

Abschlussbericht zum Projekt

Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung

März 2018

1. Einleitung

Grundidee des Projekts ist die Einhaltung der natürlichen Wasserbilanz in Siedlungsgebieten, um die weithin bekannten Nachteile durch Flächenversiegelung zu vermeiden. Das auf so bebauten Flächen anfallende Niederschlagswasser wurde in der Vergangenheit bei uns nämlich fast ausschließlich nach dem Prinzip der strikten Ableitung per Kanalisation in das nächste Gewässer entsorgt. Die Nachteile dieses "hohen Entwässerungskomforts" sind im Regelfall

- verringerte Grundwasserneubildung
- Verschärfung der Hoch- und Niedrigwasserabflüsse im Gewässer sowie
- Änderungen im Kleinklima (geringere Verdunstung, Erwärmung und Staubbildung).

Die Einhaltung bzw. weitgehende Annäherung an die natürliche Wasserbilanz wird auch durch jüngere Regelwerke für die Siedlungswasserwirtschaft gefordert [DWA-A 100], [DWA-A 102E/ BWK-A 3E]. Daher werden als Ergänzung oder Alternative zu Ableitung und technischem Rückhalt zunehmend Konzepte der sogenannten naturnahen Regenwasserbewirtschaftung in Baugebieten angestrebt. Diese können folgende Maßnahmen (bzw. –kombinationen) umfassen

- Entsiegelung
- Versickerung
- Dachbegrünung
- Dacheinstau
- Regenwassernutzung.

Abgesehen von der Vermeidungsstrategie bei Neubaugebieten (Minimierung der versiegelten Flächen) beschränkt man sich hinsichtlich dieser Einzelmaßnahmen in der Praxis derzeit aber weitgehend auf die Umsetzung von Versickerungsmaßnahmen. Dies hat vor allem wirtschaftliche Gründe, da bei der hydraulischen Bemessung von Kanalisationsanlagen die so "abgekoppelten" Flächen nicht in Rechnung gestellt werden müssen. Wie im Folgenden näher beschrieben, lässt sich aber mittels einfacher Bilanzrechnungen zeigen, dass aufgrund der weitgehend entfallenden Verdunstungskomponente durch solche *reinen* Versickerungsmaßnahmen im Jahresmittel dem Untergrund (je nach Flächennutzung vor der Bebauung) zwischen dem 2- und 7-fachen der natürlichen Mengen zugeführt wird. Es gibt Beispiele ausgeführter Versickerungsanlagen die funktionieren und solche, die es aus den genannten oder anderen Gründen (z.B. Bodenverdichtung während des Baus) nicht tun. Im Versagensfall können die direkt spürbaren Folgen für die An- und Unterlieger von allgemeiner Bodenvernässung bis zu Hangrutschungen reichen.

Die Komponenten einer Regenwasserbewirtschaftung, die auf eine Einhaltung der natürlichen Wasserbilanz abzielt, wurden vom Verfasser in einem relativ aufwendigen, 15 Jahre umfassenden Messprogramm untersucht. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse und Datenreihen flossen u.a. in die Entwicklung eines einfachen Softwareprogramms für entsprechende Bilanzrechnungen ein. Dies erfolgte teilweise im Rahmen studentischer Abschlussarbeiten. Das Projekt wurde ausschließlich aus privaten und Hochschulmitteln finanziert, d.h. es wurden keine Drittmittel beantragt.

Seit 2014 erfolgt eine Zusammenarbeit mit der italienischen Partneruniversität Salerno, da in Italien noch wenige Erfahrungen zu dieser Problematik vorliegen. Aufgrund spektakulärer Starkregenereignisse besteht dort jedoch ein großer Bedarf an abflussmindernden Maßnahmen.

2. Hydrologische Grundlagen

Hierbei muss u.a. zwischen Einzelereignissen (insbesondere Starkregen) und der mittleren Jahreswasserbilanz unterschieden werden. Quantitative Angaben schwanken in weiten Grenzen, da sie von einer Vielzahl örtlicher Parameter abhängen, wie Bebauungsgrad und -struktur, sonstige Flächennutzung und Bewuchs, Boden- und Untergrundverhältnisse, Gewässersystem, Niederschlagscharakteristik u.s.w.. Sie sind also nur für den jeweiligen Einzelfall gültig, für den eine genauere Untersuchung vorliegt. Diese kann z.B. durch den Einsatz eines mathematischen Simulationsmodells erfolgen, das sowohl das natürliche Gebiet wie auch die Siedlung bzw. die versiegelten Flächen ausreichend detailliert erfasst. Seit kurzem bietet aber [DWA-A 102E/ BWK-A 3E] auch empirische Beziehungen für die Jahreswasserbilanz unterschiedlicher Komponenten der Regenwasserbewirtschaftung an.

Durch Betrachtung grundlegender hydrologischer Zusammenhänge und mit Hilfe einfacher Beispiele werden im Folgenden zunächst einige prinzipielle Gesetzmäßigkeiten aufgezeigt.

2.1 Jahreswasserbilanzen

In der Bundesrepublik Deutschland beträgt die Größenordnung der mittleren Jahreswasserbilanz nach [ATV, 1999] etwa folgende Werte (vgl. Bild 1):

- Niederschlag: $N = 100 \% \quad (\text{ca. } 770 \text{ mm/a})$
- Evapotranspiration (Verdunstung): $E_{\text{ges}} \approx 50 - 80 \% \quad (\text{vereinfachend gerundet: } E = 65 \%)$
- Grundwasserneubildung: $GWN \approx 10 - 30 \% \quad (GWN = 20 \%)$
- Direktabfluss (Oberflächenabfluss, Bodenzwischenabfluss und direkt reagierendes Grundwasser): $\alpha \approx 10 - 20 \% \quad (\alpha = 15 \%)$

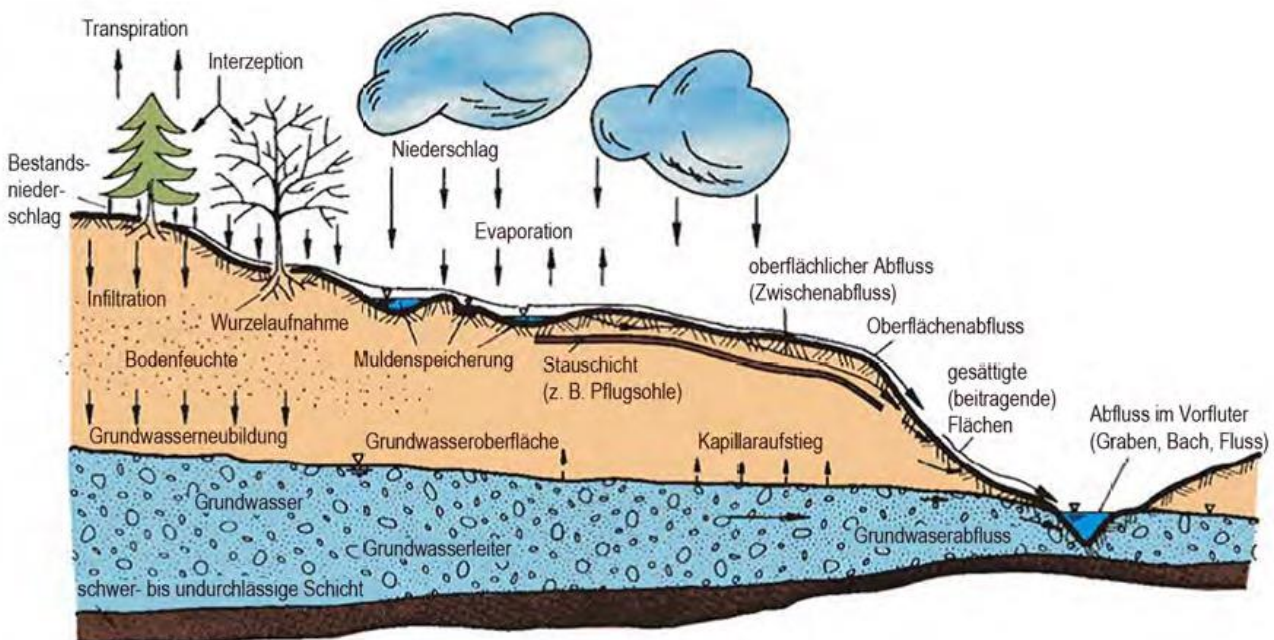


Bild 1: Natürliche Aufteilung des Niederschlags nach *Bronstert* (via [DWA-M 550])

Die entsprechenden Werte für versiegelte Flächen ergeben sich nach [DWA-M 153] etwa zu:

- $E = 30 \%$
- $\alpha = 70 \%$.

Der Jahresabflussbeiwert von $\alpha = 70\%$ bezieht sich zunächst auf das von der versiegelten Fläche (z.B. Steildach) abfließende Wasser. Für den Wasserhaushalt ist dann die weitere Bewirtschaftung dieses Regenwassers entscheidend.

Ist die versiegelte Fläche an ein reines Ableitungssystem angeschlossen, so erhöht sich danach im Jahresmittel deren Direktabflussvolumen um mehr als den 4-fachen Betrag ($70/15 = 4,7$) gegenüber dem natürlichen Zustand.

Würde man als Bezugswert - statt dem Mittelwert für die Bundesrepublik - Wald (insbesondere Nadelwald) ansetzen, so fiel das Verhältnis noch ungünstiger aus. Gemäß Bild 2 liefert Wald im Mittelgebirge zwar keinen Oberflächenabfluss, dennoch besteht hochwassererzeugender Direktabfluss ohnehin zum größten Teil aus Bodenzwischenabfluss (in Makroporen) und (mittels Druckimpuls) verdrängtem Altwasser. Altwasser, also älteres Grundwasser und ausgedrücktes Bodenwasser, das bereits zu Beginn des aktuellen Niederschlagsereignisses im Einzugsgebiet gespeichert war, kann nach [Herrmann, 1997] sogar bis zu 80% einer Hochwasserwelle ausmachen. Diese Abflusskomponenten sind in der genannten Abbildung im Term "Jahressickerung S" mitenthalten. Insbesondere bei Fichtenwald ist laut [LfW, 1991] der weitaus größte Teil der Sickerung dem Zwischenabfluss zuzuordnen. Würde man die gesamte Sickerung dem Direktabfluss zuschlagen (Maximalbetrachtung), so läge beispielsweise der Jahresabflussbeiwert α von Fichten immer noch unter 10 Prozent ($70/750 = 0,09$). Betrachtet man nun das Szenario, in dem eine ehemals mit Nadelwald bestandene Fläche versiegelt und an ein Ableitungssystem angeschlossen wird, so würde sich die Komponente Abfluss in der Jahresbilanz um mehr als den Faktor 7 ($70/10$) erhöhen!

