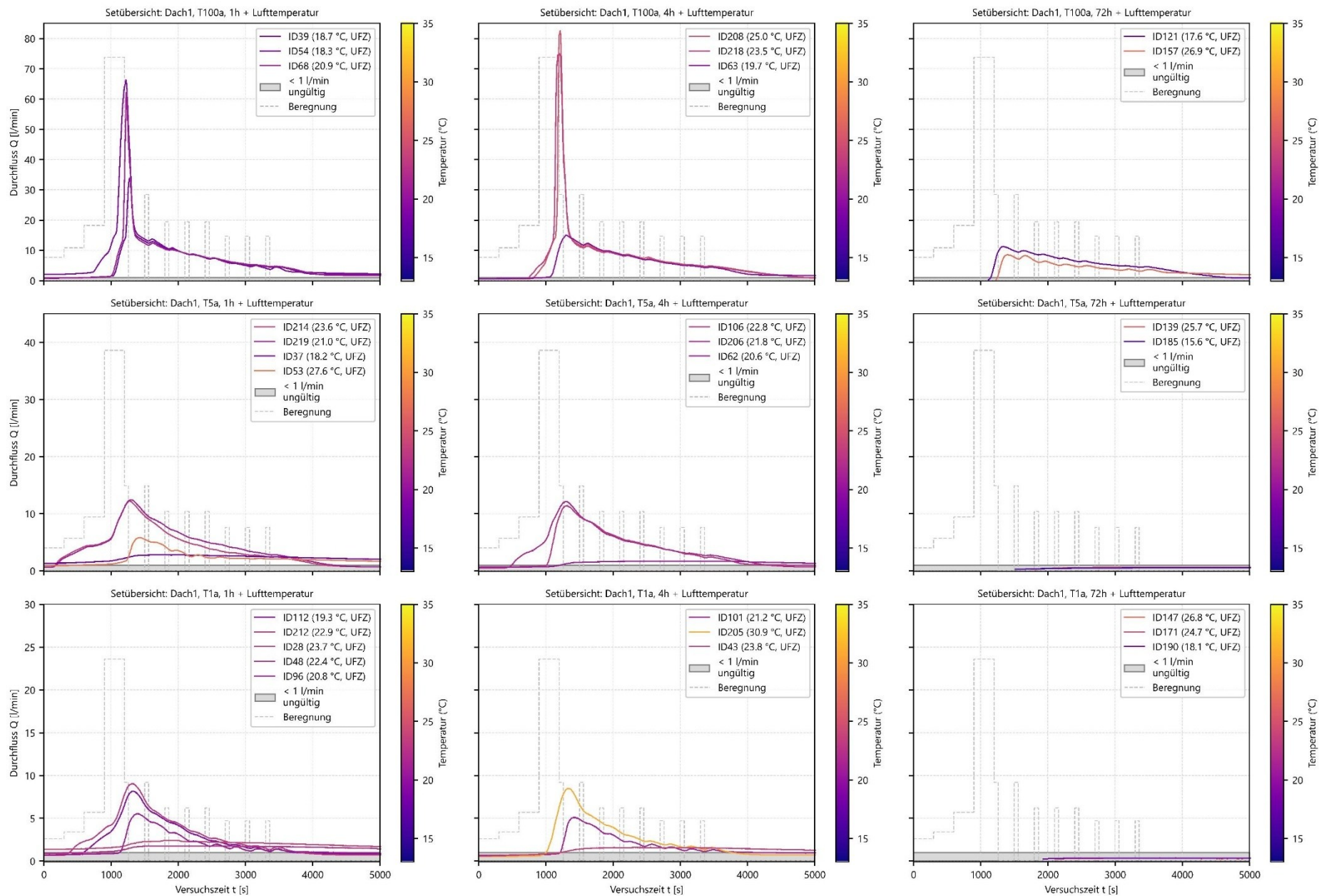


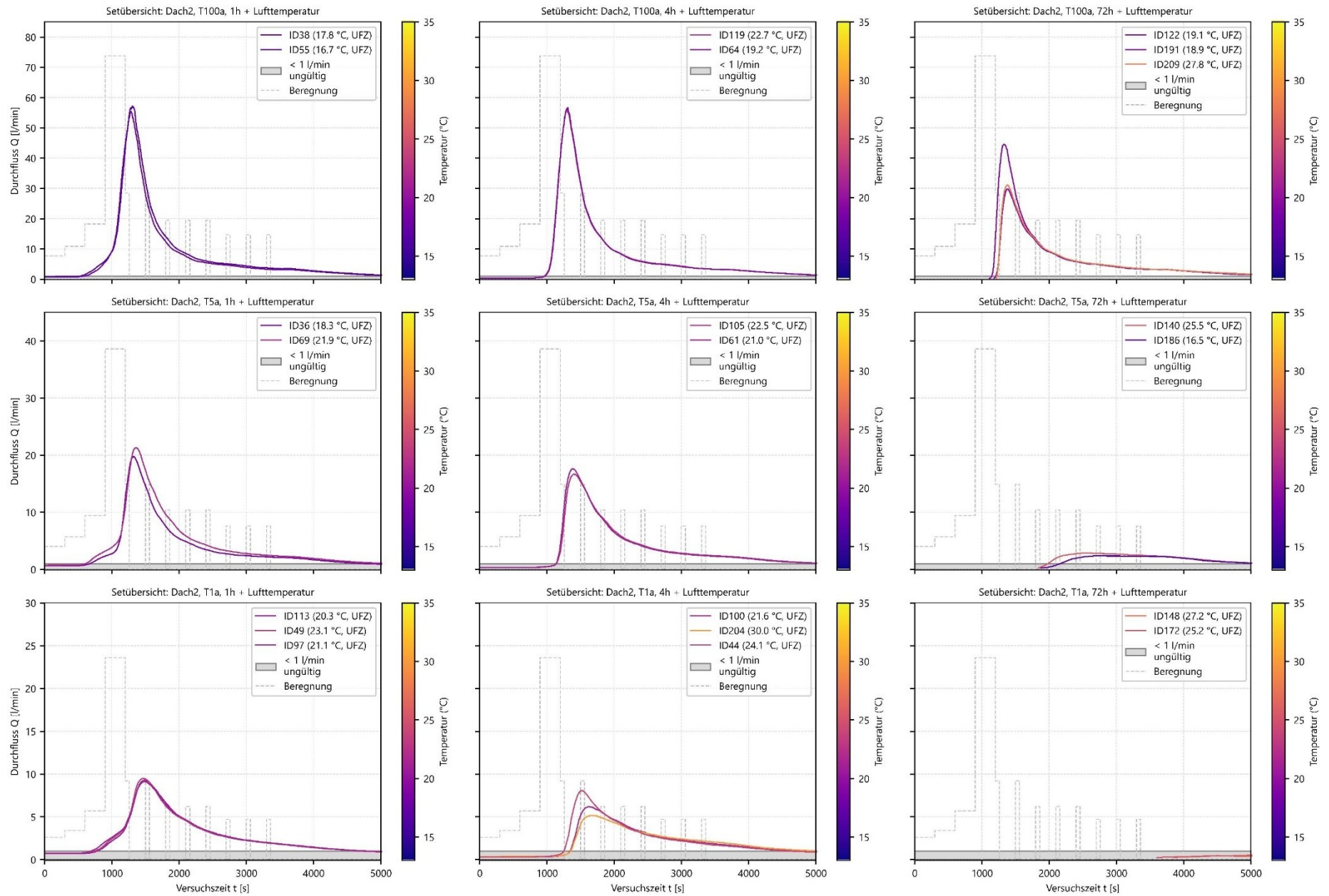


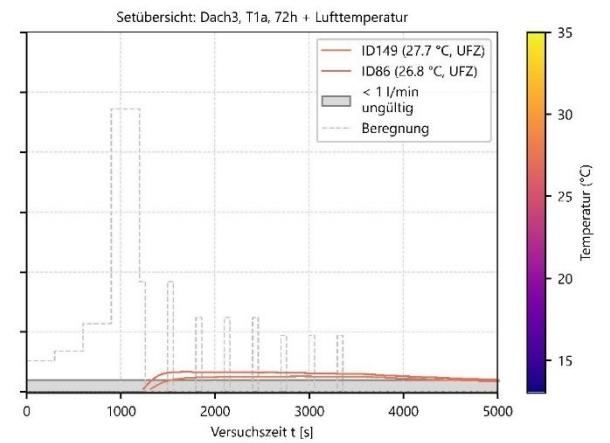
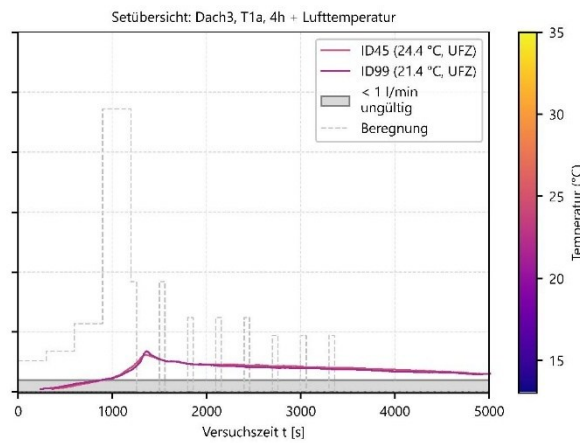
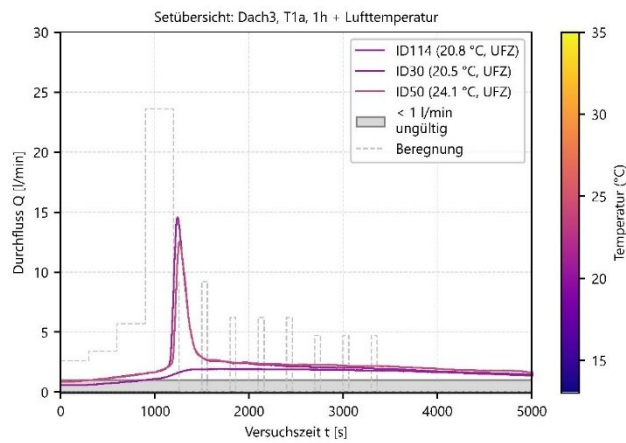
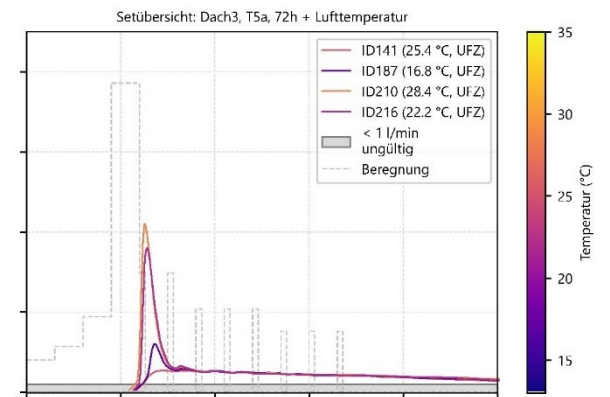
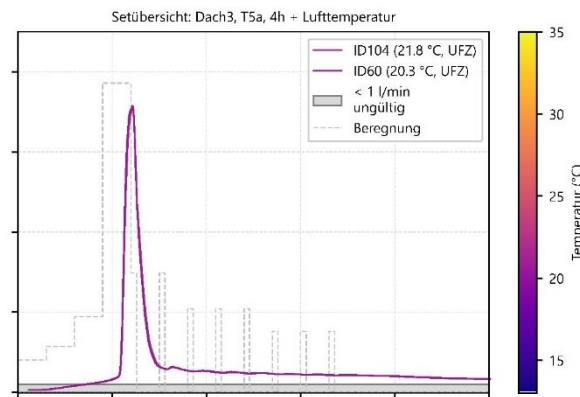
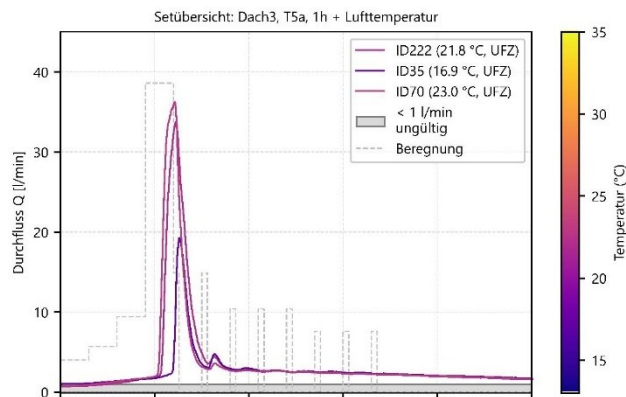
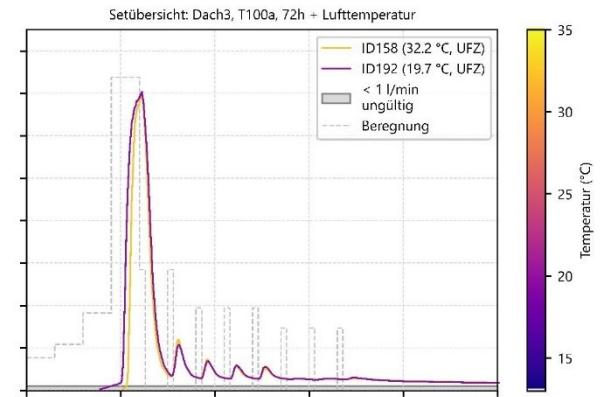
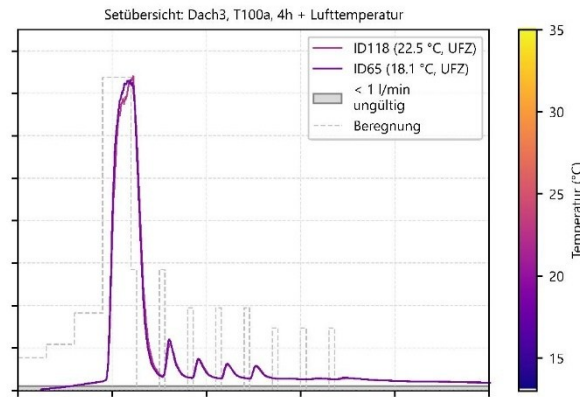
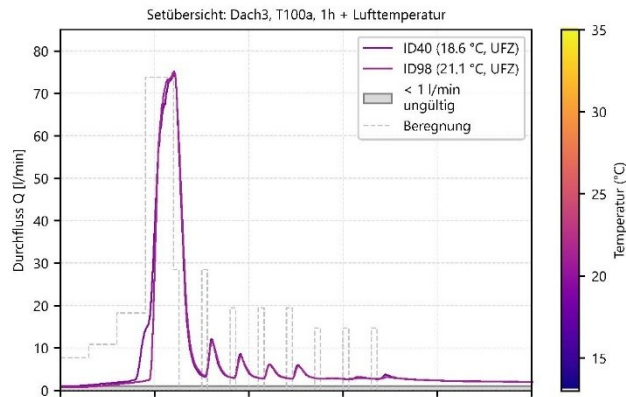


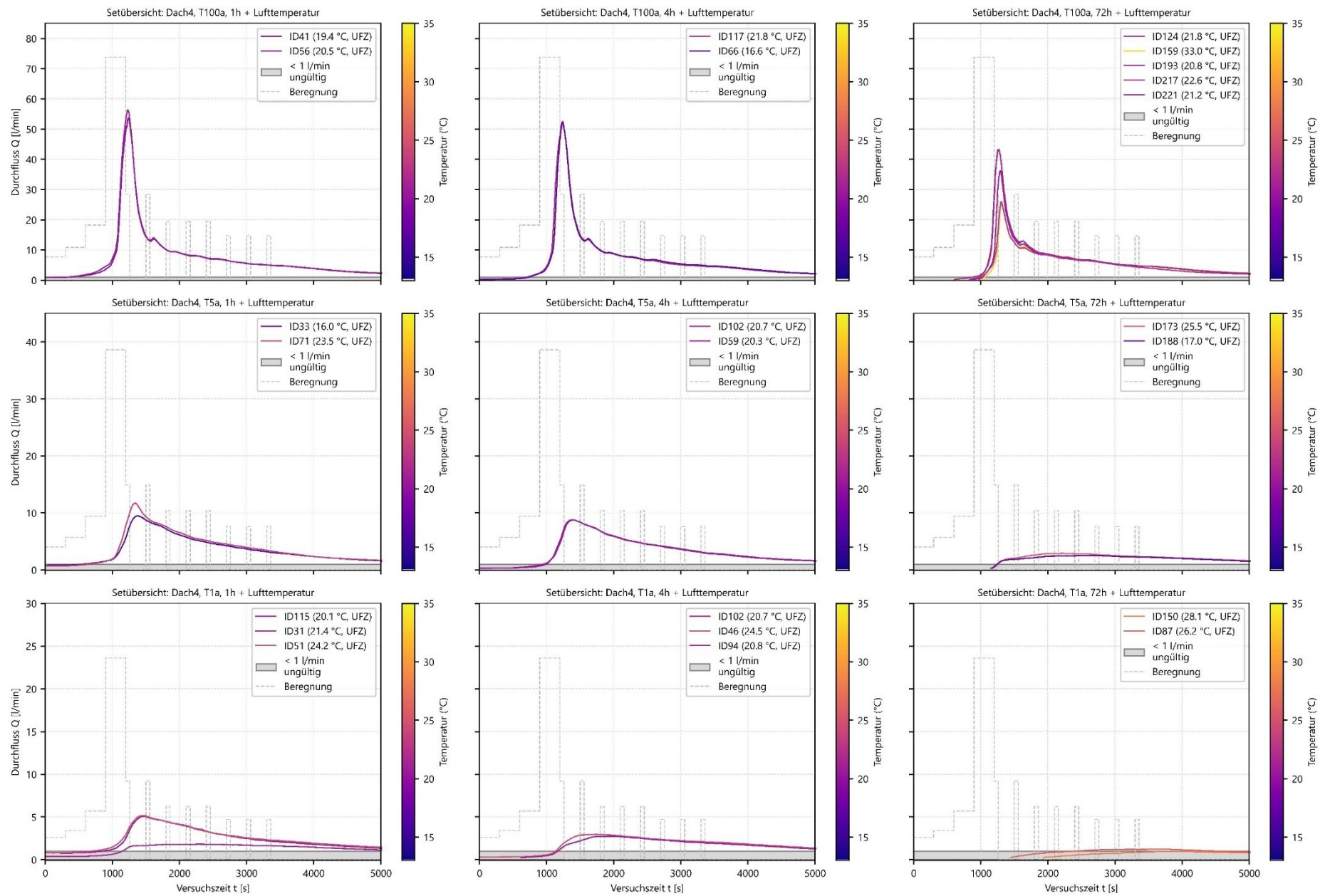


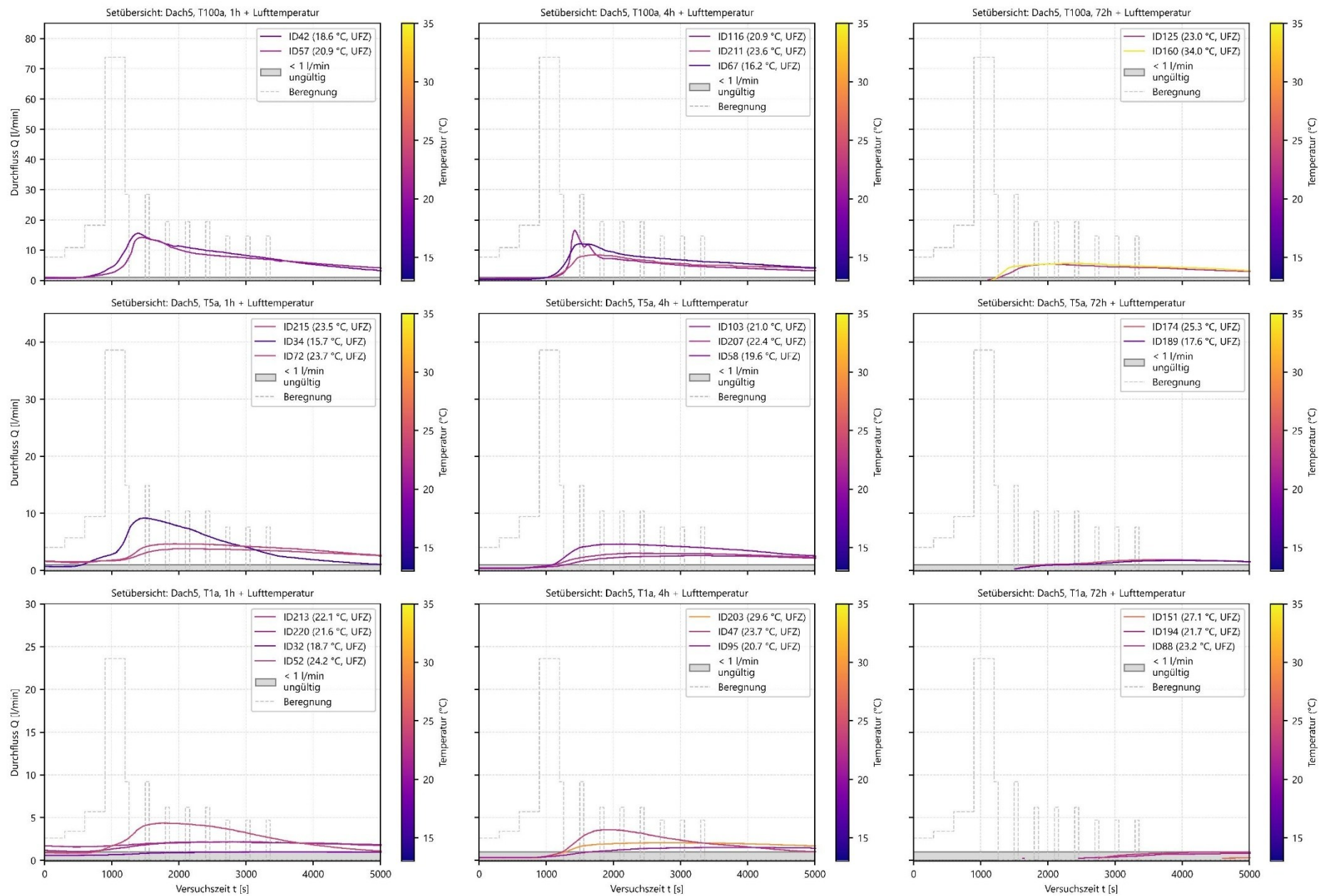
Anhang A - 7: Versuchsübersicht je Dach – Durchflüsse und Temperatur

