



hydro&meteo GmbH & Co. KG
Wetter + Wasser



Schlussbericht

zum BASt Forschungsprojekt FE-Nr. 05.0168/2011/GRB

Mai 2014

„Beurteilung der Bemessung von Straßenentwässerungseinrichtungen nach RAS-Ew und RiStWag vor dem Hintergrund veränderter Temperatur- und Niederschlagsereignisse durch den Klimawandel in Deutschland bis zum Jahr 2100“

bearbeitet von

Barbara Krauß
Dr.-Ing. Dieter Grotehusmann
Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie mbH
Hannover

Alrun Jasper-Tönnies
Dr. Thomas Einfalt
hydro & meteo GmbH&Co.KG
Lübeck

Die Bearbeitung erfolgt im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Literaturstudie	1
2.1	Klimaänderungen und Starkregentrends in Deutschland	1
2.2	Auswirkung der Klimaänderungen auf die Entwässerung	2
2.3	Dimensionierungsansätze der FGSV und der DWA.....	3
3	Auswahl der Untersuchungsgebiete	4
3.1	Auswahlkriterien.....	4
3.2	Untersuchungsregionen.....	6
4	Datenbasis Klimaprojektionen und Beobachtungen	6
5	Starkniederschläge aus regionalen Klimaprojektionen	7
5.1	Allgemeines.....	7
5.2	Niederschläge aus Beobachtungen und CLM	8
5.3	Bias-Korrektur und statistisches Downscaling	10
5.4	Ergebnisse des statistischen Downscalingverfahrens	11
5.4.1	Starkregenhäufigkeit aus Modell und Beobachtungen	11
5.4.2	Starkregentrends für die Untersuchungsregionen	13
5.5	Unsicherheiten der Starkniederschlagstrends	15
6	Trockenperioden	16
6.1	Allgemeines.....	16
6.2	Trockenperioden in Modell- und Beobachtungsdaten	16
6.3	Klimaänderungskarten Trockenperioden	17
6.4	Trendauswertung CLM	18
6.5	Schlussfolgerung.....	18
7	Auswirkungen auf die Straßenentwässerung	19
7.1	Methoden	19
7.1.1	Hydrodynamische Berechnungen.....	19
7.1.2	Hydrologische Langzeitsimulation	20
7.2	Planungshorizont von Entwässerungseinrichtungen	20
7.3	Mögliche Auswirkungen auf die Dimensionierung	20
7.4	Berechnung typischer Entwässerungseinrichtungen.....	22
7.4.1	System Bordrinne & Straßenablauf	22
7.4.2	Kanal	24
7.4.3	Rasenmulde	26
7.4.4	Regenrückhaltebecken	28
7.4.5	Abfluss aus Außengebieten	30
7.5	Berechnung realer Entwässerungssysteme	31
7.5.1	Streckenentwässerung BAB NRW	31
7.5.2	Retentionsbodenfilter Hamburg	32
7.5.3	RiStWag-Anlage Köln	33
7.6	Unsicherheiten hydraulischer Berechnungen	34
8	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	35
9	Literatur	39
10	Anhang	43
10.1	Literatur: Projekte Starkregen	43
10.2	Klimasignalkarten / Klimaänderungskarten: Robustheitstests.....	47
10.3	Tagessummen in CLM und REGNIE: Ergänzung zu 5.2.....	48
10.4	Zwischenschritte Downscalingverfahren.....	50
10.4.1	Einteilung von Temperatur-Klassen.....	50
10.4.2	Resampling der CLM-Zeitreihen für die Untersuchungsgebiete.....	51
10.5	Vergleich der Berechnungsverfahren nach RAS-Ew/RiStWag und DWA. 52	

1 Einleitung

In Projektionen von regionalen Klimamodellen ergeben sich für Deutschland bis 2100 deutliche Änderungen des regionalen Klimas, mit erhöhten Temperaturen und veränderten Niederschlagscharakteristiken.