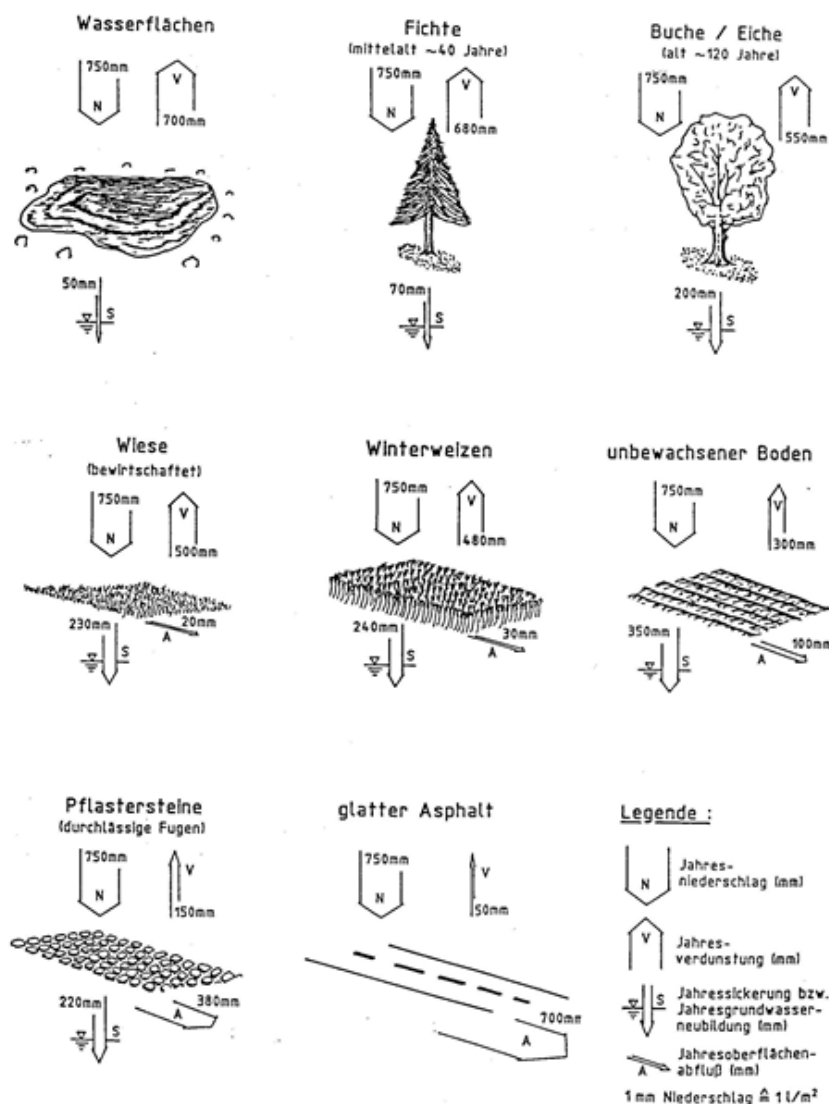


Bild 2: Standortwasserbilanzen für unterschiedliche Landnutzungsformen (aus [LfW, 1991])

Stellt man ähnliche Betrachtungen für die naturnahe Regenwasserbewirtschaftung an, so muss zunächst an die eingangs erwähnte Feststellung erinnert werden, dass sich solche Maßnahmen in der Praxis derzeit vorwiegend auf Versickerungsanlagen konzentrieren. In rechnerischer Hinsicht bietet sich dafür die leicht erfassbare Schachtversickerung oder die reine Rigolenversickerung nach [DWA-A 138] an (keine zusätzliche Verdunstung). Hierdurch wird der Abflussanteil $\alpha = 70\%$ der versiegelten Flächen vollständig dem Untergrund zugeleitet. Geht man wieder von Mittelwerten aus und nimmt man an, dass das Bodenwasser keinen Beitrag zum Direktabfluss liefert, so ergibt sich eine um das 3- bis 4-fache des natürlichen Werts erhöhte Grundwasserneubildung ($70/20 = 3,5$). Nimmt man andererseits Grundwasserneubildung und Direktabfluss als gemeinsame Bezugsgröße (d.h. es tritt kein Oberflächenabfluss auf), so ergibt sich immerhin noch der Faktor 2 ($70/(15 + 20)$). Analog ergibt sich für(Nadel-)Wald wieder mindestens der Faktor 7 ($70/10$), um den dem Untergrund mehr Wasser als im natürlichen Zustand zugeführt wird!

Die Schacht- und reine Rigolenversickerung stellen natürlich Extremfälle dar, die schon alleine aus Qualitätsgründen vermieden werden sollten, da sie keine Reinigungswirkung durch eine belebte Bodenschicht bieten. Aber auch Mulden- und Mulden-Rigolen-Systeme alleine können die natürliche Wasserbilanz nicht einhalten, da ihre Verdunstungswerte nach [Schneider, 1999] und [DWA-A 102E/BWK-A 3E] lediglich in der Größenordnung von $E = 5\%$ liegen.

Da Siedlungsgebiete nicht nur aus undurchlässigen Flächen bestehen, relativieren sich die genannten Faktoren mit abnehmendem Versiegelungsgrad. Dennoch können die direkt spürbaren Folgen für die Unterlieger durch erhöhten Bodenwasserzufluss von problematischen Grundwasserstandsanstiegen [Göbel et al, 2007], [Meßer & Gall, 2016] bis zu Hangrutschungen gehen. Solche Rutschungen, die auf eine veränderte Wasserbilanz zurückzuführen sind und/oder aus extremen Starkregenereignissen resultieren, sind ein u.a. in [Manandhar et al, 2015] beschriebenes, weltweites Phänomen. In der Region Trier traten solche Ereignisse zuletzt während der Unwetterperiode im Mai/Juni 2016 verstärkt auf.

2.2 Einzelereignisse

Im Zusammenhang mit Einzelereignissen stehen in Bezug auf den natürlichen Wasserhaushalt Hochwasserabflüsse sowie deren Beeinflussung durch Siedlungsflächen im Mittelpunkt des Interesses. Versiegelte Flächen - insbesondere Steildächer - weisen bei Starkregen nach Abdeckung eines geringen Anfangsverlustes einen Abflussbeiwert von nahe 100 Prozent auf. Wird dieses Wasser direkt dem Gewässer zugeleitet, so kann dies bei kleinen Einzugsgebieten und kleinen Ereignissen zu einer spürbaren Beeinflussung der Hochwasserabflüsse führen. Um dies näher zu erläutern, seien zwei Extremfälle betrachtet.

Kritische Niederschlagsereignisse für Kanalnetze und kleine Gewässer treten vorwiegend im Sommer als Konvektivregen (z.B. bei Gewitter) auf. Dies sind kurzzeitige, hochintensive Ereignisse, welche aber nur eine relativ geringe Gesamthöhe aufweisen. So kann der aus der Spende $r_{15,1}$ gebildete "klassische" Kanalnetzregen mit rund 10 mm an Höhe gerade ausreichen, um die Anfangsverluste eines Nadelwaldbestandes (Interzeptions-/Streuverluste) nach langer Trockenzeit im Sommer abzudecken. Folglich lässt sich der Extremfall finden, bei dem ein kleines Hochwasserereignis aus einem kleinen, hochgradig bebauten Einzugsgebiet zu 100 Prozent aus Siedlungsabflüssen besteht. Dieser Wert entspricht dann auch der Abflussverschärfung ΔQ (Scheitelabfluss) bzw. ΔV (Volumen) gegenüber dem natürlichen Gebietszustand (Q_N , V_N). Die relative Abflussverschärfung $\Delta Q/Q_N$ bzw. $\Delta V/V_N$ beträgt in diesem Fall sogar unendlich.

Das Gegenbeispiel wäre ein „Jahrtausendereignis“ in einem großen Flussgebiet. Hierfür sind langanhaltende, volumenreiche Niederschläge oder Schneeschmelzen maßgebend, welche i.d.R. nur geringe Intensitäten aufweisen. Folglich fallen auch die Spitzenabflüsse aus Siedlungen entsprechend gering aus. Zudem steigt mit zunehmender Niederschlagshöhe auch der Sättigungsgrad des natürlichen Bodens, so dass ein immer größerer Anteil des gefallenen Niederschlags zum direkten Abfluss kommt. Hierdurch nähert sich das Verhalten der natürlichen Flächenanteile demjenigen der versiegelten Flächen immer mehr an, bis sie sich ab einer bestimmten, gebietsabhängigen Grenzniederschlagshöhe quasi gleich verhalten. Ferner kommt hinzu, dass selbst bei vorhandenen Ballungsräumen der Versiegelungsgrad großer Einzugsgebiete durch ihre ausgleichende Wirkung

selten 5 Prozent überschreitet. Aufgrund all dieser genannten Einzeleffekte strebt die Abflussverschärfung bei Extremereignissen in großen Gebieten gegen Null.

Im Hinblick auf die Ereignishäufigkeiten sind diese Zusammenhänge qualitativ in Bild 3 enthalten. Wie aber bereits erwähnt, sind generelle Aussagen zur quantitativen Veränderung der Scheitelabflüsse sehr schwierig. Sie hängen insbesondere von der Lage der Siedlungsfläche zum Gewässer und den Größenverhältnissen der beteiligten Flächen ab.

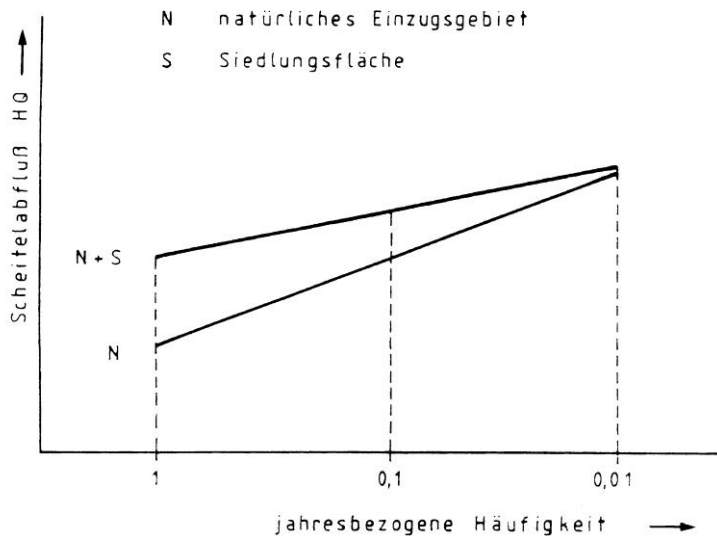


Bild 3: Einfluss von Siedlungsabflüssen auf die Scheitelabflüsse eines Gebietes bei verschiedenen Häufigkeiten (aus [ATV, 1999])

Will man ähnliche Betrachtungen unter Berücksichtigung von versiegelten Flächen durchführen, die vom Kanalnetz abgekoppelt und an eine Versickerungsanlage angeschlossen sind, so stellt sich die Frage, ob diese versickerten Regenwassermengen direkt oder indirekt noch Einfluss auf die Hochwasserwelle nehmen können. Dieser Frage wird im folgenden Abschnitt nachgegangen.

2.3 Zusammenhang zwischen Jahresbilanz und Einzelereignissen

In natürlichen Einzugsgebieten des Mittelgebirges hat der Bodenwassergehalt zu Beginn eines hochwasserverursachenden Niederschlagsereignisses nicht nur einen maßgeblichen Einfluss auf die Gesamtabflusshöhe (u.a. [DWA-M 552]), sondern auch auf die Entstehungsmechanismen und damit auf den zeitlichen Ablauf der Hochwasserwelle. Über die meteorologische Vorgeschichte (Bodenvorfeuchte) ist das Einzelereignis an die Jahreswasserbilanz gekoppelt.

Z.B. hat [Krein, 2000] in zwei kleinen Einzugsgebieten bei Trier (Kartelsbornbach/Eifel und Olewiger Bach/Hunsrück) über 700 natürliche Hochwasserereignisse ausgewertet sowie Berechnungsversuche durchgeführt. Zunächst wurde dabei wieder der große Einfluss der Bodenvorfeuchte zu Beginn eines Niederschlagsereignisses bestätigt. Mittels Beprobung der ablaufenden Hochwasserwellen wurde anhand der chemischen Analyseergebnisse auf die Entstehungsgeschichte und die Fließwege der einzelnen Abflusskomponenten geschlossen. So wurden Kalziumanteile dem (relativ geringen) Beitrag des Oberbodens zugeordnet, sie stehen also für den oberflächennahen Abfluss. Der überwiegende Teil der Hochwasserwellen stammte dagegen aus mittleren und tieferen Bodenschichten (Mangan- und Eisenanteile), wobei es sich zum Großteil um verdrängtes Altwasser handelte.

Ohne die Zusammenhänge an dieser Stelle unnötig zu verkomplizieren, kann sicherlich gesagt werden, dass bei weitgehend wassergesättigtem Boden zusätzlich versickerndes Wasser nach dem Gesetz der kommunizierenden Röhren mittels Druck(luft)impulsübertragung älteres Wasser aus tieferen Schichten ins Gewässer drücken kann. Mit Blick auf die mächtige ungesättigte Bodenschicht in Bild 1 ist dabei also entscheidend, dass das versickerte Wasser selbst den Grundwasserspiegel nicht erreicht haben muss. Dies gilt natürlich nur, sofern es sich um sogenannte "hydraulisch

angeschlossene" Flächen handelt. Da Siedlungsflächen aber fast immer in Gewässernähe liegen, kann wohl in der Mehrzahl der Fälle davon ausgegangen werden.

Auch wenn in diesem Zusammenhang noch manch offene Frage besteht ([*Uhlenbrook & Leibundgut*, 1997] und [*Mendel*, 2000], [*DWA-M 550*], [*Chiffard*, 2016]), so muss doch in Bezug auf die Regenwasserbewirtschaftung befürchtet werden, dass reine Versickerungsanlagen hinsichtlich ihrer hochwasserdämpfenden Wirkung überschätzt werden könnten. Dagegen dürfte ein Bewirtschaftungssystem, das die Gesamtwasserbilanz einhält, auch im Hinblick auf das Einzelereignis die größtmögliche Angleichung des Abflussverhaltens von Siedlungsflächen an dasjenige natürlicher Flächen erwarten lassen.