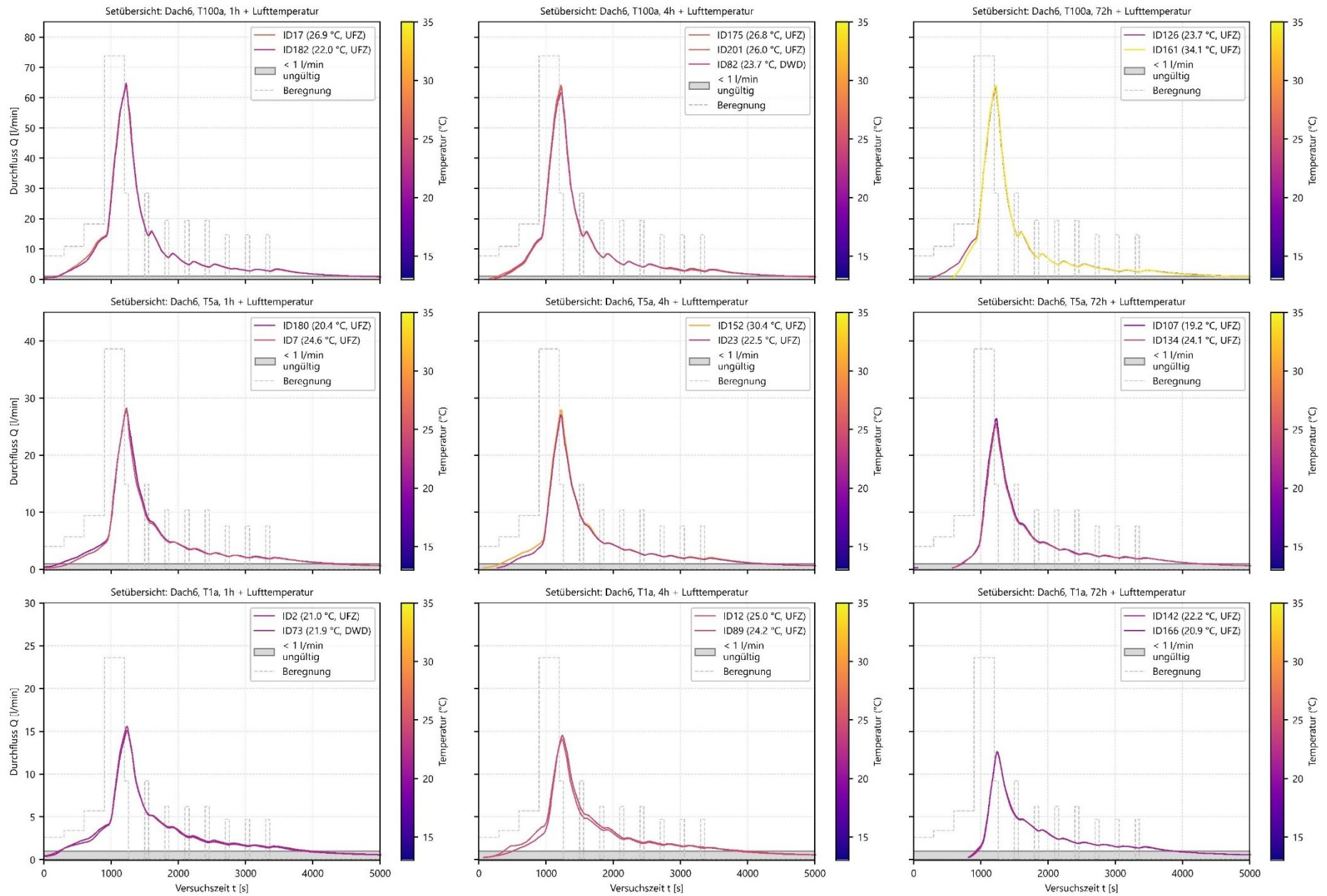


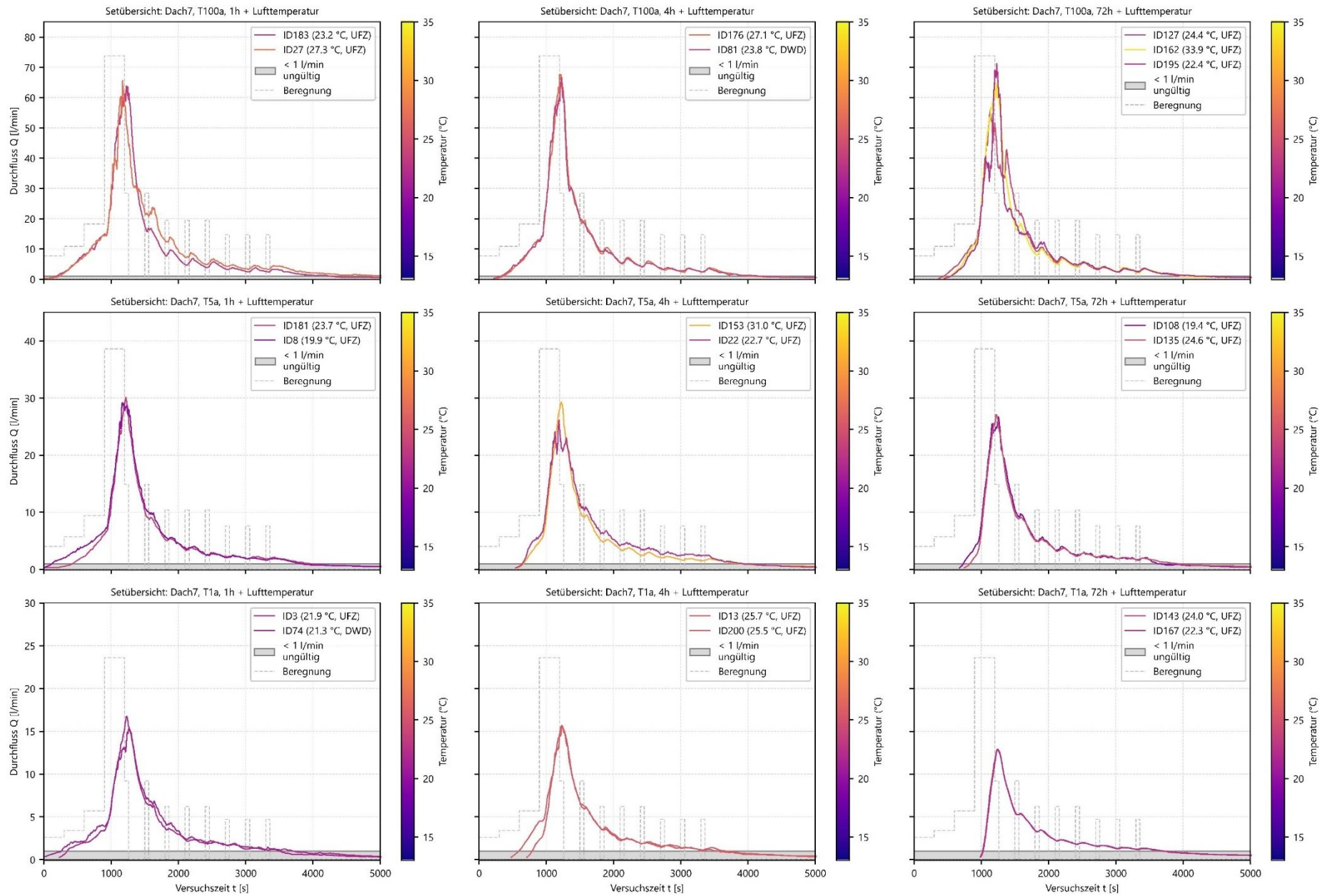


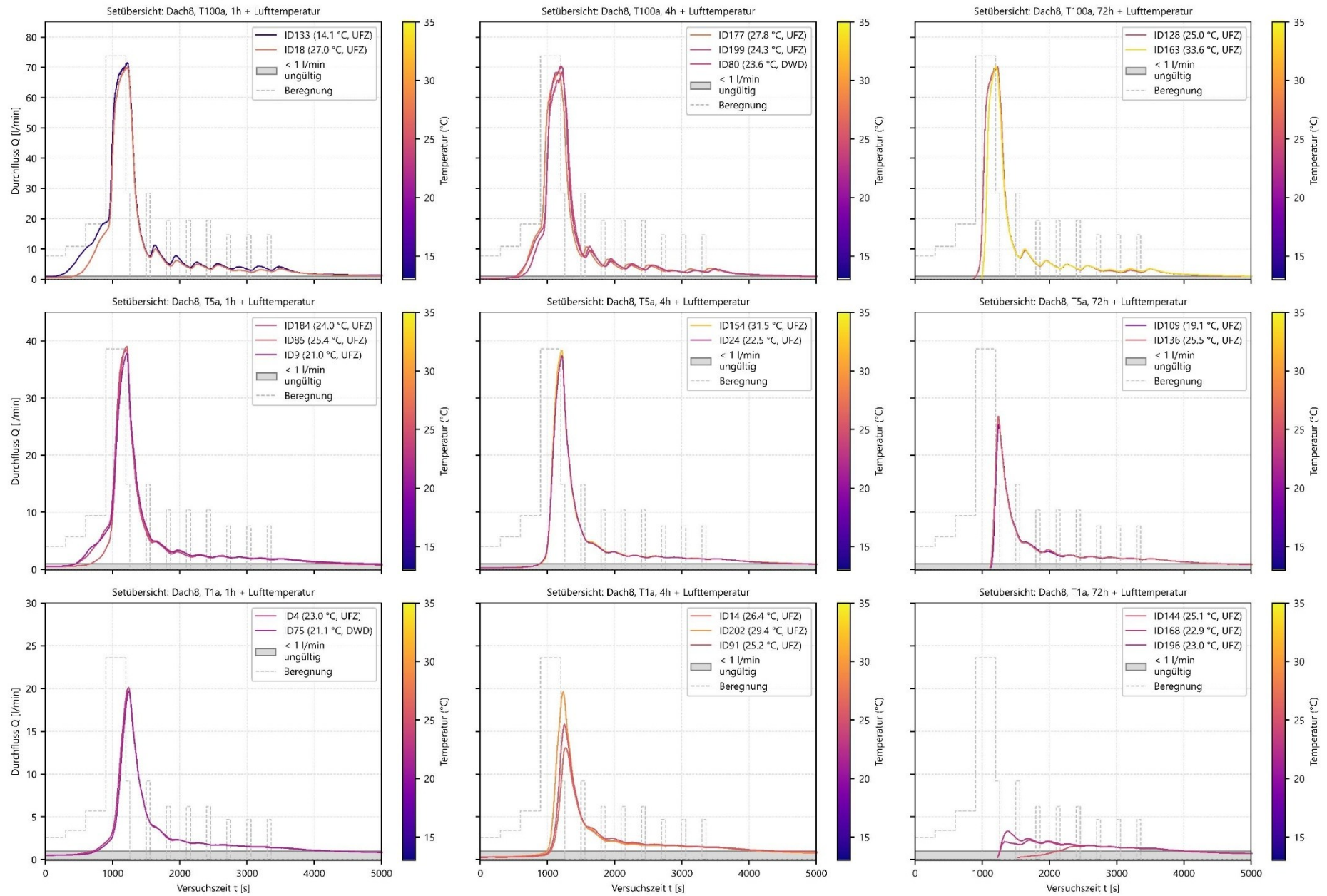


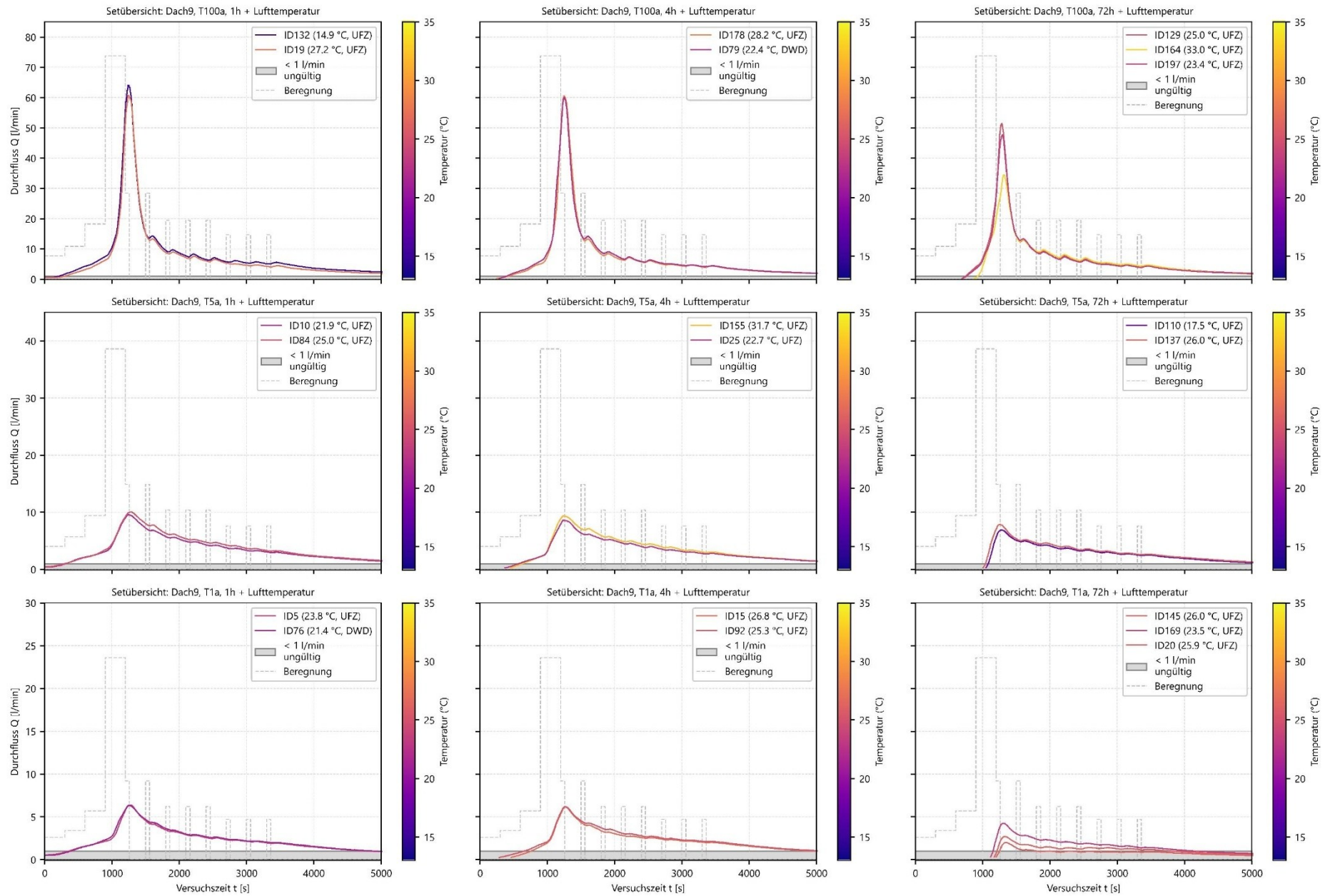


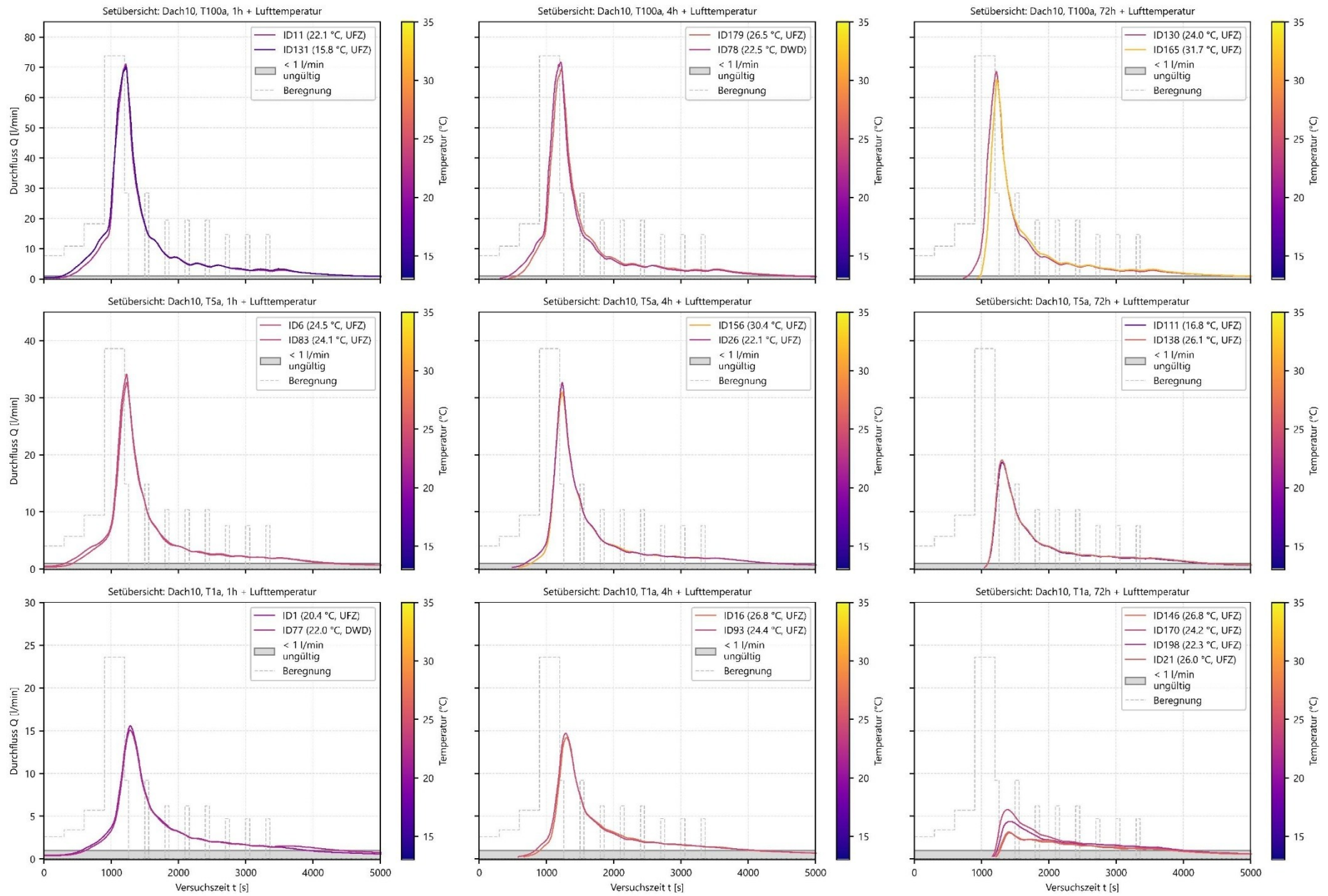




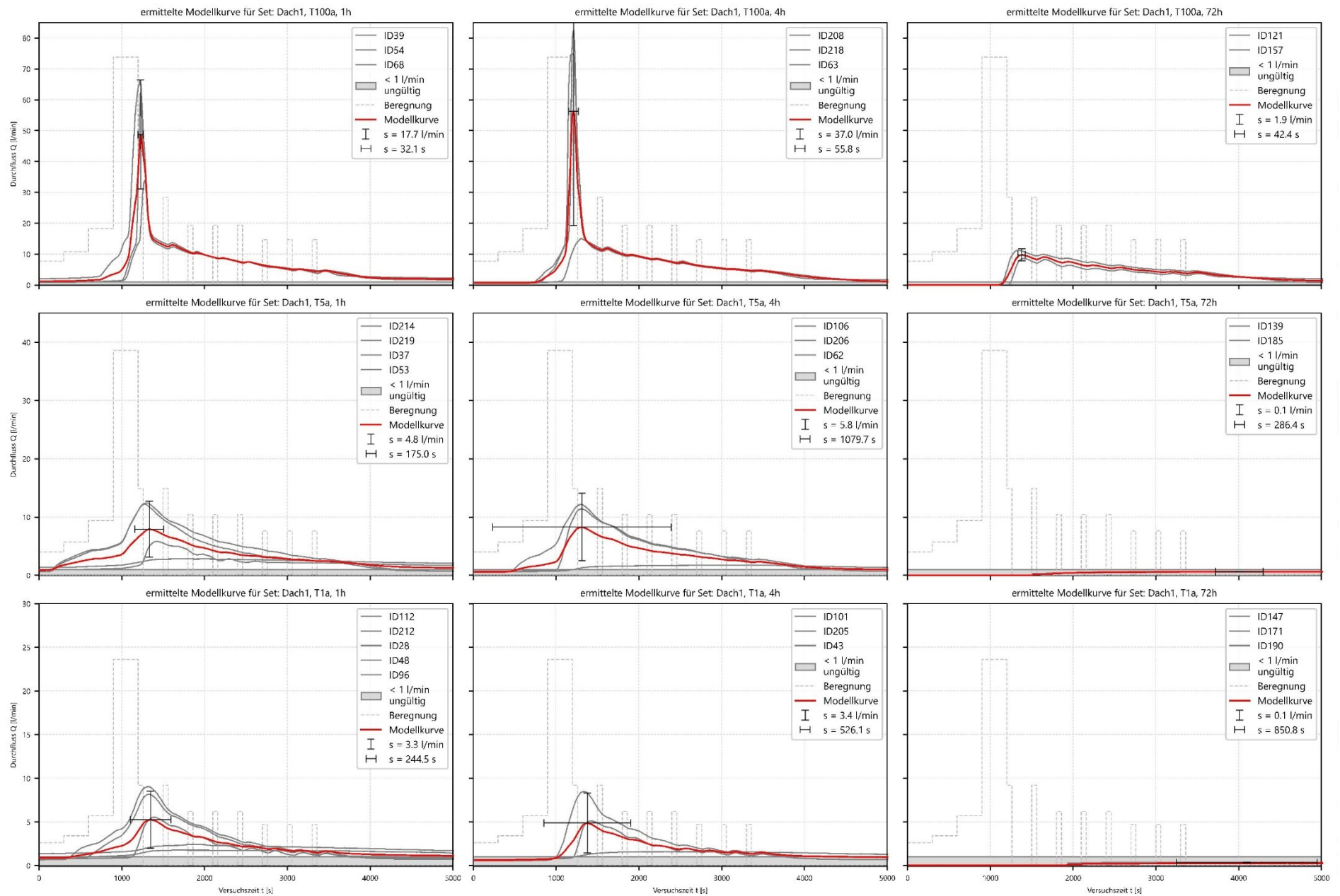


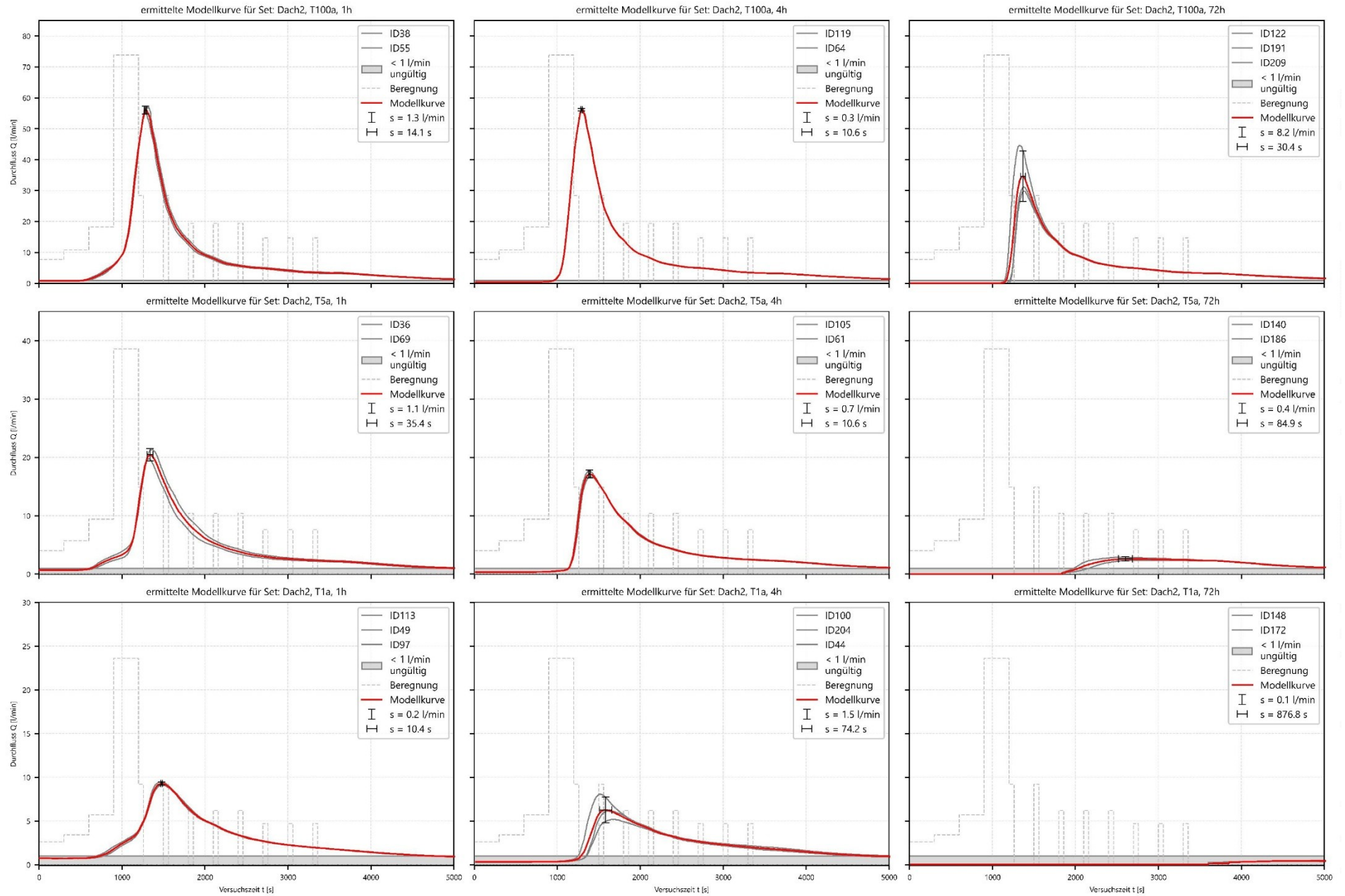


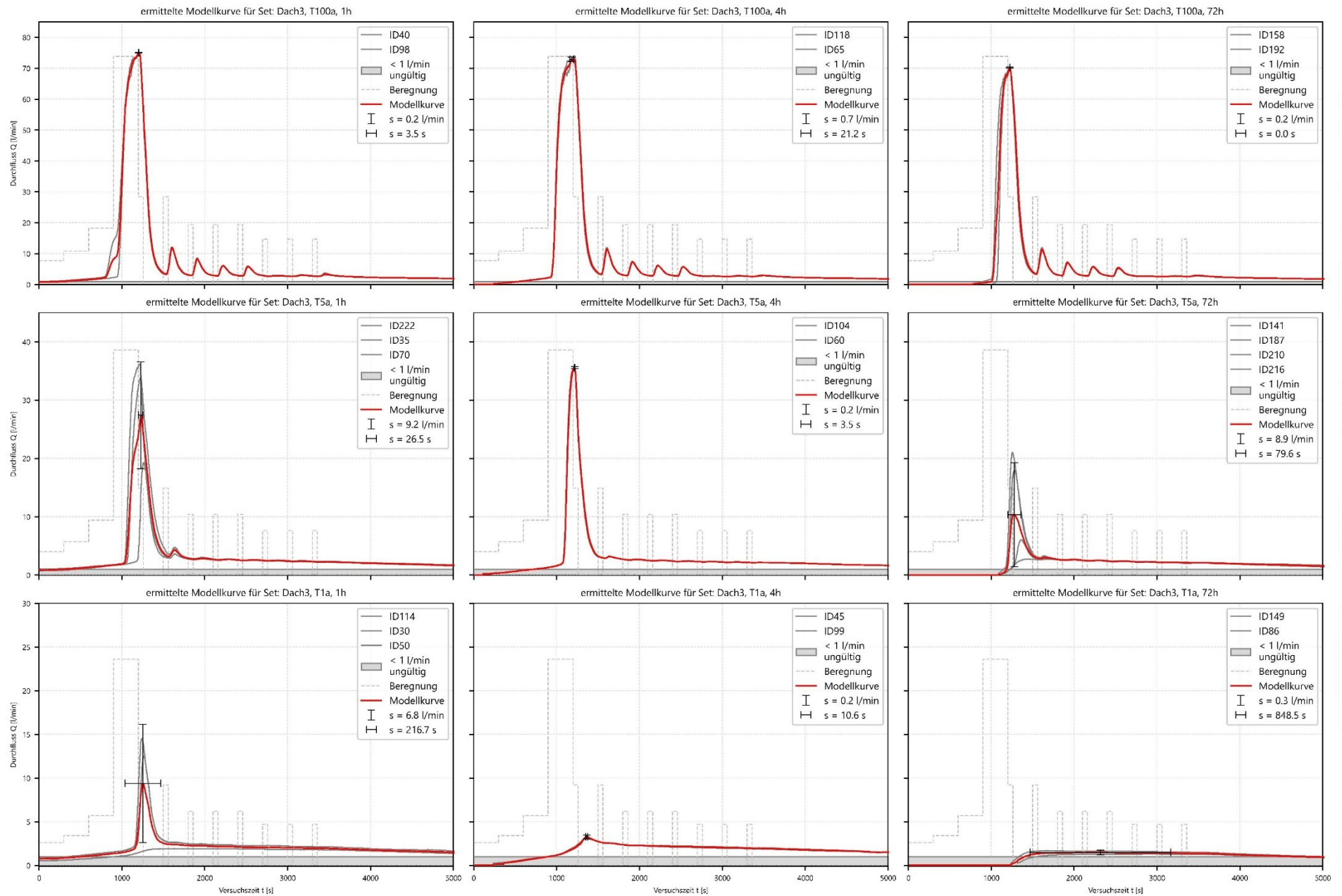


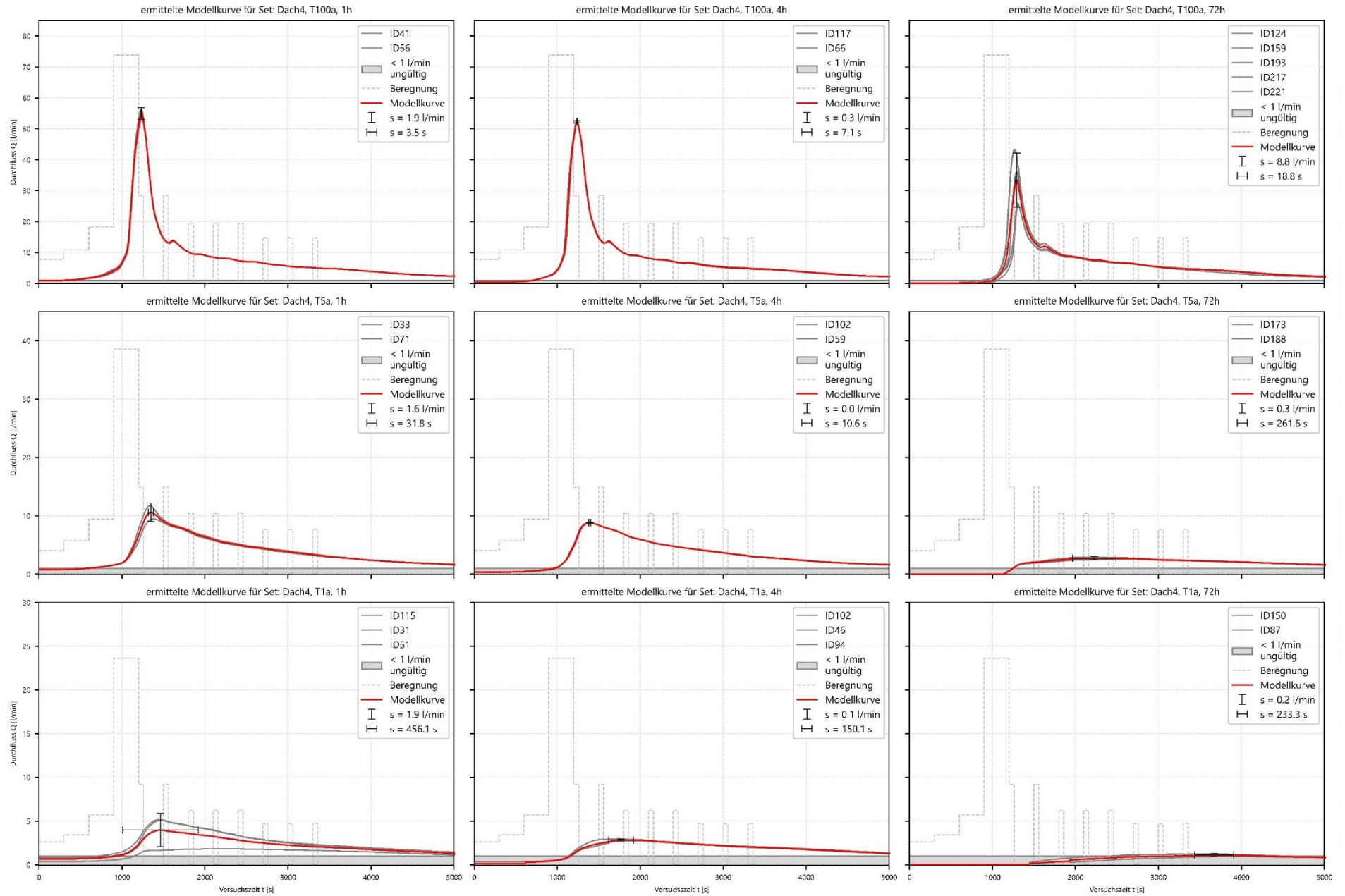


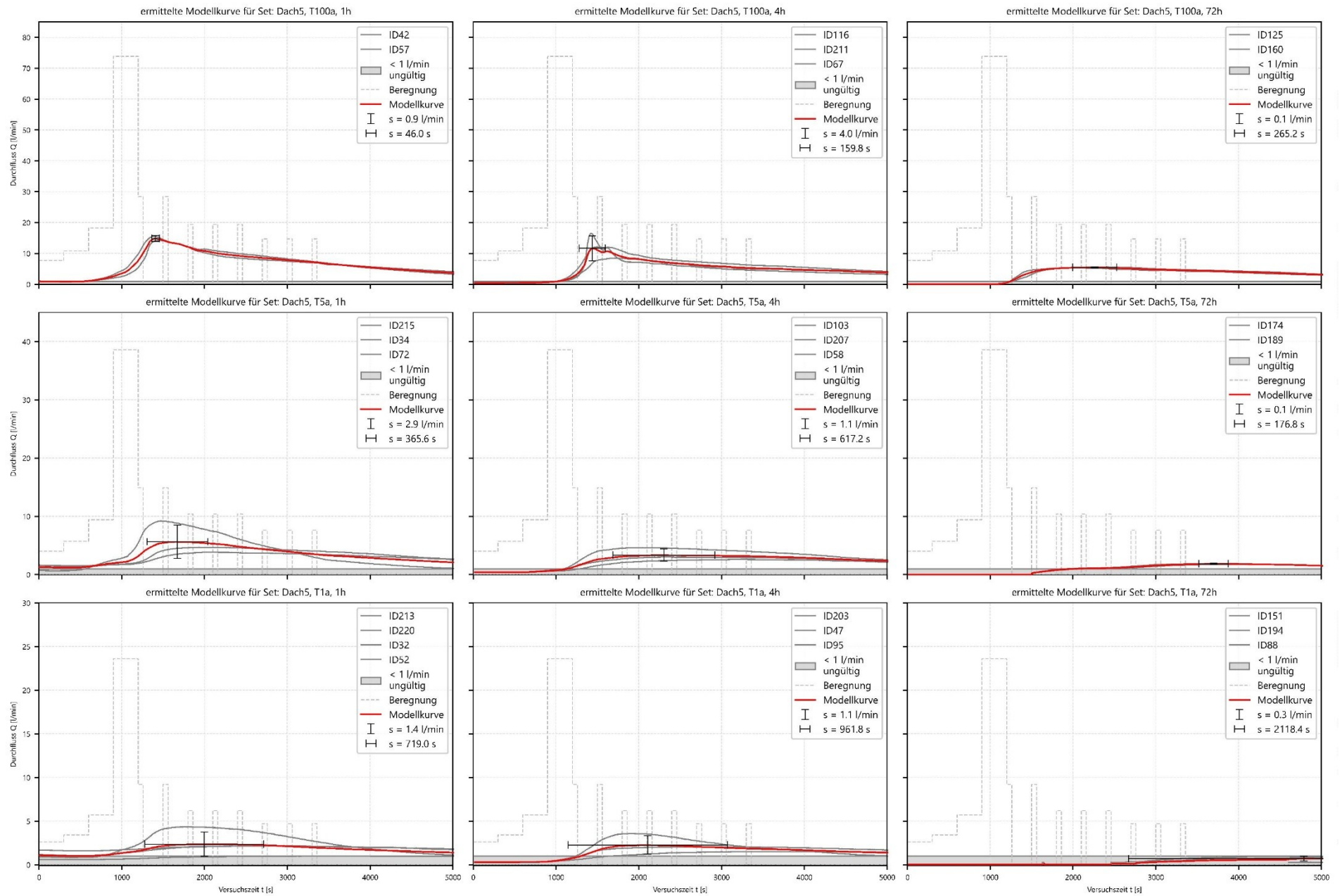
Anhang A - 8: Modellkurven je Dach – Durchflüsse