Diese können direkte Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit von Straßenentwässerungsanlagen haben. Bei einer Zunahme von Starkregenereignissen kann es vermehrt zur hydraulischen Überlastung der Entwässerungseinrichtungen und infolgedessen zu Überflutungen und Schädigungen der Straßenbauwerke und ggf. zu Verkehrsbeeinträchtigungen kommen. Bei einer Zunahme langer Trockenperioden besteht die Gefahr, dass z. B. in Absetzanlagen der Wasserspiegel aufgrund von Verdunstung unter die Unterkante der Tauchwände abfällt und somit der Leichtflüssigkeitsrückhalt nicht gewährleistet ist oder dass der Bewuchs von Bodenfiltern durch Trockenstress beeinträchtigt wird.

Im Rahmen des Projektes sollten daher die aktuellen Dimensionierungsansätze nach RAS-Ew und RiStWag im Hinblick auf den Klimawandel überprüft und mögliche Auswirkungen dargestellt werden. Auf dieser Basis sollten gegebenenfalls Vorschläge zur Anpassung der Dimensionierung und Konstruktion der Entwässerungseinrichtungen erarbeitet werden.

Da die projizierten Klimaänderungen regional unterschiedlich ausfallen, werden die Untersuchungen exemplarisch für vier Modellregionen durchgeführt. Für diese Regionen werden die Ergebnisse eines Regionalmodells (CLM) anhand gemessener Niederschlagsdaten geprüft und aufbereitet.

Um die Auswirkungen auf die Entwässerung sinnvoll abschätzen zu können, sind statistische Aussagen zur Entwicklung von extremen Niederschlagsintensitäten mit einer zeitlichen Auflösung von 5 min bis 1 Std. erforderlich. Hierzu werden die vorliegenden Modellergebnisse durch ein statistisches Downscaling-Verfahren in Zeitreihen mit höherer Auflösung überführt.

2 Literaturstudie

2.1 Klimaänderungen und Starkregentrends in Deutschland

Es gibt eine große Anzahl von Projekten, in denen in den vergangenen Jahren Klimaänderungen in Deutschland und damit einhergehende Temperatur- und Niederschlagstrends untersucht wurden. Viele davon gingen aus den EU-finanzierten Projekten PRUDENCE und

ENSEMBLES hervor, im Zuge derer eine Reihe von Simulationen von regionalen Klimamodellen erstellt wurden (vgl. Anhang 10.1, Tab. 17).

Auf Basis dieser Simulationen gibt es inzwischen relativ robuste Aussagen zu projizierten Änderungen von Mittelwerten von Temperatur und Niederschlag in Deutschland. Auf folgenden Websites gibt es übersichtliche Darstellungen:

www.dwd.de/klimaatlas/ Ergebnisse, die auf der Auswertung von 21 regionalen Klimaprojektionen beruhen, werden auf der Seite durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) bereitgestellt. Unter anderem können mittlere Änderungen und Unsicherheitsbereiche der Parameter Lufttemperatur und Niederschlag aus den Simulationen bis 2100 für Jahresmittelwerte und Jahreszeiten angezeigt werden.

www.regionaler-klimaatlas.de/ Jahresmittel für Temperatur und Niederschlag von einzelnen Modellläufen der Modelle CLM, REMO und RCAO werden dargestellt (Betreiber: Regionale Klimabüros der Helmholtz-Gemeinschaft).

http://www.climate-service-center.de/031443/index_0031443.html.de/ Klimasignalkarten des Climate Service Center (CSC). Diese zeigen die Änderung für vorgegebene Parameter (Median der verwendeten Modellläufe) vor und nach Durchführung eines dreistufigen Robustheitstests.

Während für die Temperatur bis 2100 deutliche Zunahmen projiziert werden, ist das Bild für Niederschlag uneinheitlicher. So werden für den mittleren Winterniederschlag Zunahmen erwartet, während der Niederschlag im Sommer überwiegend gleich bleibt oder abnimmt. Mehrere Studien kommen zu dem Ergebnis, dass im Winter mit einem erhöhten Risiko für Hochwasser an Flüssen zu rechnen ist (z.B. RHEINBLICK 2050, KLIWA).

