

Extensiv begrünte Dächer: Temperaturbedingungen und Wasserhaushalt

Autor(en): **Heeb, Johannes / Mosimann, Thomas**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **111 (1993)**

Heft 41

PDF erstellt am: **24.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-78254>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Extensiv begrünte Dächer

Temperaturbedingungen und Wasserhaushalt

Begrünte Dächer wirken sich stark auf den Energiehaushalt von Gebäuden sowie den Siedlungswasserhaushalt aus. Das gewählte Dachsubstrat bestimmt das siedlungsökologisch wichtige Abflussverhalten sowie die insgesamt gute Wasserrückhaltung. Für die Bearbeitung praxisorientierter Fragestellungen im Siedlungswasserbau konnte aus den statistischen Beziehungen zwischen klimatischer Wasserbilanz und Substratfeuchtegehalten ein simulationsfähiges Wasserhaushaltsmodell abgeleitet werden. Ferner war es möglich, wichtige planungsrelevante Standortfaktoren für Anlage und Funktionsfähigkeit von Dachbegrünungen auszuweisen und diese hinsichtlich mikroklimatischer und wasserhaushaltlicher Auswirkungen zu bewerten.

Begrünte Dächer als Ökosysteme

Begrünte Dächer sind künstlich geschaffene standörtliche Systeme mit einigen funktionellen Eigenschaften natürlicher Standorte. Im Strukturgefüge einer Siedlung nehmen sie deshalb eine Zwischenstellung zwischen künstlichen Oberflächen und bewachsenen Böden ein. Begrünte Dächer erfüllen dabei wichtige ökologische Funktionen in Siedlungen [1], [2]. Besonders zu nen-

nen sind die Funktion als Pflanzenstandort, die Wasserspeicherung und die Temperaturbeeinflussung über den

VON JOHANNES HEEB,
STEINHUSERBERG, UND
THOMAS MOSIMANN,
HANNOVER

vermehrten latenten Wärmestrom. Der Energie- und Wasserhaushalt der Gründächer ist von den grundsätzlichen

Funktionen her mit natürlichen Ökosystemen vergleichbar. Wesentliche Unterschiede sind dagegen:

- das ganz oder teilweise künstliche Substrat
- die Flachgründigkeit und
- die Isolation des Standortes «Dach» (Fehlen eines umgebenden Standortgefüges).

Wegen dieser Unterschiede zeigen begrünte Dächer immer einen anderen Bewuchs als Erdbodenstandorte. Sie sind als besondere Ökosysteme im Strukturmosaik von Siedlungen zu verstehen.

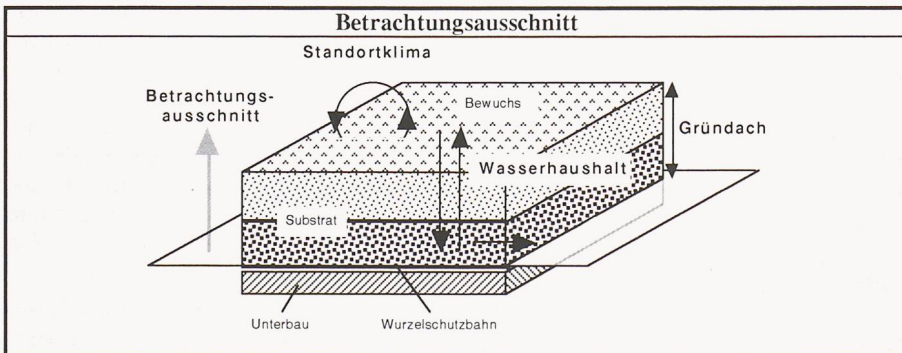
Der folgende Beitrag fasst einige Ergebnisse ökologischer Standortuntersuchungen auf begrünten Dächern im schweizerischen Mittelland zusammen und stellt ein praxisnahes Modellkonzept für die Modellierung des Wasserhaushaltes dar. Angaben zu Ansatz und Methodik der 1990 und 1991 auf verschiedenen Dachtypen und Vergleichsstandorten am Erdboden durchgeführten Untersuchungen können Bild 1 entnommen werden. Tabelle 1 zeigt die untersuchten Dachtypen. Die Untersuchung der begrünten Dächer erstreckte sich auf die Schichten oberhalb der Wurzelschutzbahn.

Ökologische Standortbedingungen verschiedener begrünter Dächer

Temperaturverhältnisse auf begrünten Dächern

Auf Dächern können extreme Temperaturverhältnisse auftreten. So wurden zwischen einem unbegrünten Kiesdach und einer intensiv begrünten Dachoberfläche Temperaturunterschiede von bis zu 25 K gemessen [3]. Begrünte Dächer weisen im Vergleich zu unbegrünten deutlich geringere Temperatur-Extremwerte und somit kleinere Temperaturamplituden auf. Unter dem Gesichtspunkt einer standörtlichen Betrachtung sind jedoch weniger einzelne Extremwerte als vielmehr mittlere Verhältnisse von Interesse.

Wie aus Bild 2 hervorgeht, wurden Dächer mit unterschiedlichem Substrataufbau und Bewuchs untersucht. Es lassen sich dabei unter dem Aspekt des Mikroklimas und unter Berücksichtigung des Substratfeuchteverhaltens drei Gruppen bzw. Typen unterscheiden:



Untersuchung der Temperaturverhältnisse						
Messgröße	Messmethode	Anordnung der Geräte		Bemerkungen		
Minimum-/Maximumtemperaturen der Luft	Minimum- und Maximumthermometer	0 cm + 50 cm		mit Strahlenschutz		
Luft- und Bodentemperaturen	Datalogger (Squirrel) der Firma GRANT mit Widerstandstemperaturfühlern (Thermistoren)	+ 50 cm 0 cm - 5 cm	Unterkante Substrat	kontinuierliche Aufzeichnung (alle 30 bzw. 15 Minuten)		
Lufttemperaturen/relative Luftfeuchtigkeit	Wetterhütte mit Thermohygrograph	+50 cm				
aktuelle Luft- und Bodentemperaturen	digitales Thermometer	+ 50 cm 0 cm - 5 cm	Unterkante Substrat			
Untersuchung des Wasserhaushaltes						
Messgröße	Niederschlag		pot. Evapotranspiration	Bodenwasser	Abfluss	
Messmethode	Hellmann Regenmesser	Hellmann Regenschreiber	Tankevapormeter	Wildsche Waage	Tensiometer	Sammelbehälter mit Pegelschreiber
Messhöhe	50 cm	150 cm	29/50 cm	50 cm	- 5/ - 10 cm	

Bild 1. Betrachtungsausschnitt, Untersuchungsparameter und Methoden der ökologischen Untersuchung begrünter Dächer. Aus Platzgründen wird bei der Methodik und Arbeitstechnik auf Detailangaben verzichtet

□ Dachtyp A: Einfach intensiv und intensiv begrünte Dächer mit Substratmischung aus Blähton, Vermiculit, Rindenkompst und granuliertem Ton. Deckungsgrade der Begrünung zwischen 50 und 80%. Mittleres Substratfeuchteniveau von 15–35 Vol.% (Bezeichnungen in den Bildern: NWSE, NWNW, GWNNE, GWSSW).

□ Dachtyp B: Einfach intensiv begrüntes Dach mit Humusschicht über Humus-Lecca-Gemisch. Deckungsgrad zwischen 90 und 100%. Eher hohes Feuchteniveau von 20–40 Vol.% (HBWSW).

□ Dachtyp C: Intensiv begrünte Dächer mit magerem Kies-Humus-Gemisch. Deckungsgrad der Begrünung zwischen 40 und 60%. Niedriges Substratfeuchteniveau von 2–15 Vol.% (HBENE, HBSCH).

Für eine vergleichende Betrachtung der an verschiedenen Standorten und zum Teil während verschiedenen Messperioden untersuchten Dachtypen wurden relative Abweichungen der auf den Dächern gemessenen Temperaturwerte zu den Referenzstandorten am Erdboden errechnet.