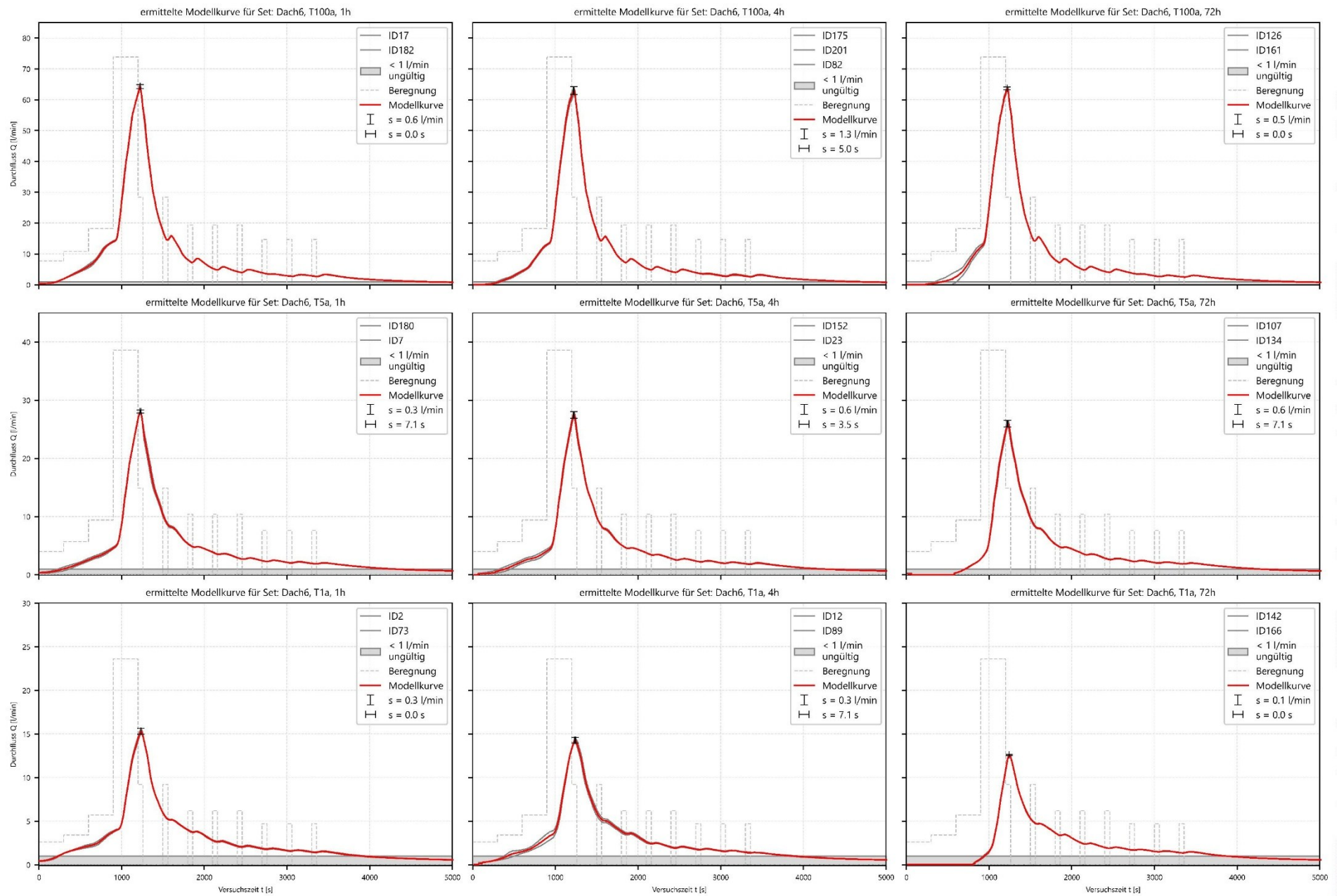


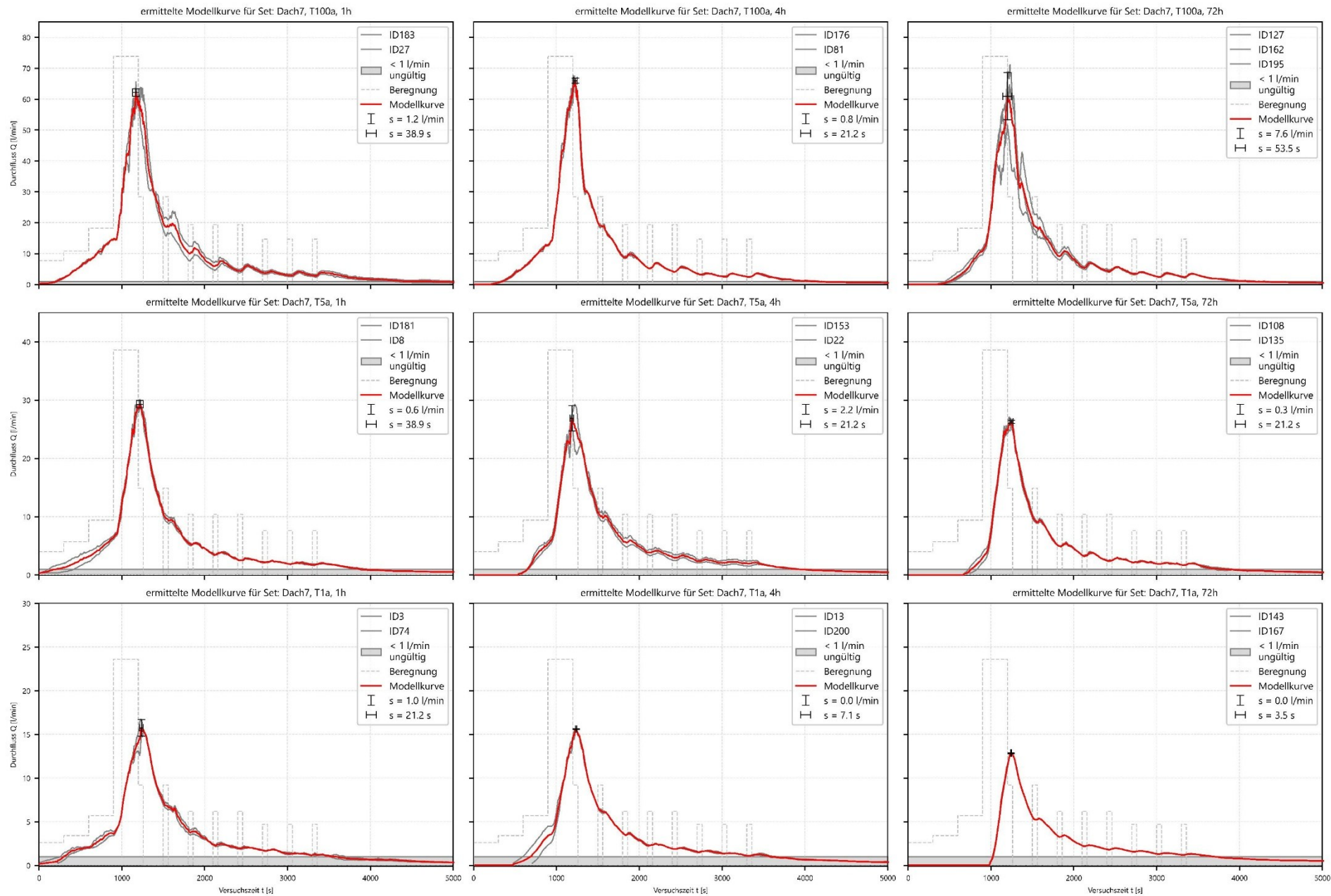


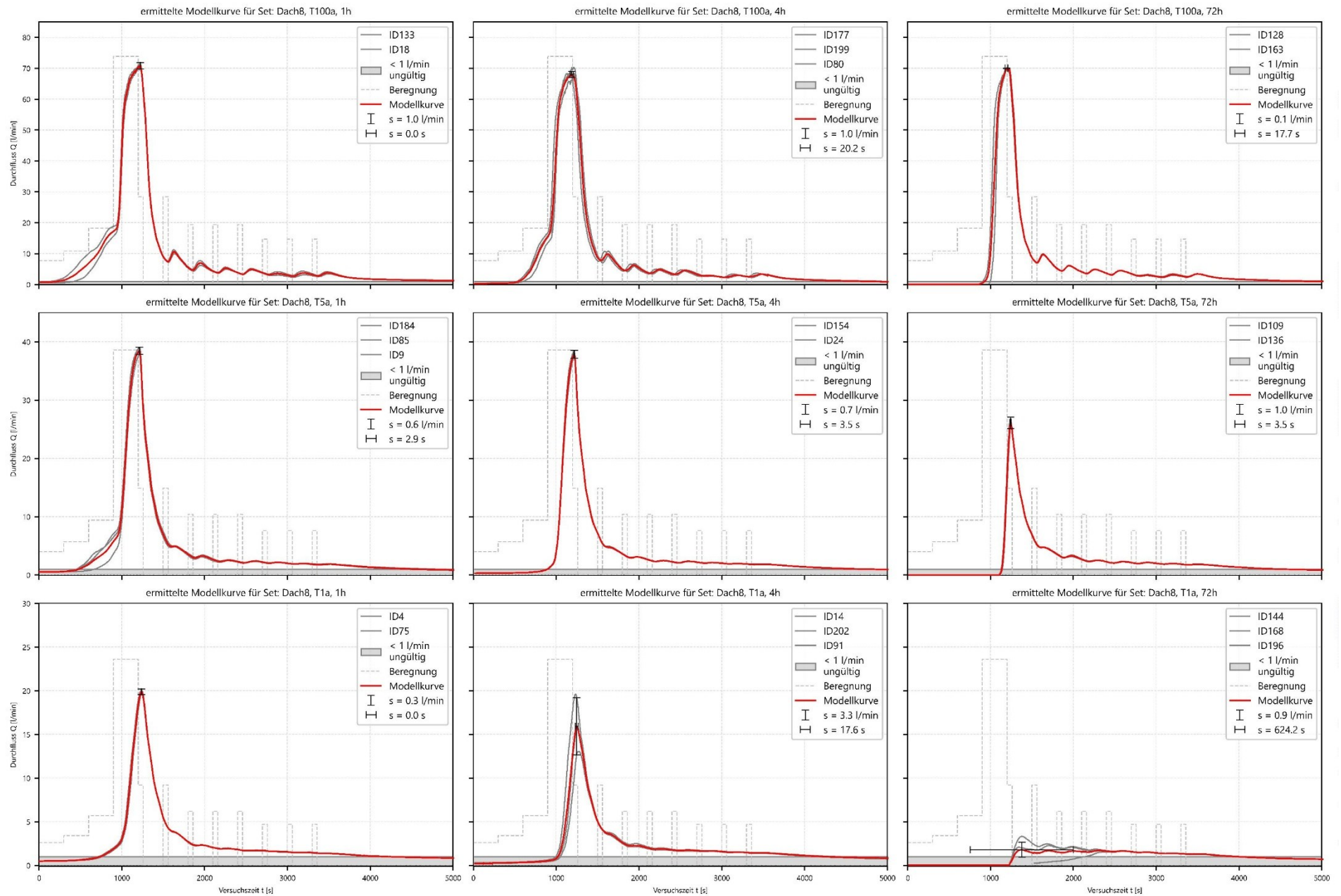


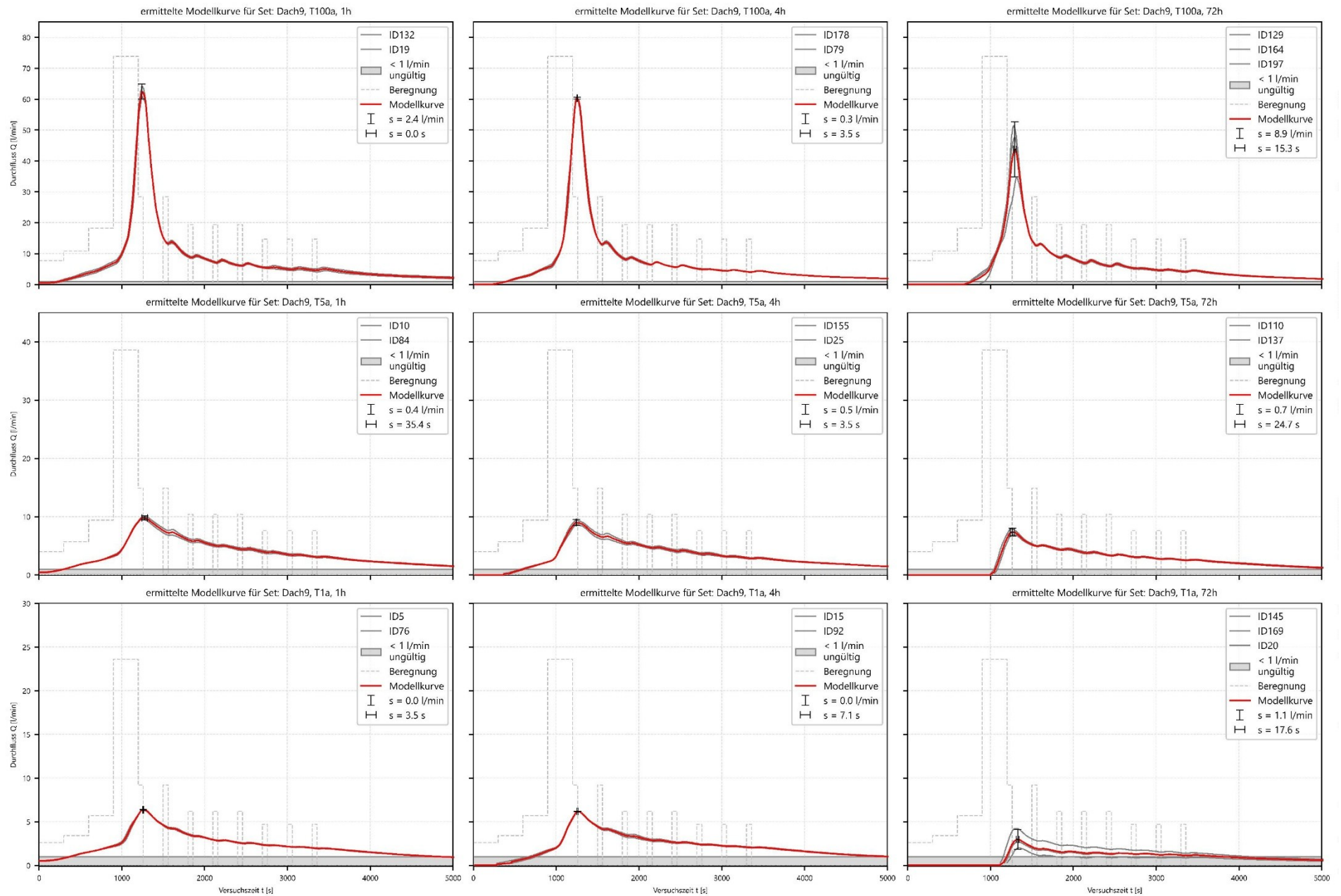


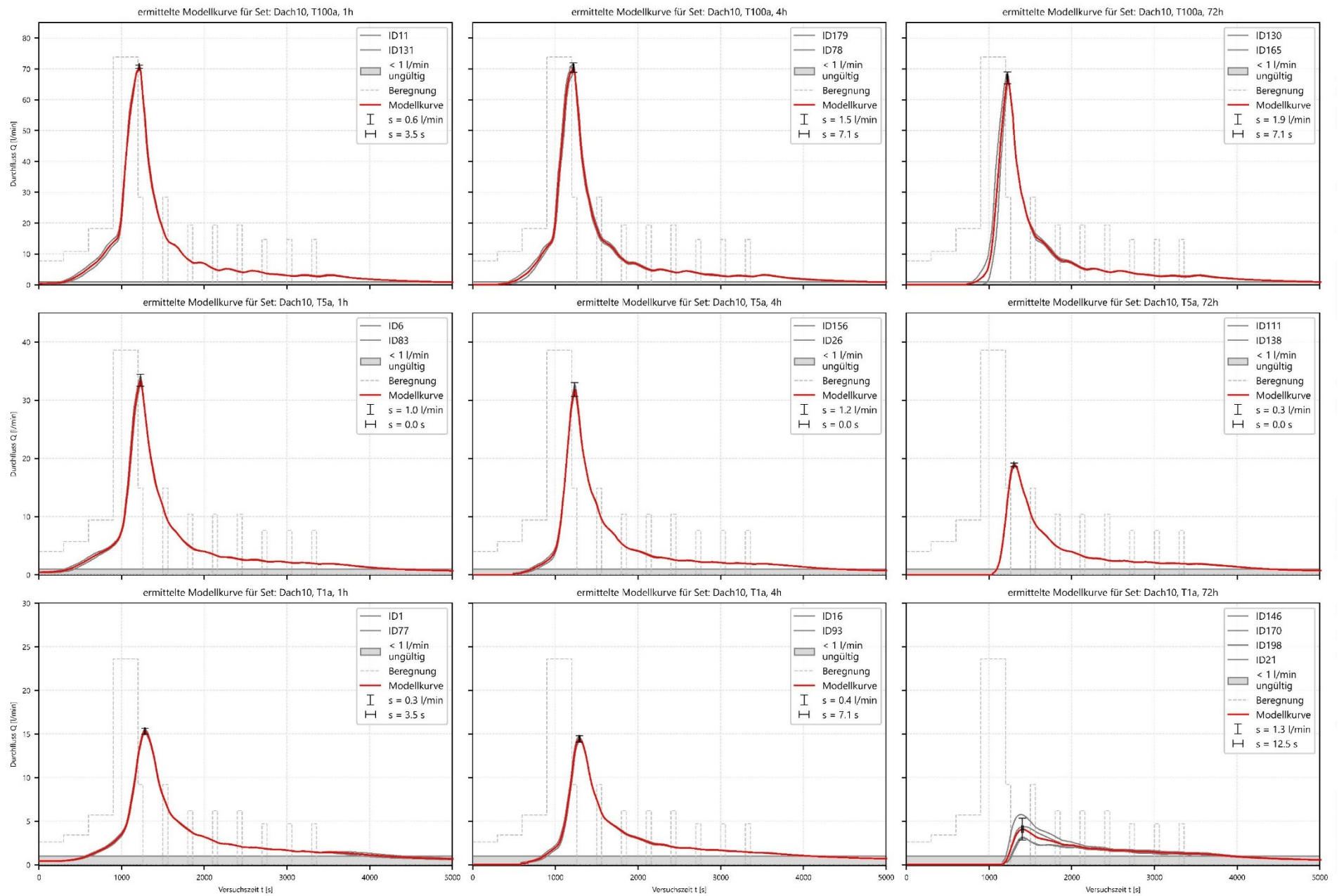




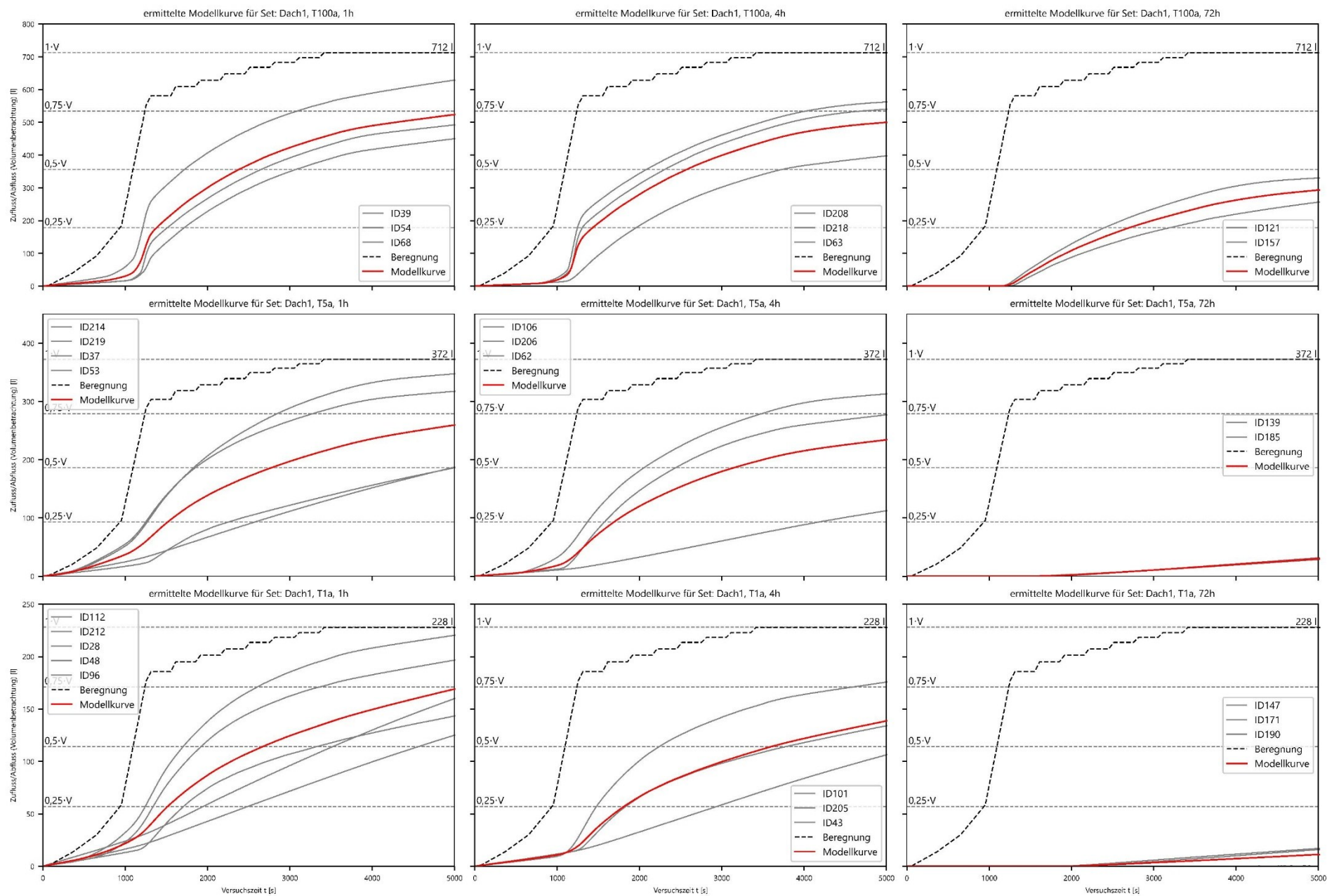


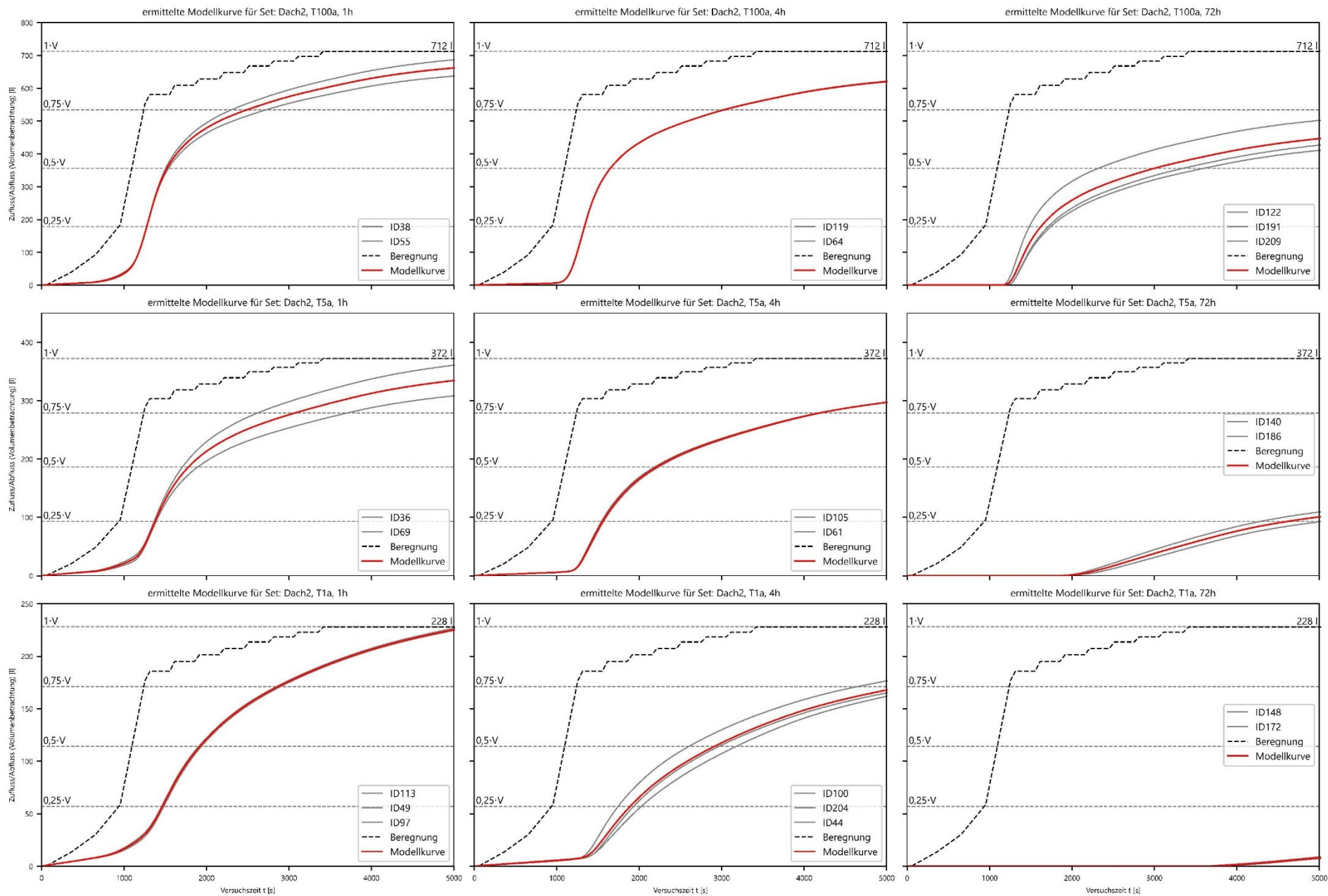


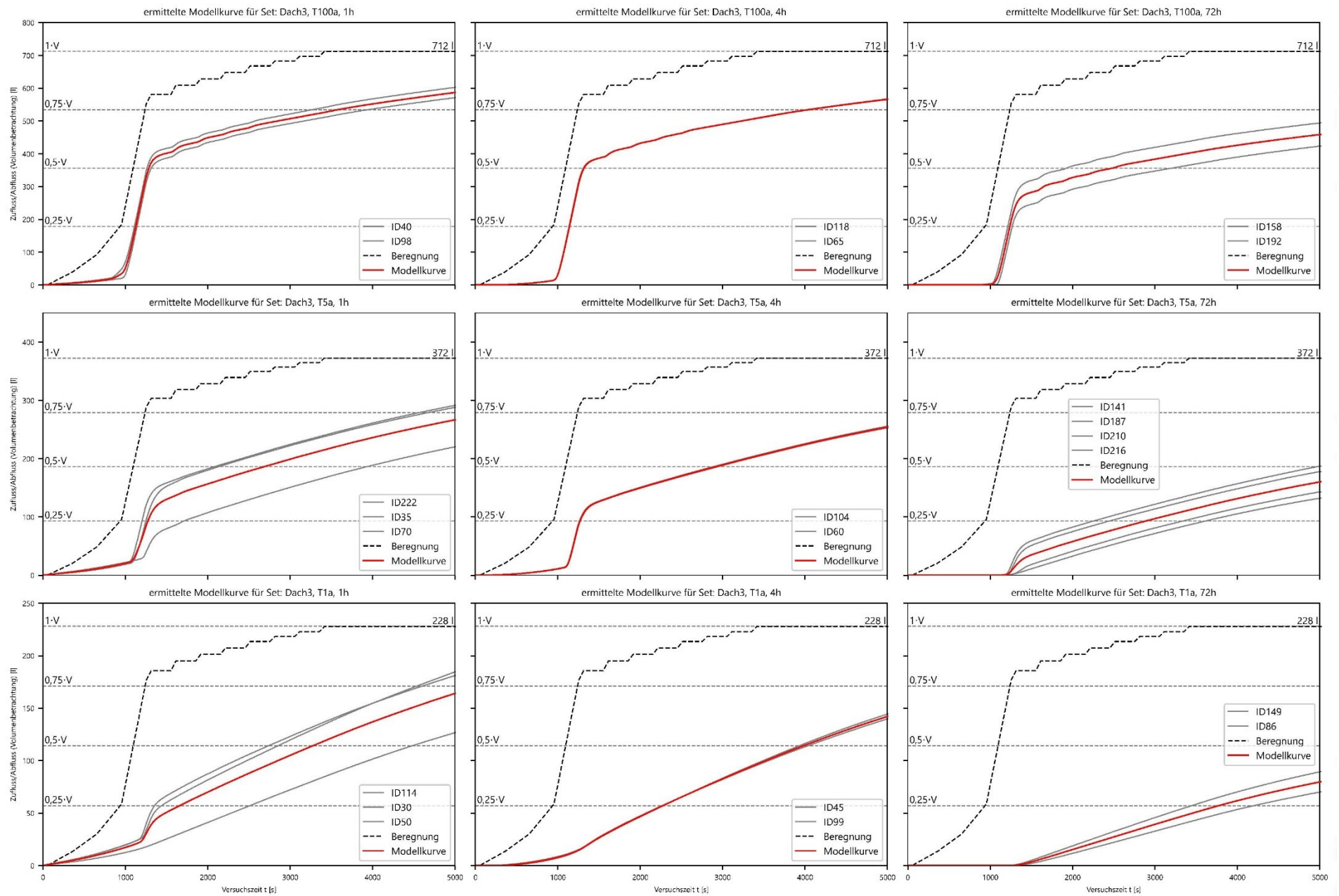


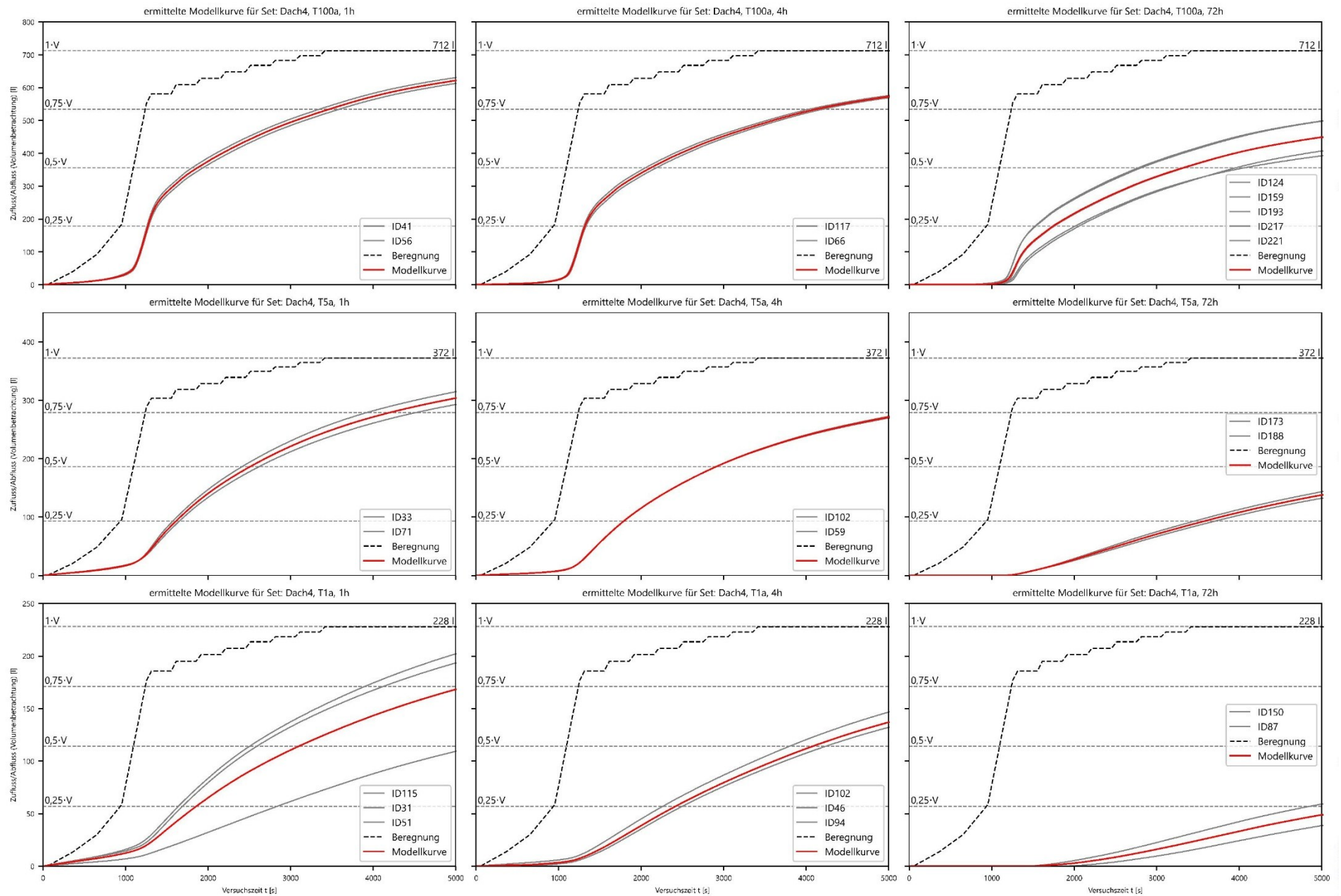


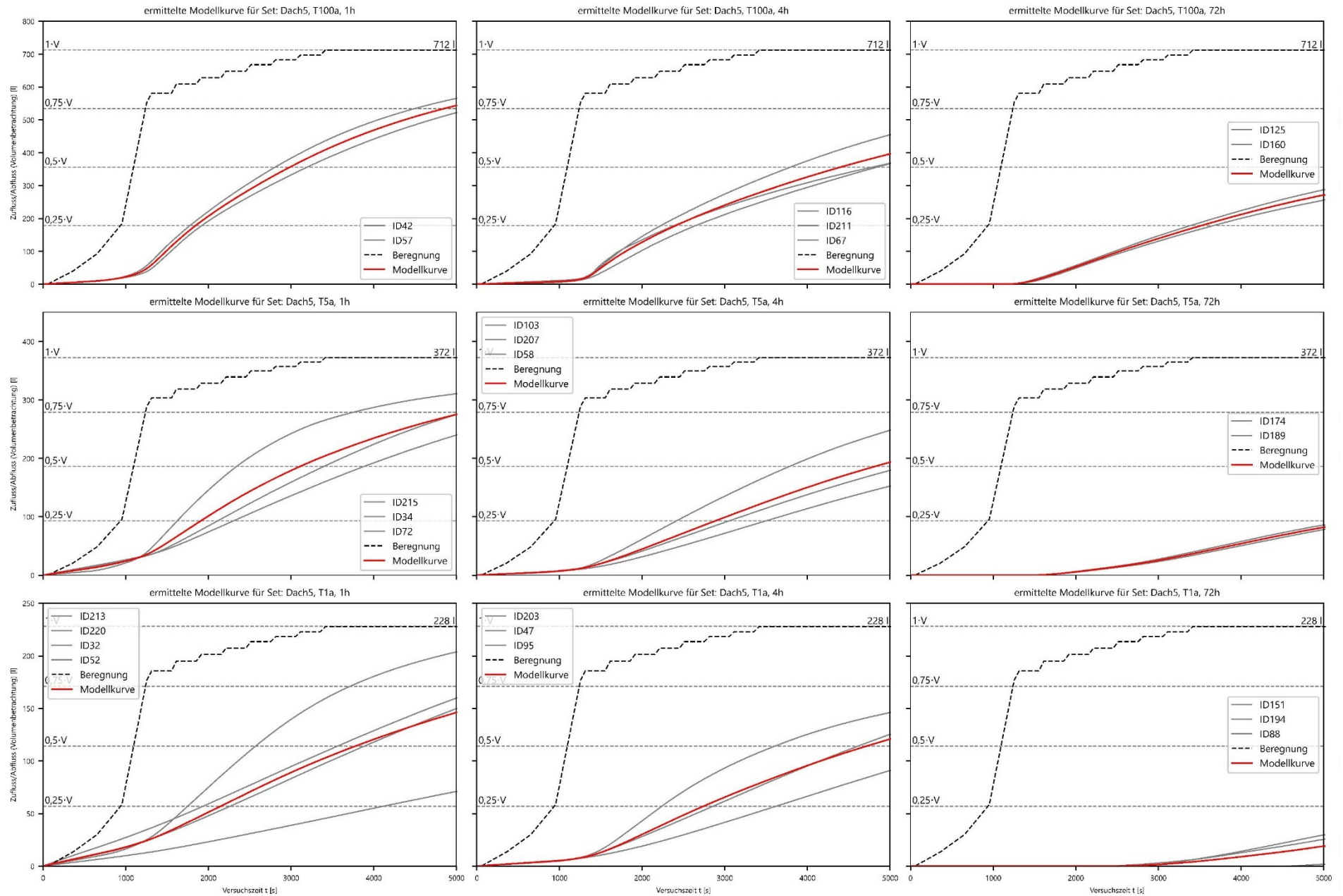
Anhang A - 9: Modellkurven je Dach – Volumenbetrachtung