3. Angepasste Regenwasserbewirtschaftung

Wie gezeigt, können weder Ableitungssysteme noch (reine) Versickerungsanlagen die natürliche Wasserbilanz einhalten, da die Verdunstungskomponente immer zu gering ausfallen wird. Stattdessen gilt es ein Bewirtschaftungssystem zu schaffen, das diese Bilanz annähernd einhält und insbesondere den Zufluss (von versiegelten Flächen) zur Versickerungsanlage auf wenige Starkregenereignisse beschränkt. So würde bei diesen Ereignissen die tatsächliche Aufnahmekapazität des Bodens und damit der Hochwasserschutzeffekt erhöht. Hierzu bieten sich als Ergänzung zur reinen Versickerung insbesondere zwei Systeme an, nämlich die Dachbegrünung und die Regenwassernutzung.

Die Dachbegrünung ist die einzige Maßnahme im Rahmen der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung, durch welche natürliche Verdunstungswerte weitgehend sichergestellt werden können und somit u.a. auch eine wesentliche Verbesserung des lokalen Kleinklimas erreicht werden kann. [*Schlichtig et al*, 2014] setzen eine um 10 % verminderte Verdunstungsleistung von Gründächern gegenüber dem unbebauten Zustand an. Um auch diese Differenz noch ausgleichen zu können, sind z.B. die künstliche Bewässerung des Gründachs während Trockenperioden, die Anlage von Wasserflächen oder Aufforstungsmaßnahmen auf den übrigen, ebenfalls in die Bilanz eingehenden Flächen möglich.

Zur nachträglichen Begrünung bieten sich insbesondere Flachdächer an (vor allem von Garagen und öffentlichen Gebäuden), die mit einer Kiesaufschüttung versehen sind. Ersetzt man diese mit vergleichsweise geringem Aufwand durch eine Vegetationsschicht (incl. Drainung und Wurzelschutzfolie), so reduziert sich der Jahresabflussbeiwert α gemäß Bild 4 von ca. 0,6 bis auf weniger als die Hälfte. Ähnliches gilt natürlich auch für geneigte Dächer, deren (nachträgliche) Begrünung aber wesentlich aufwendiger ist. Konstruktive Aspekte in Verbindung mit der Begrünung von Dächern werden in [*Mertens*, 2007] behandelt. Ein weiterer Aspekt ist, dass Gründächer als Ausgleichs- und Ersatzmaßnahme im Sinne des Naturschutzgesetzes gelten [*Roth-Kleyer*, 2010].

Führt man die "Überlaufmengen" eines Gründaches nun einer Versickerungsanlage zu, so wird der natürliche Wasserkreislauf am weitgehendsten nachgebildet. Da sich so deren Zufluss (von der angeschlossenen Fläche) auf wenige Starkregenereignisse konzentriert, könnte die Gesamtbilanz im Mittel über das Jahr theoretisch eingehalten werden. Durch den vollständigen Rückhalt kleiner Regenereignisse auf dem Gründach entspricht die Bodenfeuchte in und unter der Versickerungsanlage während der meisten Zeit des Jahres dann näherungsweise derjenigen des umgebenden natürlichen Untergrundes. Beim Auftritt hochwasserverursachender Starkregen sind dann die Vorteile gemäß Abschnitt 2.3 zu erwarten.

Insbesondere für Steildächer in Bestandsgebieten bietet sich eine Reduzierung des anfallenden Niederschlagabflusses durch eine Regenwassernutzung an. Ähnlich wie bei Gründächern (siehe u.a. *DWA-M 550*) wird dabei in der Literatur aber meist nur deren geringe Effektivität hinsichtlich des direkten Einflusses auf das Bemessungsereignis betrachtet. Dieser geringe Effekt beruht auf dem im Verhältnis zur Regenmenge sehr begrenzten Tankvolumen (insbesondere bei Ansatz einer Teilfüllung zu Ereignisbeginn), wodurch folglich kaum mehr als einen quasi leicht erhöhten Anfangsverlust bewirkt wird. Da auch die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen für Privatpersonen nur bedingt gegeben ist, hat sich die anfängliche „Euphorie“ hierzu mittlerweile etwas gelegt, obwohl diese Anlagen grundsätzlich als ökologisch sinnvoll anerkannt sind. Kombiniert man aber eine Regenwassernutzung

mit einer nachgeschalteten Versickerung, so erscheint dies wasserwirtschaftlich wesentlich attraktiver. In [DVGW-W 555], [Lowis, 1996] und [Korthals & Roth, 2003] werden nämlich Trinkwassereinsparungen von ca. 50 m³ bis 60 m³ pro Jahr und 100 m² bis 120 m² Dachfläche genannt. Dies entspricht einem Regenwasserverbrauch von rund 500 mm pro Jahr, der einer Versickerungsanlage ferngehalten wird. Wählt man $\alpha = 0,75$ für das Steildach, so ergibt sich der Gesamtabflussbeiwert dieses Teilsystems (Überlauf des Regenwassertanks) zu nur

$$\alpha_{\text{ges}} \approx 0,75 - 500/770 = 0,1.$$

Natürlich wäre eine Bilanzierung im Regelfall nicht nur für die durch ein Einzelgebäude versiegelte Fläche, sondern für das gesamte Neubaugebiet einschließlich Straßen und durchlässigen Flächenanteilen (die u.a. die Versickerungsanlagen beinhalten) zu führen.

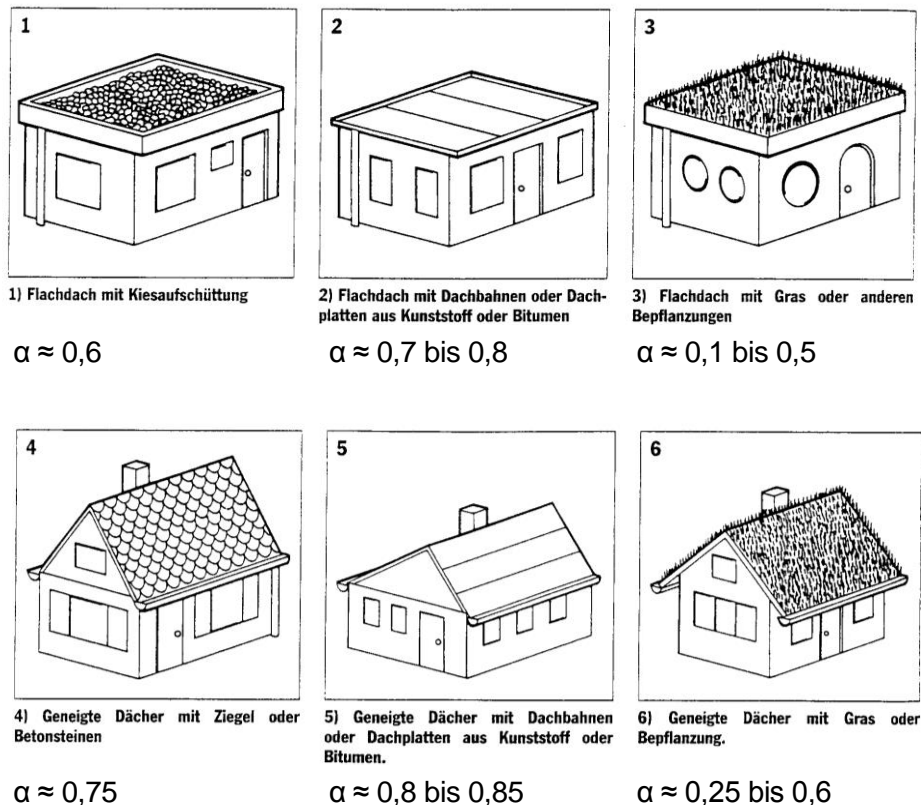


Bild 4: Jahresabflussbeiwerte α nach [DIN 1989], [FLL, 2008], [Sartor, 2002] und [Uhl et al, 2003]

Diese Zusammenhänge könnten in einer Niederschlag-Abfluss-Simulation (Kanalnetzberechnung oder Hochwassermodellierung) derzeit wie folgt berücksichtigt werden. Wie bereits erwähnt, wirkt eine reine Regenwassernutzungsanlage quasi wie ein erhöhter Anfangsverlust auf den versiegelten Flächen. Geht man davon aus, dass beispielsweise

- ein Drittel der undurchlässigen Flächen A_u einer Siedlung aus Steildachflächen besteht,
- das spezifische Tankvolumen 3 bis 4 m³/100 m² Dachfläche beträgt (d.h. im Mittel 0,035 m³/m²) und
- die Tanks bei Regenbeginn im Mittel zu 50 % gefüllt sind,

so erhält man folgendes Rückhaltepotential:

$$V_{\text{eff}} = 0,33 \cdot 0,035 \cdot 0,5 = 0,0058 \text{ m} \approx 6 \text{ mm}$$

Dies gilt natürlich nur, falls alle Steildächer angeschlossen würden. Aufgrund praktischer Erfahrungen sind in Bestandsgebieten realistischerweise eher Werte von 10 bis 20 Prozent möglich, woraus sich

ein zusätzlicher Rückhalt von nur ca. 1 mm ergibt. Dieser kann rechnerisch relativ einfach dem mittleren Anfangsverlust von ca. 1 mm zugeschlagen werden, der bei den versiegelten Flächen ohnehin zu berücksichtigen ist. Hierdurch ergäbe sich also grob eine Verdoppelung dieses Wertes.

Bei der Berücksichtigung reiner Versickerungsanlagen ist entscheidend, ob das Kanalnetz oder das Gewässer modelliert wird. Während man davon ausgehen kann, dass vollständig abgekoppelte Flächen das (als dicht angenommene) Netz nicht mehr belasten, sind gemäß Kapitel 2 die Zusammenhänge in Bezug auf die Hochwasserabflüsse im Gewässer wesentlich komplexer. Derzeit existiert noch kein weithin anerkanntes ingenieurhydrologisches Standardverfahren, das den Einfluss punktuell versickerter, zusätzlicher Regenwassermengen auf die Hochwasserwelle quantitativ abzuschätzen erlaubt.

Handelt es sich jedoch um (die vorgestellten) Bewirtschaftungssysteme, welche die Gesamtwasserbilanz einhalten, so ist sicherlich auch bei der Simulation vertretbar, dass in erster Näherung die Reaktion solcher Flächen derjenigen von natürlichen Gebieten entspricht. Entsprechend können diese im Modell angesetzt werden. Näheres hierzu findet sich in [Sartor, 2001].

4. Projektkonzeption

4.1 Projektziel und Untersuchungsobjekt

Die Einzelkomponenten einer wie zuvor im Konzept beschriebenen, naturnahen Regenwasserbewirtschaftung wurden vom Verfasser von September 1997 bis Ende 2012 in einem relativ aufwendigen Messprogramm untersucht. Hauptziel war zum einen die praktische Überprüfung der in Kapitel 3 gemachten Ausführungen anhand eines realen Objekts, wodurch u.a. praxisnahe Erkenntnisse erhofft wurden. Zum anderen sollte durch die erhobenen Messreihen eine Datenbasis zur Verbesserung entsprechender Simulationsmodelle geschaffen werden.