Temperaturverhältnisse im Vergleich zu den Bodenstandorten

Temperatur auf der Dachoberfläche:

□ Die durchschnittlichen Temperaturminima der Dachtypen A lagen 1.5 bis über 3.0 K höher als am Erdboden.
 □ Die durchschnittlichen Temperaturmaxima zeigen im Hochsommer und im Herbst prinzipiell das gleiche Bild, wenn auch das Ausmass der Abweichungen zum Teil unterschiedlich ausfällt. Mit Ausnahme der NW- und NNE-Standorte lagen die durchschnittlichen Temperaturmaxima 4.0 bis 10.0 K höher als am Boden.

Die Temperaturverhältnisse sind also gesamthaft erwartungsgemäss extremer. Mit einer Ausnahme überschritten die Abweichungen nach oben und unten die Grössenordnung von 4–5 K nicht.

Temperatur im Dachsubstrat (5 cm Tiefe):

□ Die Temperaturmittel unterscheiden sich ausser bei den SE- und SSE-exponierten Dächern wenig von den Erdbodenstandorten.

□ Bei den Temperaturextrema wurden jedoch grosse Unterschiede festgestellt, und die Dachtypen verhalten sich zum Teil auch verschieden. Die mittleren Temperaturamplituden lagen mit einer Ausnahme 6.0–10.0 K höher als am Erdboden. Die mittleren Temperaturminima erreichten zwischen 6 K tiefere bis 4 K höhere Werte, die mittleren Maxima mit einer Ausnahme 3–11.5 K höhere Werte als am Erdboden.

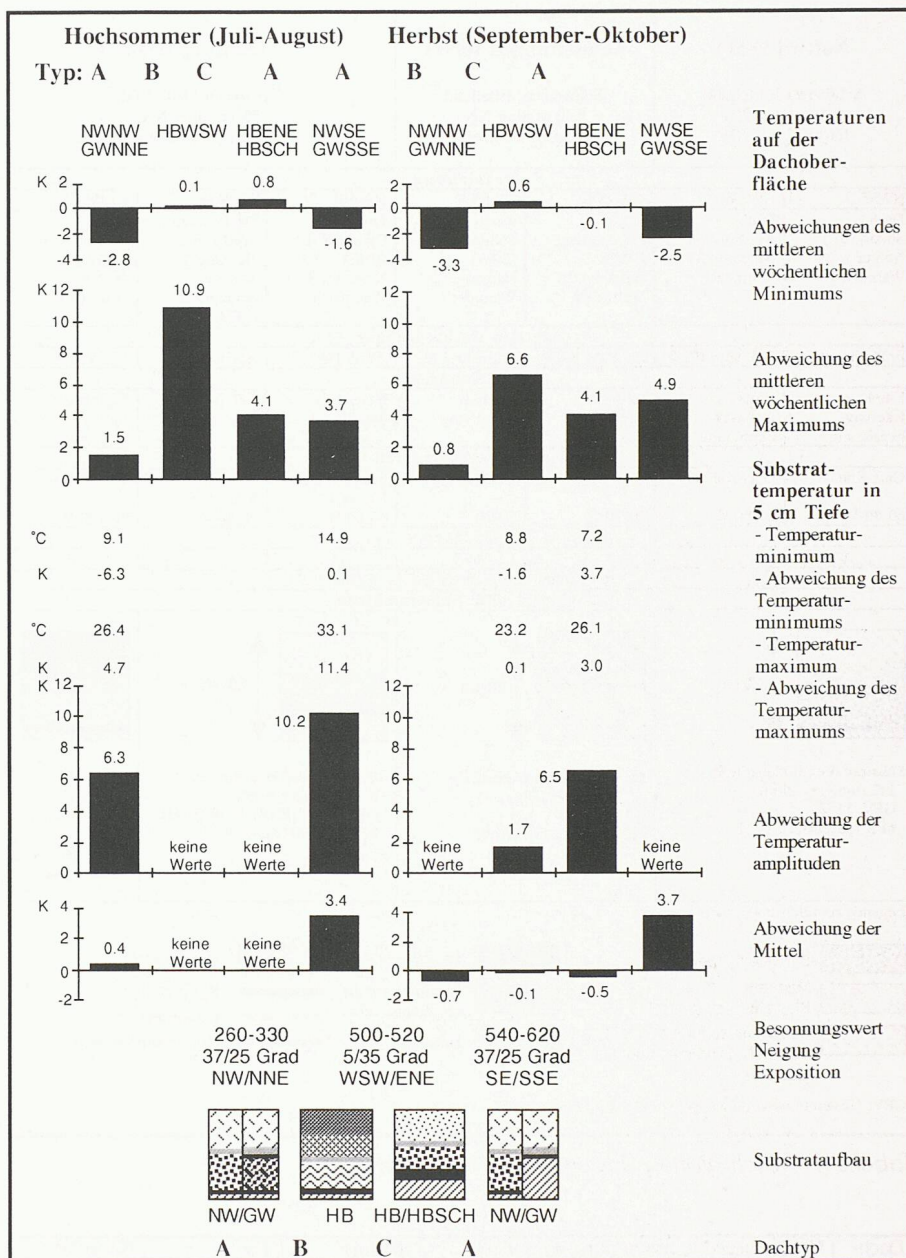


Bild 2. Temperaturverhältnisse auf den untersuchten Dächern (Legende zum Substrataufbau siehe Tabelle 1)

Einfluss von Exposition und Dachneigung

Auf Schrägdächern ergeben sich grosse Bestrahlungsunterschiede. Die Dächer mit ähnlicher Grössenordnung der Strahlungssummen sind in Bild 2 zusammengefasst. Die in diesem Rahmen untersuchten SE- und SSE-exponierten Steildächer erhalten einen 1.5 bis 2 mal höheren Nettostrahlungsinput als die Dächer mit NW- bzw. NNE-Exposition. Für die betrachteten einfach intensiv und intensiv begrünten Dächer resultierten daraus erhebliche Unterschiede in den Temperaturverhältnissen.

Temperatur auf der Dachoberfläche: Die mittleren Temperaturmaxima unterschieden sich bei potentiellen Bestrahlungsunterschieden von 250–300 kWh pro m² und Jahr um 2.5 bis 4 K. Bei

den Temperaturminima war erwartungsgemäss kein wesentlicher Unterschied feststellbar.

Temperatur im Dachsubstrat (5 cm Tiefe): Die Temperaturmittel und mittleren Temperaturamplituden der SE- und SSE-exponierten Dächer erreichten 3 bis 4 K und die mittleren Temperaturmaxima ungefähr 7 K höhere Werte als auf den NW- bzw. NNE exponierten Dächern. Die von der Sonne abgewandten Dachflächen erwärmten sich nicht nur weniger, sondern kühlten wegen der geringeren Wärmeaufnahme auch etwa 6 K tiefer ab.

Die expositions- und neigungsabhängigen Unterschiede der Temperatur wurden für Dächer des Typs A erfasst. Diese weisen bei unterschiedlicher Substratmächtigkeit (siehe Tabelle 1) eine ähn-