Auch bei abnehmenden mittleren Niederschlägen können Starkregenereignisse im Sommer zunehmen. Zukünftige Änderungen von Starkregenereignissen sind noch relativ wenig untersucht und die Ergebnisse sind zumeist wenig robust. Einerseits ist das auf die kleinen räumlichen und zeitlichen Skalen zurückzuführen, auf denen konvektive Ereignisse stattfinden und die von den regionalen Klimamodellen nicht aufgelöst werden (Parametrisierung von Wolkenbildung und Niederschlag). Andererseits ist die Analyse von Extremereignissen generell mit erhöhten Unsicherheiten verbunden. Gründe dafür sind u. a. das seltene Auftreten der Ereignisse, eine unvollständige Erfassung und Unsicherheiten in der Messung.

Eine Übersicht zu Projekten und Studien, die zukünftige Klimaänderungen in Deutschland u. a. von extremen Niederschlägen mit Hilfe von regionalen Klimamodellen untersuchen, ist im Anhang 10.1 aufgeführt.

2.2 Auswirkung der Klimaänderungen auf die Entwässerung

Nach der aktuellen Fassung der DIN EN 752 (2008) „Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden“ müssen „Bemessungskriterien zu erwartende Durchflussänderungen über die Nutzungsdauer eines Entwässerungssystems berücksichtigen, wenn diese nicht anderweitig in der Bemessung berücksichtigt sind. Die möglichen Auswirkungen des Klimawandels sollten in Betracht gezogen werden.“

Für eine angemessene Berücksichtigung der Klimaänderungen bei der Bemessung ist daher eine Abschätzung der erwarteten Trends für die Erhöhung von Starkregenereignissen definierter Häufigkeit und Dauer unabdingbar.

Die ExUS-Studie wurde für Nordrhein-Westfalen vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV, 2010b) durchgeführt. Bei dieser Studie wurde mit der größtmöglichen verfügbaren Datenbasis gemessener Niederschlagszeitreihen in NRW zwischen 1950 und 2008 gearbeitet. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass sich aus der Analyse historischer Niederschlagsdaten keine Änderung der heutigen Bemessung ableiten lässt, weil wenig signifikante Trends gefunden wurden, und in den Messdaten kleiner Dauerstufen zu große Unsicherheiten und regionale Unterschiede zu beobachten sind.

Für Dänemark wurden von ARNBJERG-NIELSEN (2008) Empfehlungen für einen Klimafaktor als Zuschlag für unterschiedliche Dauerstufen und Häufigkeiten erarbeitet, die unter Nutzung drei verschiedener methodischer Ansätze aus den Ergebnissen des Regionalmodells HIRHAM4 (GCM HadAM3H AGCM) abgeleitet wurden. Die Faktoren schwanken, abhängig von Dauerstufe, Wiederkehrhäufigkeit und verwendeter Methodik zwischen 1,1 und 1,5.

In Deutschland gibt es bei den projizierten klimatischen Veränderungen große regionale Unterschiede (DWA, 2006), so dass die Anwendung von bundesweit einheitlichen Klimafaktoren nicht zielführend ist. Dies wird u. a. aus den Klimasignalkarten für die Zunahme von Starkregentagen ersichtlich (CLIMATE SERVICE CENTER, 2012; vgl. Kapitel 3.2, Bild 2, Bild 3).

Insgesamt liegen nur wenige Studien vor, in welchen durch Downscalingverfahren Aussagen für die in der Stadt- und Straßenentwässerung maßgeblichen Niederschlagsdauern von 5 min bis 2 Std abgeleitet wurden.