Bei dem Untersuchungsobjekt handelte es sich um das in den Bildern 5 und 6 dargestellte Einfamilienhaus des Unterzeichners in 54470 Lieser, das im Oktober 1996 bezogen wurde. Die im Rahmen der Baumaßnahme 1996 mit erstellten Anlagen zur Regenwasserbewirtschaftung bestehen im Wesentlichen aus Regenwassernutzung und Gründach, deren Überläufe einer Versickerungsanlage (Mulden-Rigolen-System) zugeführt werden. Beispielsweise durch die Umlenkung von Steildachabflüssen auf das Gründach waren verschiedene Versuchsanordnungen möglich. Sowohl Niederschlag (N) wie auch Abflüsse (Q) wurden an mehreren Schnittstellen messtechnisch erfasst. Im Detail stellten sich die Einzelkomponenten zu Versuchsbeginn 1997 wie folgt dar:

- **Steildachfläche I:** $A_I = 41 \text{ m}^2$; Abfluss über Wirbelfeinfilter zur Regenwassernutzungsanlage mit Inhaltsmessung (RW-Tank)
- **Steildachfläche II:** $A_{II} = 25 \text{ m}^2$; Abfluss wie I
- **Steildachfläche III:** $A_{III} = 32 \text{ m}^2$; Abfluss wahlweise zum Kanalnetz oder auf Gründachfläche
- **Steildachfläche IV:** $A_{IV} = 34 \text{ m}^2$; Abfluss in Regentonnen/Messbehälter (Volumen $V = 200 \text{ Ltr.}$); Nutzung für Gartenbewässerung o.ä.; Überlauf zum Kanalnetz
- **Gründachfläche:** $A_{GD} = 22 \text{ m}^2$; extensiv begrüntes Flachdach (System Hydrotex); Abfluss in Regentonnen/Messbehälter (500 Ltr.); Nutzung für Gartenbewässerung o.ä.; Behälterüberlauf zum Mulden-Rigolen-System
- **Regenwassernutzungsanlage:** 1500 Liter Tank (entsprechend $1,5 \text{ m}^3/66 \text{ m}^2 = 0,023 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ Dachfläche})$); Speisung von zwei WC (von insgesamt 3), Waschmaschine und Außenzapfstelle; Tanküberlauf zum Mulden-Rigolen-System.
- **Mulden-Rigolen-System:** Versickerungsanlage nach [Sieker, 1995] bzw. [DWA-A 138], bemessen in Anlehnung an [ATV-A 138]; bestehend aus einer ca. 25 cm tiefen Mulde mit knapp 1 m^3 Inhalt und darunterliegender Rigole (V_{brutto} ca. 8 m^3)

- **Niederschlagsregistrierung:** N-Schreiber mit Wippensystem (ab 2011 Wägesystem); Aufzeichnung auf EDV-Datensammler und Bandschreiber; Summenkontrolle über Impulszähler und Sammelbehälter sowie durch separaten N-Messer auf dem Gründach.

Erhoben wurden folgende Datenreihen:

- kontinuierliche Niederschlagswerte
- Tagesinhaltswerte des Regenwassertanks
- Ereignisbezogene Inhaltswerte der Messbehälter im Ablauf des Gründachs und des Steildachs IV.

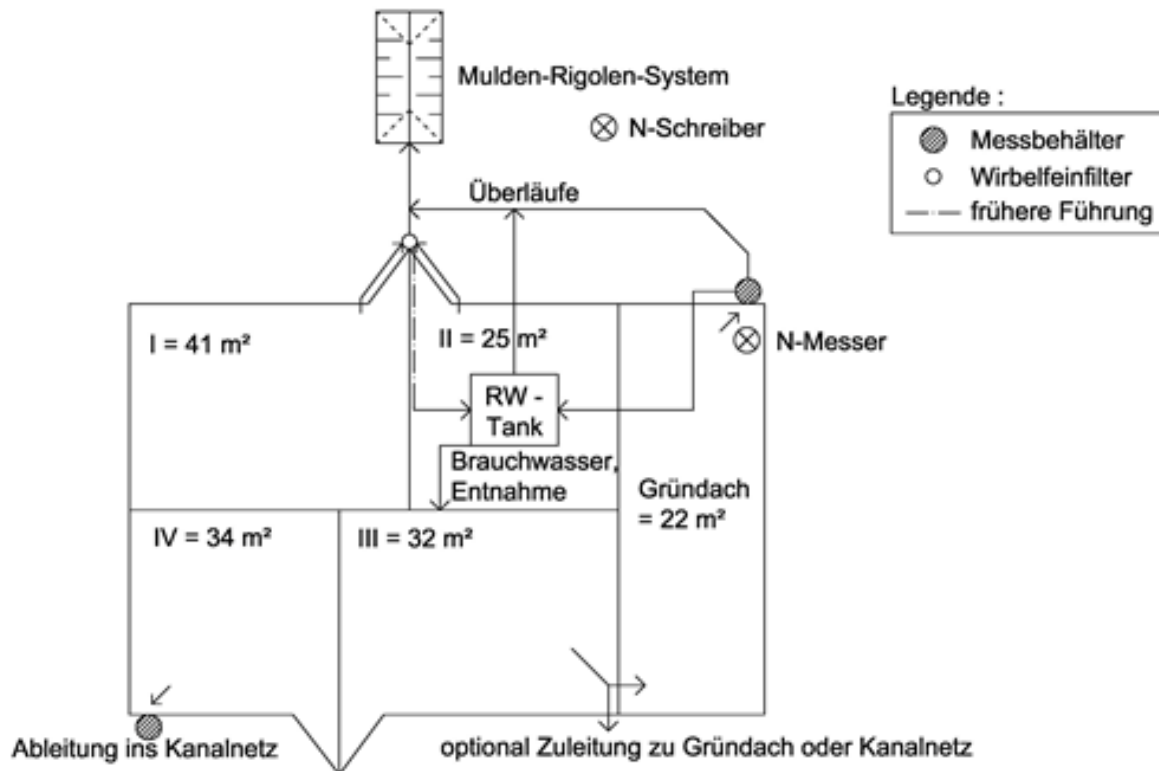


Bild 5: Anlagenprinzip mit Messanordnung (I bis IV: Steildachflächen)



Bild 6: Gesamtansicht (im Vordergrund Garage mit Gründach)



Bild 7: Versickerungsmulde



Bild 8: Gründach nach knapp 31 mm Niederschlag in ca. 3 Tagen (rechts im Bild der Zufluss vom Steildach)



Bild 9: Aufbau des Gründachs (aus Prospekt der Fa. www.6-f-g.de)

1: Initialbepflanzung: Sedum; 2: Vegetationstragschicht; 3: Wasserspeicher/Schutzschicht, System Hydrotex

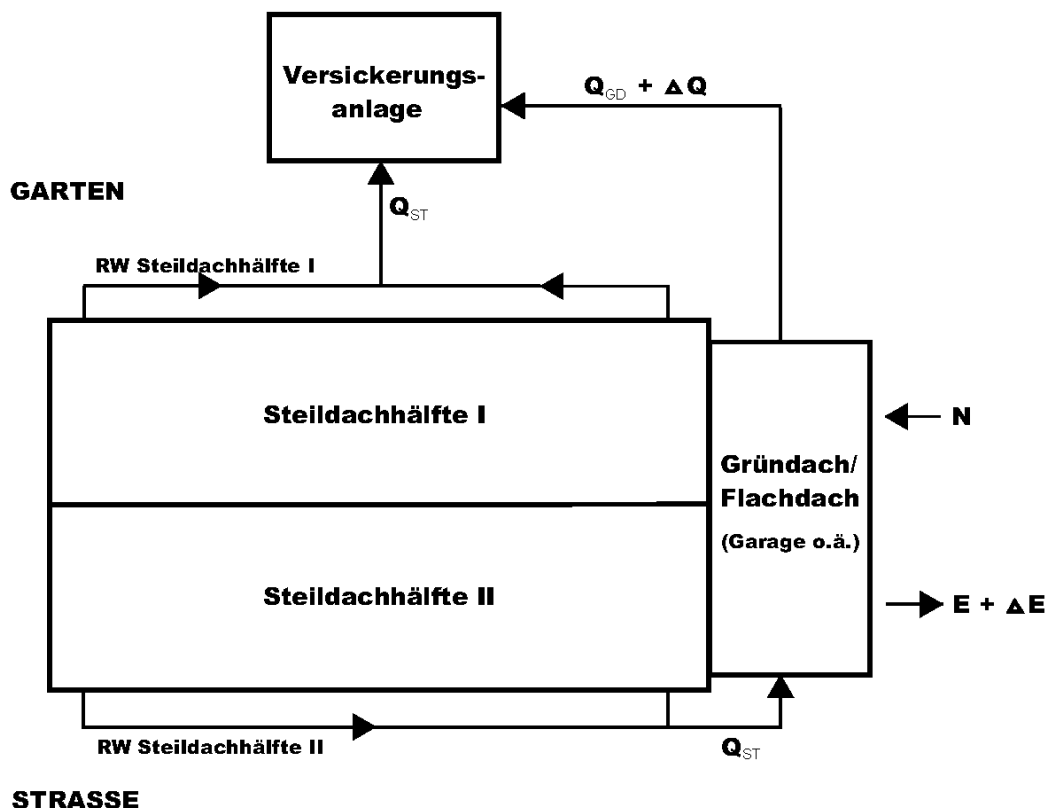
Höchste Priorität bei den Messungen hatte die kontinuierliche Aufzeichnung des Niederschlags, weshalb hierzu mehrfache Kontrollmöglichkeiten vorhanden waren (Details in Anlage 1). Dagegen hätte eine kontinuierliche Registrierung der Abflüsse an den o.g. drei Schnittstellen im System einen unverhältnismäßig hohen finanziellen und wartungstechnischen Aufwand bedeutet. Deshalb wurden die Abflüsse indirekt durch relativ einfache Ablesungen der Behälterinhalte bestimmt, was i.d.R. täglich und ereignisbezogen erfolgte. Dabei wurde davon ausgegangen, dass so entstandene und in Kauf genommene, zeitliche Aufzeichnungslücken mittels des kontinuierlich gemessenen Inputs (d.h. des Niederschlags) später durch Simulation geschlossen werden können. Voraussetzung dafür waren natürlich ausreichend erfasste Einzelereignisse, um entsprechende Modellparameter daran kalibrieren zu können.

Da ein Schwerpunkt der Untersuchungen auf dem hydrologischen Verhalten des Gründachs lag, soll dessen Konstruktion hier etwas näher vorgestellt werden. Gemäß Bild 9 besteht dessen Aufbau im Wesentlichen aus drei Schichten. Die oberste Schicht stellt die Vegetation dar, die ursprünglich aus aufgebrauchten Sedumsprossen bestand und anschließend weitgehend der natürlichen Sukzession überlassen wurde. Bereits nach ein bis zwei Jahren hatte sich eine Gras- und Krautvegetation etabliert (Bild 8). Die etwa jährliche Kontrolle beschränkt sich auf die

gelegentliche Unterbindung eines unerwünschten Gehölzaufwuchses. Die zweite, knapp 15 cm hohe Schicht besteht aus einem Mineralsubstrat (Lava, Bims, Humus) der Fa. *Vulkatec* aus Andernach, das die Vegetation trägt. Die dritte Schicht ist eine Kombination aus Wurzelschutzschicht (für die darunterliegende Betonkonstruktion) sowie einem Vlies mit Drainage- und Wasserspeicherfunktion (System *Hydrotex* der Firma *6 fürs Grün* GmbH aus Saarbrücken). Das Gesamtvolumen des Gründachaufbaus ergibt sich somit zu etwa $V_{\text{ges}} = A \cdot h = 22 \cdot 0,15 = 3,3 \text{ m}^3$.

4.2 Detailuntersuchungen zur Regenwasserüberleitung über ein Gründach

Ein praktisches Problem bei den eingangs erwähnten Abkopplungsmaßnahmen in Bestandsgebieten liegt oft darin, dass zwar die von der Straße abgewandten Dachteile (Steildachhälfte I gemäß Bild 10) höhenmäßig an Versickerungsvorrichtungen in rückwärtig gelegenen Gärten oder sonstigen Grünflächen anschließbar sind. Dagegen ist es häufig schwierig, das auf den zur Straßenseite hin geneigten Dachteilen anfallende Regenwasser mit vertretbarem Aufwand solchen Versickerungsanlagen zuzuführen. Handelt es sich um Ein- oder Zweifamilienhäuser mit seitlichem Anbau einer Garage oder eines Carports, die mit einem Flachdach ausgestattet sind, so bietet sich die Möglichkeit, das Regenwasser des Steildachs über solch ein i.d.R. tiefer gelegenes Flachdach auf die Gebäuderückseite und damit einer Versickerung zuzuführen. In diesem Fall bietet sich dann ganz besonders die Ausbildung des Flachdachs als Gründach an, womit sich u.a. der Vorteil einer teilweisen Regenwasserverdunstung und damit einer Annäherung an die natürliche Wasserbilanz ergibt. Für die Bemessung der Versickerungsanlage stellt sich unter solchen Bedingungen dann die Frage, inwieweit eine Reduktion des von den zusätzlichen Steildachflächen stammenden Regenwassers (Q_{ST} bzw. ΔQ gemäß Bild 10) durch Verdunstung (ΔE) auf dem Gründach in Rechnung gestellt werden kann.