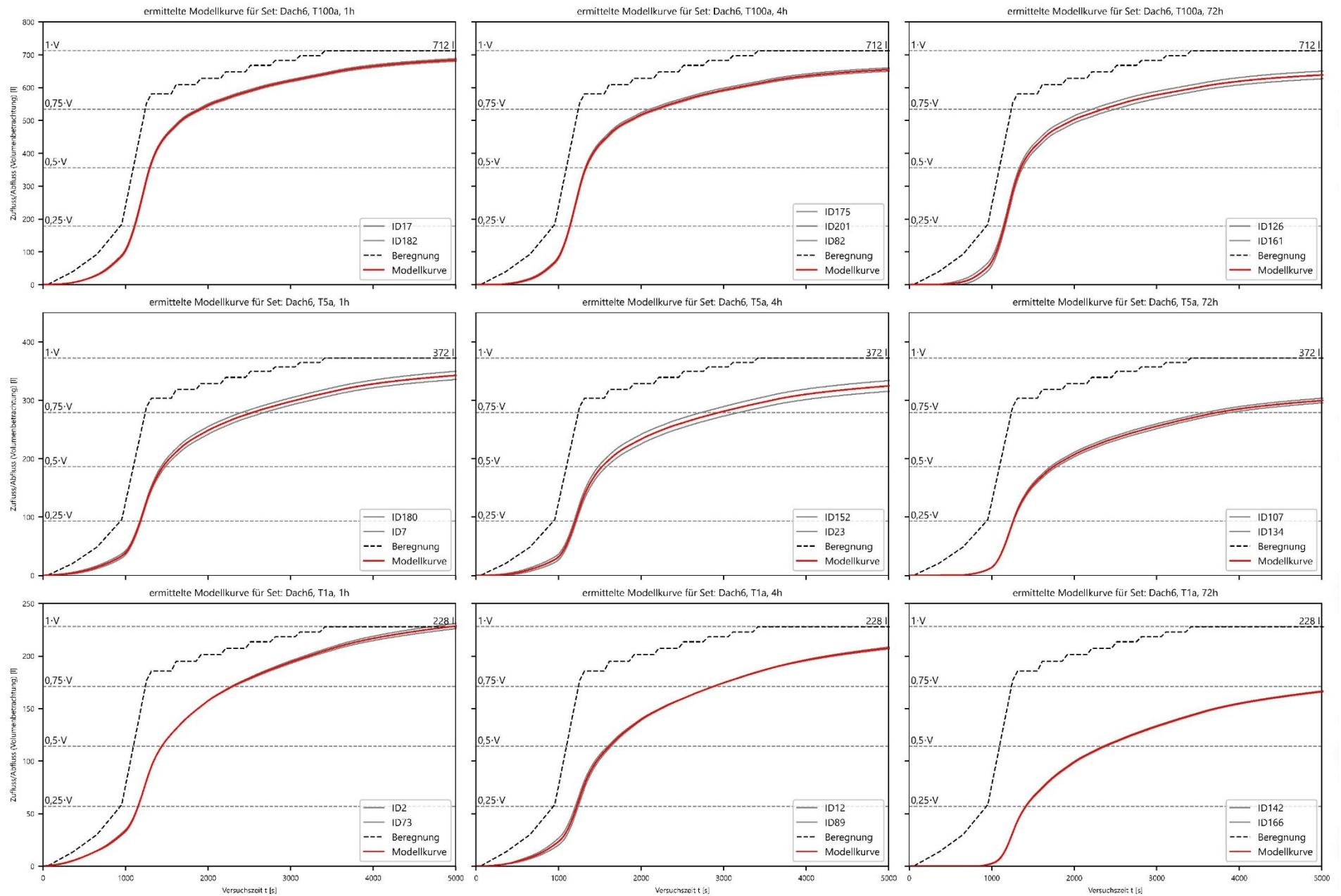


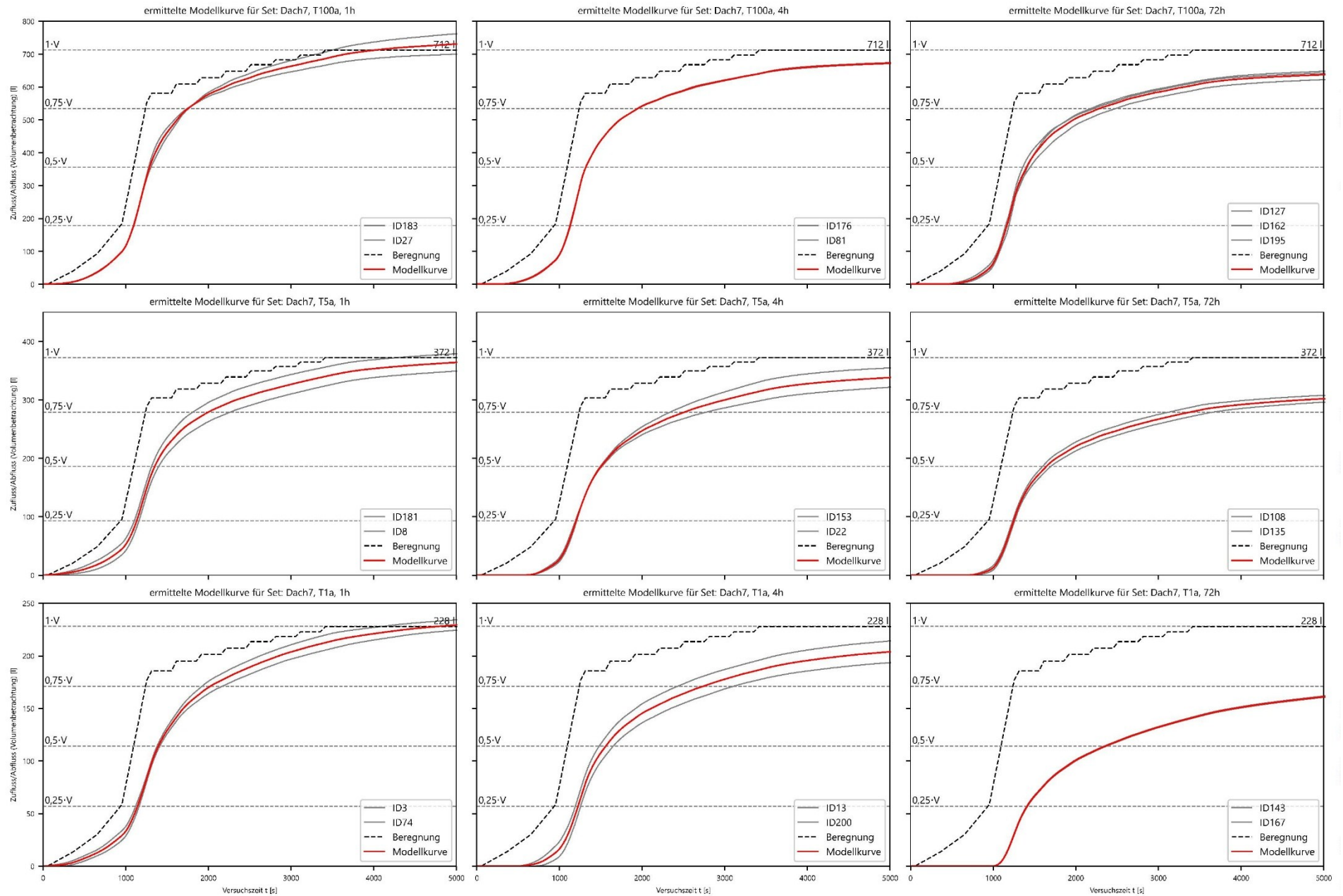


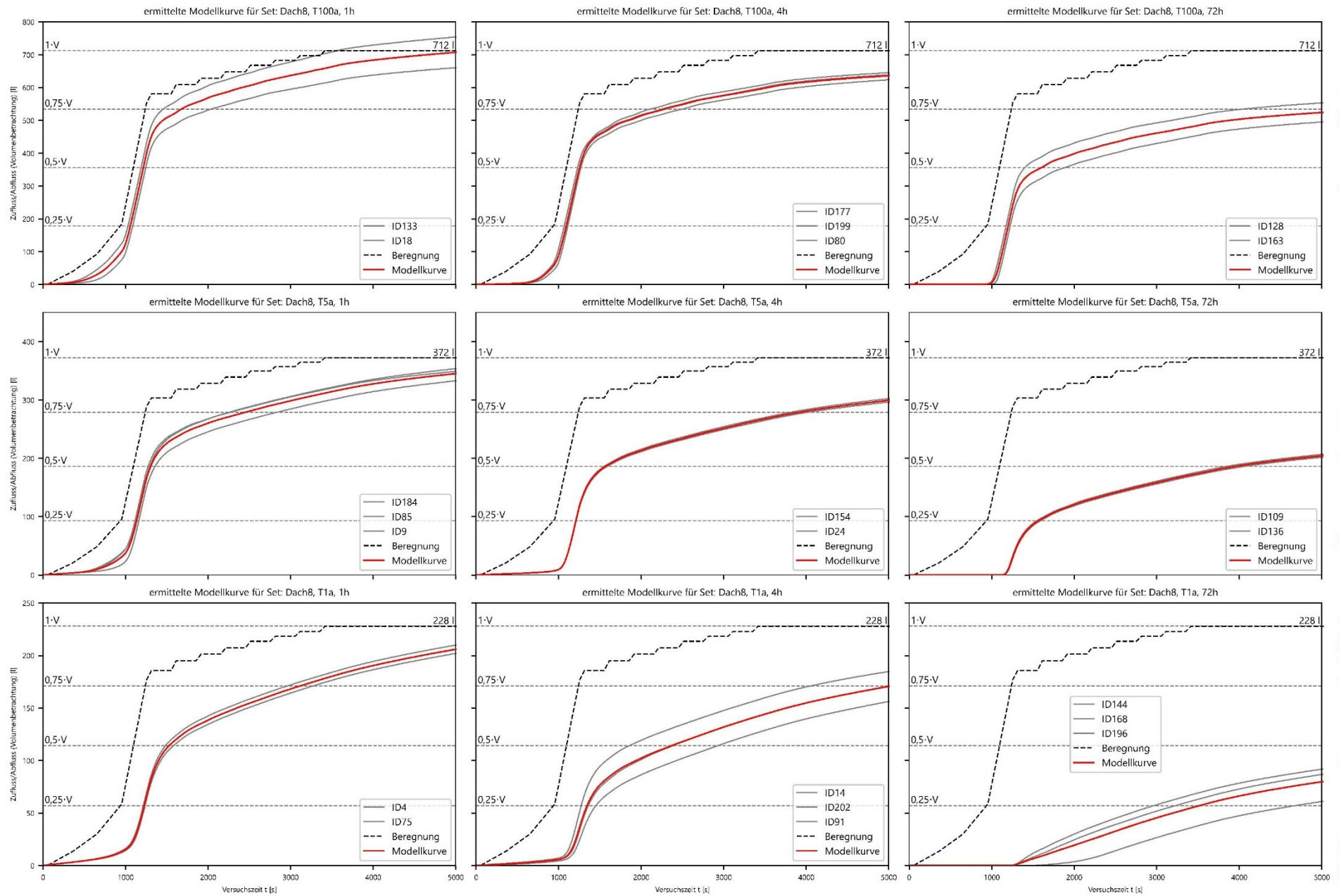


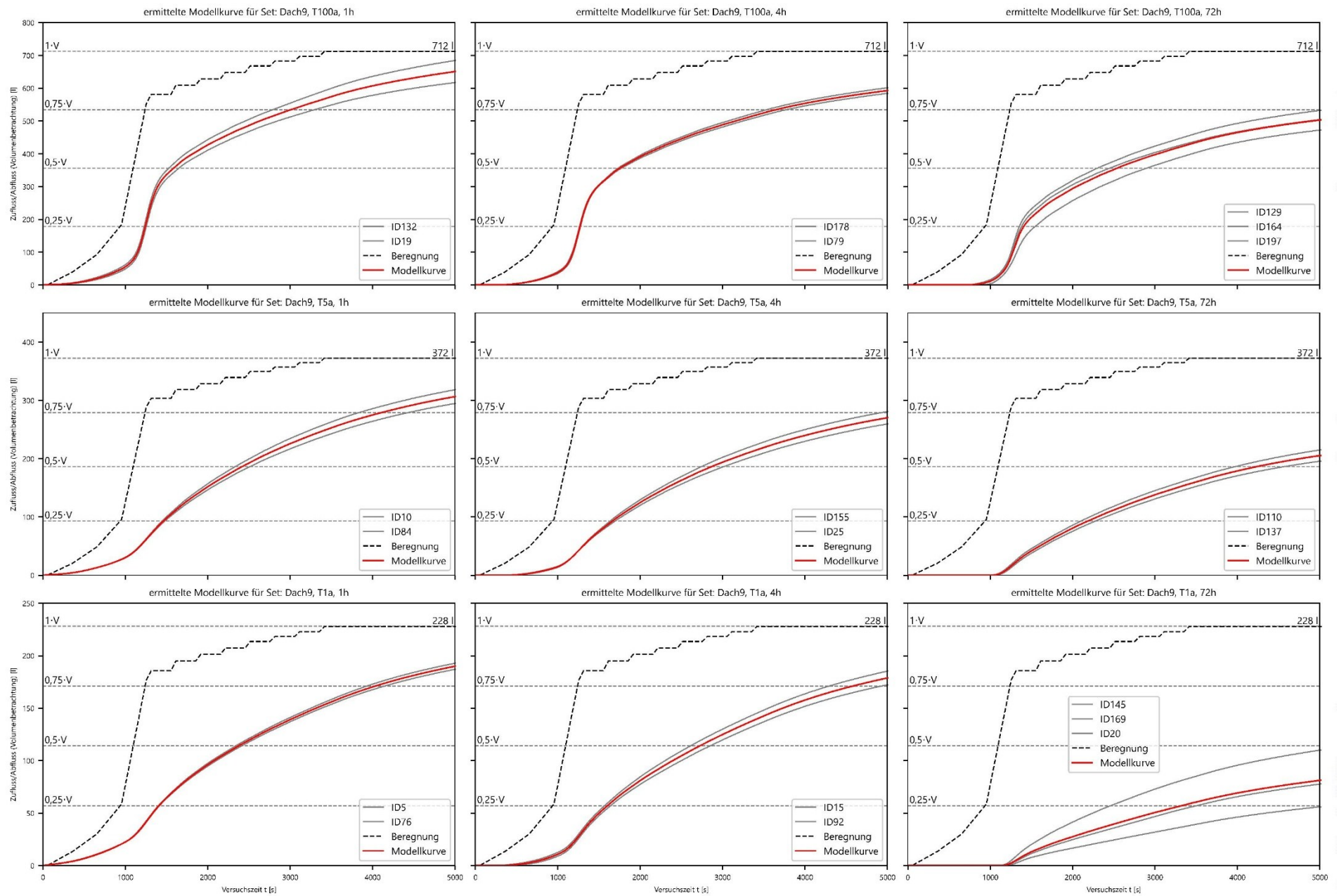


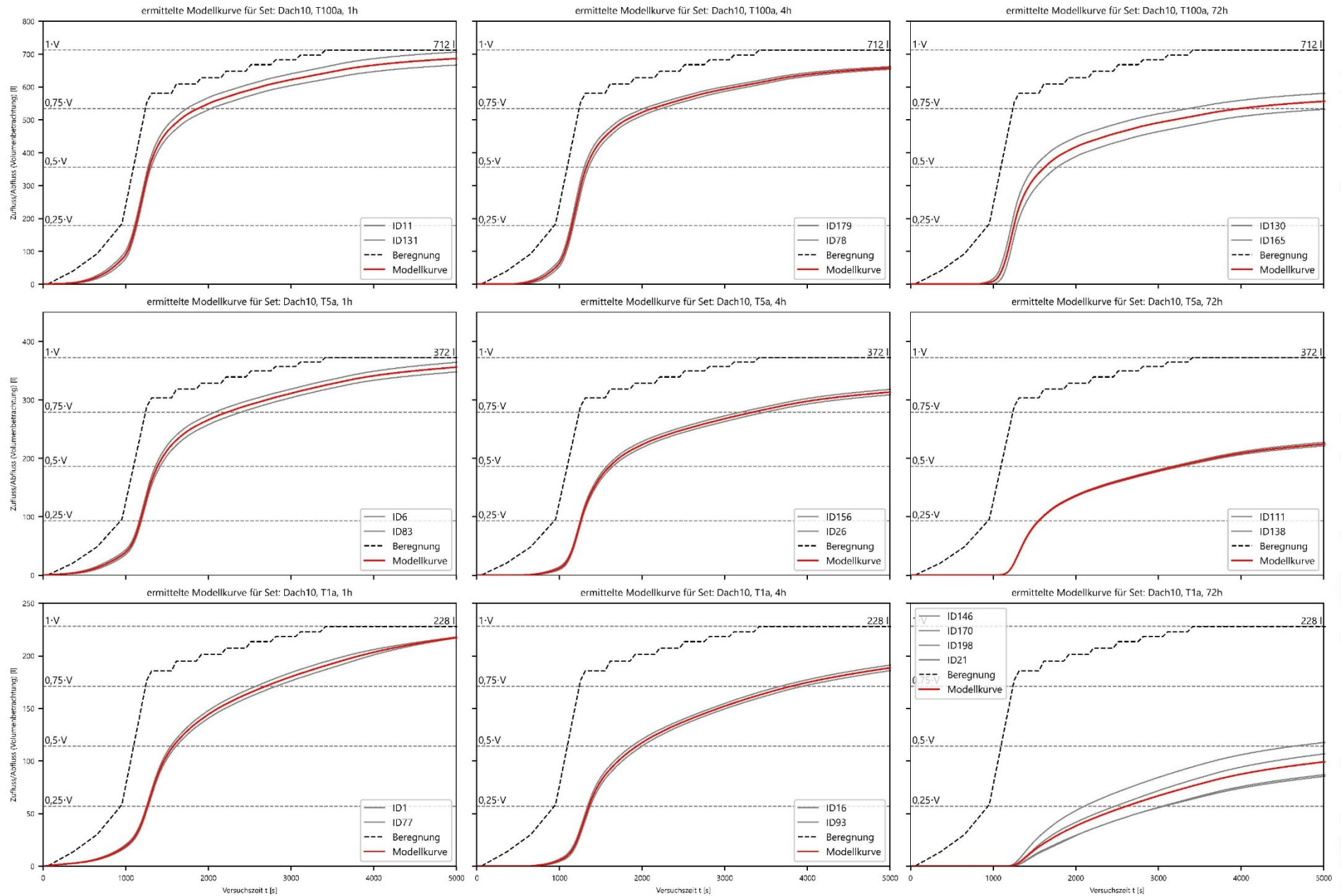












Anhang A - 10: Tabellarische Übersicht Dämpfung und Verzögerung

Klassifikation: C1 - Öffentlich
Zielgruppe: MaNuGrün-Projekt

Tabellarische Übersicht Dämpfung Verzögerung

Set	Dach	Jährlichkeit	Vorsättigung	MAX_y [l/min]	MAX_x [s]	MAX_Q [l/min]	MAX_t [s]	Verzögerung [s]	Dämpfung_absolut [l/min]	Dämpfung_relativ [%]
Dach10_T100a_1h	Dach10	T100a	1h	70,6	1215	73,8	1050	165	3,2	4,3
Dach10_T100a_4h	Dach10	T100a	4h	70,4	1220	73,8	1050	170	3,5	4,7
Dach10_T100a_72h	Dach10	T100a	72h	67,1	1225	73,8	1050	175	6,7	9,1
Dach10_T1a_1h	Dach10	T1a	1h	15,3	1285	23,6	1050	235	8,3	35,2
Dach10_T1a_4h	Dach10	T1a	4h	14,4	1295	23,6	1050	245	9,2	38,9
Dach10_T1a_72h	Dach10	T1a	72h	4,1	1405	23,6	1050	355	19,5	82,7
Dach10_T5a_1h	Dach10	T5a	1h	33,4	1230	38,6	1050	180	5,2	13,5
Dach10_T5a_4h	Dach10	T5a	4h	31,8	1235	38,6	1050	185	6,8	17,7
Dach10_T5a_72h	Dach10	T5a	72h	18,8	1305	38,6	1050	255	19,8	51,2
Dach1_T100a_1h	Dach1	T100a	1h	48,7	1230	73,8	1050	180	25,1	34,0
Dach1_T100a_4h	Dach1	T100a	4h	56,2	1215	73,8	1050	165	17,6	23,8
Dach1_T100a_72h	Dach1	T100a	72h	9,7	1380	73,8	1050	330	64,1	86,8
Dach1_T1a_1h	Dach1	T1a	1h	5,2	1350	23,6	1050	300	18,4	77,8
Dach1_T1a_4h	Dach1	T1a	4h	4,8	1380	23,6	1050	330	18,8	79,5
Dach1_T1a_72h	Dach1	T1a	72h	0,3	4100	23,6	1050	3050	23,3	98,7
Dach1_T5a_1h	Dach1	T5a	1h	7,9	1335	38,6	1050	285	30,7	79,6
Dach1_T5a_4h	Dach1	T5a	4h	8,3	1315	38,6	1050	265	30,4	78,6
Dach1_T5a_72h	Dach1	T5a	72h	0,6	4010	38,6	1050	2960	38,0	98,4
Dach2_T100a_1h	Dach2	T100a	1h	56,0	1285	73,8	1050	235	17,8	24,2
Dach2_T100a_4h	Dach2	T100a	4h	56,1	1295	73,8	1050	245	17,7	24,0
Dach2_T100a_72h	Dach2	T100a	72h	34,5	1370	73,8	1050	320	39,3	53,2
Dach2_T1a_1h	Dach2	T1a	1h	9,3	1480	23,6	1050	430	14,3	60,7
Dach2_T1a_4h	Dach2	T1a	4h	6,2	1585	23,6	1050	535	17,4	73,6
Dach2_T1a_72h	Dach2	T1a	72h	0,5	6200	23,6	1050	5150	23,1	97,9
Dach2_T5a_1h	Dach2	T5a	1h	20,4	1340	38,6	1050	290	18,2	47,1
Dach2_T5a_4h	Dach2	T5a	4h	17,1	1390	38,6	1050	340	21,5	55,7
Dach2_T5a_72h	Dach2	T5a	72h	2,6	2605	38,6	1050	1555	36,0	93,3
Dach3_T100a_1h	Dach3	T100a	1h	75,0	1205	73,8	1050	155	-1,2	-1,6
Dach3_T100a_4h	Dach3	T100a	4h	72,9	1185	73,8	1050	135	0,9	1,3
Dach3_T100a_72h	Dach3	T100a	72h	70,2	1225	73,8	1050	175	3,6	4,9
Dach3_T1a_1h	Dach3	T1a	1h	9,4	1255	23,6	1050	205	14,2	60,3
Dach3_T1a_4h	Dach3	T1a	4h	3,2	1365	23,6	1050	315	20,4	86,3
Dach3_T1a_72h	Dach3	T1a	72h	1,5	2320	23,6	1050	1270	22,1	93,8
Dach3_T5a_1h	Dach3	T5a	1h	27,4	1230	38,6	1050	180	11,2	29,1
Dach3_T5a_4h	Dach3	T5a	4h	35,6	1220	38,6	1050	170	3,0	7,9
Dach3_T5a_72h	Dach3	T5a	72h	10,3	1280	38,6	1050	230	28,3	73,3
Dach4_T100a_1h	Dach4	T100a	1h	54,9	1235	73,8	1050	185	18,9	25,6
Dach4_T100a_4h	Dach4	T100a	4h	52,2	1240	73,8	1050	190	21,6	29,3
Dach4_T100a_72h	Dach4	T100a	72h	33,4	1295	73,8	1050	245	40,4	54,8
Dach4_T1a_1h	Dach4	T1a	1h	4,0	1465	23,6	1050	415	19,6	83,2
Dach4_T1a_4h	Dach4	T1a	4h	2,8	1770	23,6	1050	720	20,8	88,1
Dach4_T1a_72h	Dach4	T1a	72h	1,1	3675	23,6	1050	2625	22,5	95,4
Dach4_T5a_1h	Dach4	T5a	1h	10,5	1350	38,6	1050	300	28,1	72,7
Dach4_T5a_4h	Dach4	T5a	4h	8,8	1395	38,6	1050	345	29,8	77,3
Dach4_T5a_72h	Dach4	T5a	72h	2,7	2230	38,6	1050	1180	35,9	93,1
Dach5_T100a_1h	Dach5	T100a	1h	14,8	1410	73,8	1050	360	59,0	80,0

Eigentümer: Andrea Bernhardt
Datum: 23.02.2026

Klassifikation: C1 - Öffentlich
Zielgruppe: MaNuGrün-Projekt

Tabellarische Übersicht Dämpfung Verzögerung

Set	Dach	Jährlichkeit	Vorsättigung	MAX_y [l/min]	MAX_x [s]	MAX_Q [l/min]	MAX_t [s]	Verzögerung [s]	Dämpfung_absolut [l/min]	Dämpfung_relativ [%]
Dach5_T100a_4h	Dach5	T100a	4h	11,6	1440	73,8	1050	390	62,2	84,3
Dach5_T100a_72h	Dach5	T100a	72h	5,4	2265	73,8	1050	1215	68,4	92,7
Dach5_T1a_1h	Dach5	T1a	1h	2,3	2000	23,6	1050	950	21,3	90,1
Dach5_T1a_4h	Dach5	T1a	4h	2,2	2110	23,6	1050	1060	21,4	90,5
Dach5_T1a_72h	Dach5	T1a	72h	0,7	4790	23,6	1050	3740	22,9	97,1
Dach5_T5a_1h	Dach5	T5a	1h	5,6	1675	38,6	1050	625	33,0	85,5
Dach5_T5a_4h	Dach5	T5a	4h	3,3	2305	38,6	1050	1255	35,3	91,4
Dach5_T5a_72h	Dach5	T5a	72h	1,8	3700	38,6	1050	2650	36,8	95,3
Dach6_T100a_1h	Dach6	T100a	1h	64,2	1225	73,8	1050	175	9,6	13,0
Dach6_T100a_4h	Dach6	T100a	4h	62,9	1225	73,8	1050	175	10,9	14,7
Dach6_T100a_72h	Dach6	T100a	72h	63,6	1220	73,8	1050	170	10,2	13,8
Dach6_T1a_1h	Dach6	T1a	1h	15,3	1235	23,6	1050	185	8,3	35,1
Dach6_T1a_4h	Dach6	T1a	4h	14,3	1240	23,6	1050	190	9,3	39,6
Dach6_T1a_72h	Dach6	T1a	72h	12,6	1245	23,6	1050	195	11,0	46,8
Dach6_T5a_1h	Dach6	T5a	1h	28,0	1230	38,6	1050	180	10,6	27,4
Dach6_T5a_4h	Dach6	T5a	4h	27,4	1225	38,6	1050	175	11,2	28,9
Dach6_T5a_72h	Dach6	T5a	72h	26,0	1225	38,6	1050	175	12,6	32,8
Dach7_T100a_1h	Dach7	T100a	1h	62,1	1170	73,8	1050	120	11,7	15,8
Dach7_T100a_4h	Dach7	T100a	4h	65,9	1230	73,8	1050	180	7,9	10,7
Dach7_T100a_72h	Dach7	T100a	72h	60,9	1200	73,8	1050	150	12,9	17,5
Dach7_T1a_1h	Dach7	T1a	1h	15,7	1240	23,6	1050	190	7,9	33,3
Dach7_T1a_4h	Dach7	T1a	4h	15,6	1240	23,6	1050	190	8,0	33,9
Dach7_T1a_72h	Dach7	T1a	72h	12,8	1245	23,6	1050	195	10,8	45,6
Dach7_T5a_1h	Dach7	T5a	1h	29,3	1220	38,6	1050	170	9,3	24,2
Dach7_T5a_4h	Dach7	T5a	4h	26,9	1190	38,6	1050	140	11,8	30,4
Dach7_T5a_72h	Dach7	T5a	72h	26,2	1250	38,6	1050	200	12,4	32,0
Dach8_T100a_1h	Dach8	T100a	1h	70,8	1225	73,8	1050	175	3,0	4,1
Dach8_T100a_4h	Dach8	T100a	4h	67,9	1190	73,8	1050	140	5,9	7,9
Dach8_T100a_72h	Dach8	T100a	72h	69,9	1195	73,8	1050	145	3,9	5,3
Dach8_T1a_1h	Dach8	T1a	1h	19,9	1240	23,6	1050	190	3,7	15,8
Dach8_T1a_4h	Dach8	T1a	4h	15,9	1250	23,6	1050	200	7,7	32,6
Dach8_T1a_72h	Dach8	T1a	72h	1,8	1380	23,6	1050	330	21,8	92,5
Dach8_T5a_1h	Dach8	T5a	1h	38,4	1215	38,6	1050	165	0,2	0,5
Dach8_T5a_4h	Dach8	T5a	4h	37,8	1220	38,6	1050	170	0,8	2,0
Dach8_T5a_72h	Dach8	T5a	72h	26,1	1245	38,6	1050	195	12,5	32,5
Dach9_T100a_1h	Dach9	T100a	1h	62,4	1245	73,8	1050	195	11,4	15,5
Dach9_T100a_4h	Dach9	T100a	4h	60,3	1255	73,8	1050	205	13,5	18,3
Dach9_T100a_72h	Dach9	T100a	72h	43,7	1295	73,8	1050	245	30,1	40,8
Dach9_T1a_1h	Dach9	T1a	1h	6,4	1260	23,6	1050	210	17,2	73,1
Dach9_T1a_4h	Dach9	T1a	4h	6,2	1260	23,6	1050	210	17,4	73,9
Dach9_T1a_72h	Dach9	T1a	72h	3,0	1330	23,6	1050	280	20,6	87,5
Dach9_T5a_1h	Dach9	T5a	1h	9,8	1280	38,6	1050	230	28,8	74,7
Dach9_T5a_4h	Dach9	T5a	4h	9,0	1245	38,6	1050	195	29,6	76,7
Dach9_T5a_72h	Dach9	T5a	72h	7,3	1265	38,6	1050	215	31,3	81,0