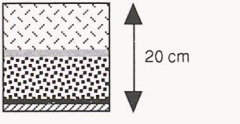
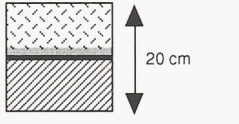
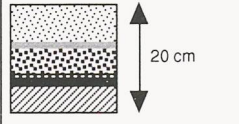
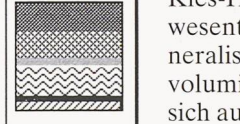
Nottwil (NW) Schweizer Mittelland 570 m über NN Exposition: NW		Grosswangen (GW) Schweizer Mittelland 540 m über NN Exposition: Ebene		Heimberg (HB) Schweizer Mittelland 550 m über NN Exposition: Ebene		
Bezeichnung						
NWSE Dach Südost (SE) Neigung: 37° Warmdach	NWNW Dach Nordwest (NW) Neigung: 37° Warmdach	GWNNE Dach Nordnordost (NNE) Neigung: 25° Warmdach	GWSSW Dach Südsüdwest (SSW) Neigung: 25° Warmdach	HBENE Dach Ostnordost (ENE) Neigung: 5° Warmdach	HBSCH Dachmodell Westsüdwest Neigung: 35° Kaldach Schrägdach (SCH)	HBWSW Dach Westsüdwest (WSW) Neigung: 5° Warmdach
Bau der Dachbegrünung						
Frühjahr 1989	Frühjahr 1989	Frühjahr 1989	Frühjahr 1989	April 1991	April 1991	Juli 1983
Begrünungsart						
Einfache Intensiv-begrünung	Einfache Intensiv-begrünung	Intensiv-begrünung	Intensiv-begrünung	Extensiv-begrünung	Extensiv-begrünung	Einfache Intensiv-begrünung
Vegetation / Deckungsgrad in %						
Gras-Kräuter 60-80 %	Gras-Kräuter 60-80 %	Gras-Kräuter 50-70 %	Gras-Kräuter 50-70 %	Sedum (Gras-Kräuter) 40-60 %	Sedum (Gras-Kräuter) 50-70 %	Gras-Kräuter 90-100 %
Dachtyp						
A	A	A	A	C	C	B
Beschreibung der Dachtypen siehe Kapitel 2.1.1						
Schicht- und Substrataufbau						
						
Substrat (Feinbodenanteil): - Lt2 (toniger Lehm) - GPV: 81 % - nFK (geschätzt): 10 %	Substrat (Feinbodenanteil): - Lt2 (toniger Lehm) - GPV: 81 % - nFK (geschätzt): 10 %	Substrat (Feinbodenanteil): - Sl3 (lehmgiger Sand) - GPV: 58 % (ENE), 52 % (SCH) - nFK (geschätzt): 20 %	Substrat (Feinbodenanteil): - Sl4 (lehmgiger Sand) - GPV: 69 % - nFK (gesch.): 35 %			
Legende zum Substrataufbau						
Bimsstein-Speicher	Humusschicht	Drainschicht				
Mageres Kies-Humus-Gemisch	Humus-Lecca-Gemisch	Schutzfolie				
Substratmischung aus Blähton, Vermiculit, Rindenkompost und granuliertem Ton	Unterbau	Filtermatte				
Gummischrotmatte						
GPV: Gesamtporenvolumen, nFK: nutzbare Feldkapazität						

Tabelle 1. Beschreibung der untersuchten Dachtypen

Dachtyp	Grobmaterial > 2 mm	Organische Substanz	Sand	Schluff	Ton	Bodenart
A	25 %	29 %	22 %	47 - 52 %	27 - 31 %	Lt2
B	12 %	8 %	50 %	36 %	14 %	Sl4
C	42 %	6 %	62 %	25 %	13 %	Sl3

Tabelle 2. Substratzusammensetzung der untersuchten Dächer

liche Zusammensetzung der ungefähr 8 cm mächtigen oberen Schicht auf. Die Substratfeuchteverhältnisse waren ebenfalls vergleichbar. Der Wassergehalt des Substrates sank nie unter 15 Vol.%. Die Evapotranspiration war auf diesen stark bestrahlten Dächern trotz der niedrigen nFK also nur wenig und kurzzeitig eingeschränkt. Damit konnte der fühlbare Wärmeüberschuss keine extremen Werte erreichen. Auf trockenen Dachstandorten sind deshalb grössere Unterschiede der mittleren Extrema zu erwarten. So wurden für mit 12 Grad wesentlich weniger stark geneigte N- und S-exponierte extensiv begrünte Dächer bereits Temperaturunterschiede in der hier beschriebenen Grössenordnung festgestellt [4].

Einfluss von Dachaufbau und Vegetation auf die Temperatur im Dachsubstrat

Im Temperaturmittel in 5 cm Tiefe unterscheiden sich alle Dachsubstrate jeweils wenig von den Referenzstandorten. Die mittleren Temperaturamplituden im Vergleich zu den Referenzstandorten sind jedoch auf den Dachtypen A und C grösser als auf Dachtyp B. Die unterschiedlichen Substratfeuchteverhältnisse der Dachtypen A und C wirken sich also kaum auf die Temperaturextreme im Dachsubstrat aus. Entscheidend dagegen ist der substrat- und substratfeuchteabhängige Bewuchs. Die fast vollständig deckende Gras-Kräuter-Schicht von Dachtyp B ver-

mindert die Temperaturamplitude im Substrat im Vergleich zu den mit 50-70 % Deckungsgrad bewachsenen Dächern um rund 5 K.

Gesamthaft wurden die Temperaturverhältnisse über und im Substrat durch unterschiedliche Bestrahlung etwas stärker beeinflusst als durch unterschiedlichen Bewuchs.

Substratfeuchteverhalten und Wasserspeichervermögen

Die untersuchten Dächer weisen einen unterschiedlichen Substrataufbau auf (siehe Tabellen 1 und 2). Die freien Porenvolumina liegen zwischen 52 und 81% (ohne korninterne Porenvolumina bei porösen Substraten wie Blähton, Bims oder Lava). Mit Ausnahme des Kies-Humus-Gemisches sind sie also wesentlich höher als in natürlichen mineralischen Böden. Die hohen Porenvolumina der Dachtypen A ergeben sich aus hohen Anteilen an organischer Substanz (Rindenkompost) von fast 30% und Tonanteilen zwischen 27 und 31%. Auf der anderen Seite weist das Kies-Humus-Gemisch mit 58% GPV einen hohen Anteil an grobem Material (42%), nur 6% organische Substanz und 13% Ton auf. Der Dachtyp B mit humoser Schicht nimmt eine mittlere Stellung ein. Diese Unterschiede prägen sich im Speicher- und Feuchteverhalten aus.

Feuchteverhalten des Substrates:

Das höchste Substratfeuchteniveau herrschte auf dem Dachtyp B (siehe Bild 3). Diese Substratschicht weist den geringsten Grobmaterialanteil und gesamthaft die ausgeglichene Substratverhältnisse und den dichtesten Bewuchs auf.

Auf den Dachtypen A und B unterschritt der Wassergehalt 15 Vol.% nicht. Auf Dachtyp B (Heimberg) war bei diesen Feuchtegehalten die Wasserversorgung der Vegetation wegen der hohen nFK meistens gewährleistet. Das Substrat des Dachtyps A konnte dagegen die Wasserversorgung infolge der vergleichbar sehr viel tieferen nFK im Sommer über längere Zeit nicht sicherstellen.

Der Schwankungsbereich der Substratfeuchte unterscheidet sich bei den Dächern des Typs A mit verschiedenen Einstrahlungssummen auffallend wenig. Die SE- und SSE-exponierten Dächer trockneten also nicht stärker aus als die NW- und NNE-exponierten Dächer, waren aber weniger häufig feucht oder sehr feucht. Die Wassergehalte der NW- und NNE-exponierten Dächer er-

reichten zum Teil 5–10 Vol.% höhere Werte.

- Dachtyp C mit dem Kies-Humusgemisch weicht im Substratfeuchteverhalten völlig ab. Die Wassergehalte überschritten im Sommer oft 5 Vol.% nicht und 10 Vol.% nur kurzfristig. Hier herrschte während etwa der Hälfte der Zeit Substrattrockenheit, d.h. die nFK war bei Feuchtegehalten um und unter 5 Vol.% völlig ausgeschöpft.

Bild 4 zeigt ein Simulationsergebnis für den Substratwassergehalt der Dachtypen B und C und des Referenzstandortes. Grundlage für die Berechnungen bilden statistische Beziehungen gemäss Bild 6, die allerdings wegen ungenügender Sicherheit noch mit gemessenen pF-Werten korrigiert wurden.

Die geschilderten Verhältnisse wurden in zwei Perioden mit bis Anfang Oktober unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen (mittlere Monatsniederschläge um 30-80% unterschritten) und überdurchschnittlichen Temperaturen beobachtet. Die Dachstandorte befinden sich aber in Gebieten mit Jahresniederschlagsmengen um 1000 mm. Auch die unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen während der Messperioden betragen von Ende Juni bis 10. November noch etwa 220 mm. Die Niederschläge fielen zudem ziemlich regelmässig. Es traten bis Anfang Oktober nur je eine einwöchige und zweiwöchige Trockenperiode auf.