Q_{ST} : Abfluss Steildach; Q_{GD} : Abfluss Gründach; N: Niederschlag; E: Verdunstung (von N)

ΔE : Zusätzliche Verdunstung durch Zusatzangebot Q_{ST} ; $\Delta Q = Q_{\text{ST}} - \Delta E$

Bild 10: Anschluss des Regenwasserablaufs der zur Straße gewandten Steildachhälfte II eines Einzelhauses an eine rückwärtige Versickerungsanlage über ein seitliches Gründach

4.3. Zusammenarbeit mit der Partneruniversität Salerno

2014 begann die bereits erwähnte Zusammenarbeit mit der italienischen Universität Salerno in Form einer in Trier angefertigten Masterthesis [Mobilia, 2014] (veröffentlicht als [Mobilia et al, 2014]), in welche Erkenntnisse aus dem hier behandelten Projekt einfließen und bestmöglich auf italienische Verhältnisse übertragen wurden. Als praktischer Anwendungsfall diente der Universitätscampus Salerno (Bild 11), wobei es um die potentielle Abflussreduzierung bei Starkregenereignissen durch die Umwandlung vorhandener Dachflächen in Gründächer ging. Unter weiterer Verwendung der in Lieser erhobenen Datenreihen und z.T. der damit erzielten Erkenntnisse gemäß Kapitel 5 konzentrieren sich die seitdem laufenden, gemeinsamen Forschungsaktivitäten auf folgende Themenbereiche.

- Einfluss der unterschiedlichen Klimabedingungen des Moselraums (Mitteleuropa) und Süditaliens (mediterran) auf die hydrologische Leistungsfähigkeit von Gründächern ([Mobilia et al, 2015])
- Weiterentwicklung des hydrologischen Simulationsmodells gemäß [Mobilia et al, 2016 a]
- Untersuchungen zur Eignung verschiedener Berechnungsansätze für die Verdunstung von Gründächern ([Mobilia et al, 2016 b] und [Mobilia et al, 2017]).

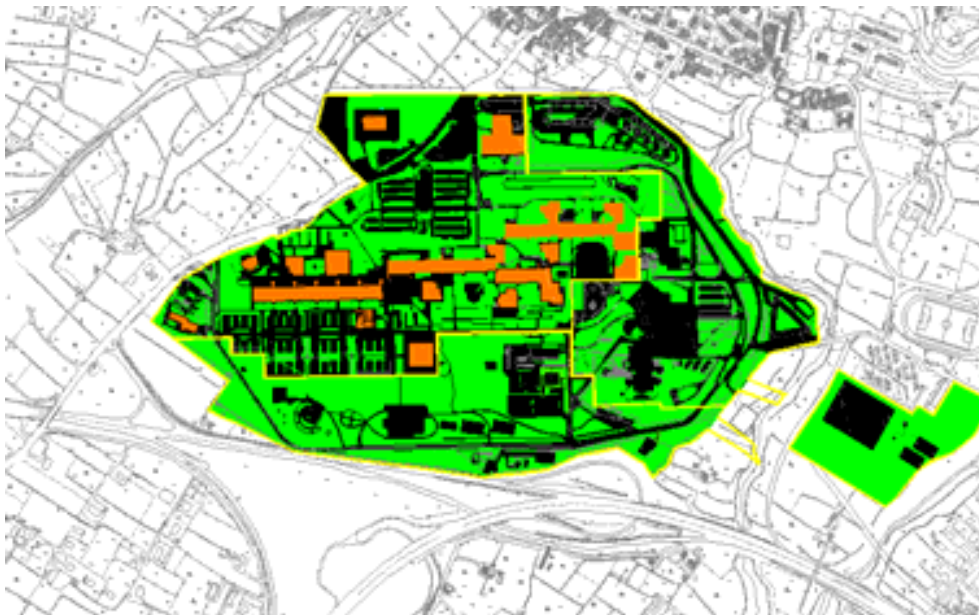


Bild 11: Undurchlässige Flächen (in schwarz), durchlässige Flächen (in grün) und potentielle Gründächer (in orange) des Campus der Universität Salerno nach [Mobilia et al, 2014]

Dabei wurde ein Näherungsverfahren für Planungszwecke entwickelt, das mit rein meteorologischen Daten die hydrologische Leistungsfähigkeit eines Gründachs prognostiziert, also keine konstruktionsspezifischen Parameter benötigt. Da es sich um ein neu entwickeltes, empirisches Verfahren handelt, das bisher lediglich am Fallbeispiel Lieser abgesichert ist, wird hier auf eine detaillierte Wiedergabe verzichtet und stattdessen auf [Mobilia et al, 2017] verwiesen. Es beinhaltet sicherlich ein großes Potential, dessen Weiterentwicklung unter Hinzuziehung weiterer Messreihen unterschiedlicher Gründachkonstruktionen und Klimabedingungen lohnend erscheint.

U.a. dazu wurde im Frühjahr 2017 auch auf dem Campus in Salerno ein experimenteller Gründach-Versuchsstand mit zwei verschiedenen Testbeeten eingerichtet. Aktuell arbeitet die Ingenieurin Mirka Mobilia an der Universität Salerno an der Fertigstellung Ihrer Dissertation, die alle erzielten Ergebnisse beinhalten wird. Der Verfasser ist als Mitglied der Prüfungskommission vorgesehen.

5. Erkenntnisse und Ergebnisse

5.1 Untersuchungsverlauf und praktische Erkenntnisse

Bereits in einem frühen Untersuchungsstadium stellte sich heraus, dass der Regenwassertank im Betrieb häufig leer fiel. Dies war aufgrund seines relativ geringen Volumens von $0,023 \text{ m}^3/\text{m}^2$ angeschlossener Dachfläche nicht überraschend, werden nach DIN 1989 doch $0,025 \text{ m}^3/\text{m}^2$ bis $0,050 \text{ m}^3/\text{m}^2$ empfohlen. Wird die Zahl der Nutzer zugrunde gelegt, so fällt das Verhältnis noch ungünstiger aus. Nach DIN 1989 sollte der Tankinhalt 800 Ltr. bis 1000 Ltr. pro Person betragen, nach [fbr, 2016] sogar 1250 Ltr./Person. Vorhanden sind aber nur $(1500/4 =) 375 \text{ Ltr. pro Nutzer}$. Die deshalb ursprünglich vorgehaltene, bautechnische Option auf eine Verdopplung des Volumens wurde aufgrund der nachfolgend erläuterten Probleme nicht umgesetzt. Zunächst zeigte sich durch die laufende Entnahme von Wasser aus dem unteren Tankbereich (oft aus dem öffentlichen Netz nachgespeistes Trinkwasser) eine Verstopfung des Mikrosiebs im Zulauf zur Waschmaschine, da auf dem Behälterboden abgelagerte Partikel mitangesaugt wurden. Diese stammten meist von Vogelkot und Moosbewuchs auf den (nicht versiegelten) Betonsteinen der Dachabdeckung. Der am Vereinigungspunkt der beiden Regenfallrohre eingebaute Wirbelfeinfiler (s. Bild 5) erwies sich nämlich hydraulisch als wenig effektiv und wird mittlerweile in dieser Form auch generell nicht mehr empfohlen. Ein weiteres hiermit verbundenes Problem war der periodisch auftretende Faulungsgeruch im genutzten Regenwasser, insbesondere bei der Toilettenspülung, der sich aufgrund des biologischen Abbaus der genannten Partikel im Regenwassertank einstellte.

Hieraus wurden folgende praktische Konsequenzen gezogen. Zunächst wurde am 29.11.1997, also bereits gut ein Jahr nach Inbetriebnahme der Regenwassernutzungsanlage die Waschmaschine wegen der Verstopfungsprobleme von der Anlage abgeklemmt und von da an aus dem öffentlichen Netz gespeist. Auch eine ebenfalls vorhandene Außenzapfstelle wurde praktisch nie genutzt. Ferner wurde am 06.05.2009 der Regenwassernutzungstank komplett von den Steildachflächen abgeklemmt, da das Problem der Geruchsbelästigungen trotz zeitweiser Schwefelzugabe nicht in den Griff zu bekommen war. Stattdessen wurde der Überlauf des Gründachs bzw. von dessen nachgeschaltetem Messbehälter (s. Bild 5) direkt an den Regenwassertank angeschlossen. Ein Überlauf in die Versickerungsanlage erfolgte von nun an nur noch bei gleichzeitig vollem Regenwassertank.

Einige Effekte wurden erst nach Abschluss der Messungen deutlich. So hat sich u.a. die alleinige Speisung des Regenwassertanks in jeder Hinsicht bewährt, d.h. ein Gründach kann aus Sicht der Wasserqualität als (unter diesen Randbedingungen) bester „Filter“ empfohlen werden. Auch in mengenmäßiger Hinsicht erwies sich die Kombination von Gründach (22 m^2 Fläche) und daran angeschlossener Steildachfläche III (32 m^2) als nahezu ideale Kombination, da der 1500 Liter große Regenwassertank seitdem nur noch relativ selten trockenfiel oder überlief. Dabei ist natürlich auch zu berücksichtigen, dass sich mittlerweile die Zahl der Nutzer von vier auf zwei verringert hat.



Bild 12: Zustand des Gründachs am 23. Juni 2017 nach langer Trockenheit. Siehe zum Vergleich die Färbung der Rasenfläche im Hintergrund (rechts im Bild der Zufluss vom Steildach)

Der Anschluss der Steildachfläche erwies sich auch für die Vegetation des Gründachs als großer Vorteil. So offenbarte diese z.B. im Vergleich zur natürlichen Vegetation während der anhaltenden Trockenperiode im Frühjahr und Frühsommer 2017 kaum Probleme. Der zusätzliche Steildachzufluss während der wenigen, überwiegend geringfügigen Regenereignisse reichte offenbar aus, um das Gründach mit genügend Wasser zu versorgen (Bild 12). Betrachtet man zudem beispielsweise Bild 8, so lässt sich resumieren, dass sich der Steildachanschluss bei Starkregen hinsichtlich Wasserrückhalt und in regenarmen Perioden hinsichtlich zusätzlicher Wasserversorgung bewährt hat.

Ein weiteres Problem stellte Schimmelpilzbefall an der dem Regenwassertank gegenüberliegenden Wand dar. Diese war ursprünglich mit Rigipsplatten verkleidet und ist nur ca. 20 cm vom Tank entfernt. Sehr wahrscheinlich kam es durch die Temperaturunterschiede von in den Tank eingeleitetem (relativ wärmeren) Regenwasser an der (relativ kälteren) Kellerwand zur Kondenswasserbildung auf den Rigipsplatten und entsprechendem Pilzbefall. Seit dem Ersatz des Rigipses durch Mineralputz hat sich das Problem nicht wiedereingestellt.

Wie beschrieben, standen in den ersten Untersuchungsjahren die Messungen zur Wasserbilanz der Regenwassernutzungsanlage im Vordergrund. Als ein Ende des 4-Personen-Haushalts durch Auszug der heranwachsenden Kinder absehbar wurde und so die Vergleichbarkeit der Verbrauchswerte untereinander nur noch bedingt gegeben war, verlagerte sich der Focus der Messungen zunehmend in Richtung Gründach. Dabei spielte natürlich auch die Annahme eine Rolle, dass zur Konsolidierung von dessen Vegetationstragschicht sowie zur Entwicklung der Vegetation selbst ein gewisser Mindestzeitraum erforderlich war. So wurde erst seit dem 13.04.2001, also etwa 3,5 Jahre nach Inbetriebnahme des Gründaches, die tägliche Registrierung des Messbehälterinhalts in dessen Ablauf angestrebt. Naturgemäß gelang dies aus verschiedensten Gründen faktisch nicht jeden Tag. Zudem war unvermeidbar, dass es aufgrund des begrenzten Behälterinhalts von 500 Liter bei größeren Ereignissen zum Überlauf kam, wodurch natürlich nur ein Teil dieses Volumens erfasst wurde. Dies betraf insbesondere die Zeiträume, in denen das Gründach zusätzlich durch die Abflüsse des angeschlossenen Steildachs III beaufschlagt wurde.

Die besagten Zeiträume, in denen die Steildachfläche III an das Gründach angeschlossen war umfassten folgende Perioden

- 18.07.1998 bis 27.03.2004 und
- seit dem 12.05.2007.

In der mehr als 3 Jahre umfassenden Zwischenperiode wurde das Steildach III direkt an das Kanalnetz angeschlossen, um zu Vergleichszwecken Messwerte des von anderen Flächen unbeeinflussten Gründachs zu erhalten.