Anhang A - 11: Tabellarische Übersicht Volumenbetrachtung

Set	Dach	Jährlichkeit	Vorsättigung	V_Beregnung [l]	V_bei 3600s [l]	V_bei 3600s [%]	V_bei 5000s [l]	25%_Durchgang [s]	50%_Durchgang [s]	75%_Durchgang [s]
Dach10_T100a_1h	Dach10	T100a	1h	712	651	91	686	1125	1290	1875
Dach10_T100a_4h	Dach10	T100a	4h	712	622	87	658	1155	1330	2120
Dach10_T100a_72h	Dach10	T100a	72h	712	519	73	556	1255	1630	3980
Dach10_T1a_1h	Dach10	T1a	1h	228	195	85	217	1265	1580	2695
Dach10_T1a_4h	Dach10	T1a	4h	228	167	73	188	1360	1940	3805
Dach10_T1a_72h	Dach10	T1a	72h	228	80	35	99	2615		
Dach10_T5a_1h	Dach10	T5a	1h	372	331	89	356	1180	1390	2235
Dach10_T5a_4h	Dach10	T5a	4h	372	287	77	313	1260	1610	3345
Dach10_T5a_72h	Dach10	T5a	72h	372	198	53	224	1555	3215	
Dach1_T100a_1h	Dach1	T100a	1h	712	469	66	523	1385	2385	
Dach1_T100a_4h	Dach1	T100a	4h	712	447	63	500	1435	2575	
Dach1_T100a_72h	Dach1	T100a	72h	712	242	34	293	2705		
Dach1_T1a_1h	Dach1	T1a	1h	228	140	62	169	1520	2670	
Dach1_T1a_4h	Dach1	T1a	4h	228	114	50	139	1815	3600	
Dach1_T1a_72h	Dach1	T1a	72h	228	6	2	11			
Dach1_T5a_1h	Dach1	T5a	1h	372	222	60	259	1520	2775	
Dach1_T5a_4h	Dach1	T5a	4h	372	204	55	234	1695	3145	
Dach1_T5a_72h	Dach1	T5a	72h	372	16	4	30			
Dach2_T100a_1h	Dach2	T100a	1h	712	610	86	662	1280	1525	2490
Dach2_T100a_4h	Dach2	T100a	4h	712	568	80	620	1340	1655	3025
Dach2_T100a_72h	Dach2	T100a	72h	712	391	55	446	1625	3005	
Dach2_T1a_1h	Dach2	T1a	1h	228	196	86	225	1470	1920	2875
Dach2_T1a_4h	Dach2	T1a	4h	228	138	60	168	1895	2915	
Dach2_T1a_72h	Dach2	T1a	72h	228	0	0	8			
Dach2_T5a_1h	Dach2	T5a	1h	372	299	80	335	1380	1785	3080
Dach2_T5a_4h	Dach2	T5a	4h	372	259	70	297	1560	2210	4195
Dach2_T5a_72h	Dach2	T5a	72h	372	62	17	101	4620		
Dach3_T100a_1h	Dach3	T100a	1h	712	535	75	586	1130	1290	3575
Dach3_T100a_4h	Dach3	T100a	4h	712	517	73	566	1145	1320	4040
Dach3_T100a_72h	Dach3	T100a	72h	712	410	58	458	1240	2495	
Dach3_T1a_1h	Dach3	T1a	1h	228	125	55	164	1660	3275	
Dach3_T1a_4h	Dach3	T1a	4h	228	102	45	142	2280	3980	
Dach3_T1a_72h	Dach3	T1a	72h	228	53	23	80	3775		
Dach3_T5a_1h	Dach3	T5a	1h	372	222	60	266	1275	2680	
Dach3_T5a_4h	Dach3	T5a	4h	372	211	57	254	1270	2910	
Dach3_T5a_72h	Dach3	T5a	72h	372	118	32	160	2895		
Dach4_T100a_1h	Dach4	T100a	1h	712	544	76	621	1275	1875	3470
Dach4_T100a_4h	Dach4	T100a	4h	712	500	70	572	1320	2125	4125
Dach4_T100a_72h	Dach4	T100a	72h	712	377	53	449	1745	3325	
Dach4_T1a_1h	Dach4	T1a	1h	228	131	57	168	1860	3100	
Dach4_T1a_4h	Dach4	T1a	4h	228	100	44	137	2420	4080	
Dach4_T1a_72h	Dach4	T1a	72h	228	26	11	49			
Dach4_T5a_1h	Dach4	T5a	1h	372	254	68	304	1615	2510	4210
Dach4_T5a_4h	Dach4	T5a	4h	372	223	60	271	1795	2910	
Dach4_T5a_72h	Dach4	T5a	72h	372	94	25	138	3580		
Dach5_T100a_1h	Dach5	T100a	1h	712	429	60	543	1845	2990	4855
Dach5_T100a_4h	Dach5	T100a	4h	712	294	41	396	2410	4405	

Klassifikation: C1 - Öffentlich
Zielgruppe: MaNuGrün-Projekt

Tabellarische Übersicht Volumenbetrachtung

Set	Dach	Jährlichkeit	Vorsättigung	V_Beregnung [l]	V_bei 3600s [l]	V_bei 3600s [%]	V_bei 5000s [l]	25%_Durchgang [s]	50%_Durchgang [s]	75%_Durchgang [s]
Dach5_T100a_72h	Dach5	T100a	72h	712	184	26	271	3520		
Dach5_T1a_1h	Dach5	T1a	1h	228	109	48	146	2150	3780	
Dach5_T1a_4h	Dach5	T1a	4h	228	84	37	121	2745	4715	
Dach5_T1a_72h	Dach5	T1a	72h	228	5	2	19			
Dach5_T5a_1h	Dach5	T5a	1h	372	214	58	275	1915	3110	
Dach5_T5a_4h	Dach5	T5a	4h	372	130	35	193	2890	4820	
Dach5_T5a_72h	Dach5	T5a	72h	372	42	11	82			
Dach6_T100a_1h	Dach6	T100a	1h	712	651	91	684	1115	1300	1905
Dach6_T100a_4h	Dach6	T100a	4h	712	622	87	655	1140	1335	2180
Dach6_T100a_72h	Dach6	T100a	72h	712	605	85	638	1155	1360	2345
Dach6_T1a_1h	Dach6	T1a	1h	228	209	92	228	1155	1440	2295
Dach6_T1a_4h	Dach6	T1a	4h	228	189	83	208	1225	1620	2880
Dach6_T1a_72h	Dach6	T1a	72h	228	148	65	166	1420	2365	
Dach6_T5a_1h	Dach6	T5a	1h	372	318	85	343	1185	1455	2545
Dach6_T5a_4h	Dach6	T5a	4h	372	301	81	324	1205	1530	2945
Dach6_T5a_72h	Dach6	T5a	72h	372	275	74	299	1265	1750	3735
Dach7_T100a_1h	Dach7	T100a	1h	712	697	98	731	1100	1290	1755
Dach7_T100a_4h	Dach7	T100a	4h	712	649	91	672	1135	1325	1950
Dach7_T100a_72h	Dach7	T100a	72h	712	614	86	637	1170	1405	2285
Dach7_T1a_1h	Dach7	T1a	1h	228	216	95	229	1145	1400	2025
Dach7_T1a_4h	Dach7	T1a	4h	228	190	83	204	1230	1565	2745
Dach7_T1a_72h	Dach7	T1a	72h	228	145	64	161	1415	2355	
Dach7_T5a_1h	Dach7	T5a	1h	372	346	93	364	1135	1355	2000
Dach7_T5a_4h	Dach7	T5a	4h	372	320	86	338	1205	1505	2520
Dach7_T5a_72h	Dach7	T5a	72h	372	285	77	302	1250	1645	3390
Dach8_T100a_1h	Dach8	T100a	1h	712	669	94	707	1060	1220	1680
Dach8_T100a_4h	Dach8	T100a	4h	712	603	85	636	1095	1260	2280
Dach8_T100a_72h	Dach8	T100a	72h	712	490	69	524	1205	1610	
Dach8_T1a_1h	Dach8	T1a	1h	228	182	80	206	1230	1530	3120
Dach8_T1a_4h	Dach8	T1a	4h	228	146	64	171	1350	2370	
Dach8_T1a_72h	Dach8	T1a	72h	228	59	26	80	3520		
Dach8_T5a_1h	Dach8	T5a	1h	372	317	85	345	1140	1310	2455
Dach8_T5a_4h	Dach8	T5a	4h	372	270	73	299	1215	1570	3925
Dach8_T5a_72h	Dach8	T5a	72h	372	177	48	204	1570	3950	
Dach9_T100a_1h	Dach9	T100a	1h	712	582	82	651	1245	1590	3010
Dach9_T100a_4h	Dach9	T100a	4h	712	531	75	592	1275	1755	3645
Dach9_T100a_72h	Dach9	T100a	72h	712	442	62	503	1410	2545	
Dach9_T1a_1h	Dach9	T1a	1h	228	159	70	190	1410	2375	4035
Dach9_T1a_4h	Dach9	T1a	4h	228	146	64	179	1605	2725	4585
Dach9_T1a_72h	Dach9	T1a	72h	228	62	27	81	3325		
Dach9_T5a_1h	Dach9	T5a	1h	372	258	69	306	1465	2415	4115
Dach9_T5a_4h	Dach9	T5a	4h	372	224	60	270	1670	2865	
Dach9_T5a_72h	Dach9	T5a	72h	372	164	44	205	2190	4230	

Eigentümer: Andrea Bernhardt
Datum: 23.02.2026

Seite 2 von 2

Seite 122

Anhang A - 12: Drosselkennlinie in Abhängigkeit des Wasserstands

Drosselkennlinie in Abhängigkeit des Wasserstands

H [m]	Q [l/s] Dach01	Q [l/s] Dach02	Q [l/s] Dach03	Q [l/s] Dach04	Q [l/s] Dach05	Q [l/s]6 Dach08	Q [l/s] Dach09	Q [l/s] Dach10
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.001	0	0	0	0	0	0	0	0
0.002	0	0	0	0	0	0	0	0
0.003	0	0	0	0	0	0	0	0
0.004	0	0	0	0	0	0	0	0
0.005	0	0	0	0	0	0	0	0
0.006	0	0	0	0	0	0	0	0
0.007	0	0	0	0	0	0	0	0
0.008	0	0	0.87	0.1	0	1.1	0.3	0.4
0.009	0	0	1.06	0.3	0	1.3	0.8	1.1
0.01	0	0	1.26	0.5	0	1.5	1.5	1.9
0.011	0	0	1.48	0.8	0	1.8	2.2	4.0
0.012	0	0	1.7	1.0	0	2.3	3.1	7.1
0.013	0	0.4	1.94	1.4	0.20	2.9	4.1	10.8
0.014	0.3	0.4	2.19	1.7	1.09	3.6	5.2	15.1
0.015	0.3	0.7	2.45	2.1	1.22	9.9	6.3	19.9
0.016	0.4	1.1	2.71	2.5	1.38	20.9	7.6	25.2
0.017	0.4	1.6	2.99	3.0	1.56	35.0	8.9	30.8
0.018	0.5	2.2	3.27	3.4	1.76	51.6	10.2	36.9
0.019	0.5	2.8	8.24	3.9	1.97	70.3	11.7	45.1
0.02	0.5	3.5	17.07	4.4	2.19	91.0	13.1	55.3
0.021	0.6	4.3	28.44	5.1	2.43	113.4	14.7	66.8
0.022	0.8	5.1	41.85	6.0	2.68	137.4	16.3	79.3
0.023	0.9	6.9	57.02	7.0	2.94	163.0	17.9	92.9
0.024	1.1	9.3	73.77	8.0	3.21	190.0	19.6	107.4
0.025	1.4	12.3	91.96	9.2	3.58	218.4	21.4	122.8
0.026	1.7	15.7	111.49	10.5	4.03	248.1	23.2	138.9
0.027	2.1	19.4	132.25	11.8	4.55	279.0	28.8	155.8
0.028	2.5	23.5	154.2	13.2	5.12	311.1	37.5	173.5
0.029	2.9	27.8	177.26	14.7	5.73	344.4	48.3	191.8

H [m]	Q [l/s] Dach01	Q [l/s] Dach02	Q [l/s] Dach03	Q [l/s] Dach04	Q [l/s] Dach05	Q [l/s]6 Dach08	Q [l/s] Dach09	Q [l/s] Dach10
0.03	3.4	32.4	201.38	16.2	6.37	378.8	60.8	210.7
0.031	4.2	37.3	228.58	19.9	7.06	414.3	74.7	230.3
0.032	5.4	42.5	258.45	25.3	7.78	450.8	89.9	250.5
0.033	6.8	47.8	290.37	31.8	8.53	488.3	106.3	271.3
0.034	8.4	53.4	324.11	39.3	9.31	526.9	123.8	292.7
0.035	10.2	59.2	359.49	47.7	10.12	566.4	142.4	314.7
0.036	12.1	65.2	396.43	56.7	10.96	606.8	161.9	337.1
0.037	14.1	71.4	434.82	66.5	11.83	648.2	182.3	360.2
0.038	16.3	77.9	474.61	76.9	12.72	690.5	203.6	383.7
0.039	18.6	84.4	515.73	87.8	13.64	733.6	225.8	407.8
0.04	21.0	91.2	558.13	99.4	14.58	777.6	248.8	432.3
0.041	23.5	98.2	601.78	111.4	15.55	822.5	272.5	457.4
0.042	26.1	105.3	646.62	124.0	16.54	868.2	297.1	482.9
0.043	28.8	112.6	692.63	137.1	17.55	914.7	322.3	508.9
0.044	31.6	120.0	739.78	150.6	18.58	962.0	348.3	535.3
0.045	34.5	127.7	788.03	164.6	19.64	1 010.2	375.0	562.2
0.046	37.5	135.4	837.35	179.0	20.71	1 059.1	402.3	589.6
0.047	40.5	143.4	887.73	193.8	21.81	1 108.7	430.3	617.3
0.048	43.7	151.5	939.14	209.1	22.93	1 159.1	459.0	645.6
0.049	46.9	159.7	991.55	224.7	24.06	1 210.3	488.3	674.2
0.05	50.2	168.1	1044.95	240.8	25.22	1 262.2	518.2	703.3
0.051	53.6	176.6	1099.32	257.2	26.40	1 314.8	548.7	732.7
0.052	57.0	185.3	1154.65	274.0	27.59	1 368.1	579.8	762.6
0.053	60.6	194.1	1210.9	291.2	28.81	1 422.1	611.4	792.9
0.054	64.2	203.0	1268.07	308.7	30.04	1 476.8	643.7	823.6
0.055	67.8	212.1	1326.15	326.5	31.29	1 532.2	676.5	854.6
0.056	71.6	221.3	1385.12	344.7	32.56	1 588.3	709.9	886.1
0.057	75.4	230.6	1444.96	363.3	33.84	1 645.1	743.8	917.9
0.058	79.3	240.1	1505.66	382.1	35.14	1 702.5	778.2	950.1
0.059	83.2	249.7	1567.21	401.3	36.46	1 760.5	813.1	982.7
0.06	87.2	259.4	1629.6	420.9	37.80	1 819.2	848.6	1 015.6
0.07	130.6	363.1	2297.27	632.5	52.04	2 440.4	1 230.3	1 364.5
0.08	179.6	477.9	3038.49	871.4	67.76	3 119.6	1 656.9	1 746.3

H [m]	Q [l/s] Dach01	Q [l/s] Dach02	Q [l/s] Dach03	Q [l/s] Dach04	Q [l/s] Dach05	Q [l/s]6 Dach08	Q [l/s] Dach09	Q [l/s] Dach10
0.09	233.5	602.8	3846.5	1 134.8	84.83	3 852.3	2 124.3	2 158.5
0.1	292.0	737.1	4716.13	1 420.6	103.16	4 634.7	2 629.0	2 598.8

Anhang A - 13: Kalibrierergebnis und qualitative Bewertung für Dach 1

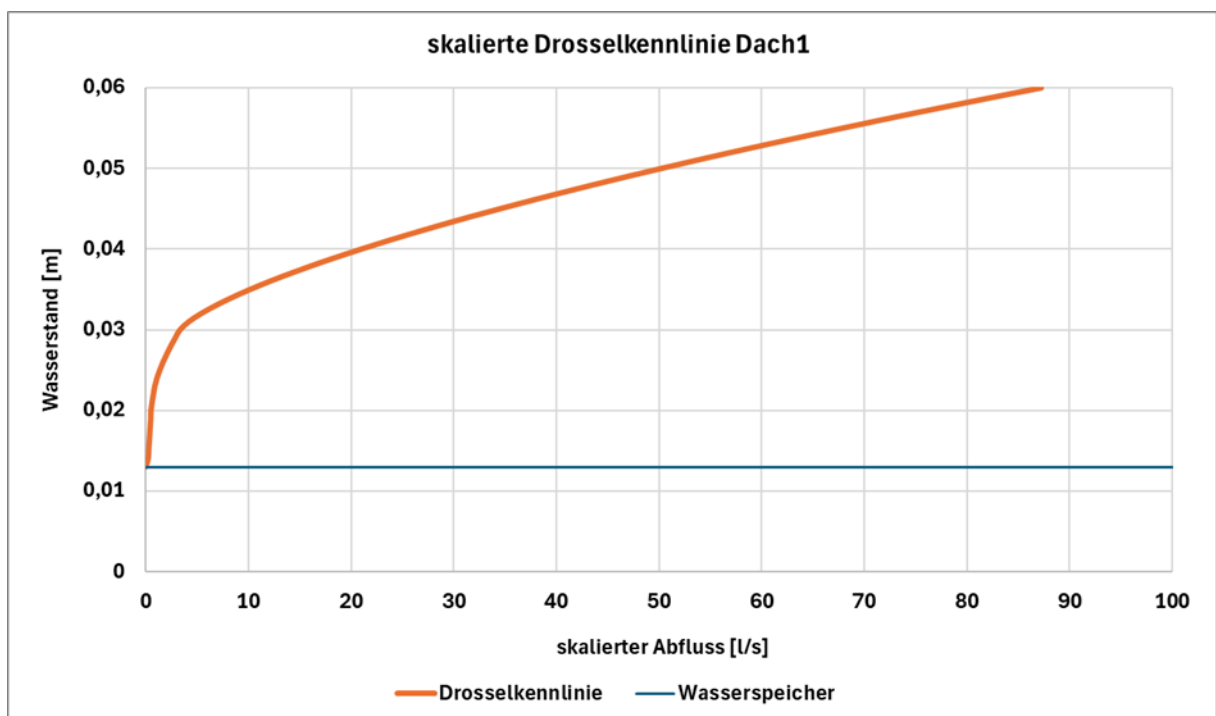
Die nachfolgenden Abbildungen in den Anhängen A - 13 bis A - 20 zeigen je Dach:

- die kalibrierten Parameter (A),
- die Drosselkennlinie des Speicherelements (B) sowie
- die simulierten und gemessenen Abflussganglinien für die Modellregen mit Wiederkehrzeiten $T = 1a, 5a$ und $100a$ (C1, C2, C3).

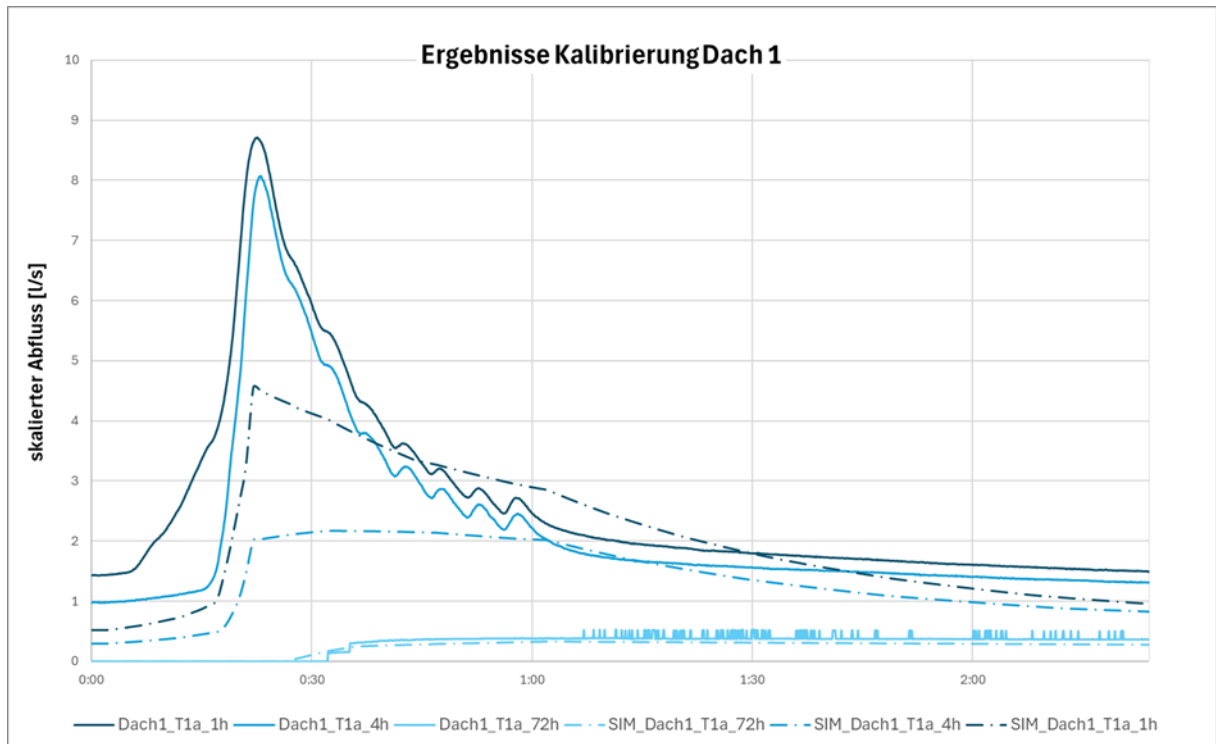
Der Begriff „Abtropfzeit“ bezeichnet in den folgenden Tabellen die Entleerungszeit des Gründachspeichers.

(A) Kalibrierte Parameter des Transportelements und Speicherelements für Dach 1

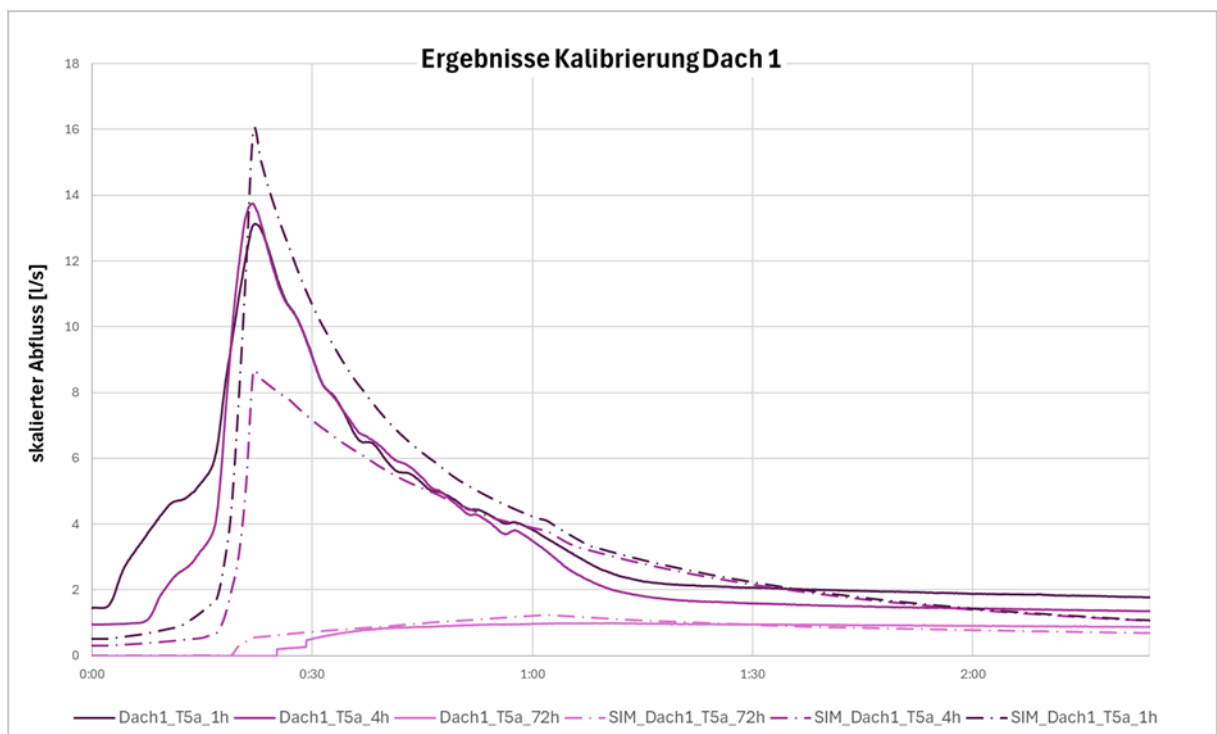
Element	Parameter	Eingabewert	Einheit	Bemerkung
Transportstr.	Fließzeit Translation	3	min	
Speicher	Stauziel für 1h Abtropfzeit	0,020	m	Gesättigt
	Stauziel für 4h Abtropfzeit	0,015	m	Teilgesättigt
	Stauziel für 72h Abtropfzeit	0,000	m	Ungesättigt
	Wasserspeicher (aus Drossel-KL)	0,013	m	$H_{\max}$ ohne Drosselleistung
	Drossel-KL	variiert	-	Digitaler Anhang



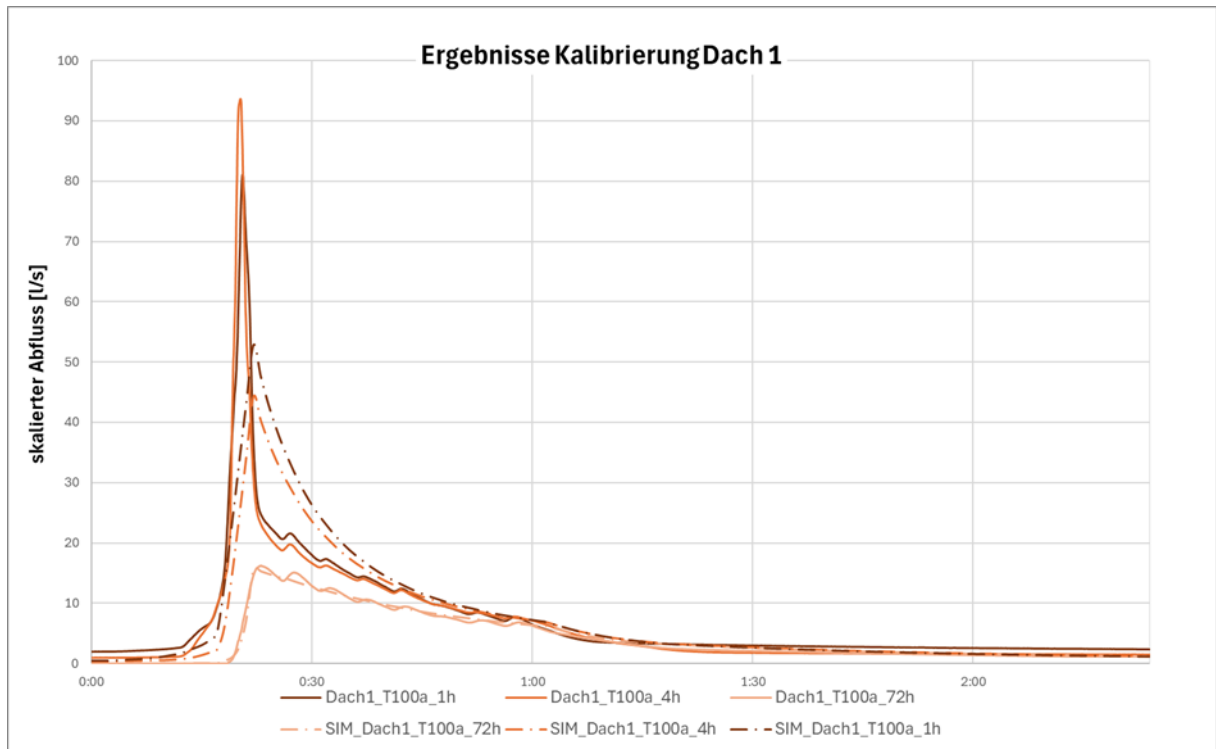
(B) Drosselkennlinie des Speicherelements des Ersatzmodell-Daches 1



(C1) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=1a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) für Dach 1



(C2) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=5a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) für Dach 1

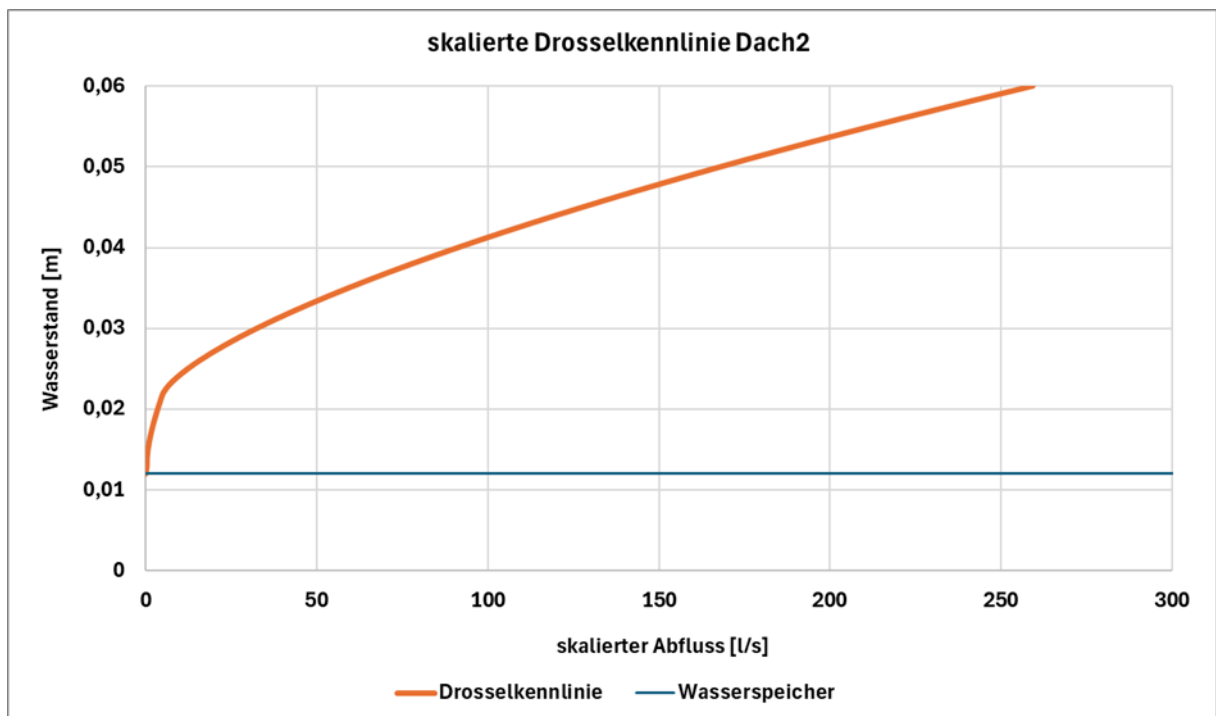


(C3) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=100a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) für Dach 1

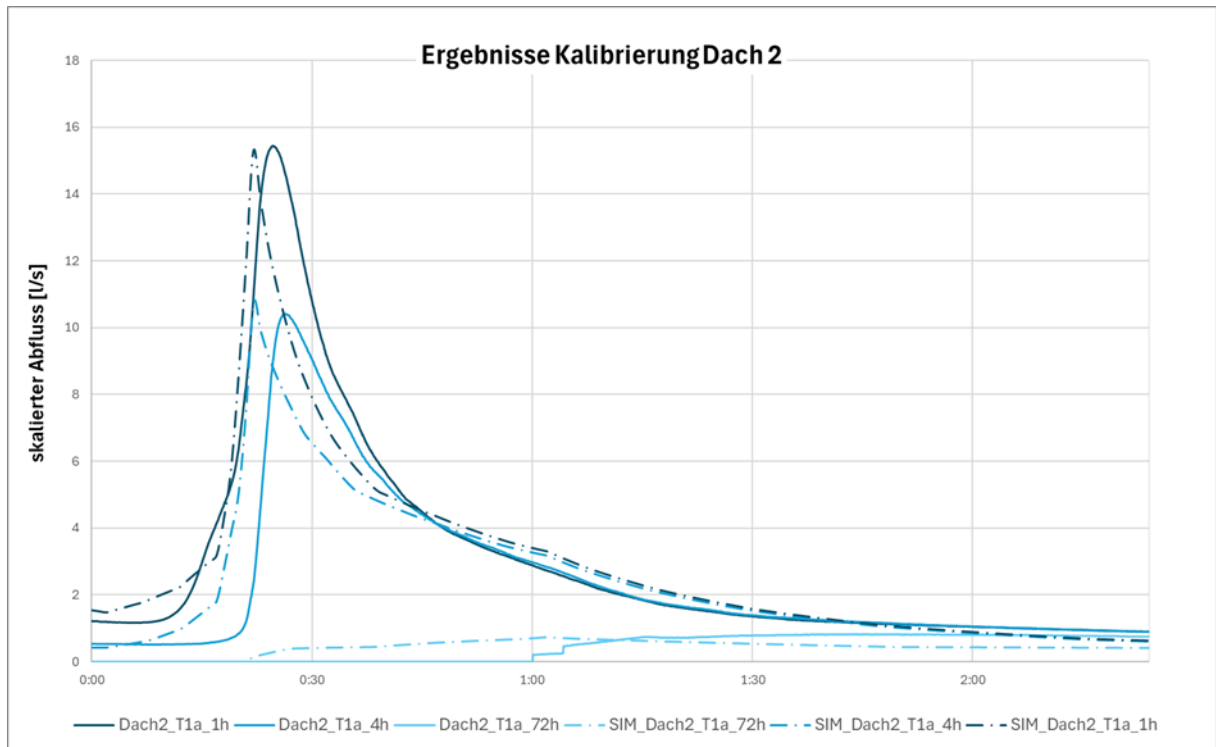
Anhang A - 14: Kalibrierergebnis und qualitative Bewertung für Dach 2