Wie Dachtyp B zeigt, wird unter diesen Bedingungen bei einer günstigen Substratzusammensetzung eine häufig ausreichende Wasserversorgung der Vegetation gewährleistet. Dies zeigte sich auch daran, dass die Reaktion des Bodenwassergehaltes auf Regenfälle jeweils bis zu 5 Tage andauerte. Einwöchige Trockenperioden konnten also annähernd überbrückt werden. Im mageren Kies-Humus-Gemisch sind dagegen die Grobmaterial- und Sandanteile bei gleichzeitig niedrigem Gehalt an organischer Substanz zu hoch, um eine ausreichende Wasserspeicherung zu bieten. Die auch damit zusammenhängenden, mit ca. 50% geringen Deckungsgrade der sukkulentenreichen Vegetation begünstigen zudem Wasserverluste durch Evaporation.

Wasserspeichervermögen: Das Wasserspeichervermögen der untersuchten Schrägdächer kann nach Abfluss des Wassers aus den dränenden Poren etwa wie folgt geschätzt werden:

- Dachtyp A ohne Bimssteinspeicher: ungefähr 25 mm
- Dachtyp A mit Bimssteinspeicher: ungefähr 50 mm
- Dachtyp B: 20–25 mm

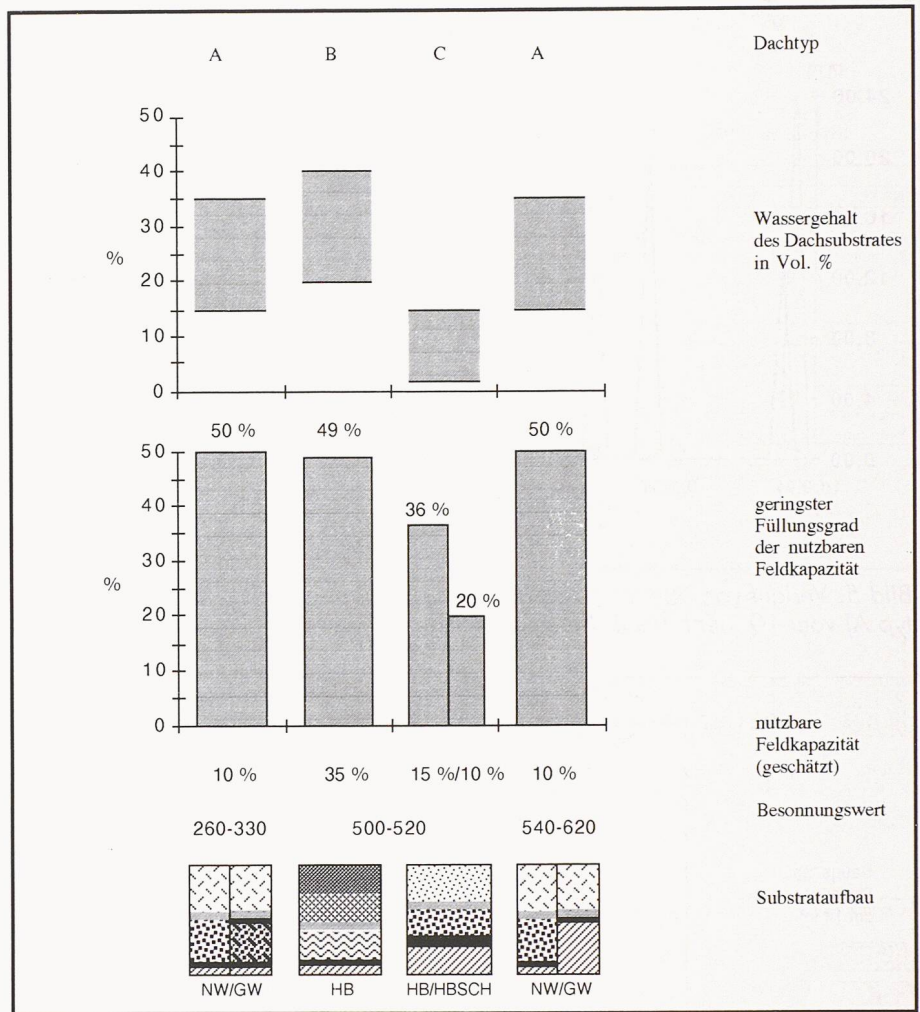


Bild 3. Vergleich der Substratfeuchteverhältnisse der untersuchten Dächer (Legende zum Substrataufbau, siehe Tabelle 1)

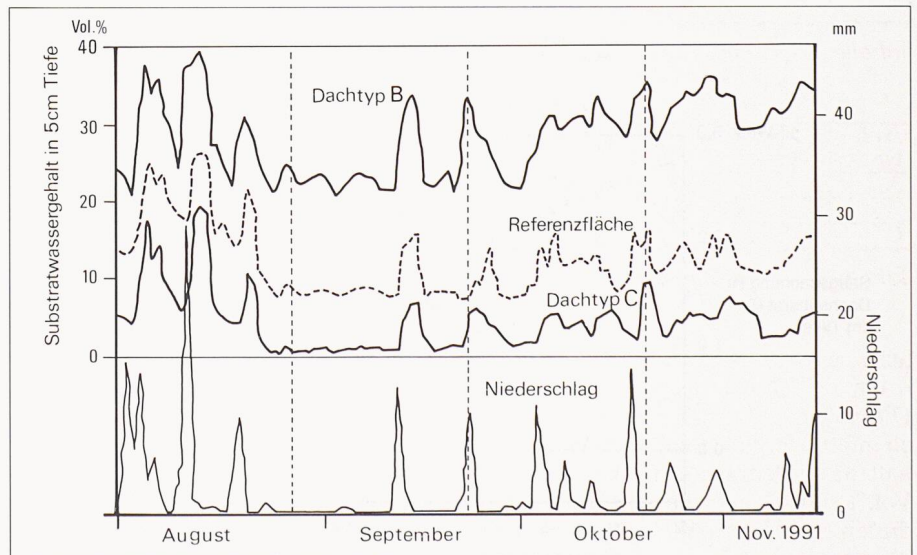


Bild 4. Substratwassergehalte der Dachtypen B und C sowie der Referenzfläche im Vergleich zum Niederschlagsverlauf (Standort: Heimberg)

- Dachtyp C mit Bimssteinspeicher: ungefähr 20 mm

Diese Werte liegen eher im unteren Teil der von [5] für neun verschiedene Dächer mit Substratmächtigkeiten <10 cm angegebenen Werte der nutzbaren Wasserkapazität im Wurzelraum.

Wasserhaushalt

Abflussverhalten

Das Abflussverhalten begrünter Dächer ist eine für siedlungsökologische Belange sowie für das Abflussgesche-

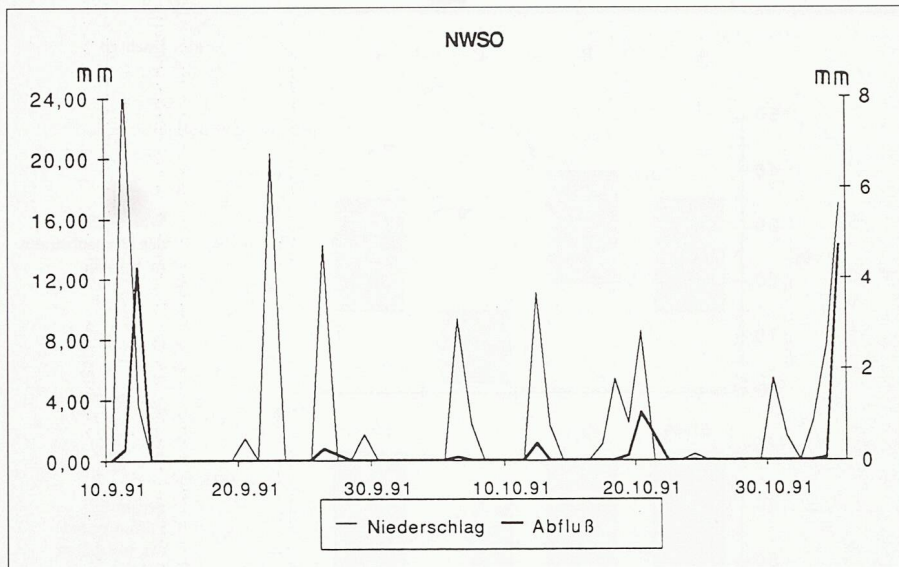


Bild 5. Verlauf von Niederschlag und Abfluss auf der Dachfläche NWSE (Dachtyp A) vom 10. Sept. bis 4. Nov. 1991 [9]