5.2 Quantitative Ergebnisse

5.2.1 Allgemeines

Zum einen wurden bereits mit Teilen der Datenreihen die sechs Abschlussarbeiten [*Gottesch&Zimmer, 2002*], [*Nilles, 2003*], [*Wendling, 2010*], [*Stürmer, 2012*] [*Mobilia, 2014*] und [*Freier, 2016*] mit im Detail unterschiedlicher Fragestellung durchgeführt. Als ein wesentliches Ergebnis kann festgehalten werden, dass die Einhaltung der natürlichen Wasserbilanz mittels den zuvor genannten Einzelkomponenten (unter fiktiver Variation ihrer Größenverhältnisse) näherungsweise möglich ist. Dieser Nachweis konnte natürlich nur mittels eines einfachen Simulationsprogrammes erfolgen, das anhand der vorliegenden Messreihen kalibriert worden war. Nähere Hinweise zum verwendeten Programm „Langzeit“ finden sich im folgenden Unterkapitel.

Ein Detailergebnis war die mittlere Trinkwassereinsparung durch die Regenwassernutzungsanlage, deren Höhe für den Zeitraum von 1998 bis 2001 von [*Gottesch&Zimmer, 2002*] zu 20 l/(E·d) ermittelt wurde. Bei dem geringen Wert von 20 l/(E·d) ist zu berücksichtigen, dass (wie in Kap. 4 und 5.1 näher erläutert) der Tankinhalt relativ gering ist und nur 2 von 3 WCs damit gespeist wurden. Während dieses Zeitraums wurde das Haus durchgehend von einer 4-köpfigen Familie bewohnt bzw. die Anlage genutzt. Später reduzierte sich die Anzahl der Personen

schrittweise auf zwei, wodurch die weiteren Verbrauchswerte nur noch bedingt untereinander vergleichbar waren.

Der Benetzungsverlust AV_B für das Steildach wurde durch Betrachtung der größten Niederschlagsereignisse ermittelt, die auf der (zuvor abgetrockneten) Steildachfläche gerade noch keinen Abfluss lieferten. So ergab sich $AV_B = 0,4$ mm, der u.a. im von [DWA-A 118] genannten Bereich liegt.

5.2.2 Niederschlag-Abfluss-Simulation

Da die Simulation des Regenwasserzuflusses von Dachflächen in eine Regenwassernutzungsanlage (bei Kenntnis des Filterwirkungsgrades) und deren Speicherwirkung (bei Kenntnis des Verbraucherverhaltens) i.d.R. keine größeren Probleme bereiten bzw. als Stand der Technik anzusehen sind, wurde der Schwerpunkt der Untersuchungen auf die Abflussmodellierung des Gründachs gelegt.

Im Rahmen studentischer Abschlussarbeiten wurde zunächst ein Programm „Langzeit“ erstellt (Anlage 4), das mittels relativ einfacher Bilanzrechnungen das Verhalten der untersuchten Komponenten modelliert. Entsprechend den vorliegenden Messwerten des Unterzeichners wurde grundsätzlich ein Zeitschritt von $\Delta t = 1$ Tag verwendet, was u.a. der Forderung der DIN 1989 entspricht. Für das Gründach stellt sich diese Bilanzrechnung wie folgt dar.

$$V_t' = V_{t-1} + N_t - E_t \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

$$\text{für } V_t' < 0 \quad \rightarrow \quad V_t = 0 \text{ und } Q_t = 0$$

$$\text{für } V_t' \leq W_{\max} \quad \rightarrow \quad V_t = V_t' \text{ und } Q_t = 0$$

$$\text{für } V_t' > W_{\max} \quad \rightarrow \quad V_t = W_{\max} \text{ und } Q_t = V_t' - W_{\max}$$

mit V_t : Gespeichertes Regenwasservolumen im Gründach am Tag "t"

N_t : Niederschlagshöhe am Tag "t"

E_t : reale = potentielle Verdunstungshöhe am Tag "t"

Q_t : Abfluss vom Gründach am Tag "t"

W_{\max} : Max. im Gründach und auf der Vegetationsoberfläche (Interzeption) speicherbares Wasservolumen in [mm]

Wie bei [Huhn & Swiridjuk, 1994] wurde bei der Abflusssimulation vom Gründach davon ausgegangen, dass es ohne Belang ist, ob Regenwasser über die Drainschicht oder über die Oberfläche abfließt. Ebenso wurde auch die potentielle Verdunstungshöhe E_t mit der einfachen Beziehung nach Brandt [ATV-DVWK-M 165] ermittelt:

$$E_t = 1,4 \sin\left(\frac{2\pi}{365}(j - 91)\right) + 1,8 \quad [\text{mm/d}] \quad (2)$$

mit j : Tag des Jahres (1. Januar: $j = 1$)

Hiermit wird also nicht die tatsächliche, sondern die Verdunstung bestimmt, mit der im langjährigen Mittel am Tag „j“ des Jahres zu rechnen ist. Die zugehörigen Werte schwanken zwischen 0,4 und 3,2 mm/d.

Der W_{\max} -Wert wurde so z.B. von [Wendling, 2010] mittels Kalibrierung an den gemessenen Gründachabflüssen im Zeitraum vom 28.03.2004 bis zum 12.05.2007 (kein Steildachanschluss) zu knapp 14 mm bzw. zu rund 300 ltr ermittelt. Dabei empfahl er, die Verdunstungswerte nach Gl. (2) mit dem Faktor 1,5 zu multiplizieren, was zu einer geringfügig besseren Angleichung der Simulations- an die Messwerte führte.

[Freier, 2016] verbesserte (im Rahmen eines neuen Excel-Programmes) die Bestimmung der Verdunstungswerte, indem er den Ansatz nach Haude verwendete:

$$E_t = f \cdot (e_s - e) = f \cdot e_s (1 - RF) \quad [\text{mm/d}] \quad (3)$$

- mit $(e_s - e)$: Sättigungsdefizit der Luft zum Mittagstermin um 14:30 Uhr [hPa]
 RF: Relative Luftfeuchte zum Mittagstermin [-]
 f: Haundefaktor. Werte nach [DVWK-M 238]:

OKT - MRZ	APR + MAI	JUN	JUL	AUG	SEP
0,22	0,29	0,28	0,26	0,25	0,23

Der temperaturabhängige Sättigungswert des Dampfdruckes e_s bestimmt sich nach [DVWK-M 238] wie folgt

$$e_s = 6,11 \cdot e^{\frac{17,62 \cdot T}{243,12 + T}} \quad [\text{hPa}] \quad (4)$$

mit T: Temperatur der Luft zum Mittagstermin [° C]

Der Vorteil lag darin, dass so die tagesaktuellen, meteorologischen Klimadaten relative Luftfeuchte RF bzw. Dampfdruck e sowie Lufttemperatur T in die Berechnung eingingen, wodurch grundsätzlich von wirklichkeitsnäheren Verdunstungswerten ausgegangen werden kann. Allerdings stehen die entsprechenden Daten der ortsnahe Wetterstation Brauneberg (s. Anlage A2) erst seit dem 20.07.2005 im Internet zur Verfügung, d.h. nur für 7 volle Jahre des Untersuchungszeitraums bzw. nur für knapp 2 Jahre des o.g. Kalibrierungszeitraums, in dem an das Gründach kein Steildach angeschlossen war. Bei der Verdunstungsberechnung nach *Haude* wurden zudem die relativ leicht zugänglichen Tagesmittelwerte der Temperatur T verwendet, da die zugehörige Internetseite (s. Anlage A3) so aufgebaut ist, dass die Stunden- und Maximalwerte für jeden Einzeltag individuell angesteuert werden hätten müssen. Ferner bestehen Einschränkungen dadurch, dass auch der Ansatz nach *Haude* nur ein Näherungsverfahren darstellt.

Für den so auf die Zeitspanne vom 20.07.2005 bis zum 12.05.2007 eingeschränkten Kalibrierungszeitraum ermittelte [Freier, 2016] das Speichervermögen des Gründachs zu $W_{\max} = 25 \text{ mm}$ bzw. 550 Liter.

Zur Simulation der zusätzlichen Belastung durch das zeitweise angeschlossene Steildach von 32 m^2 Fläche erhöht sich die Niederschlagshöhe N_t in Gl. (1) um den Term

$$N_{t,SD} = 32 (N_t - 0,4) / 22 \quad [\text{mm/d}] \quad (5)$$

für $N_t \geq AV_B = 0,4 \text{ mm/d}$; sonst $N_{t,SD} = 0$.

Bei allen zuvor beschriebenen Untersuchungen wurde die potentielle gleich der realen Verdunstung gesetzt, sofern der im Gründach theoretisch vorhandene Wasservorrat zu deren Deckung ausreichte. Im Rahmen weiterer Untersuchungen wurde die Bilanzgleichung (1) in Anlehnung an [Ostrowski, 1982] dadurch verbessert, dass die reale Verdunstung E_t in Abhängigkeit des aktuellen Wassergehalts V_{t-1} wie folgt bestimmt wurde:

$$E_t = E_P \cdot V_{t-1} / W_{\max} \quad [\text{mm/d}] \quad (6)$$

mit E_P : potentielle Verdunstungshöhe

Hierdurch soll berücksichtigt werden, dass die Pflanzen bei abnehmendem Wassergehalt im Boden ihre Transpiration drosseln und nur noch bei Wassersättigung ($V_{t-1} = W_{\max}$) die reale der potentiellen Verdunstung entspricht.

Zunächst fiel bei diesen Untersuchungen auf, dass der Ansatz nach *Haude* zu unplausibel niedrigen Verdunstungswerten (bzw. hohen Überlaufmengen) für das Gründach führte, obwohl laut [DVWK-M 238] dieser Ansatz für Deutschland im Mittel eigentlich ca. 8 % zu hohe Werte liefern soll. So betrug die mittlere rechnerische Verdunstung der für die Kalibrierung relevanten Jahre 2006 und 2007 mit 343 mm/a nur etwa 52 % derjenigen nach Gl. (2) mit 657 mm/a . Für die neben Brauneberg in Frage kommende Wetterstation Wittlich (Anlage 2) ergaben sich nach *Haude* sogar nur 233 mm/a . Daraufhin wurden die vier Jahre von 2009 bis 2012 zu einem weiteren Vergleich herangezogen, für welche die Verdunstungswerte nach dem von der *Food and Agriculture Organization* der UNO empfohlenen, weitgehend physikalisch basierten Verfahren nach *Penman* vorliegen (s. [DVWK-M 238]). Die Ergebnisse gemäß Tabelle 1 zeigen dann eindeutig, dass das

Haude-Verfahren unbrauchbar ist, sofern als Eingangswert die mittlere Lufttemperatur und Luftfeuchte des Tages verwendet wird. Daher wurde im Weiteren wie folgt vorgegangen:

- Kalibrierung des Gründachs (ohne Steildachanschluss) unter Verwendung der für den Zeitraum vom 20.07.2005 bis zum 12.05.2007 größtenteils vorliegenden Verdunstungshöhen nach *Penman*
- Kalibrierung des Gründachs mit Steildachanschluss unter Verwendung der ab März 2008 vollständig vorliegenden Verdunstungswerte nach *Penman*
- Beschränkung aller weiteren Untersuchungen auf die vier Jahre von 2009 bis 2012 mittels *Penman*-Verfahren. Von der ursprünglich vorgesehenen Synthese für die vollen 15 Untersuchungsjahre mittels berechneten Verdunstungswerten nach *Haude* aus den Werten von Wittlich wurde abgesehen.

Tabelle 1: Mittlere jährliche Verdunstungshöhen in [mm/a] nach verschiedenen Verfahren

Jahresreihe	ATV-DVWK	<i>Haude</i> aus Tagesmittelwerten	<i>Penman</i>
	M 165	Station Brauneberg/Wittlich	Station Brauneberg
2006/2007	657	343 / 233	653*
2009 - 2012	657	302 / 222	641
1998 - 2012	657	- / 225	-

*: nur 2006, mangels entsprechender Werte nach *Penman* wurde für 2 Tage die Verdunstung nach *Haude* mittels T_{\max} ermittelt

Unabhängig davon zeigte [*Schreiegg*, 2017] zumindest für das Fallbeispiel der Station Brauneberg, dass auch die relativ aufwendige Beschaffung der Tagesmaxima der Temperaturen sowie der 14:00 Uhr-Werte von Temperatur und Luftfeuchte keine wesentlichen Verbesserungen bringt. Gemäß Tabelle 2 ergibt sich bei Verwendung von 14:00 Uhr-Werten eine Abweichung von + 21 %, die zwar im vom [*DVWK-M 238*] genannten Bereich von – 20 bis + 40 % für 19 untersuchte deutsche Stationen liegt, aber den zugehörigen Mittelwert von + 8 % deutlich überschreitet.