(A) Kalibrierte Parameter des Transportelements und Speicherelements für Dach 2

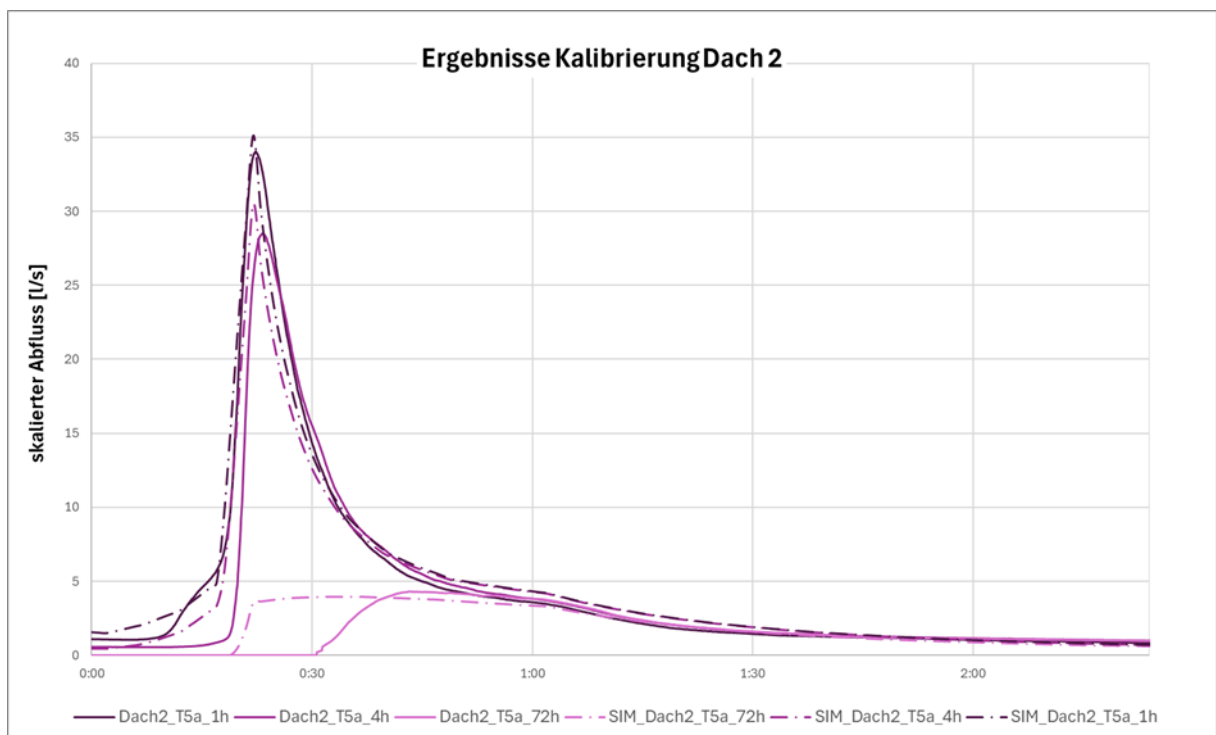
Element	Parameter	Eingabewert	Einheit	Bemerkung
Transportstr.	Fließzeit Translation	3	min	
Speicher	Stauziel für 1h Abtropfzeit	0,017	m	Gesättigt
	Stauziel für 4h Abtropfzeit	0,014	m	Teilgesättigt
	Stauziel für 72h Abtropfzeit	0,000	m	Ungesättigt
	Wasserspeicher (aus Drossel-KL)	0,012	m	H _{max} o. Drosselleistung
	Drossel-KL	variiert	-	Digitaler Anhang



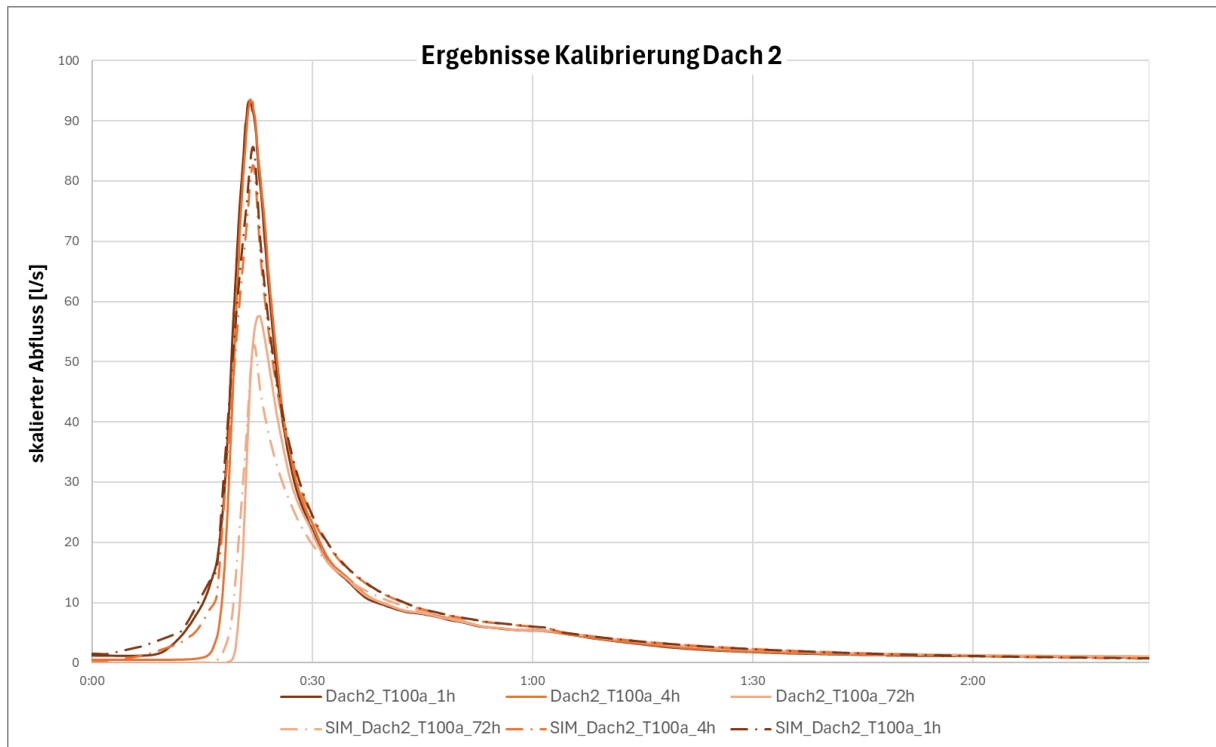
(B) Drosselkennlinie des Speicherelements des Ersatzmodell-Daches 2



(C1) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=1a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach2)



(C2) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=5a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach2)

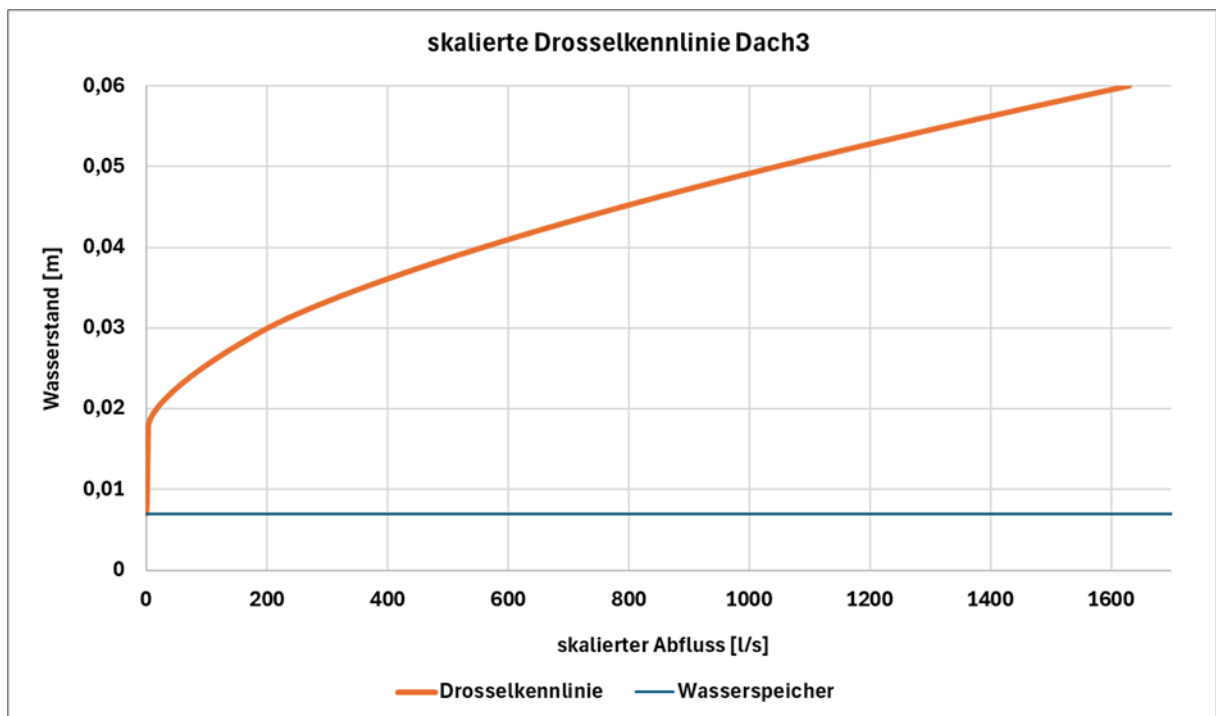


(C3) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=100a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach2)

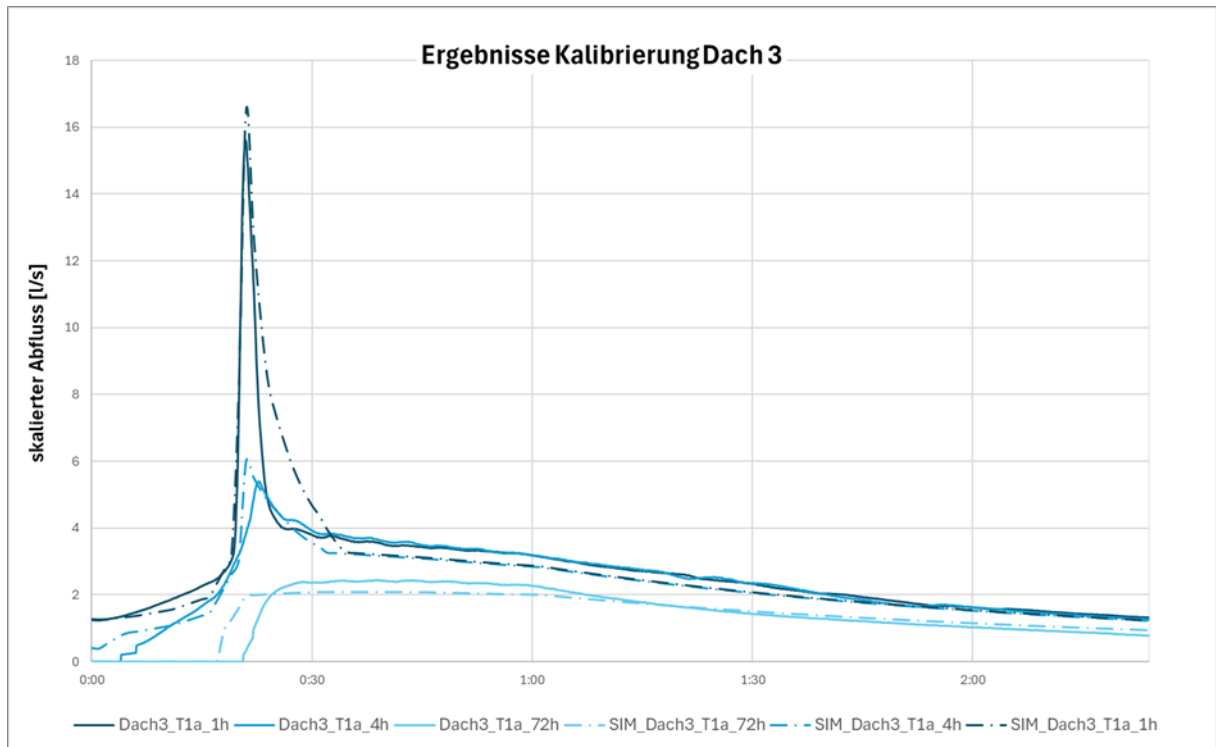
Anhang A - 15: Kalibrierergebnis und qualitative Bewertung für Dach 3

(A) Kalibrierte Parameter des Transportelements und Speicherelements für Dach 3

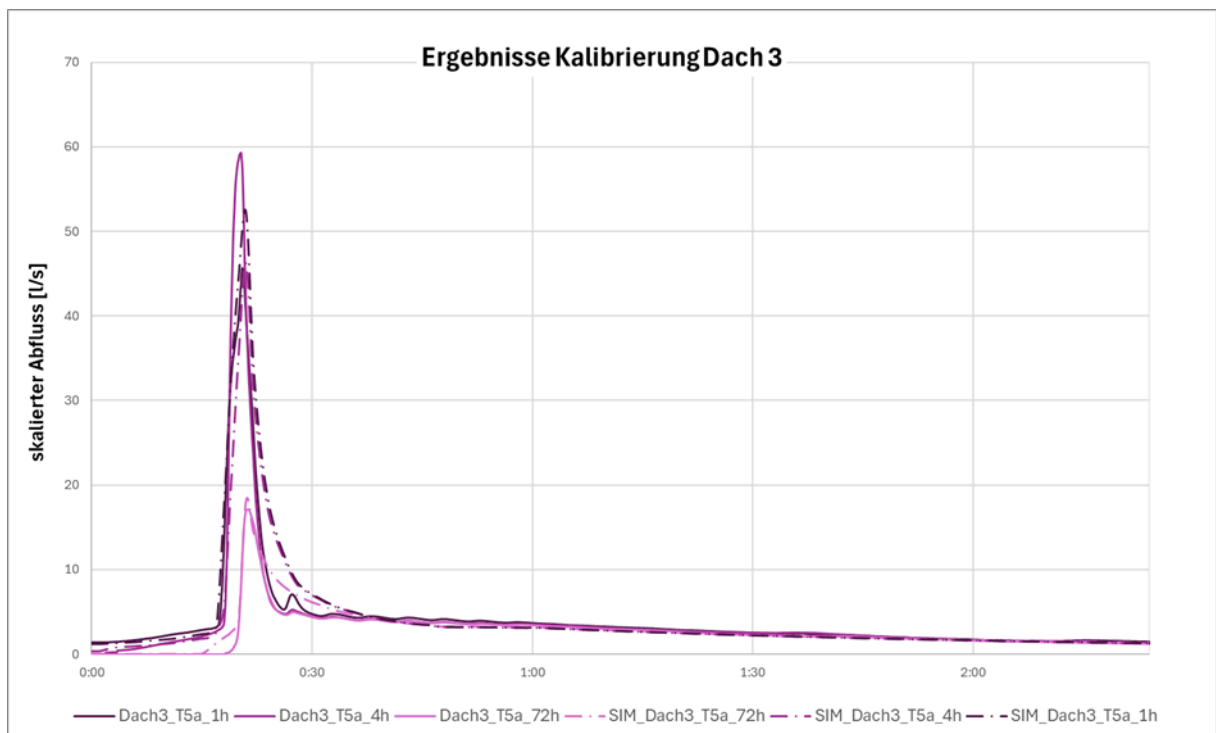
Element	Parameter	Eingabewert	Einheit	Bemerkung
Transportstr.	Fließzeit Translation	2	min	
Speicher	Stauziel für 1h Abtropfzeit	0,010	m	Gesättigt
	Stauziel für 4h Abtropfzeit	0,008	m	Teilgesättigt
	Stauziel für 72h Abtropfzeit	0,001	m	Ungesättigt
	Wasserspeicher (aus Drossel-KL)	0,007	m	$H_{\max}$ o. Drosselleistung
	Drossel-KL	Variiert	-	Digitaler Anhang



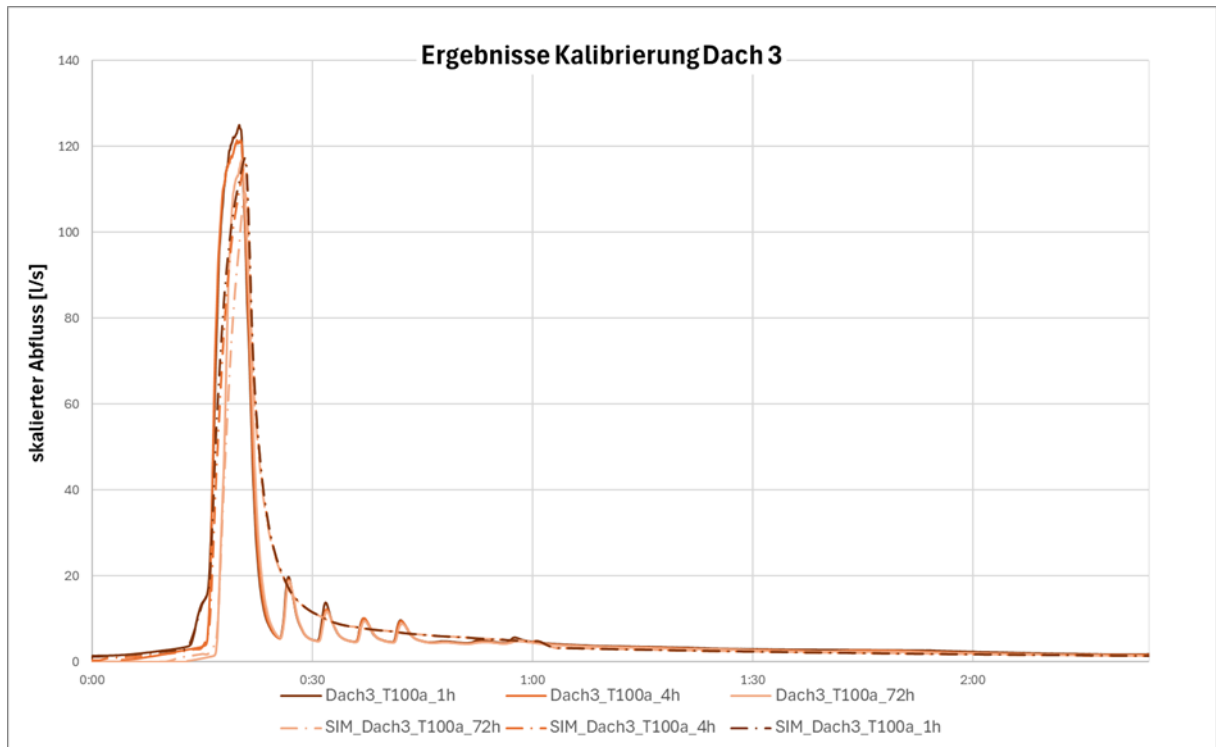
(B) Drosselkennlinie des Speicherelements des Ersatzmodell-Daches 3



(C1) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=1a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach3)



(C2) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=5a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach3)

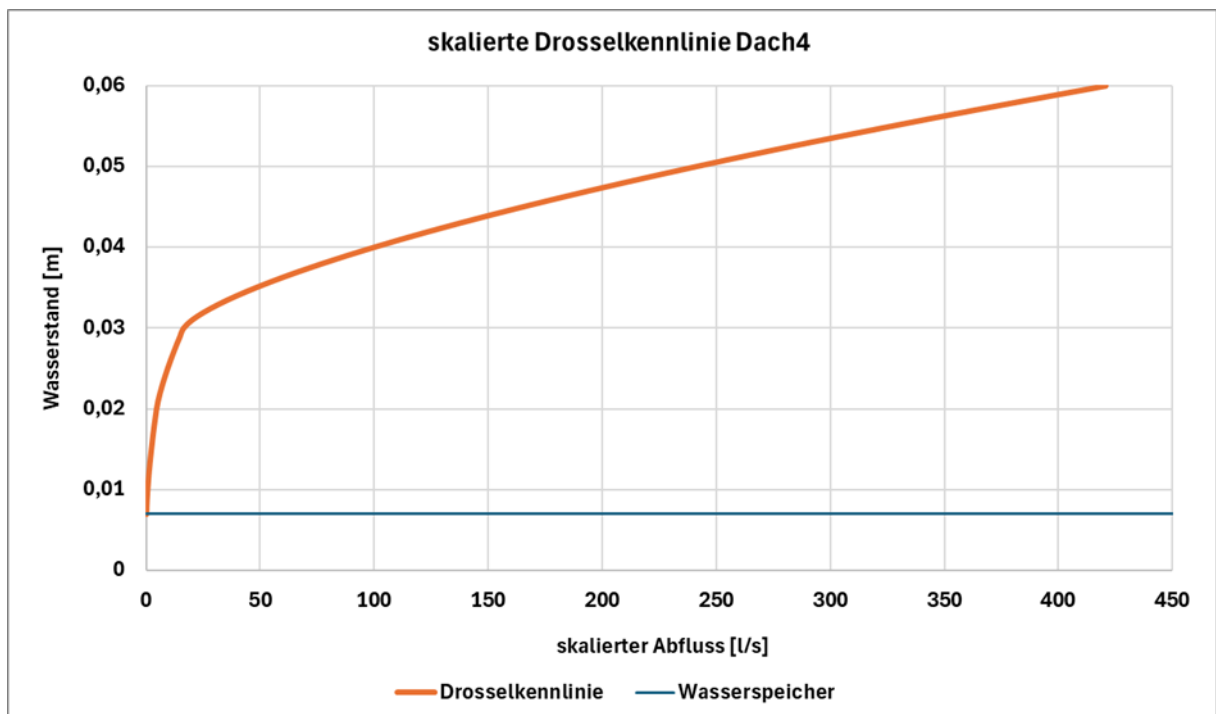


(C3) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=100a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach3)

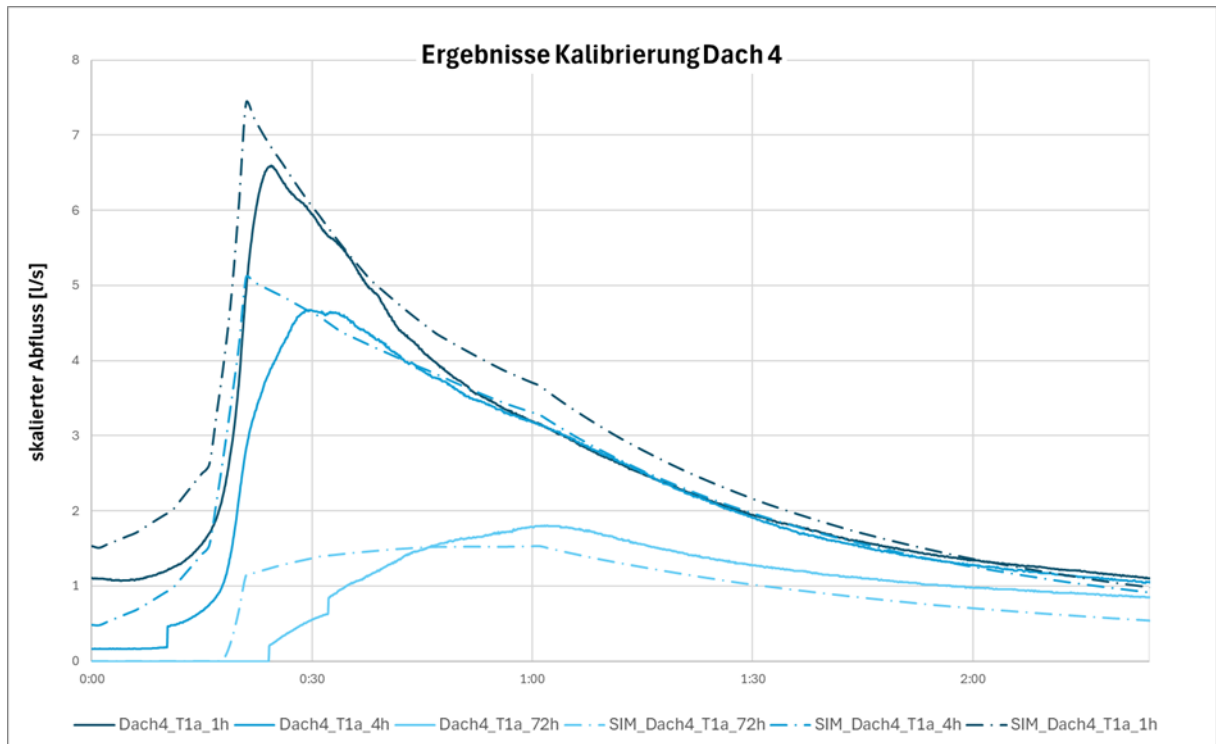
Anhang A - 16: Kalibrierergebnis und qualitative Bewertung für Dach 4

(A) Kalibrierte Parameter des Transportelements und Speicherelements für Dach 4

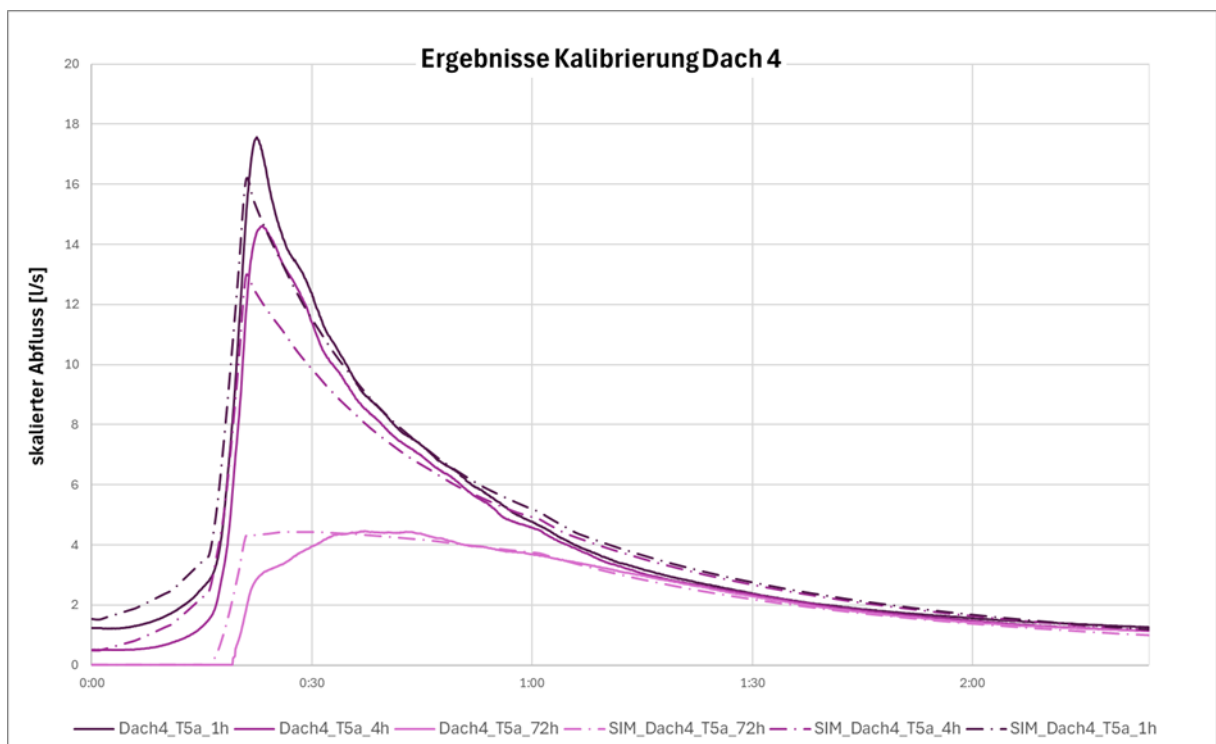
Element	Parameter	Eingabewert	Einheit	Bemerkung
Transportstr.	Fließzeit Translation	2	min	
Speicher	Stauziel für 1h Abtropfzeit	0,014	m	Gesättigt
	Stauziel für 4h Abtropfzeit	0,010	m	Teilgesättigt
	Stauziel für 72h Abtropfzeit	0,000	m	Ungesättigt
	Wasserspeicher (aus Drossel-KL)	0,008	m	H _{max} o. Drosselleistung
	Drossel-KL	variiert	-	Digitaler Anhang



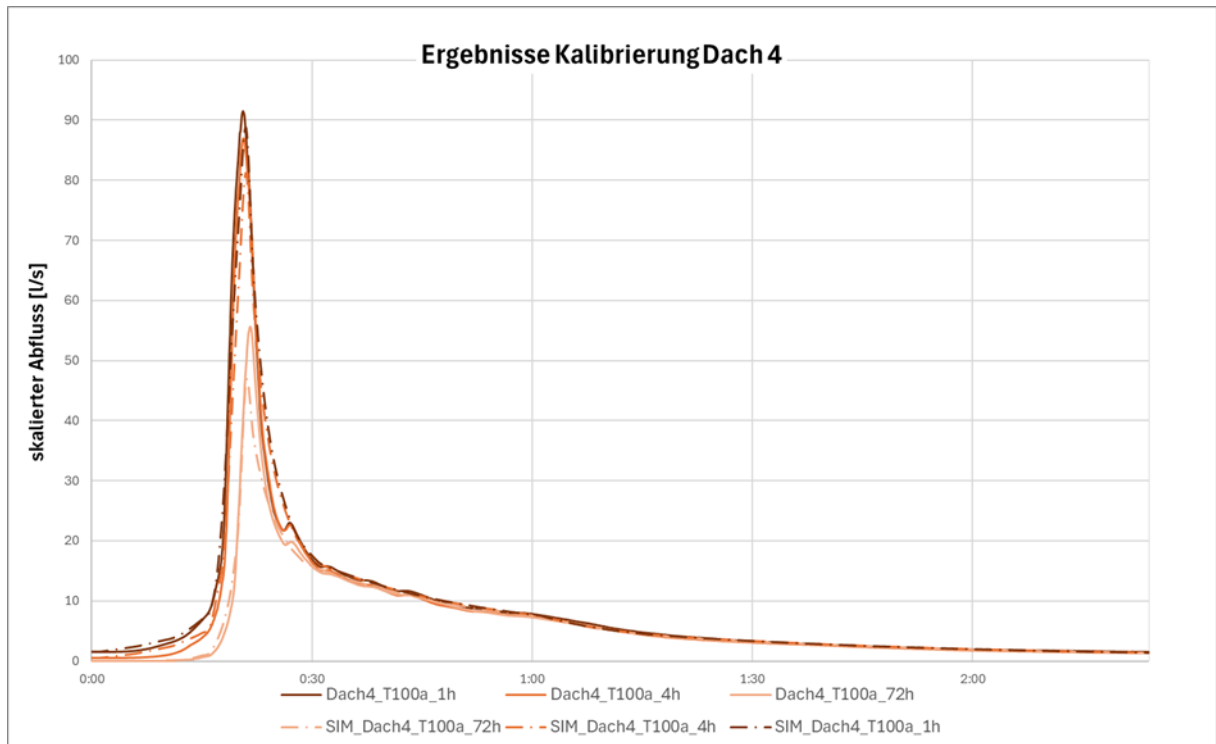
(B) Drosselkennlinie des Speicherelements des Ersatzmodell-Daches 4



(C1) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=1a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach4)



(C2) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=5a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach4)

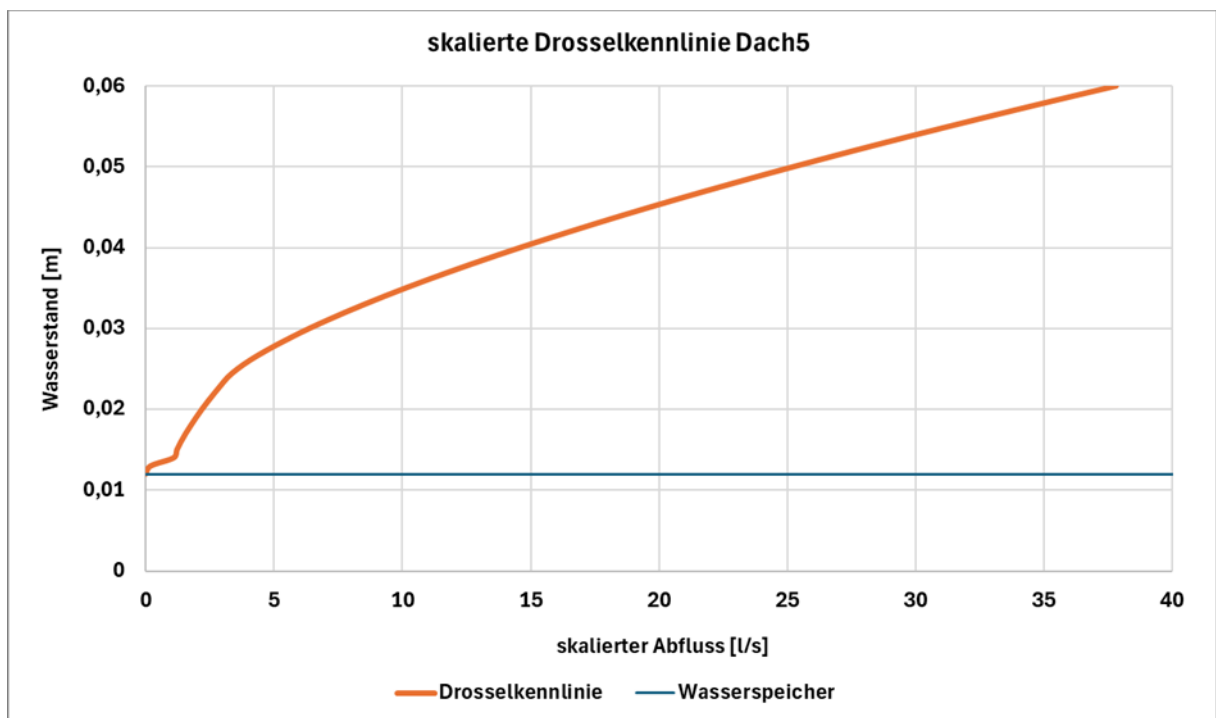


(C3) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=100a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach4)