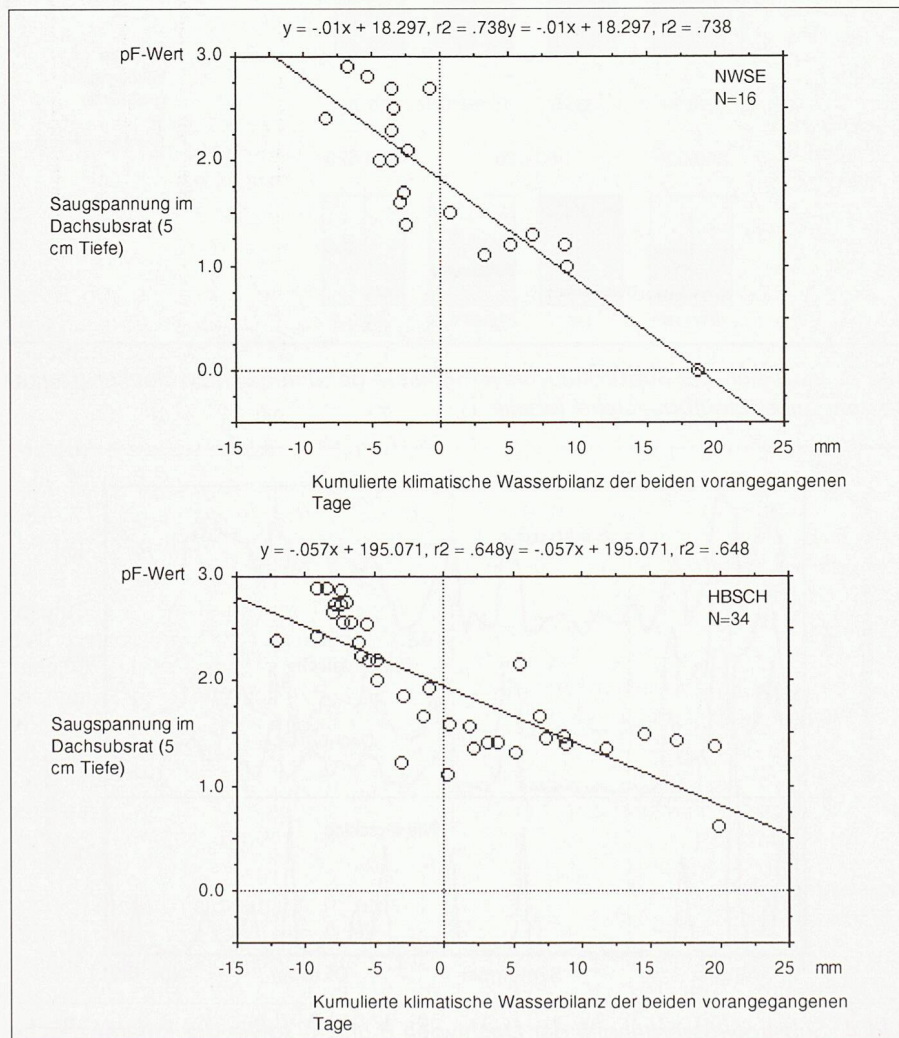


Bild 6. Regressionsbeziehungen zwischen der klimatischen Wasserbilanz und der Saugspannung im Dachsubstrat

hen versiegelter Flächen bedeutende Grösse des Wasserhaushaltes. Die Abflussbeiwerte ψ liegen für Flachdächer oder schwach geneigte Dächer bei Intensivbegrünungen und Extensivbegrünungen ab 10 cm Aufbaudicke bei $\psi =$

0.3 und bei Extensivbegrünungen unter 10 cm Aufbaudicke bei $\psi = 0.5$ [2]. Bekieste Dächer zeigen Werte von $\psi = 0.5$ bis 0.8.

Das Abflussverhalten begrünter Dächer wurde bisher insbesondere ex-

perimentell untersucht [6], [7], [8]. Diese Ergebnisse zeigen, dass je nach Witterungsverlauf und Wassersättigung verschiedener Dächer rund 30-85% der Niederschläge zurückgehalten werden. Für die Sommermonate gelten mittlere Werte von 70% und für die Wintermonate von etwa 50%. Bedingt durch das spezifische Retentionsverhalten von begrünten Dächern ergibt sich beim Abflussverhalten im weiteren eine zeitliche Verschiebung der Abflussspitze. Dieser Tendenz folgt auch das in dieser Arbeit untersuchte Steildach Nottwil (Dachtyp A, Dachneigung 37°. Es herrschte hier insgesamt eine sehr gute Wasserrückhaltung. Von den Niederschlagsereignissen geringer Intensität flossen nur jeweils 0-15% und von denen mittlerer Intensität 15-20% vom Dach ab. Das Abflussmaximum lag dabei ca. 1 Stunde später als das Niederschlagsmaximum (siehe auch Bild 5).

Dynamische Wasserhaushalts-Modellierung

Methodischer Ansatz

Bilanzierungsmodell: Das in diesem Kapitel vorgestellte Modell ist als Bilanzierungsmodell zu charakterisieren. Der zentrale Speicher «Bodenwasser» wird durch die Steuergrössen «Niederschlag» (effektiver Niederschlag) gespeist sowie durch «Verdunstung» (effektive Evapotranspiration) und die im Modell berechnete Zielgrösse «Abfluss» entleert. Als weitere wichtige Steuergrösse wird im Modell der Substratfeuchtegehalt eingesetzt: Übersteigt der im Modell berechnete Wert des Speichers «Bodenwasser» die Steuergrösse «Substratfeuchtegehalt», wird die Differenz der beiden Werte als «Abflussmenge» definiert. Die Steuergrösse «Substratfeuchtegehalt» wird mittels eines empirisch ermittelten Korrelationsfaktors aus der klimatischen Wasserbilanz berechnet (siehe dazu auch Bild 6). Die Steuergrössen Niederschlag und Verdunstung können gemessene oder stochastische Datenreihen sein. Der Substratfeuchtegehalt wird im Modell auf Grundlage der vorgehend empirisch bestimmten Regressionsbeziehung zwischen klimatischer Wasserbilanz und Substratfeuchtegehalt (bzw. der Saugspannungswerte) berechnet. Das vorgestellte Modell ist simulationsfähig und als Hilfsmittel zur Bearbeitung praxisorientierter Fragestellungen aus den Bereichen Siedlungswasserhaushalt und Siedlungswasserbau einsetzbar.

Regressionsbeziehung zwischen klimatischer Wasserbilanz und Substratfeuchtegehalt: Voraussetzung für die

Erstellung eines Modelles der skizzierten Art ist die Quantifizierung der Funktionszusammenhänge zwischen der Wasserbilanz und dem Abfluss. Als Ansatz dient dabei der Zusammenhang zwischen klimatischer Wasserbilanz und Substratfeuchtegehalt. Die Erstellung einer entsprechenden Regressionsbeziehung setzt eine langfristige und zeitlich genügend fein auflösende Erfassung der entsprechenden Grundlegenden voraus.