Tabelle 2: Mittlere jährliche Verdunstungshöhen in [mm/a] nach verschiedenen Verfahren sowie Abweichungen in [%] für die Jahresreihen 2009 bis 2012 der Station Brauneberg nach [*Schreiegg*, 2017]

<i>Penman</i>	<i>Haude</i> unter Verwendung von			
	T _m , RF _m	T ₁₄ , RF ₁₄	T _{max} , RF ₁₄	T _{max} , RF _m
641,2	301,6 (- 53,0)	775,6 (+ 21,0)	803,3 (+ 25,3)	449,8 (- 29,8)

mit T_m, RF_m: Tagesmittelwerte von Temperatur T und relativer Luftfeuchte RF
T_{max}: Tagesmaximum der Temperatur; T₁₄, RF₁₄: 14-Uhr-Werte von T und RF

Mittels den realitätsnäheren Verdunstungshöhen nach *Penman* sowie Gl. (6) wurde eine erneute Kalibrierung des Wasserspeichervermögens W_{\max} des Gründachs durchgeführt. Dazu wurden die in Anlage 5 enthaltenen 10 Ereignisse verwendet, für welche die Verdunstungshöhen nach *Penman* vorlagen und für welche die Messwerte aus der Periode vom 20.07.2005 bis zum 12.05.2007 besonders zuverlässig erschienen. So kamen naturgemäß nur relativ kleine Ereignisse in Frage, die zu keinem Überlauf des 500 Liter beinhaltenden Messbehälters (unterhalb des Gründachs) gemäß Bild 5 geführt hatten. Als vorteilhaft kann dabei angesehen werden, dass so die Untergrenze an Ereignisklassen analysiert wurde, welche erstmalig das Gründach zum Überlauf bringen, also an dessen Kapazitätsgrenze liegen. Damit ergab sich das Speichervermögen des Gründachs zu 36 bis 39 mm. Da sich keine nennenswerten Unterschiede

hinsichtlich den Auswirkungen auf die Berechnungsergebnisse bei der Wahl von W_{\max} innerhalb dieser Bereichsgrenzen zeigten, wird im Folgenden vereinfachend von folgendem Wert ausgegangen:

$$W_{\max} = 39 \text{ mm bzw. rund 850 Liter.}$$

Der Wert liegt damit (aufgrund des veränderten Verdunstungsansatzes) deutlich über demjenigen von 25 mm nach [Freier, 2016], aber noch etwas unter der von [FLL, 2008] angegebenen Spanne von rund 46 bis 75 mm (3,1 bis 5 l/m² und cm Schichtdicke). Zudem ist zu berücksichtigen, dass gemäß dem Ansatz nach Gl. (1) rechnerisch der Interzeptionsverlust durch die Pflanzenoberfläche von etwa 2 bis 3 mm [Ostrowski, 1982] mitenthalten ist.

Für die Periode vom 11.03.2008 bis 31.12.2012 mit Steildachanschluss wurden 10 weitere Ereignisse ausgewählt und nachgerechnet, für welche ebenfalls relativ zuverlässige Abflussmessungen vorlagen. Da der W_{\max} – Wert von 39 mm unverändert beibehalten wurde, kann diese zweite Kalibrierungsphase mit dem zusätzlichen Niederschlagswasser nach Gl. (5) auch im weitesten Sinne als Verifizierung angesehen werden.

Bei Betrachtung der 20 Kalibrierungsereignisse gemäß Anlagen A5 und A6 sollte Folgendes berücksichtigt werden.

- Wie bereits erwähnt, handelt es sich um überwiegend kleine Ereignisse, die an der Kapazitätsgrenze des Gründachs sowie in der Größenordnung der Ablesegenauigkeit der Inhaltsanzeige des 500 Liter fassenden Messbehälters liegen. Diese beträgt rund 5 Liter bzw. 0,23 mm, welche somit der Überlaufmenge von 6 (der 20) Ereignisse entspricht. Deren augenscheinlich hohe Abweichungen (zwischen Messung und Rechnung) von formal 100 % sind also entsprechend zu relativieren.
- Im Widerspruch zu den Messwerten wurde bei rund der Hälfte der Ereignisse kein Überlauf simuliert. Um hier das Modellverhalten besser beurteilen zu können, wurde in der letzten Spalte der Anlage 6 der rechnerische Wassergehalt $W(UE-M)$ im Gründach zum Zeitpunkt des gemessenen Überlaufs angegeben. Umso näher $W(UE-M)$ dort bei $W_{\max} = 39$ mm liegt, umso relativ besser ist folglich das Simulationsergebnis.
- Da es sich von der Niederschlagshöhe her gesehen um überwiegend kleine Ereignisse handelt, ist in Anlage 5 die folglich sehr einflussreiche Vorgeschichte mittels 5-Tage-Vorregenhöhe sowie mittels Vorregenindex nach Zaiß quantifiziert. Der große Einfluss der Bodenfeuchte zu Ereignisbeginn aufgrund der Vorregengeschichte wird auch von [Uhl et al, 2003] und [Scherer et al, 2017] betont.
- Trotz allem ist nicht übersehbar, dass einige Ereignisse, insbesondere dasjenige vom 22.07.2010 nur sehr schlecht wiedergegeben werden konnten.

Insgesamt bleibt also festzuhalten, dass die Modellanpassung nicht sonderlich befriedigend ist und dass hierzu noch weiterer Forschungsbedarf besteht. Dies ist aber keineswegs nur auf die verwendeten, relativ einfachen Berechnungsansätze zurückzuführen. Auch mit anspruchsvolleren Modellen, wie mit SWMM (Stormwater Management Model) ergeben sich bei der Simulation des Abflussverhaltens von Gründächern laut [Kleckers, 2014] erhebliche Schwierigkeiten, zumindest wenn die Phase der Abflusskonzentration mit abgebildet werden soll.

Mit dem so angepassten Modell ergab sich ein mittlerer Jahresabflussbeiwert für die vier Jahre von 2009 bis 2012 von $\alpha = 0,431$. Dieser passt immerhin auffallend gut zu dem Wert von 0,423, der nach einer empirischen Formel aus [DWA-A 102E/ BWK-A 3E] ermittelt wurde (Anlage 7).

5.2.3 Regenwasserüberleitung über das Gründach

Aus den Berechnungen von [Freier, 2016] lässt sich ableiten, dass von den zusätzlichen Steildachabflüssen für den Zeitraum von 2006 bis 2012 im Mittel nur etwa $\Delta E = 2$ % (vgl. Bild 10) durch das Gründach verdunstet werden.

Mit den zuvor erläuterten Verbesserungen hinsichtlich der höheren (realistischeren) Verdunstungsintensität nach Penman wurde diese Teiluntersuchung für die vier Jahre von 2009 bis 2012 erneut durchgeführt. Die potentielle Verdunstung beträgt für diesen Zeitraum im Jahresmittel $E_P = 641,2$ mm/a. Ohne Steildachanschluss werden vom mittleren Jahresniederschlag

$h_N = 704,9$ mm/a laut Modell real $E_a = 400,8$ mm/a verdunstet. Im Jahresmittel ergab die Langzeitsimulation mit einem Benetzungsverlust von 0,4 mm für das Steildach gemäß Gl. (5) eine zusätzliche Belastung des Gründachs durch diesen Zufluss von $Q_{ST} = 931,3$ mm/a (Bild 10). Für diesen Fall ermittelte das Modell eine reale Verdunstungshöhe von $E_a' = 477,3$ mm/a auf dem Gründach, woraus eine Mehrverdunstung von $\Delta E = (477,3 - 400,8 =) 76,5$ mm/a folgt. Bezogen auf den zusätzlichen Regenwasserzufluss vom Steildach ergibt sich also eine relative Mehrverdunstung von $\Delta E = (76,5/931,3 =) 8,2$ %. Ganglinien der Überlaufereignisse finden sich für das repräsentative Jahr 2010 in Anlage 8.

Danach wird also bei der Regenwasserüberleitung von einem Steildach über ein Gründach im Jahresmittel rund $\Delta E = 8$ % dieses zusätzlichen Wasserangebots verdunstet und somit in gleichem Maße eine nachgeschaltete Versickerungsanlage entlastet. Dieser Wert erscheint nicht ausreichend hoch genug, um ihn ohne weitere Untersuchungen (z.B. zu Einzelereignissen) bei der hydraulischen Bemessung einer Versickerungseinrichtung in Rechnung stellen zu können. Allerdings wird hierdurch die herkömmliche Bemessung mit zusätzlichen Sicherheiten versehen.

Diese Entlastung für eine Versickerungsanlage liegt somit übrigens in der gleichen Größenordnung wie diejenige, die nach [fbr, 2016] von einer vorgeschalteten Regenwassernutzungsanlage ausgeht. Beispielsweise beträgt danach für die Standorte Berlin oder Mainz die Abminderung des 5-jährlichen Regenwasserabflusses eines Einfamilienhauses 5 bis 10 % und die Einsparung an Rigolenvolumen einer Versickerungsanlage je nach Bodendurchlässigkeit bis zu 10 %.

6. Zusammenfassung

Grundgedanke des Projekts ist die Einhaltung der natürlichen Wasserbilanz in Siedlungsgebieten, um die weithin bekannten Nachteile durch Flächenversiegelung zu vermeiden. Dies steht u.a. in Übereinstimmung mit der Forderung jüngerer Regelwerke für die Siedlungswasserwirtschaft [DWA-A 100], [DWA-A 102E/ BWK-A 3E].

Von September 1997 bis Ende 2012 (15 vollständige Jahre) wurden vom Verfasser an einem Einfamilienhaus die Komponenten einer Regenwasserbewirtschaftung untersucht. Diese besteht im Wesentlichen aus Regenwassernutzung und extensivem Gründach (Aufbauhöhe 15 cm), deren Überläufe einer Versickerungsanlage (Mulden-Rigolen-System) zugeführt werden. Sowohl Niederschlag wie auch Abflüsse wurden an mehreren Schnittstellen messtechnisch erfasst. Hauptziele waren zum einen die praktische Überprüfung der genannten Regenwasserbewirtschaftungskomponenten im laufenden Betrieb wie zum anderen die Verbesserung entsprechender Simulationsmodelle mittels der erhobenen Messreihen.

Bereits relativ kurz nach Untersuchungsbeginn zeigten sich ernste Probleme mit der Regenwassernutzungsanlage. Aufgrund des wenig effektiven Wirbelfeinfilters im Tankzulauf kam es häufig zu Verstopfungen des Mikrosiebs der angeschlossenen Waschmaschine sowie zu Geruchsbelästigungen aufgrund des biologischen Abbaus von Partikeln im Regenwassertank, die meist von Vogelkot und Moosbewuchs auf den (nicht versiegelten) Betonsteinen der Steildachflächen stammten. Daher wurde gut ein Jahr nach Inbetriebnahme die Regenwassernutzungsanlage so umgestellt, dass hiervon lediglich noch zwei (der drei) Toiletten im Haus versorgt und seit 2009 der Tank nur noch von den Überläufen des Gründachs gespeist wird. Dies hat sich in jeder Hinsicht bewährt, d.h. ein Gründach kann aus Sicht der Wasserqualität als bester „Filter“ empfohlen werden. Auch in mengenmäßiger Hinsicht erwies sich die Kombination von Gründach (22 m² Fläche) und einer daran angeschlossenen Steildachfläche von 32 m² als nahezu ideale Kombination, da der 1500 Ltr. große Regenwassertank für den (mittlerweile nur noch) 2 Personen-Haushalt seitdem selten trockenfiel oder überlief. Weitere Vorteile des Steildachanschlusses an das Gründach sind die zusätzliche Wasserversorgung der Vegetation in regenarmen Zeiten sowie der Wasserrückhalt bei Starkregen.