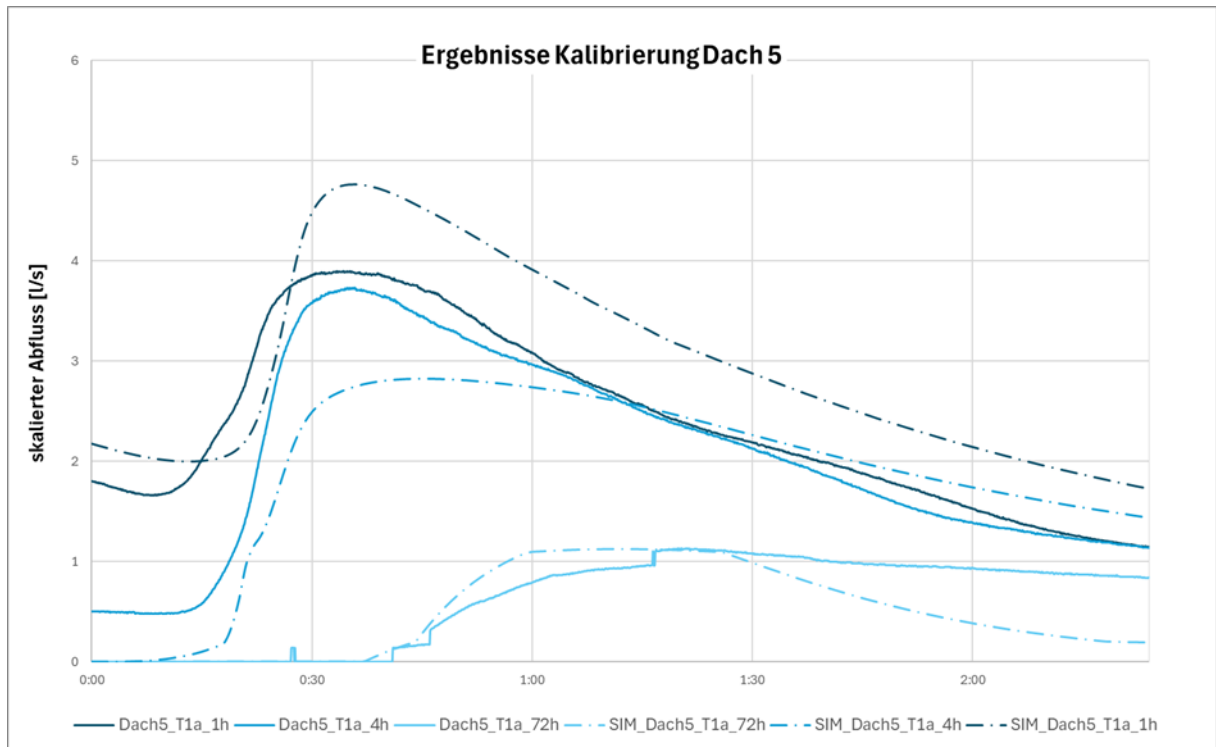
Anhang A - 17: Kalibrierergebnis und qualitative Bewertung für Dach 5

(A) Kalibrierte Parameter des Transportelements und Speicherelements für Dach 5. Blau gekennzeichnet sind die variierten Parameter, die bei den anderen Dächern nicht verstellt wurden

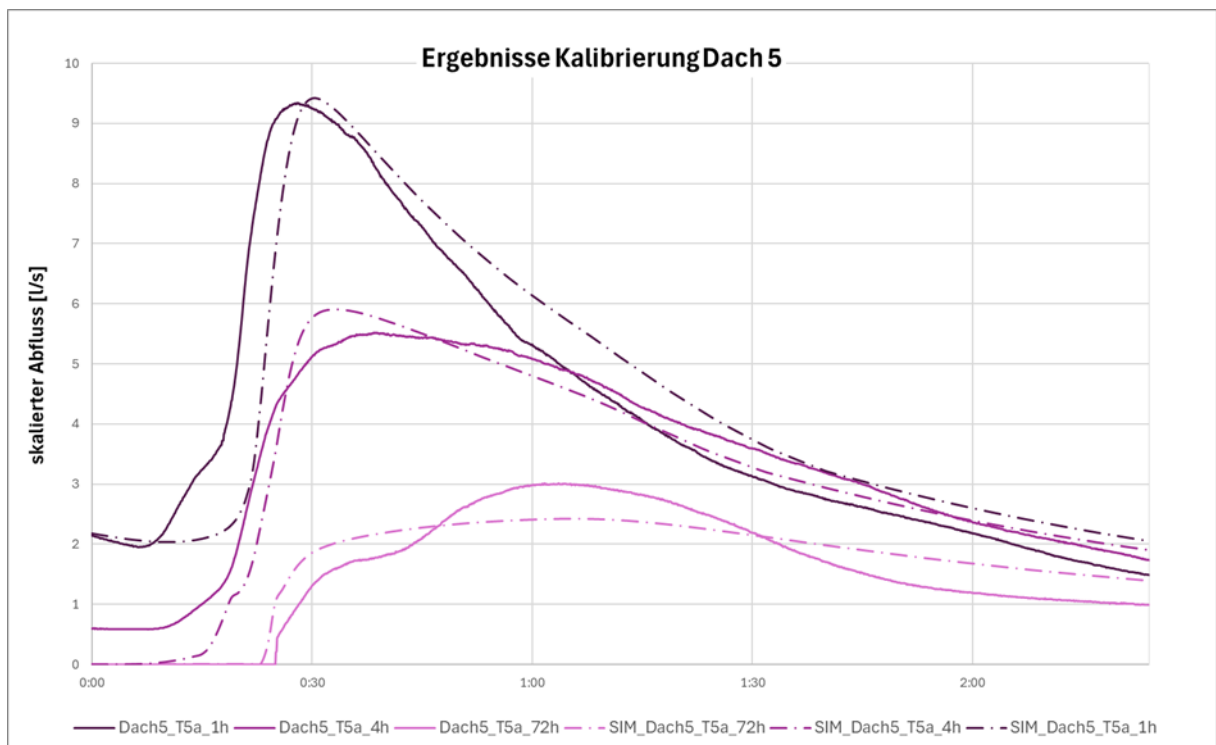
Element	Parameter	Eingabewert	Einheit	Bemerkung
Fläche	Anzahl Speicher	2	-	
	Speicherkonstante	5	min	
Regenabfluss-Parameter (befestigt)	Speicherkonstante konstant	Nein	-	
	Kritische Regenspende	100	l/(s*ha)	
	Faktor Speicherkonstante Min	0,5	-	
	Faktor Speicherkonstante Max	2	-	
Transportstr.	Fließzeit Translation	3	min	
Speicher	Stauziel für 1h Abtropfzeit	0,020	m	Gesättigt
	Stauziel für 4h Abtropfzeit	0,012	m	Teilgesättigt
	Stauziel für 72h Abtropfzeit	0,000	m	Ungesättigt
	Wasserspeicher (aus Drossel-KL)	0,012	m	H _{max} o. Drosselleistung
	Drossel-KL	variiert	-	Digitaler Anhang



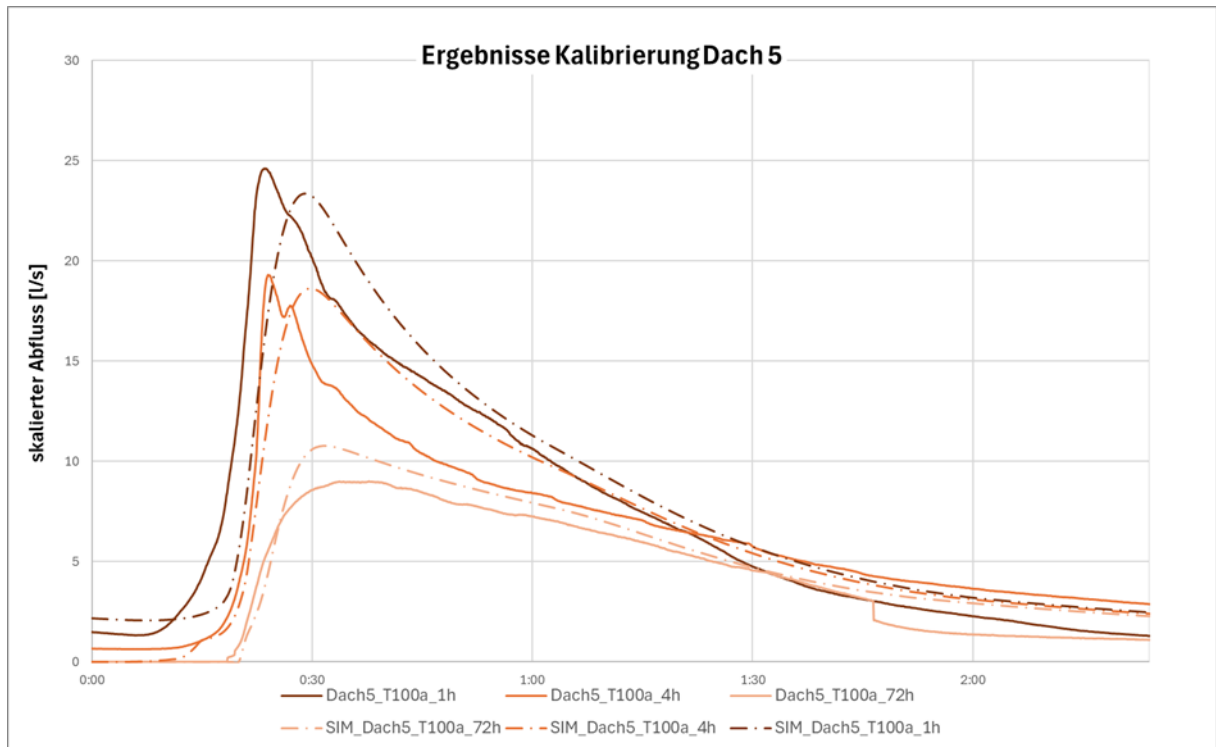
(B) Drosselkennlinie des Speicherelements des Ersatzmodell-Daches 5



(C1) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=1a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach5)



(C2) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=5a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach5)

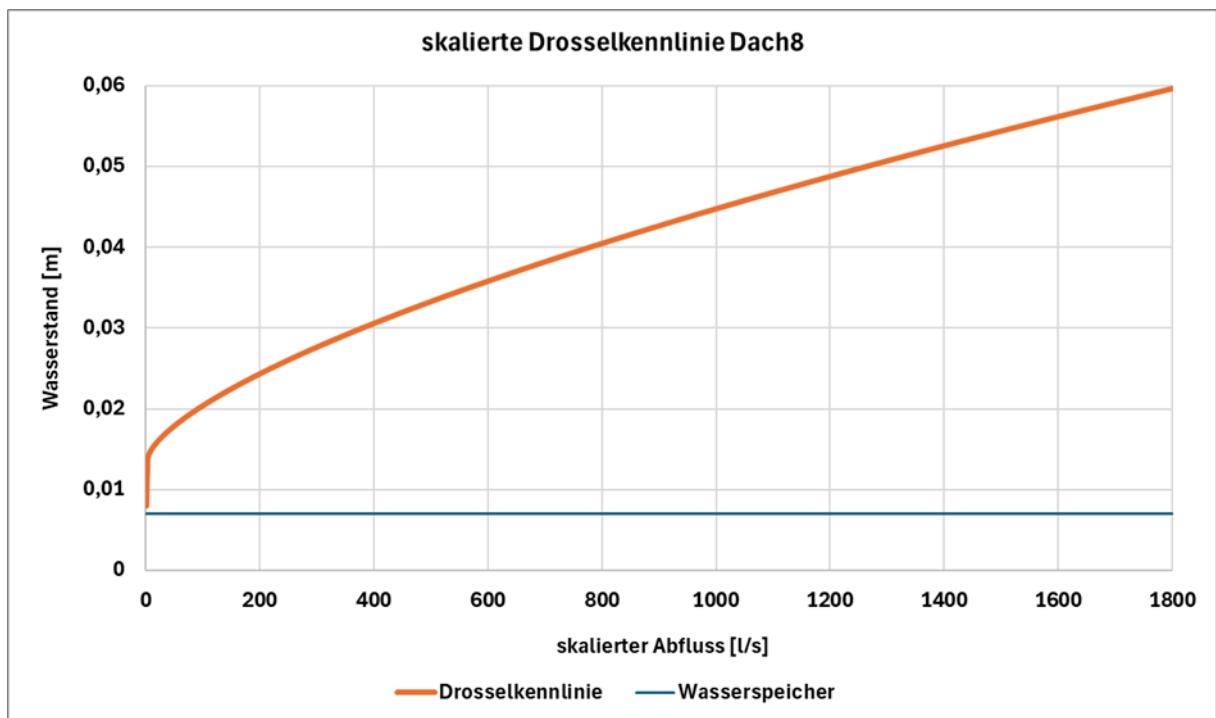


(C3) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=100a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach5)

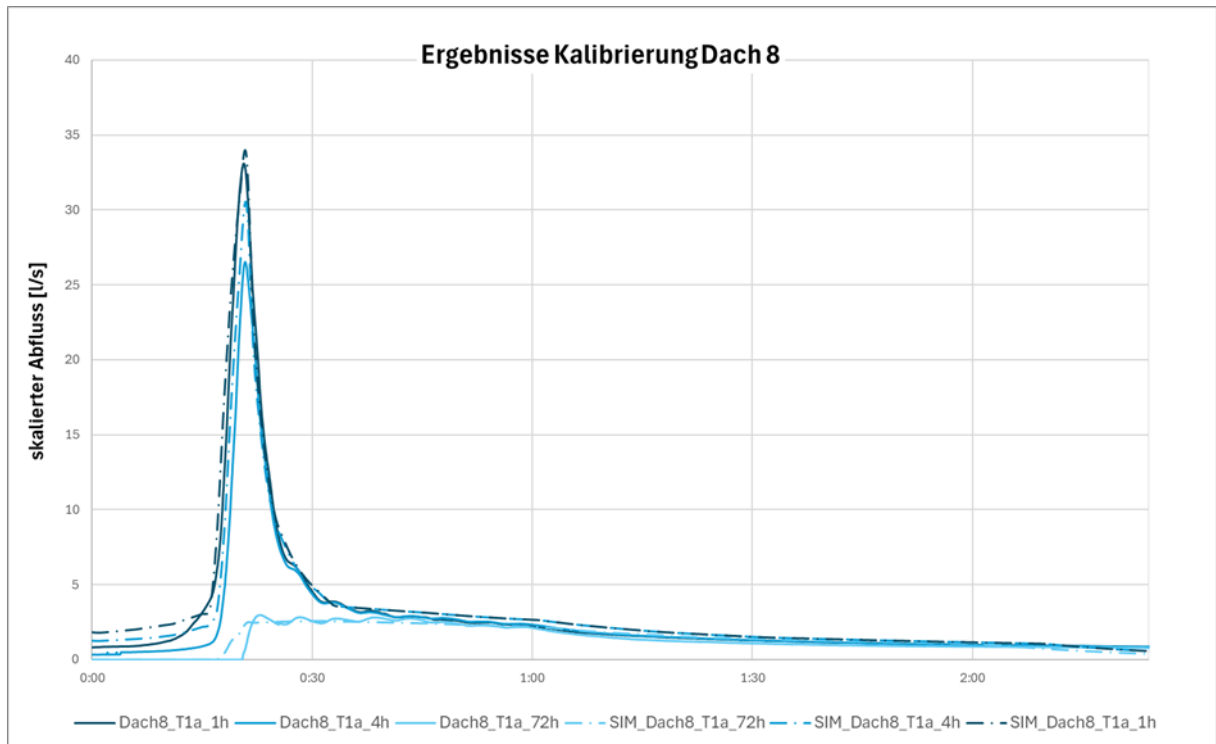
Anhang A - 18: Kalibrierergebnis und qualitative Bewertung für Dach 8

(A) Kalibrierte Parameter des Transportelements und Speicherelements für Dach 8

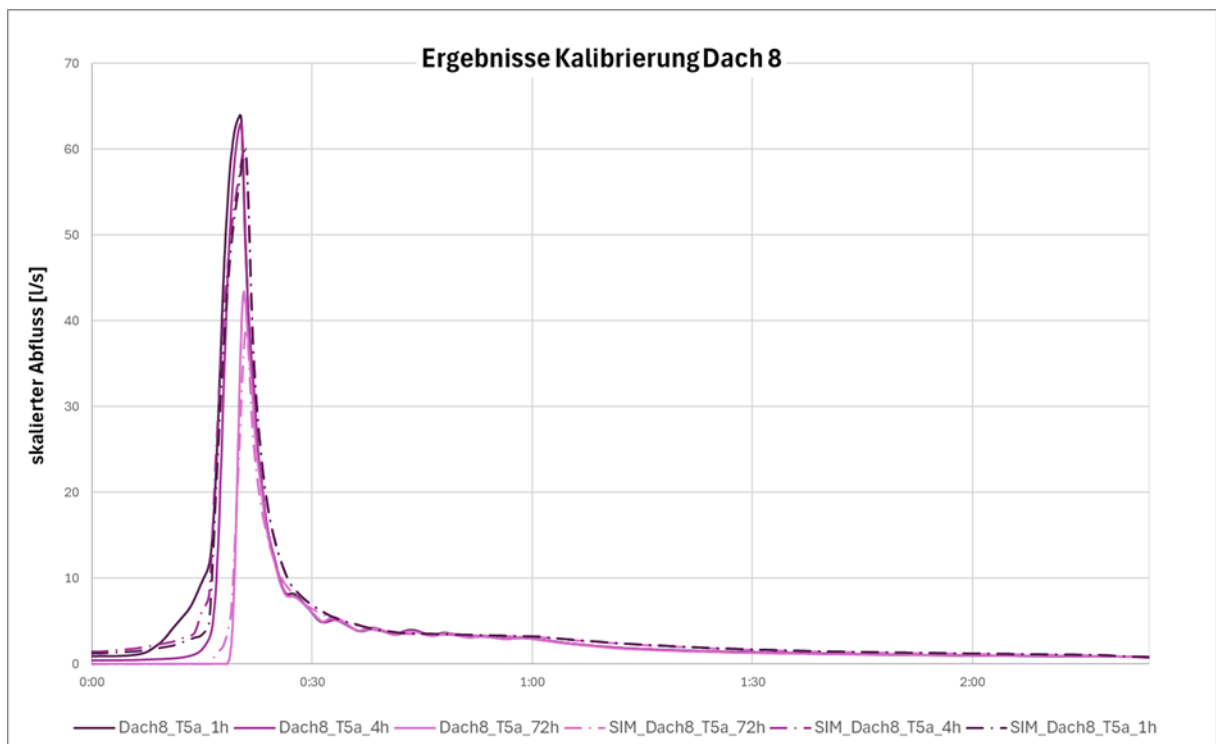
Element	Parameter	Eingabewert	Einheit	Bemerkung
Transportstr.	Fließzeit Translation	2	min	
Speicher	Stauziel für 1h Abtropfzeit	0,011	m	Gesättigt
	Stauziel für 4h Abtropfzeit	0,009	m	Teilgesättigt
	Stauziel für 72h Abtropfzeit	0,000	m	Ungesättigt
	Wasserspeicher (aus Drossel-KL)	0,007	m	H _{max} o. Drosselleistung
	Drossel-KL	variiert	-	Digitaler Anhang



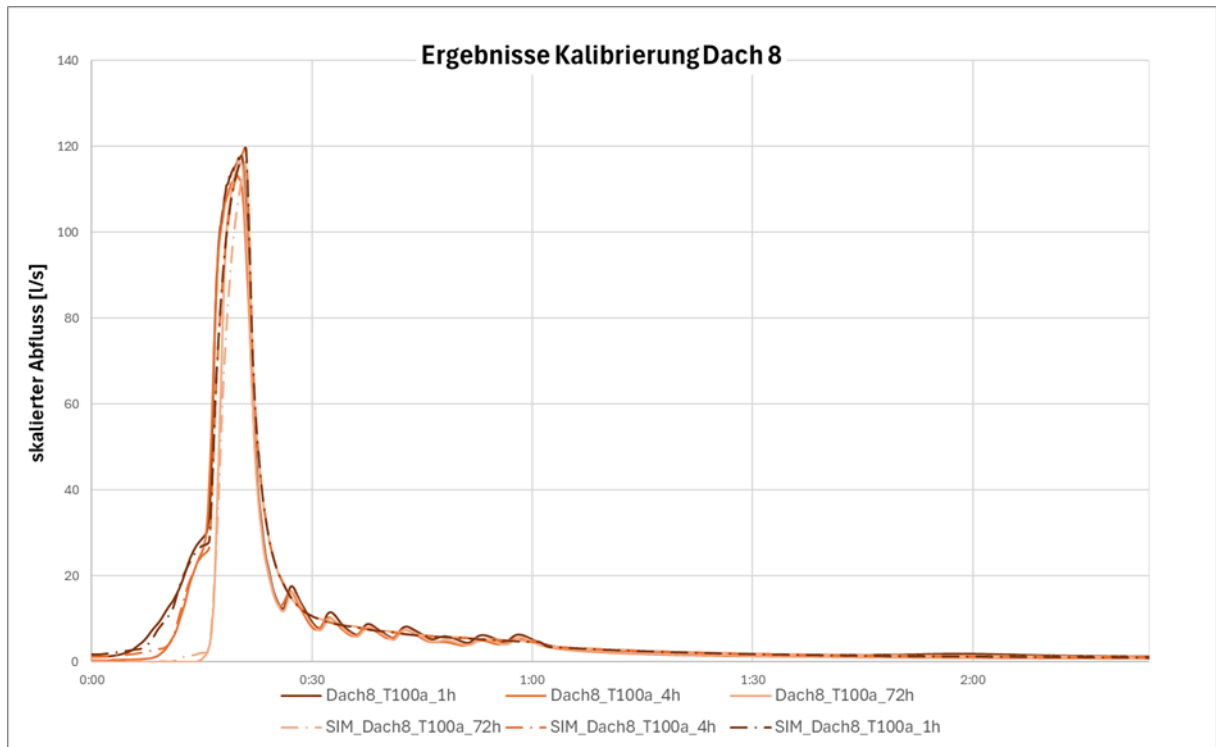
(B) Drosselkennlinie des Speicherelements des Ersatzmodell-Daches 8



(C1) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=1a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach8)



(C2) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=5a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach8)

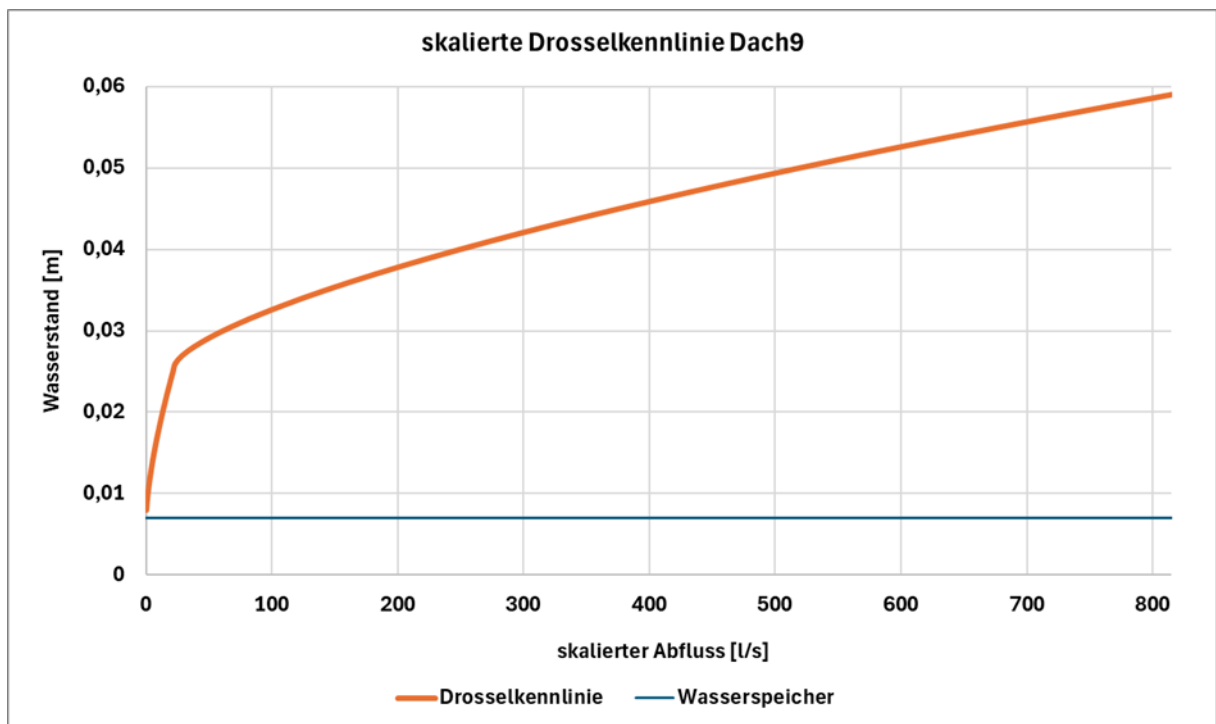


(C3) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=100a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach8)

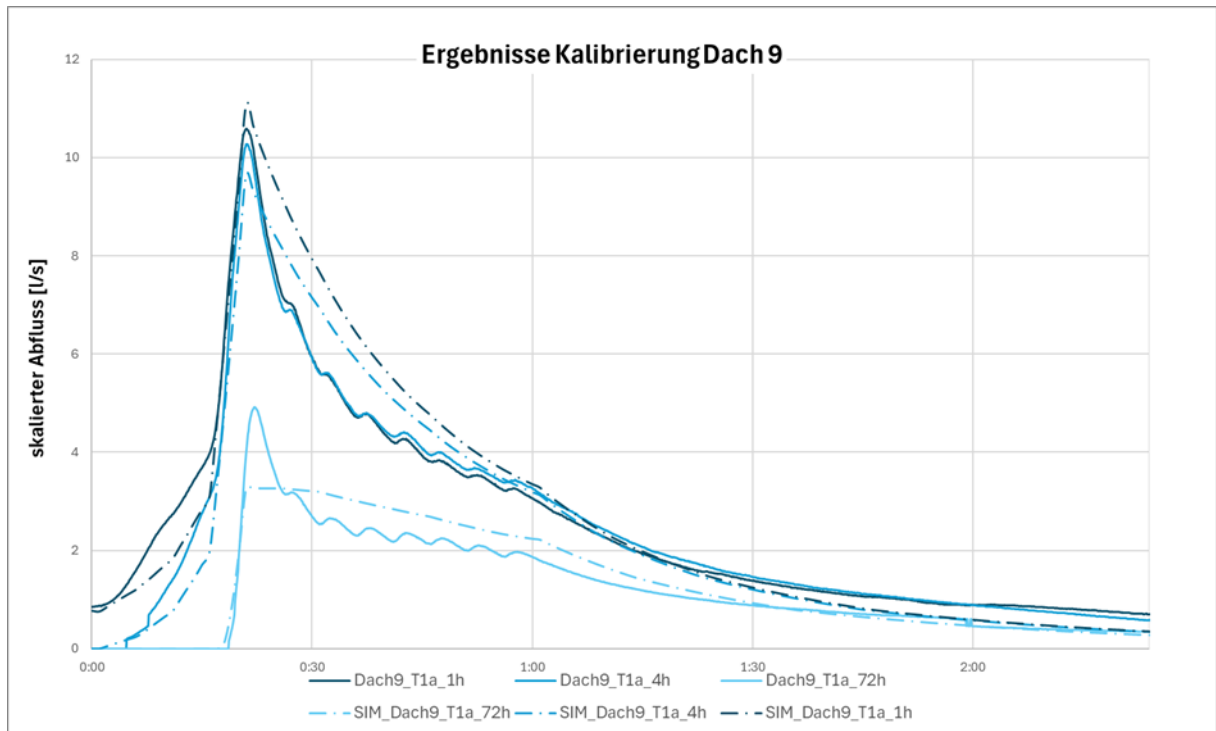
Anhang A - 19: Kalibrierergebnis und qualitative Bewertung für Dach 9

(A) Kalibrierte Parameter des Transportelements und Speicherelements für Dach 9

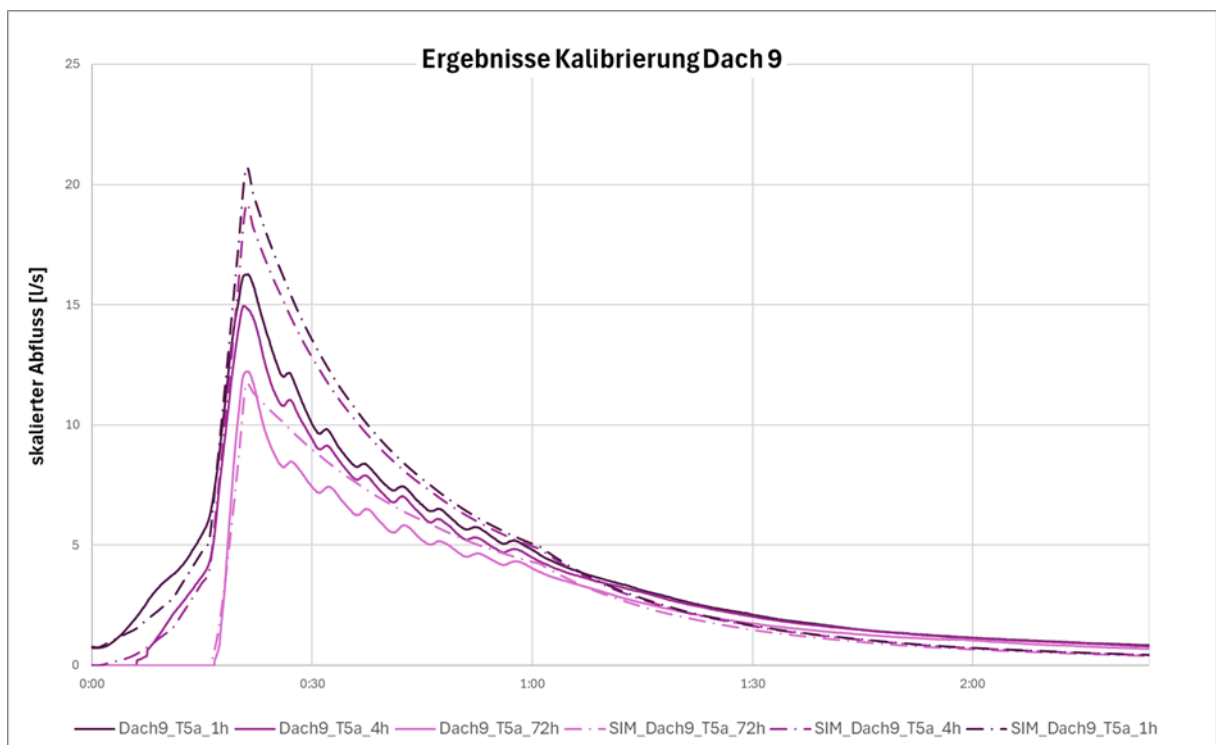
Element	Parameter	Eingabewert	Einheit	Bemerkung
Transportstr.	Fließzeit Translation	2	min	
Speicher	Stauziel für 1h Abtropfzeit	0,009	m	Gesättigt
	Stauziel für 4h Abtropfzeit	0,007	m	Teilgesättigt
	Stauziel für 72h Abtropfzeit	0,000	m	Ungesättigt
	Wasserspeicher (aus Drossel-KL)	0,007	m	$H_{\max}$ o.Drosselleistung
	Drossel-KL	variiert	-	Digitaler Anhang