Die Auswirkungen projizierter Änderungen im Niederschlagsgeschehen auf die Stadthydrologie wurden in den folgenden Studien untersucht:

PASCHE & HELLMERS (2011) führten im Rahmen des Projektes KLIMZUG-NORD für das Einzugsgebiet der Krückau im Stadtgebiet Hamburg Niederschlag-Abfluss-Simulationen auf Basis der Modellergebnisse von REMO durch. Der Status Quo (1971-2000) wurde dabei mit dem Zeitraum 2041-2070 verglichen. Für das Szenario A1B ergab sich z. B. für ein Wiederkehrintervall $T = 5$ a bei der Regenintensität [mm/h] eine Zunahme um 23 %. Die Zunahme des berechneten Maximalabflusses ist mit 22 % nahezu identisch. Bei einem Wiederkehrintervall von $T = 1$ a steht einer Zunahme des Niederschlags um 50 % eine Erhöhung des Abflusses um 29 % gegenüber.

Im SAWA-Projekt „Fachliche Analyse des Klimazuschlags für Bemessungsabflüsse im Einzugsgebiet der Wandse“ (SAWA, 2009) wurde die Auswirkung berechneter Klimaänderungen in Bezug auf die statistischen Abflussspenden der Wandse mit dem Modell REMO untersucht. Die kleinste ausgewertete Dauerstufe in dem gewässerhydrologischen Forschungsvorhaben beträgt 2 Stunden. Für die statistischen Hochwasserabflüsse am Pegel „Hohes Haus“ wurden Abflussänderungen von 13 % (HQ 5) bis zu 33 % (HQ 200) berechnet.

HOPPE (2008) untersuchte anhand eines konkreten Kanalnetzes im Bergischen Land (320 ha) mittels hydrologischer und hydrodynamischer Simulation den Einfluss erhöhter Niederschlagsintensitäten auf das Überstauverhalten. Hierbei wurden nicht die Ergebnisse eines Klimamodells berücksichtigt, sondern es wurde durch prozentuale Zuschläge auf Regenreihen und Modellregen eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Für das untersuchte Netz ergab sich bereits bei einer Erhöhung des Modellregens um 5 % eine deutliche Zunahme (> 30%) der überstauten Schächte und des Überstauvolumens. Die Zunahme der überstauten Schächte bzw. des berechneten Überstauvolumens ist nach den Ergebnissen der Studie keineswegs linear abhängig vom gewählten Zuschlagfaktor des Niederschlages. Die Ergebnisse sind stark durch das Netzverhalten und die ggf. vorhandenen Kapazitäten beeinflusst.

Im Rahmen des Projektes dynaklim untersuchen SIEKMANN & MÜLLER (2011) mögliche Anpassungsstrategien der konventionellen Mischwasserbehandlung an Auswirkungen des Klimawan-

dels. Aufgrund der Unsicherheiten der Klimaprojektionen legen sie den Schwerpunkt ihrer Untersuchungen auf eine Vulnerabilitätsanalyse der bestehenden Systeme, um sogenannte „No Regret-Maßnahmen“ zu identifizieren, die unabhängig von der zukünftigen Entwicklung eine Verbesserung der Mischwasserbehandlung und Verringerung der Gewässerbelastung bewirken. Es werden im dynaklim-Vorhaben auch die Daten von Klimamodellen einbezogen, eine abschließende Veröffentlichung hierzu liegt jedoch zurzeit noch nicht vor.

DITTRICH (2007) beschäftigt sich konkret mit Anpassungsmöglichkeiten im Bereich der Straßenentwässerung. Er gibt unabhängig von der erwarteten Klimaänderung Empfehlungen für die bessere Berücksichtigung von Starkniederschlägen bei Planung und Betrieb, um die Funktionsfähigkeit der Entwässerung an Schwachpunkten (z. B. Querneigungswechsel, Tiefpunkte, Übergänge zwischen Rohrleitungen und Gräben) zu verbessern, und die Überlastungsresistenz der Anlagen bei seltenen Starkregenereignissen zu verbessern.