In Bild 6 werden die Regressionsbeziehungen zwischen der kumulierten klimatischen Wasserbilanz der zwei vorangegangenen Tage (Tage t-1 und t-2) sowie der Saugspannung am Tag t auf zwei untersuchten Dächern dargestellt. Die statistische Beziehung ist allerdings, vor allem für das Dach Nottwil SE (NWSE), infolge der geringen Datenbasis (N=16) noch nicht genügend gesichert.

Aus den Regressionsbeziehungen ist abzuschätzen, ab welcher kumulierten klimatischen Wasserbilanz (der letzten beiden Tage) mit Abfluss aus dem Dachsubstrat zu rechnen ist. Wird davon ausgegangen, dass Abfluss unter einer Saugspannung von pF 1.2 wahrscheinlich ist, so setzt dieser auf dem Dach Nottwil-SE (NWSE) ab ca 7 mm und auf dem Heimberg-Schrägdach (HBSCH) ab ca. 14 mm ein. Der im Vergleich zu Heimberg deutlich geringere Abflussgrenzwert des Daches Nottwil ist bei vergleichbarer Dachneigung im wesentlichen der geringen nFK von 10% (HBSCH ca. 20 %) zuzuschreiben.

Wasserhaushalts-Modell für ein extensiv begrüntes Steildach

Das in Bild 7 dargestellte Modell basiert auf dem im vorgehenden Kapitel beschriebenen Bilanzierungsansatz und baut auf der Software-Struktur des Programmes STELLA auf [10]. Im Modell werden real an den Untersuchungsstandorten erhobene Niederschlags- und Verdunstungsdaten als Steuergrößen des Modells verwendet. Das Modell wird wie folgt definiert:

Speicher: Bodenwasser (t) = Bodenwasser (t-1) + dt * (Infiltration – Effektive Evapotranspiration – Abfluss)

Die Infiltration wird im vorgestellten Modell dem effektiven Niederschlag gleichgesetzt.

Steuergrößen: Infiltration (dt) = Effektiver Niederschlag (dt)

Effektiver Niederschlag: Korrektur des gemessenen Niederschlages nach Berücksichtigung des Haftwassers und der Windfeldderformation am Messgerät sowie der vegetationsbedingten Interceptionsverluste.

Reelle Evapotranspiration (dt) = Po-

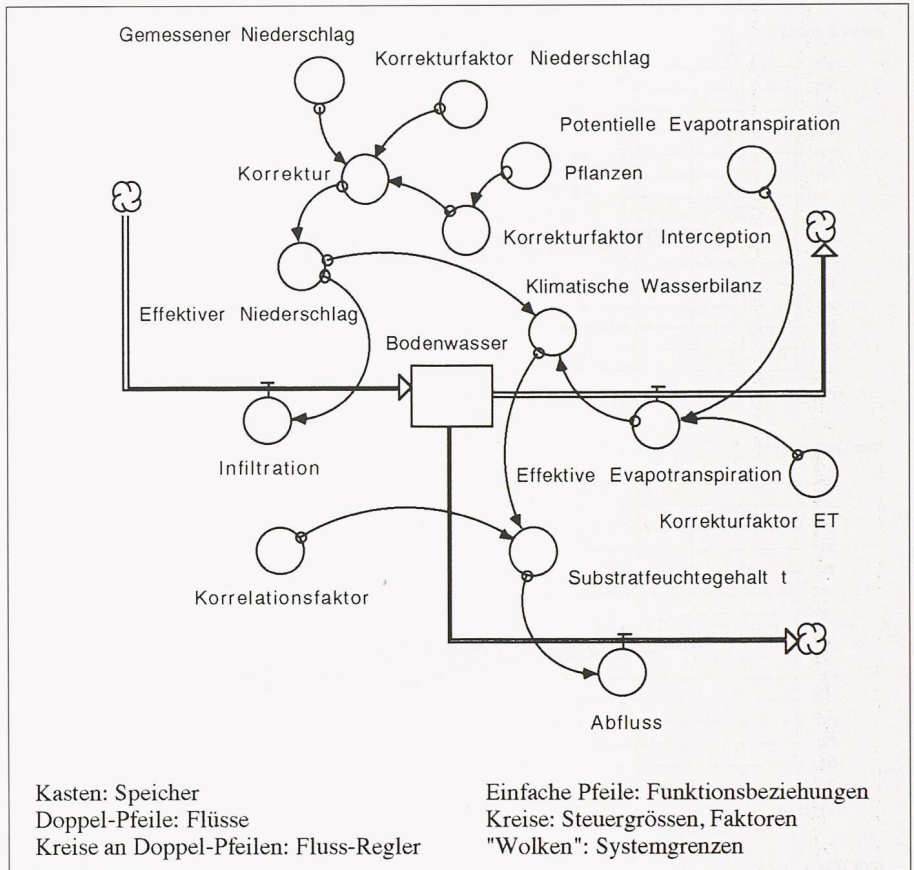


Bild 7. Aufbau des Wasserhaushaltsmodells

tentielle Evapotranspiration (dt) * Korrekturfaktor ET

Berechnung der Potentiellen Evapotranspiration: Substratfeuchtegehalt (t) = Klimatische Wasserbilanz (t-1 + t-2) * Korrelationsfaktor

Korrelationsfaktor: Regressionsbeziehung zwischen kumulierter klimatischer Wasserbilanz der Tage t-1 und t-2 und dem gemessenen Substratfeuchtegehalt am Tag t.

Zielgrößen: Abfluss (dt) = Wenn [Bodenwasser (t) – Substratfeuchtegehalt (t) > 0] dann [Bodenwasser (t) – Substratfeuchtegehalt (t)] sonst 0

Aus dem effektiven Niederschlag und der effektiven Evapotranspiration wird die klimatische Wasserbilanz der Standorte bestimmt.

Ergebnisse der Abflussmodellierung

Es wurden verschiedene Modellläufe für die Zeiträume vom 15.8. bis 7.11.90 (Dachtyp A) und 20.7. bis 4.11.91 (Dachtyp B und C) durchgeführt. Wegen der Kontrolle der Ergebnisse mit den gleichzeitig durchgeführten Saugspannungs- und Abflussmessungen beschränkten sich die Modellläufe vorerst auf diesen Messzeitraum.

Bild 8 zeigt das Modellierungsergebnis für den Verlauf und die Bilanz der Wasserhaushaltsgrößen mit dem Abfluss als Zielgröße für das Dach Nottwil

(Dachtyp A) im Vergleich zum Referenzstandort. Grundlage sind berechnete und gemessene Substratfeuchtegehalte (siehe oben). Die Berechnungen basieren auf Tagesintervallen.

Für den Abfluss lässt sich feststellen:

□ Die Abflussmengen für den Gesamtzeitraum betragen nur 37% des Niederschlags. Der Abflussbeiwert beträgt also 0.37.

□ Für das SE- und NW-exponierte Dach resultiert kein Unterschied. Das Speicherverhalten der beiden Dächer unterscheidet sich nur in einer um wenige % höheren Ausschöpfung der nFK auf dem SE-exponierten Dach. Solche geringen Unterschiede kann das Regressionsmodell zur Berechnung der Bodenwassergehalte (Bild 6) nicht wiedergeben.

□ Vom 20. August bis Anfang November lieferte das Dach nur während drei Zwei- bis Eintagsperioden Abflüsse von > 1 mm. Für diese drei Ereignisse betrug der Abflussbeiwert bei Ereignisniederschlagsmengen zwischen 21 und 47 mm im Durchschnitt 0.24. Anfang November setzte aber ein stetiger Abfluss ein.