Hinsichtlich der Überprüfung und Weiterentwicklung von hydrologischen Modellen wurde der Schwerpunkt auf die Simulation der Gründachleistung gelegt, wobei sich schnell herausstellte, dass die Berechnung der Verdunstung die entscheidendste Einzelkomponente darstellt. Einfache Ansätze, wie z.B. das *Haude*-Verfahren können demnach für diesen Zweck nicht empfohlen werden. Die Kalibrierung mittels je 10 gemessenen Ereignissen des Gründachs mit/ohne

Steildachanschluss unter Verwendung von Verdunstungswerten nach *Penman* führte zu den relativ besten Ergebnissen. Für die Reihe 2009 bis 2012 ergab sich so ein mittlerer Abflussbeiwert von 0,431, der auffallend gut zu dem Wert von 0,423 nach [DWA-A 102E/ BWK-A 3E] passt (nach Druckfehlerkorrektur in dortiger Formel!). Dagegen liegt das kalibrierte Speichervermögen des Gründachs mit 39 mm unter der von [FLL, 2008] angegebenen Spanne von rund 46 bis 75 mm.

Eine Teiluntersuchung betraf den bereits erwähnten Anschluss einer Steildachfläche an das Gründach. Hintergrund ist das im Rahmen von Abkopplungsmaßnahmen (von der Kanalisation) in Bestandsgebieten häufig auftretende Problem, dass das auf den zur Straßenseite hin geneigten Dachteilen anfallende Regenwasser häufig schwierig an Versickerungsanlagen in rückwärtig gelegenen Gärten anschließbar ist. Typischerweise verfügen aber viele Ein- und Zweifamilienhäuser über einen seitlichen Garagen- oder Carportanbau mit Flachdach. Hier bietet sich die Möglichkeit, das Regenwasser des i.d.R. höher gelegenen Steildachs über solch ein (dann begrüntes) Flachdach auf die Gebäuderückseite und damit einer Versickerung zuzuführen, womit sich u.a. die genannten Vorteile hinsichtlich der natürlichen Wasserbilanz ergeben. Für das aktuelle Fallbeispiel wurde per Simulation ermittelt, dass im Jahresmittel von dem so zusätzlich auf das Gründach geleiteten Regenwasser rund 8 % verdunstet und die nachgeschaltete Versickerung entsprechend entlastet wird.

Derzeit werden die genannten Datenreihen intensiv von der italienischen Partneruniversität Salerno genutzt.

7. Literatur

Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV): Arbeitsblatt A 138 - Bau und Bemessung von Anlagen zur dezentralen Versickerung von nicht schädlich verunreinigtem Niederschlagswasser. St. Augustin, 1990

ATV: Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten zur Angleichung an natürliche Abflussverhältnisse. Arbeitsbericht der Arbeitsgruppe 1.2.6 "Hydrologie der Stadtentwässerung"; Korrespondenz Abwasser, Heft 4, 1999

Chiffard, P.: Wissenschaftliches Netzwerk der Deutschen Forschungsgemeinschaft: „Zwischenabfluss – Ein anerkannter, aber immer noch schwer zu erfassender Prozess in der Einzugsgebietshydrologie“. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 6, 2016

Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 1989 Regenwassernutzungsanlagen. Berlin, 2002

Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW): Nutzung von Regenwasser (Dachablaufwasser) im häuslichen Bereich. Arbeitsblatt W 555, 2002

Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK): Merkblatt 238 – Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Bonn, 1996

DVWK: Schrift 124 – Hochwasserabflüsse. 1999

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (ATV-DVWK): Merkblatt 165 – Anforderungen an Niederschlag-Abfluss-Berechnungen in der Siedlungsentwässerung. Hennef, 2003

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA): Arbeitsblatt 138 – Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser. Hennef, 2005

DWA: Arbeitsblatt 100 – Leitlinien der integralen Siedlungsentwässerung. 2006

DWA: Arbeitsblatt 102, inhaltsgleich mit dem Merkblatt 3 des *Bundes der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK):* Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer. Entwurf, 2016

DWA: Arbeitsblatt 118 – Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. 2006

DWA: Merkblatt 153 - Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser. 2007

DWA: Merkblatt 550 - Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung. 2015

- DWA: Merkblatt 552 - Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. 2012
- DWA: Abflüsse aus Außengebieten der Kanalisation. Arbeitsbericht, KA, Heft 8/2008
- Deutscher Wetterdienst (DWD): Starkniederschlagshöhen für Deutschland (KOSTRA-2000), Offenbach, 2005
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL): Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen. Bonn, 2008
- Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung e.V. (fbr): Hinweisblatt H 101 – Kombination der Regenwassernutzung mit der Regenwasserversickerung. Darmstadt, 2016
- Freier, M.: Gründächer zur Unterstützung von Abkopplungsmaßnahmen im Rahmen der hydraulischen Kanalnetzsanierung. (Unveröffentlichte) Bachelor-Thesis an der Hochschule Trier, 2016
- Göbel, P.; Dierkes, C.; Korles, H.; Meßer, J.; Meißner, E.; Coldeway, W. G.: Einfluss von Gründächern und Regenwassernutzungen auf Wasserhaushalt und Grundwasserstand in Siedlungen. Grundwasser, Heft 12, 2007
- Gottesch, G.; Zimmer, M.: Bewertungskriterien für Konzepte der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung. (Unveröffentlichte) Diplomarbeit an der Fachhochschule Trier, 2002
- Herrmann, A.: Global review of isotope hydrological investigations. In: Oberlin, G. (ed.): Friend-3rd Report 1994-1997, Cemagref Editions Antony, France, 1997 (zitiert aus [DVWK, 1999])
- Huhn, V.; Swiridjuk, T.: Modellierung des Abflussverhaltens begrünter Dächer. Stadtentwässerung und Gewässerschutz, Heft 28, 1994
- Kleckers, J.: Simulation des Abflussverhaltens begrünter Dächer mit SWMM. (Unveröffentlichte) Bachelor-Thesis an der Fachhochschule Münster, 2014
- Korthals, W.; Roth, U.: Nutzung von Regenwasser im häuslichen Bereich. bbr, Heft 8/2003
- Krein, A.: Der Einfluss des Bodens auf die Wellenform und den Stofftransport bei Hochwasser in kleinen Einzugsgebieten. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Heft 1, 2000
- Landesamt für Wasserwirtschaft (LfW) Rheinland-Pfalz: Landnutzung und Wasserhaushalt. Mainz, 1991
- Lowis, J.: Regenwassernutzung in Köln, Köln, 1996
- Manandhar, S.; Pratoomchai, W.; Keisuke, O.; Kazama, S.; Komori, D.: Local people's perceptions of climate change and related hazards in mountainous areas of northern Thailand. International Journal of Disaster Risk Reduction, issue 11, 2015
- Mendel, H.: Elemente des Wasserkreislaufs - eine kommentierte Bibliographie zur Abflussbildung. Analytica Verlagsgesellschaft, Berlin, 2000
- Meßer, J.; Gall, S.: Angepasste Regenwasserversickerung als Kompensation des Eingriffs in die Grundwasserneubildung durch Bebauung. Korrespondenz Abwasser, Heft 1, 2016
- Mertens, F.: The Economic Relationship between the Water Storage Capacity of Green Roofs and the Requirements for the Structural Design. (Unveröffentlichte) Master-Thesis an der englischen Universität Portsmouth im Rahmen des mit der HS Trier gemeinsamen MSc-Studiengangs, 2007
- Mobilis, M.: Analysis of Urban Drainage System - Implementation of Green Roof Technology for the University of Salerno Campus. (Unveröffentlichte) Master-Thesis an der Hochschule Trier, 2014
- Mobilis, M.; Longobardi, A.; Sartor, J.: Impact of green roofs on stormwater runoff coefficients in a Mediterranean urban environment. Beitrag zur Konferenz USCUDAR'14, Florenz, 2014
- Mobilis, M.; Longobardi, A.; Sartor, J.: Green roofs hydrological performance under different climate conditions. WSEAS Transactions on Environment and Development, 2015 (<http://wseas.org/wseas/cms.action?id=10179>)

- Mobilia, M.; Longobardi, A.; Sartor, J.:* How complex has to be a green roof model? Beitrag zur 14th International CCWI conference, Amsterdam, 2016
- Mobilia, M.; Longobardi, A.; Sartor, J.:* Including actual evapotranspiration for green roof modelling at an experimental site. Beitrag zur IDRA16 Konferenz, Bologna, 2016
- Mobilia, M.; Longobardi, A.; Sartor, J.:* Including a-priori assessment of actual evapotranspiration for green roof daily scale hydrological modelling. MDPI water, Basel, Schweiz, 2017
- Nilles, S.:* Aspekte der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung. (Unveröffentlichte) Diplomarbeit an der Fachhochschule Trier, 2003
- Ostrowski, M.W.:* Ein Beitrag zur kontinuierlichen Simulation der Wasserbilanz. Mitteilung Nr. 42 des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen, 1982
- Roth-Kleyer, S.:* Dachbegrünung als Modul der Siedlungswasserwirtschaft. Korrespondenz Abwasser, Heft 4, 2010
- Sartor, J.:* Die Bedeutung der Wasserbilanz in der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung. In: Hochwasserschutz heute - Nachhaltiges Wassermanagement, Erich Schmidt Verlag, Berlin 2001
- Sartor, J.:* Ist die Regenwasserversickerung von bebauten Flächen wirklich naturnah? Wasser und Abfall, Heft 7-8, 2002
- Scherer, I.; Henrichs, M.; Uhl, M.; Schuetz, T.; Weiler, M.; Hackenbroch, K.; König, F.; Freytag, T.:* Planungsinstrumente und Bewirtschaftungskonzepte für den Wasserhaushalt in Siedlungen. Korrespondenz Wasserwirtschaft, Heft 4, 2017
- Schlichtig, B.; Dittmer, U.; Haas, U.; Besier, H.; Langner, J.; Henrichs, M.; Uhl, M.:* Schritte zu einem anpassungsfähigen Management des urbanen Wasserhaushalts. Wasser und Abfall, Heft 11, 2014
- Schneider, F.:* Messtechnische Untersuchung und modelltechnische Beschreibung des Speicher- und Abflussverhaltens von Mulden-Rigolen-Systemen. Dissertation am Institut für Wasserwirtschaft der Universität Hannover, 1999 (zitiert aus [Sieker, 2001])
- Schreiegg, M.:* Die Bedeutung der Verdunstungsberechnung bei der hydrologischen Gründachsimulation. (Unveröffentlichte) Bachelor-Thesis an der Hochschule Trier, 2017
- Sieker, F.:* Das Mulden-Rigolen-System, ein neues Konzept zur Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten. Wasserwirtschaft, Heft 3, 1995
- Sieker, H.:* Generelle Planung der Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten. Mitteilung Nr. 116 des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Darmstadt, 2001
- Stürmer, C.:* Regenwasserbewirtschaftung zur Entlastung der Kanalisation. (Unveröffentlichte) Master-Thesis an der Fachhochschule Trier, 2012
- Uhl, M.; Schiedt, L.; Henneberg, M.; Mann, G.:* Langzeitstudie zum Abflussverhalten begrünter Dächer. Wasser und Boden, Heft 3, 2003
- Uhl, M.: Die Stadt als hydrologisches System im Wandel – Schritte zu einem anpassungsfähigen Management des urbanen Wasserhaushalts (Schlussbericht zum Forschungsvorhaben SAMUWA). Münster, 2017
- Uhlenbrook, S.; Leibundgut, C.:* Abflussbildung bei Hochwasser in verschiedenen Raumskalen (Literaturstudie), Wasser und Boden, Heft 9, 1997
- Wendling, D.:* Kombination von Gründach und Versickerung bei der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung. (Unveröffentlichte) Bachelor-Thesis an der Fachhochschule Trier, 2010

Trier, den 7. März 2018



Anschrift des Verfassers: Prof. Dr.-Ing. Joachim Sartor
Hochschule Trier, FB BLV
Schneidershof
54293 Trier
J.Sartor@Hochschule-Trier.de

Anlagenverzeichnis

A 1: Niederschlagsstatistik

A 2: Wetterstationen Brauneberg und Wittlich

A 3: Beispiel für die Bereitstellung von Tagesmittelwerten der Wetterstation Brauneberg im Netz

A 4: Beispiel für eine Ergebnisübersicht des Programms „Langzeit“

A 5: Modellkalibrierung für das Gründach – Verwendete Ereignisse

A 6: Modellkalibrierung für das Gründach – Ergebnisse

A 7: Ergänzende Berechnungen

A 8: Jahresgang der Gründachüberläufe 2010