2.3 Dimensionierungsansätze der FGSV und der DWA

Die derzeit gültigen Regelwerke der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV) zur Bemessung von Straßenentwässerungseinrichtungen sind:

- RAS-Ew - Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Entwässerung (FGSV, 2005)
- RiStWag – Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wasserschutzgebieten (FGSV, 2002)

Darüber hinaus sind das Regelwerk der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) sowie die einschlägigen DIN-Normen anzuwenden, insbesondere:

- DIN EN 752 Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden; Deutsche Fassung EN 752:2008
- DWA-A 110: Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Abwasserleitungen und -kanälen (08/2006)
- DWA-A 117: Bemessung von Regenrückhalteräumen (12/2013)
- DWA-A 118: Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen (03/2006)

- DWA-A 138: Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser (04/2005)
- DWA-M 153: Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser (08/2007)
- DWA-M 178: Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb von Retentionsbodenfiltern zur weitergehenden Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem (10/2005)

Die maßgeblichen Berechnungsansätze sind nachfolgend zusammengestellt, ein detaillierter Vergleich der Ansätze nach RAS-Ew und RiStWag mit den Bemessungs- und Nachweisverfahren nach DWA ist im Anhang 10.5 beigefügt.

1. Ableitungssysteme

Als Bemessungsabfluss für Rohrleitungen und andere Ableitungselemente wird der Spitzenabfluss für die maßgebliche Häufigkeit und Regendauer angesetzt. Der Bemessungsabfluss wird nach dem Fließzeitverfahren aus der angeschlossenen Fläche, der maßgeblichen KOSTRA-Regenspende (DWD, 2005) und dem Spitzenabflussbeiwert berechnet.

Sowohl in den RAS-Ew als auch im DWA-Regelwerk wird die Bemessungshäufigkeit anhand der gewünschten Sicherheit für verschiedene Entwässerungssituationen festgelegt.

Die maßgebliche Dauer der Bemessungsregenspenden wird anhand der Fließzeit bis zum Berechnungspunkt festgelegt. Nach den RAS-Ew werden in der Regel Fließzeiten ≥ 15 Minuten angesetzt, kleinere Fließzeiten sollen demnach nur bei starkem Gefälle und bei Trogstrecken mit Tiefpunkt angesetzt werden.

Für Spitzenabflussbeiwerte von Straßen- und Straßennebenflächen sind in den RAS-Ew Richtwerte angegeben. Das DWA-A 118 gibt Richtwerte abhängig von Regenspende, Befestigungsgrad und Geländeneigung an.

Die Berechnung des Vollfüllabflusses von Rohrleitungen erfolgt sowohl nach den RAS-Ew als auch nach dem DWA-A110 mit den Berechnungsformeln von Prandtl-Colebrook für geschlossene Profile und von Manning-Strickler für offene Gerinne (DIN EN 752-4, Abschnitt 9). In den RAS-Ew sind Vereinfachungen der Manning-Strickler-Formel zur Berechnung von Entwässerungsrinnen angegeben.

Nach DWA darf der Bemessungswert maximal 90 % des Vollfüllabflusses betragen. Diese Vorgabe wird in den RAS-Ew nicht getroffen.

Weitere Besonderheit der Bemessung nach RAS-Ew ist die Möglichkeit, den Bemessungsabfluss um die geschätzte Versickerung auf dem Fließweg (z. B. beim Abfluss über bewachsene Böschungen) zu verringern.

Zur Abflussleistung von Straßenabläufen sind in den RAS-Ew empirisch abgeleitete Richtwerte enthalten.

Nachweisrechnung

Zum Nachweis der Überflutungshäufigkeit wird in den RAS-Ew auf die Vorgaben der DIN EN 752 verwiesen. Wird ein Überflutungsnachweis für Straßenentwässerungsanlagen gefordert, so ist dieser für die in der Norm genannten Häufigkeiten zu führen. Details der in Deutschland verwendeten Modellansätze und empfohlenen Überstauhäufigkeiten sind im DWA-A118 erläutert.