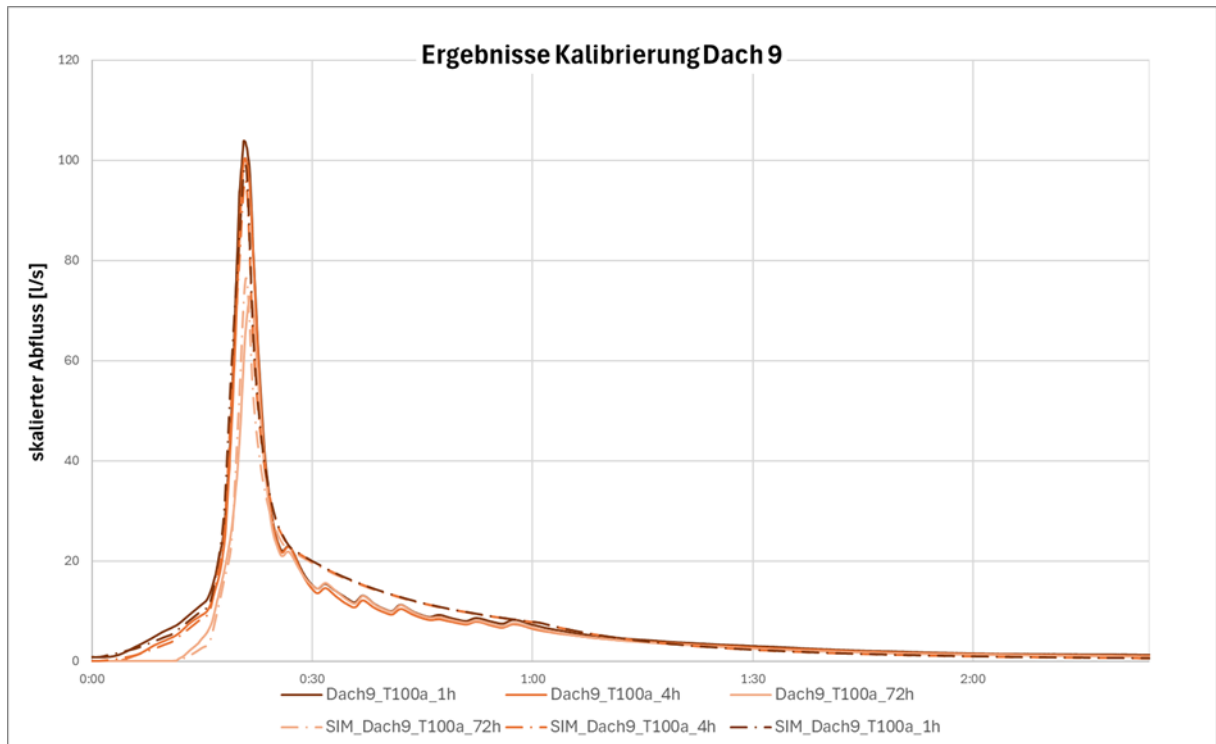
(B) Drosselkennlinie des Speicherelements des Ersatzmodell-Daches 9



(C1) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=1a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach9)



(C2) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=5a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach9)

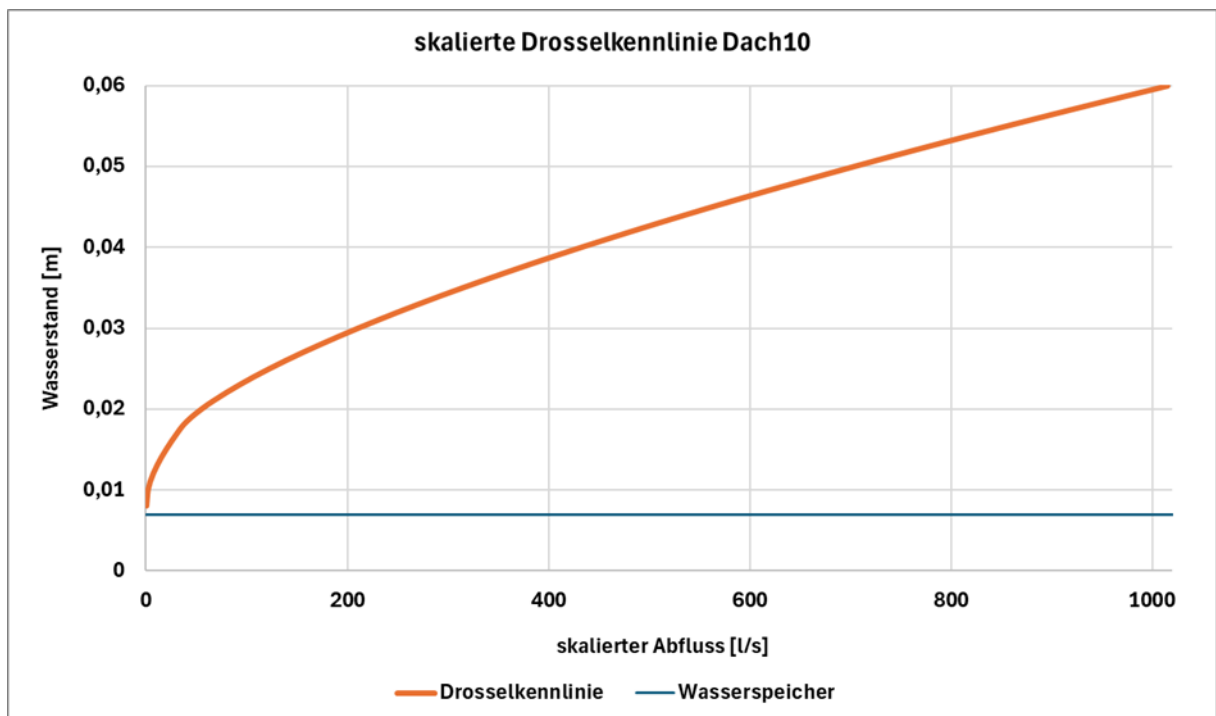


(C3) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=100a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach9)

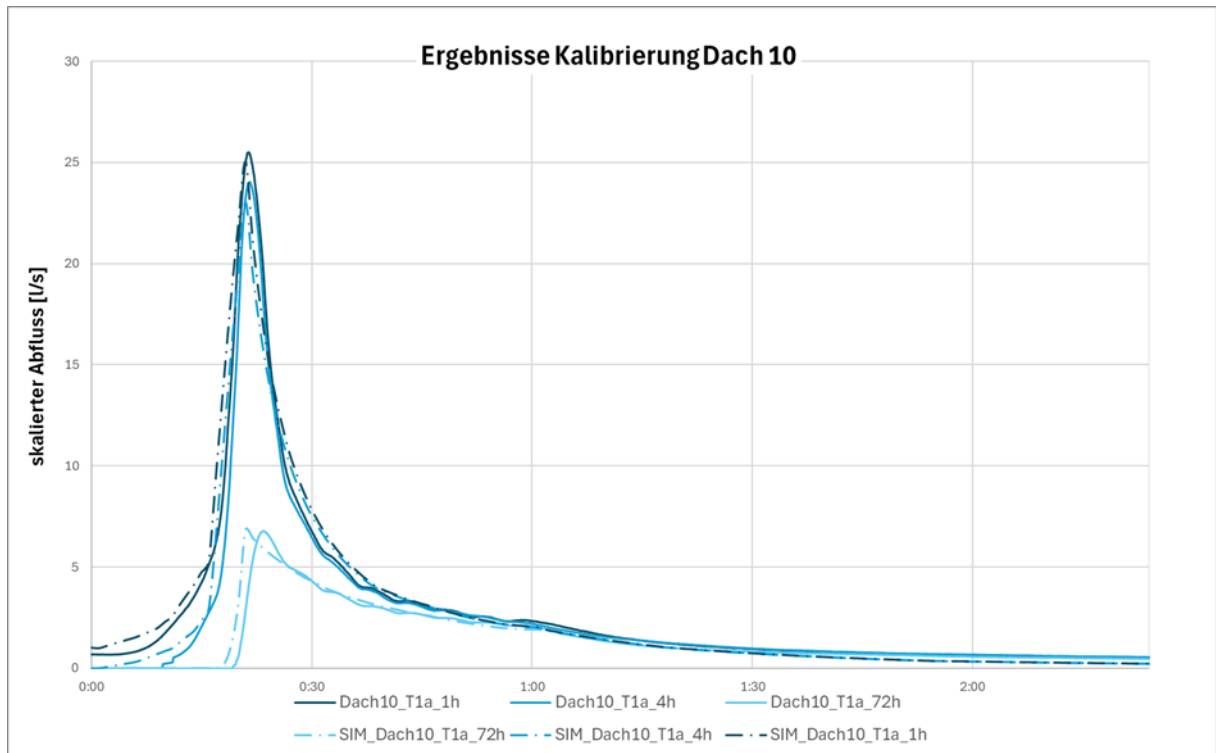
Anhang A - 20: Kalibrierergebnis und qualitative Bewertung für Dach 10

(A) Kalibrierte Parameter des Transportelements und Speicherelements für Dach 10

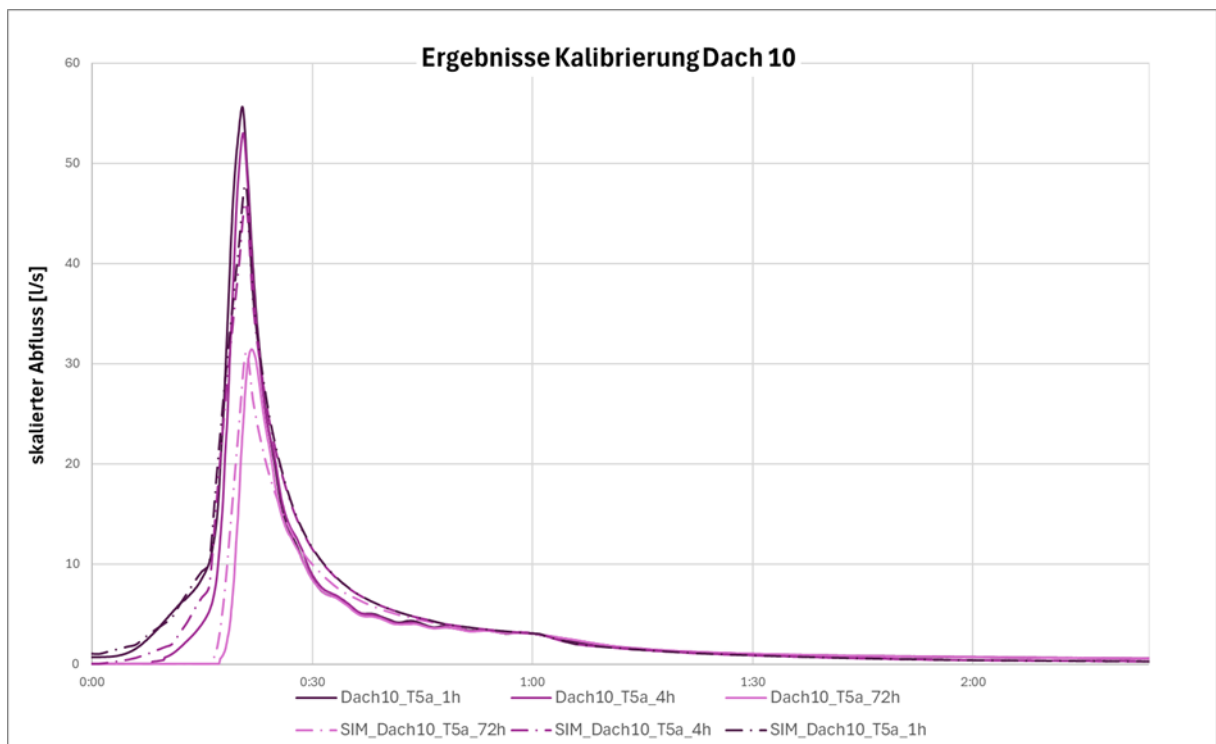
Element	Parameter	Eingabewert	Einheit	Bemerkung
Transportstr.	Fließzeit Translation	2	min	
Speicher	Stauziel für 1h Abtropfzeit	0,009	m	Gesättigt
	Stauziel für 4h Abtropfzeit	0,007	m	Teilgesättigt
	Stauziel für 72h Abtropfzeit	0,000	m	Ungesättigt
	Wasserspeicher (aus Drossel-KL)	0,007	m	$H_{\max}$ o. Drosselleistung
	Drossel-KL	variiert	-	Digitaler Anhang



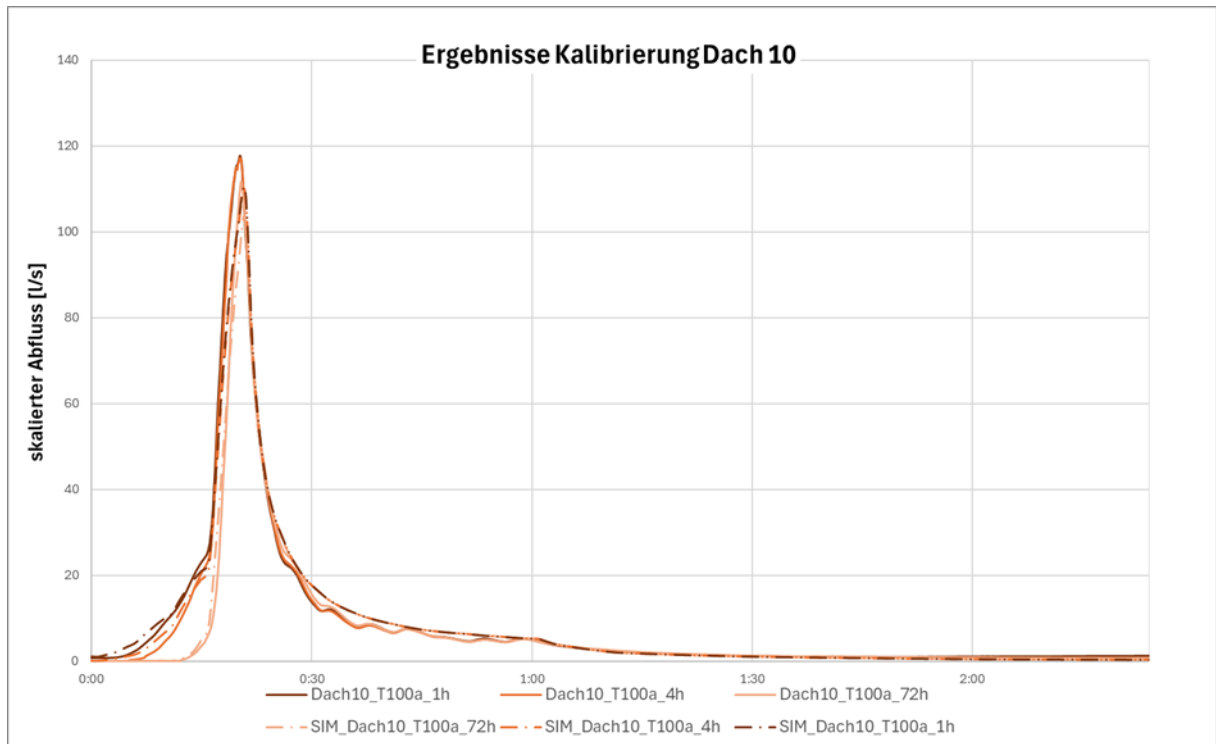
(B) Drosselkennlinie des Speicherelements des Ersatzmodell-Daches 10



(C1) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=1a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach10)



(C2) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=5a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach10)



(C3) Abflussganglinie des kalibrierten Ersatzmodells (Punkt-Strichlinie) belastet mit dem Modellregen T=100a; in ungesättigtem, teilgesättigtem und gesättigtem Zustand im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen (durchgezogen) (Dach10)

Anhang A - 21: Handlungsleitfaden für Kommunen, Gemeinden und Planungsbüros zur Nutzung von Gründächern



Extreme Wetterereignisse nehmen in den letzten Jahren spürbar zu. Dazu gehören langanhaltende Hitzeperioden im Sommer sowie Stark- und Extremniederschläge, die insbesondere in verdichteten Stadtgebieten mit hohem Anteil versiegelter Flächen zu erheblichen Belastungen führen. Parallel steigen die qualitativen und quantitativen Anforderungen an die Gewässerbenutzung. Dadurch geraten Entsorger und Kommunen zunehmend unter Druck, klimaresiliente Lösungen zu identifizieren und umzusetzen. Um diesen Entwicklungen wirksam zu begegnen, rückt die wassersensible Stadtentwicklung mit dem Leitbild der Schwammstadt in den Fokus. Ziel ist es, Regenwasser dezentral zurückzuhalten, zu speichern, zeitverzögert abzugeben oder verdunsten zu lassen. Dadurch werden Kanalisation sowie urbane Ökosysteme entlastet. Eine der effektivsten Maßnahmen innerhalb dieses Konzeptes sind Gründächer. Sie wirken wie „grüne Schwämme“. Sie speichern Niederschlagswasser, geben es gedämpft und zeitlich verzögert ab, fördern die Verdunstung und tragen gleichzeitig zur Kühlung und Verbesserung des Mikroklimas bei – ohne zusätzliche Flächeninanspruchnahme im Stadtraum.

Im DBU-geförderten Forschungsprojekt „Management und Resilienz verschiedener Gründachsysteme bei Starkregenereignissen und Trockenperioden im urbanen Raum“ (kurz: MaNuGrün) wurde das

Abflussverhalten verschiedener Gründächer untersucht. Das Projekt wurde durch das Bildungs- und Demonstrationszentrum Dezentrale Infrastruktur e.V. geleitet und von den Projektpartnern Leipziger Wasserwerke, Institut für Wasserbau und Siedlungswasserwirtschaft der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig sowie dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung wissenschaftlich begleitet. Ergänzend finanziert wurde das Projekt von den Leipziger Wasserwerken und der Stadtentwässerung Dresden.

Diese Handlungsempfehlung richtet sich an Planer, Kommunen und Ingenieurbüros.



Elemente der Schwammstadt

Funktionsweise und stadtökologische Wirkung von Gründächern

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass konventionelle Flach- und Kiesdächer aufgrund fehlender Speicherschichten und geringer Oberflächenrauigkeit kaum Retentions- oder Verzögerungseffekte aufweisen. Niederschläge werden nahezu vollständig und innerhalb kurzer Aufenthaltszeit abgeleitet. So entstehen hohe Abflussspitzen, die insbesondere bei Starkregenereignissen die Entwässerungsinfrastruktur erheblich belasten. Demgegenüber zeigen die in der Studie analysierten extensiven sowie retentions-optimierten Gründachaufbauten eine ausgeprägte hydraulische Entlastung, sie basiert im Wesentlichen auf drei Mechanismen:

1. Abflussdämpfung:

Durch Vegetation, Substrat, Retentionselemente und kapillare Strukturen werden Abflussspitzen signifikant reduziert. Bei geringer Vorsättigung entsteht eine deutliche zeitliche Entkopplung zwischen Niederschlagsereignis und Einleitung in das Entwässerungssystem.

2. Rückhaltung (Retentionsvolumen):

Gründächer speichern Niederschlagswasser temporär in Substratschichten und technischen Retentionskörpern. Die speicherwirksame Wassermenge variiert in Abhängigkeit von Substratmächtigkeit, Porenstruktur und Aufbaukonzept deutlich – übertrifft jedoch die Rückhaltewirkung unbegrünter Dachaufbauten um ein Vielfaches.

3. Verdunstung (Evapotranspiration):

Ein relevanter Anteil des gespeicherten Wassers wird über Vegetation und Substratkapillaren wieder an die Atmosphäre abgegeben. Dieser Prozess reduziert die Gesamtabflussmenge dauerhaft und trägt zugleich zur Abkühlung und Verbesserung des lokalen Mikroklimas bei.



Bewirtschaftung von Niederschlagswasser

Niederschlagswasser ist laut Wasserrahmenrichtlinie und Wasserhaushaltsgesetz grundsätzlich am Ort des Anfalls zu bewirtschaften. Daher ergibt sich für jeden Neubau oder Umbau eines Bestandsgebäudes folgende Prüffolge zum Umgang mit Regenwasser:

1. Ist eine Bewirtschaftung des Niederschlagswassers möglich? Sind ausreichend Flächen zur Bewirtschaftung gegeben?

z. B. Entwässerung von Wegen und Stellflächen in benachbarte Grünfläche (keine technische Anlage notwendig)

2. Ist eine Versickerung von Niederschlagswasser mittels technischer Anlage möglich?

z. B. Entwässerung von befestigten Flächen über Pflasterrinnen in eine Mulde oder Muldenrigole

3. Ist eine Einleitung in ein naheliegendes Gewässer möglich?

Sollte eine Entsorgung des Niederschlagswassers über die ersten drei Prüfoptionen nicht möglich sein, ist eine Einleitung in die öffentliche Kanalisation zu prüfen.

4. Ist eine Einleitung in eine Regenwasserkanalisation möglich?

Nur in letzter Instanz, falls keine Regenwasserkanalisation vorhanden ist, sollte eine Einleitung ins Mischwassernetz in Betracht gezogen werden:

5. Ist eine Einleitung in eine Mischwasserkanalisation möglich?

Einleitbeschränkungen in die Kanalisation

Aufgrund der hydraulischen Auslastung vieler Bestandskanalisationen ist eine Einleitung nur noch unter Einhaltung einer Einleitbeschränkung möglich.

Durch den Entsorger können Beschränkungen zum Schutz der Kanalisation festgelegt werden. Folgende technische Möglichkeiten gibt es unter anderem:

- klassische gedrosselte Einleitung (maximalwertbegrenzt)
z. B. gedrosselte Einleitung mit QDr – 5 l/s einer Fläche $A_{e,b,k} = 700 \text{ m}^2$ aus entsprechend dimensioniertem Rückhalteraum und festem Drosselorgan
- zeitverzögerte Einleitung
z. B. Einleitung mit mindestens 2 Stunden Zeitverzögerung einer Fläche $A_{e,b,k} = 700 \text{ m}^2$ aus einem entsprechend dimensionierten Rückhalteraum (z. B. Mulden-Rigolen-Element)
- gedämpfte und zeitverzögerte Einleitung
Kombination aus genannten Beschränkungen

Eine Einleitbeschränkung lässt sich mit verschiedenen Bewirtschaftungselementen umsetzen. Im Ergebnis des MaNuGrün-Projektes konnte ermittelt werden, mit welchem Gründach die jeweiligen Einleitbeschränkungen eingehalten werden.

Für das Projekt entstand auf dem Areal der alten Kläranlage Leutzsch eine Versuchsanlage mit einer Flachdachanlage mit Beregnungsanlage. Insgesamt wurden acht Gründächer, ein Kiesdach und ein Normaldach aufgebaut. Die Gründächer variieren in Aufbau und Bepflanzung deutlich und sollen das aktuelle Baugeschehen abbilden:

- verschiedene Hersteller
- extensiv oder intensiv
- Substratmächtigkeit zwischen 6 cm und 30 cm
- Retentionsräume zwischen 2,5 cm und 8 cm
- Sedumsprossen als Matte und als Keime oder Bepflanzung mit Stauden

	Dach 1	Dach 2	Dach 3	Dach 4	Dach 5
Systematik	extensiv	intensiv	extensiv	extensiv	intensiv
Begrünung	Stauden-Sedum-Mix	Stauden	Sedum	Sedum	Stauden
Vegetationstragschicht	Substrat	Substrat	Substrat	Substrat	Substrat
Mächtigkeit Vegetationstragschicht [cm]	10	20	10	10	30
Dränage [cm]	4	6	8	3 (fließwegverlängernd)	6
Drossel	ja (aufgelegte Drossel)	nein	ja (gesteckte Drossel)	nein	ja (aufgelegte Drossel)

	Dach 6	Dach 7	Dach 8	Dach 9	Dach 10
Systematik	Kiesdach (10 cm)	intensiv	extensiv	extensiv	intensiv
Begrünung			Sedum	Sedum	Sedum
Vegetations- tragschicht			Mineralwoll- fasern	Mineralwoll- fasern	Substrat
Mächtigkeit Vegetations- tragschicht [cm]			4	4	6
Dränage [cm]			2,5	4	2,5
Drossel	nein	nein	nein	nein	nein

Versuchsdurchführung

Mithilfe der Beregnungsanlage wurden auf den Gründächern Versuche unterschiedlicher Beregnungsintensität und Vorsättigungsbedingungen durchgeführt. Die Dächer wurden mit einem 1-jährlichen, 5-jährlichen und 100-jährlichen Niederschlag beregnet. Mit einer Vorsättigung und unterschiedlicher Abtropfzeit wurden gesättigte, teilgesättigte und ungesättigte Zustände simuliert.

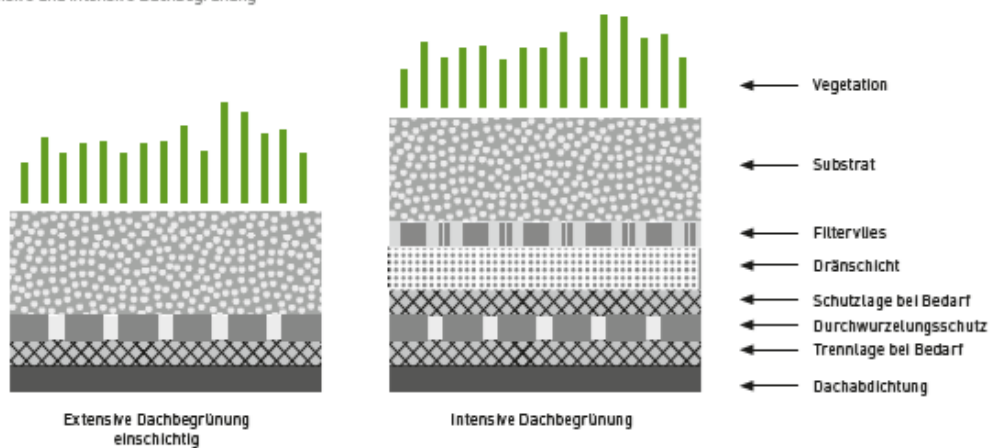
Die Dächer wurden anschließend anhand ihres Rückhalts untersucht. Konkret wurden folgende Fragen beantwortet:

- Wie viel Dämpfung der Abflussspitze kann mit dem spezifischen Gründach unter verschiedenen Beregnungs-/Vorsättigungsszenarien erreicht werden?
- Wie viel Zeitverzögerung der Abflussspitze kann mit dem spezifischen Gründach unter verschiedenen Beregnungs-/Vorsättigungsszenarien erreicht werden?

Im Rahmen der Auswertung konnten fünf Gruppen mit unterschiedlicher Abflusswirkung bestimmt werden.

Kategorie	Dachcharakteristik	Wirkung
rot	Kiesdach, Normaldach	keine
gelb	Extensivdächer, ohne Drossel	Abflusssdämpfung in einigen Szenarien bis 80 %, keine Abflussverzögerung
lila	Extensivdach mit hohem Drosselpunkt	100-jährlicher Starkregen ohne Verzögerung & Dämpfung, andere Szenarien mit deutlicher Dämpfung und Verzögerung
blau	Extensivdach mit fließwegverzögernder Drainage, Extensivdach mit flachem Drosselpunkt, Intensivdach ohne Drossel	In jedem Szenario mind. 20 % Dämpfung bis teilweise über 90 %, deutliche Verzögerung in einigen Szenarien (größte Ergebnisspannweite zwischen den Sets)
grün	Intensivdach, mit Drossel	In jedem Szenario deutliche Verzögerung & Dämpfung

Extensive und intensive Dachbegrünung



Aus den Untersuchungen heraus lässt sich grundsätzlich feststellen, dass jedes extensive und intensive Gründach unter ungesättigten Bedingungen eine deutliche Abflussdämpfung erreichen kann.

Sind Einleitbeschränkungen durch den Entsorger umzusetzen, dann sind nicht mehr alle Gründächer für jeden Beschränkungsfall geeignet. Die Dächer der gelben Kategorie, einfache Extensivdächer, entfallen in der Regel für die Umsetzung einer „harten“ Einleitbeschränkung.

Klassische gedrosselte Einleitung (maximalwertbegrenzt)

Gründächer lassen sich drosseln. Dabei wird der Rückhalteraum zur Bewirtschaftung der Drosselmenge auf dem Dach angeordnet. Durch die Drossel wird die Abflussspitze gedämpft. Ein Retentionsgründach mit fester Drosselmenge ist in der Regel mit einem erhöhten statischen Aufwand verbunden, allerdings müssen dann keine technischen Anlagen unter die Erde gebracht werden. Nur ein Gründach mit festem Drosselement ist für die Umsetzung einer gedrosselten, maximalwertbegrenzten Einleitung geeignet.

Für die Anordnung des Drosselpunktes gibt es zwei Möglichkeiten:

- Hoher Drosselpunkt (lila Kategorie): großer permanenter Wasseranstau auf dem Dach. Können Biodiversität und verbesserte Bedingungen für die Pflanzen auf dem Dach bedeuten. Allerdings steht nicht der volle Rückhalteraum zum temporären Einstau zur Verfügung, d. h. die Drosselmengen sind in der Regel recht groß.
- Niedriger Drosselpunkt (blaue Kategorie): kleiner permanenter Wasserstau auf dem Dach. Durch den permanent freien Rückhalteraum können sehr kleine Drosselmengen erreicht werden, allerdings ist das anfallende Niederschlagswasser nicht pflanzenverfügbar, sondern wird schnell abgeleitet.

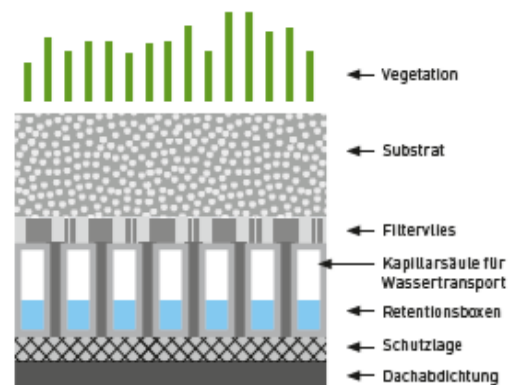
Zeitverzögerte Einleitung

Eine zeitverzögerte Einleitung lässt sich mit Gründächern der Kategorie blau umsetzen. Die drei sehr unterschiedlichen Typen haben dabei eine ähnliche Wirkung gezeigt.

Gedämpfte und zeitverzögerte Einleitung

Die gedämpfte und gedrosselte Einleitung lässt sich nur mit einem intensiven Gründach und Drossel (Kategorie grün) umsetzen. Es zeigt unter jeglichen Jährlichkeiten und Vorsättigungsszenarien eine deutliche Dämpfung als auch Verzögerung der Abflussspitze.

Da die Ausführung des Gründachs großen Einfluss auf Gebäudestruktur und Statik haben kann, empfiehlt es sich, die Einleitbeschränkung so früh wie möglich beim Abwasserentsorger abzufragen. Anschließend kann geprüft werden, ob ein Gründach für die Umsetzung der Einleitbeschränkung geeignet ist oder weitere Maßnahmen zur Bewirtschaftung notwendig sind.



Retentionsgründach



Retentionsgründach der Grundschule Dölzig (Foto: Andrea Bernhardt)

Fazit

Gründächer können hydraulische Lastspitzen sowohl in Misch- als auch in Trennsystemen reduzieren und leisten damit einen wesentlichen Beitrag zu einer klimaresilienten, dezentralen Regenwasserbewirtschaftung im urbanen Raum.

Neben den hydrologischen Vorteilen ergeben sich für Grundstückseigentümerinnen und -eigentümer ökonomische Effekte. Die Reduktion der abflusswirksamen Fläche wirkt sich unmittelbar auf die Bemessung der Niederschlagswassergebühren aus und ermöglicht in vielen Kommunen erhebliche Gebühreneinsparungen.

Damit bestätigt die DBU Studie „MaNuGrün“ die hohe technische Leistungsfähigkeit moderner Gründachsysteme als Schlüsselbaustein der Schwammstadt und als zukunftsorientierte Maßnahme im Umgang mit klimawandelbedingt zunehmenden Extremwetterereignissen.

Weitere Projektpartner