Ein Vergleich der berechneten mit den gemessenen Abflussmengen ergibt je nach der Berechnung auf der Basis einer Korrektur der Regressionsbeziehung mit gemessenen Werten oder dem rein statistischen Ansatz einen Fehler von +

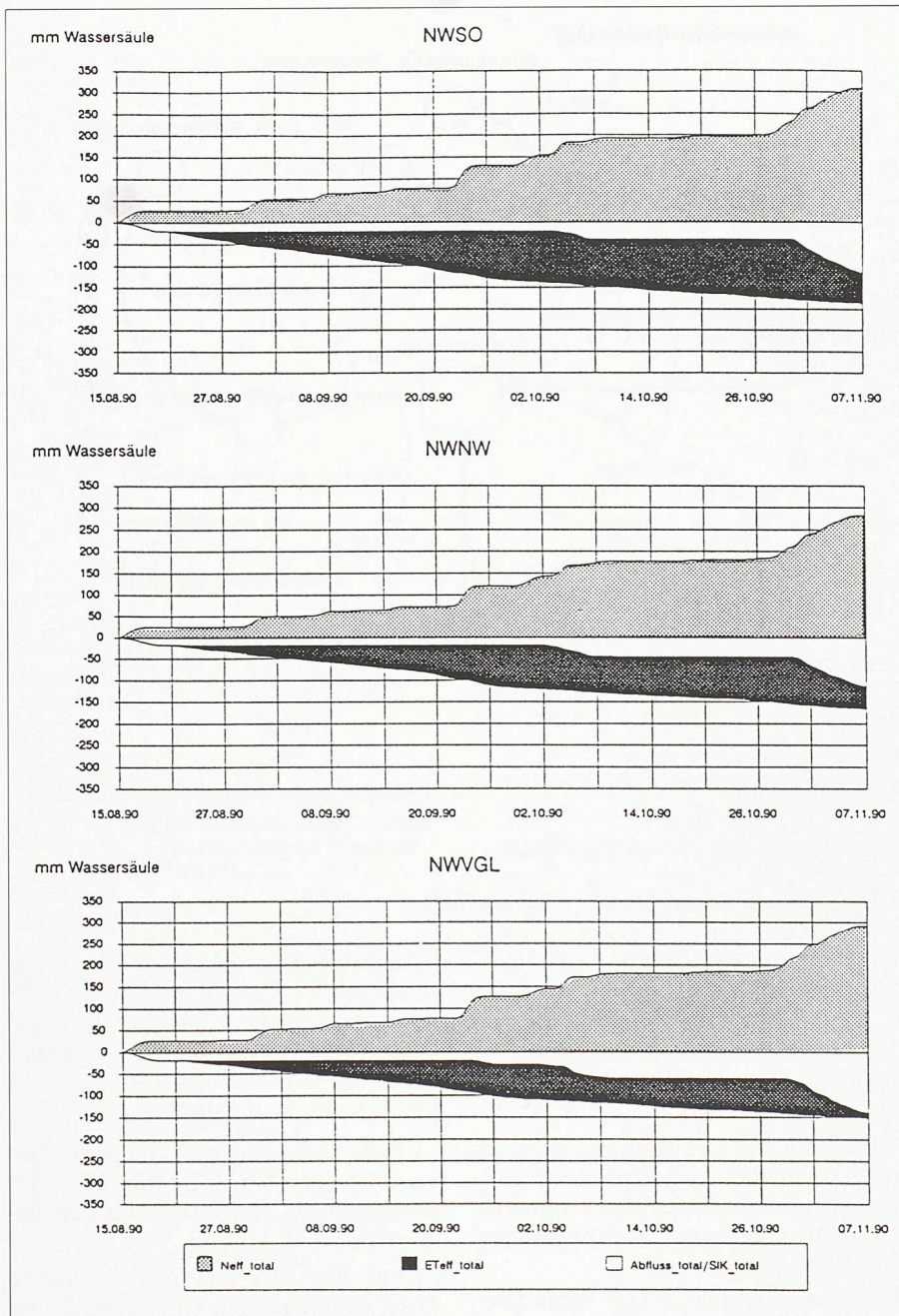


Bild 8. Verlauf und Bilanz der Wasserhaushaltsgrößen für das Dach Nottwil im Vergleich zum Referenzstandort (Neff: effektiver Niederschlag, ETeff: effektive Evapotranspiration, SIK: Sickerung) [11]

27 bis + 50%. Das auf der Basis der Regressionsbeziehung gemäss Bild 7 rechnende Modell unterschätzt also die Aufnahmefähigkeit des Substratspeichers.

Diese Ergebnisse sind für die Abschätzung des Beitrages der Gründächer an den Wasserhaushalt von Stadtökosystemen noch nicht genügend genau. Eine Ursache hierfür ist auch die mit Tageswerten noch zu grobe zeitliche Auflösung. In weiteren Modellläufen wurde deshalb mit 6-Stunden-Intervallen gerechnet. Ein direkter Fehlervergleich mit diesen Berechnungen ist dagegen wegen abweichender Rahmenbedingungen nicht möglich. Der Hauptfehler liegt noch anderswo. Er resultiert ver-

mutlich aus den nur näherungsweise abgeschätzten Desorptionskurven und den im höheren pF-Bereich problematischen Saugspannungsmessungen.

Eine Weiterentwicklung des Modells verlangt eine bessere Eichung der Beziehung zwischen klimatischer Wasserbilanz und Feuchteverhalten der Dächer. Hierzu sind weitere experimentelle Untersuchungen von Dächern mit verschiedenem Substrataufbau und unterschiedlicher Neigung erforderlich. Auch eine verbesserte Berechnung der durch abweichenden Strahlungsenergieinput und in der Regel höheren Ventilation z.T. erheblich von den Erdbeckenstandorten abweichenden Evapotranspiration ist anzustreben.

Einige Folgerungen für die Praxis

Aus der Vielfalt der vorkommenden und ständig neu entwickelten Dachtypen kann im Rahmen experimenteller Untersuchungen immer nur ein beschränktes Spektrum erfasst werden. Zwangsläufig lassen sich deshalb die Untersuchungsergebnisse nicht ohne weiteres verallgemeinern.

Das Spektrum der hier analysierten Dächer ist jedoch genügend breit, um auch einige allgemeinere Folgerungen für die Praxis ziehen zu können.

Charakterisierung des Lebensraumes Gründach

Für den Lebensraum Gründach sind die strahlungsabhängigen Temperaturverhältnisse, der Wind und die Wasserversorgung massgebend. Eine mögliche Gliederung kann deshalb nach den Parametern Licht, Windexposition und Substratmächtigkeit erfolgen [2]. Die vorliegenden Untersuchungen bestätigen die Bedeutung der Bestrahlungsunterschiede für die Temperatur über und im Dachsubstrat. Sie zeigen auch, dass mikroklimatisch der Einfluss der Substratzusammensetzung und der damit zusammenhängenden Bewuchsdichte nur wenig geringer ist und deshalb nicht unterschätzt werden darf. Dies gilt besonders bei der für die Stoffumsetzung im Wurzelraum wichtigen Substrattemperatur. Die Substratqualität besitzt also wasserhaushaltliche und mikroklimatische Relevanz. Bei der standardisierten Lebensraumcharakterisierung (Berechnung von Lebensraumindizes) sollte deshalb die Substratzusammensetzung auf gleicher Ebene wie die obengenannten Standortfaktoren berücksichtigt werden. Dabei sind bei Schichtdicken bis 25 cm mindestens zu unterscheiden:

- magere, kiesreiche Gemische (Grobmaterial > 35%, humusarm)
- feinmaterialreiche Humusschichten (mehr oder weniger modifizierte Natursubstrate)
- porenreiche Substrate, z.B. Blähton Lava oder Bims
- verschiedene humus-, und tonmineralangereicherte Kunstsubstrate

Exposition und Dachneigung als Standortfaktoren

Die Untersuchung der Temperaturbedingungen ergab erhebliche Abweichungen für die unterschiedlich besonnten Dachflächen in Nottwil und Grosswangen (siehe Bild 2). Diese Unterschiede resultieren allerdings in höherem Mass aus den steilen Dachneigungen. Die Unterschiede sind mit max.

Begrünte Dächer – ökologische Nischen und Ausgleichsflächen unter besonderer Berücksichtigung der Extensivbegrünung

Die Broschüre bietet eine Darstellung der siedlungsökologischen Bedeutung begrünter Dächer, eine Beurteilung aus planerischer Sicht sowie Angaben zur konstruktiven und planerischen Realisierung. Im weiteren umfasst sie Argumente zur Förderung begrünter Dächer in der Siedlungsplanung. Sie wendet sich somit neben Architekten, Bauherren usw. auch an Entscheidungsträger aus Politik und Verwaltung.

Bezug: Buwal, Bern, Schriftenreihe Umwelt

einigen Kelvin jedoch auch nicht so gross, dass völlig verschiedene Lebensraumbedingungen entstehen. Bei Dächern geringerer Neigung, was aus konstruktiven Gründen in der Praxis sowieso vorgezogen wird, ergeben sich durch die Besonnung alleine also kaum für die Praxis relevante Lebensraumunterschiede. Der im vorhergehenden Abschnitt bereits erwähnte indirekte mikroklimatische Einfluss des Substrats tritt immer mehr in den Vordergrund. Die Messergebnisse zeigen dabei, dass auch unter den Klimabedingungen im feuchteren Mittelland und am Alpenrand Substrate mit >30% Grobanteil, >50% Sandanteil und niedrigem Humusgehalt mindestens auf südexponierten Dächern wegen des zu hohen Trockenrisikos nicht empfehlenswert sind.

Das für Vegetation und Siedlungswasserhaushalt bedeutende Substratfeuchteverhalten wird im wesentlichen durch die Substratzusammensetzung und weniger durch Standort und Ausrichtung des Gebäudes bestimmt. *Die Bestimmung optimaler Dachsubstrate ist deshalb eine vordringliche Aufgabe der Weiterentwicklung begrünter Dächer.* Wichtig ist dabei nach den von [6] veröffentlichten «Anforderungen an Vegetationssubstrate», dass bei der Auswahl der Substratkomponenten nebst dem Aspekt des Wasserhaushaltes auch die Aspekte Nährstoffhaushalt, Pflanzen- und Umweltverträglichkeit (Ökobilanz), Gewicht, Struktur- und Lagerungsstabilität sowie der Aspekt Brandverhalten berücksichtigt werden.

Interessant scheint insbesondere die Anwendung von mit Tonmineralien und Humus angereicherten Lava- und Bimssubstraten. Solche Substrate können bei einer geringen Dachlast einen ausgeglichenen Wasser- und Nährstoffhaushalt und somit günstige Retentionswerte und Wachstumsbedingungen für Pflanzen sowie bei richtiger Abstimmung und Auswahl der Materialien, eine ausreichende Lagerungsstabilität gewährleisten.

Wasserhaushalts-Modelle im Siedlungswasserbau

Das in dieser Arbeit vorgestellte Wasserhaushalts-Modell dient im wesentlichen der dynamischen, d.h. zeitlich hoch auflösenden Quantifizierung sowie Bewertung von Substratfeuchte- und Abflussverhalten begrünter Dächer.

Bewertung des Substratfeuchteverhaltens

Die Beschreibung und Bewertung des Substratfeuchteverhaltens ist insbesondere für die Auswahl der auf dem begrünten Dach zu verwendenden Pflanzen (bzw. der entsprechenden Saatmischung) von grosser Bedeutung. Für die Wahl der Bepflanzung gibt dabei vor allem das Substratfeuchteverhalten während den Monaten Juni bis Oktober den Ausschlag. Das in dieser Arbeit vorgestellte Modell liefert den Ansatz für ein praxistaugliches Instrument für die wasserhaushaltliche Optimierung des Substrates sowie für die Abstimmung zwischen Substrat und Vegetation.

Bewertung des Abflussverhaltens

Der Beitrag begrünter Dächer zur Regulierung des Siedlungswasserhaushaltes ist besonders in Siedlungsstrukturen mit hohem Anteil versiegelter Bodenflächen von Bedeutung. Die wirkungsvolle Förderung begrünter Dächer als Elemente zur Regulierung des Siedlungswasserhaushaltes muss allerdings in Kombination mit weiteren, flankierenden Massnahmen, z.B. durch verstärkte Flächenentsiegelung oder durch Regenwasserversickerung vor Ort, erfolgen. Sinnvoll erscheint in diesem Zusammenhang die Einführung von Retentionsplänen als Instrumente der Planung und zielorientierten ökologischen Optimierung des Wasserhaushaltes städtischer Ökosysteme. In Retentionsplänen sollten flächenbezogen Retentionswerte definiert sowie retentionswirksame Massnahmen aufeinander abgestimmt werden. Der in dieser Arbeit vorgestellte Modellansatz sollte als ein wichtiges Hilfsmittel für dieses Planungskonzept weiterentwickelt werden. Logischerweise soll sich dabei die Modellierung von der Stufe Einzeldach (dachtypenspezifische Ermittlung des Retentionsverhaltens) auf die Stufe Siedlung ausdehnen. Diese Aufgabe steht noch bevor.

Adressen der Verfasser: *Dr. Johannes Heeb*, Zentrum für angewandte Ökologie Schattweid, CH-6114 Steinhuserberg; und *Prof. Dr. Thomas Mosimann*, Geographisches Institut der Universität Hannover, Abteilung Physische Geographie und Landschaftsökologie, Schneiderberg 50, D-3000 Hannover 1.

Literatur

- [1] Köhler, M. [Hrsg.]: Extensive Dachbegrünungen. Ergebnisse des Symposiums in der TU Berlin. – Schriftenreihe des Fachbereichs Landschaftsentwicklung der TU Berlin, Nr. 76: Landschaftsentwicklung und Umweltforschung, Berlin 1990, 110 S.
- [2] Krupka, B.: Dachbegrünungen. Pflanzen- und Vegetationsanwendungen an Bauwerken. Stuttgart: Ulmer 1992, 508 Seiten
- [3] Kolb, W. & T. Schwarz: Zum Klimatisierungseffekt von Pflanzenbeständen auf Dächern. 1. Kühlleistung verschiedener Gräser-Kräuter-Mischungen und Stauden bei Intensivbegrünungen. – In: Ztschr. f. Vegetationstechnik 9 (1986), H. Juli - Sept., S. 116-120
- [4] Köhler, M.: Ökologische Untersuchungen an extensiven Dachbegrünungen. – Sonderdruck aus Verhandlungen Gesellschaft für Ökologie, Essen 1988, Bd. XVII, Göttingen 1989, S. 249-255
- [5] Köhler, M. & B. Baier: Ökologische Untersuchungen an neueren Berliner Grasdächern. In: Das Gartenamt 38 (1989), H. 5, S. 302-306
- [6] Liesecke, H.-J.: Beurteilung von Eigenschaften und Anforderungen bei Vegetationssubstraten für extensive Dachbegrünungen. – In: Das Gartenamt 38 (1989), S. 152-159
- [7] Kolb, W.: Abflussverhalten extensiv begrünter Flachdächer. I. Abflussverhalten und Wasserrückhaltung im Vergleich mit Kiesdächern. – In: Ztschr. f. Vegetationstechnik 10 (1987), H. Juli - Sept., S. 111-116
- [8] Kolb, W.: Abflussverhalten extensiv begrünter Flachdächer. II. Wirkung des Sättigungsgrades der Vegetationsschicht auf Abflussverhalten und Wasserrückhaltung. – In: Ztschr. f. Vegetationstechnik 10 (1987), H. Okt. - Dez., S. 162-165
- [9] Lietsch, B.: Grasdächer als quasi-natürliche Standorte in Siedlungen. Untersuchungen zum Mikroklima, Feuchte- und Wasserhaushalt verschiedener Dachtypen. – Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Hannover, Hannover 1992, 105 S.
- [10] Richmond, B. et al.: An Academic User's Guide to STELLA. Handbuch zur Modellierungssoftware STELLA. Herg. v. HIGH PERFORMANCE SYSTEMS, Lyme (USA) 1987, 392 S.
- [11] Beins, A.: Mikroklima und Wasserhaushalt von begrünten Dächern und deren ökologische Bedeutung in Siedlungen. – Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Hannover, Hannover 1991, 116 S.

Die Untersuchungen wurden unter Mitarbeit von Andrea Beins und Britta Lietsch, Hannover, durchgeführt.