2. Absetzanlagen

Absetzanlagen wie z. B. Regenklärbecken, Absetzbecken oder RiStWag-Anlagen werden für einen festen Bemessungszufluss ausgelegt. Dieser ergibt sich aus der angeschlossenen Fläche, dem Spitzenabflussbeiwert sowie einer festgelegten kritischen Regenspende (RKB, Absetzbecken) oder einer KOSTRA-Regenspende für die vorgegebene Häufigkeit und Regendauer. Die Bemessungsansätze der RAS-Ew und der RiStWag unterscheiden sich von den Ansätzen nach DWA nur in den konkreten Vorgaben für Oberflächenbeschickung und Regenspende (vgl. Anhang 10.5).

3. Retentionsbodenfilter

Retentionsbodenfilter sind nach den aktuellen RAS-Ew (2005) analog den Versickerungsanlagen zu bemessen. Dies widerspricht den Empfehlungen des DWA-Merkblattes M178, nach welchem die Bemessung einer Bodenfilteranlage aufgrund der geforderten Zielgrößen (Entlastungsrate, Wirkungsgrad) grundsätzlich mit einer hydrologischen Langzeitsimulation durchgeführt werden sollte. Das Bemessungsverfahren nach den RAS-Ew führt zu deutlich größeren Anlagen als nach dem DWA-M178. Bei der laufenden Überarbeitung der RAS-Ew wird voraussichtlich eine Angleichung an das DWA-M178 erfolgen.

4. Versickerungsanlagen

Zur Bemessung von Versickerungsanlagen wird in den RAS-Ew auf das DWA-A138 verwiesen. Die RAS-Ew geben lediglich Hinweise zur Bestimmung der anzusetzenden Versickerungsrate.

Die Grundzüge der einfachen Bemessung nach DWA-A138 entsprechen dem im Absatz 5 be-

schriebenen einfachen Verfahren für Regenrückhaltebecken. Anstelle des Drosselabflusses ist für die Entleerung der Anlage jedoch die Versickerungsrate anzusetzen. Für Rigolen ist bei der Ermittlung des Volumens das Porenvolumen zu berücksichtigen. Maximale Entleerungsdauern sind nachzuweisen.

Für zentrale, gekoppelte Versickerungsanlagen (Becken, Mulden-Rigolen-Systeme) empfiehlt das DWA-A138 die Berechnung durch eine hydrologische Langzeitsimulation und Auswertung analog DWA-A117 für Regenrückhaltebecken.

5. Rückhaltebecken

Zur Bemessung von Regenrückhaltebecken wird in den RAS-Ew auf das DWA-A117 verwiesen und die Anwendung des einfachen Verfahrens empfohlen.

Die einfache Bemessung erfolgt mit KOSTRA-Regenspenden (DWD, 2005) für die vorgegebene Häufigkeit und verschiedene Dauerstufen. Von dem Zuflussvolumen je Dauerstufe wird zur Ermittlung des Speichervolumens jeweils der konstant über die Dauer angesetzte Drosselabfluss abgezogen. Der hierbei errechnete Maximalwert gibt den erforderlichen Speicherraum an.

Die RAS-Ew geben für die Bemessung eine maximale Häufigkeit von $n = 0,5 \text{ 1/a}$ vor.

Der von der DWA empfohlene Zuschlagfaktor von 1,1 bis 1,2 zur Berücksichtigung der Unsicherheiten des einfachen Bemessungsverfahrens ist nach den RAS-Ew für außerörtliche Straßen nicht anzusetzen ($f_z=1$). Bei größeren Fließzeiten kann ein Abminderungsfaktor (f_A) angesetzt werden.

Eine Berechnung durch hydrologische Langzeitsimulation ist nach RAS-Ew nur in Ausnahmefällen vorzusehen.

3 Auswahl der Untersuchungsgebiete

3.1 Auswahlkriterien

Die Untersuchungen der Klimaänderungen werden für vier Regionen durchgeführt. Die Auswahl der Untersuchungsgebiete basiert auf folgenden Kriterien:

- Relevanz für die Straßenentwässerung (Dichte des Straßennetzes)
- Verfügbarkeit von Messdaten
- Verteilung über das gesamte Bundesgebiet mit Unterschieden in der Niederschlagscharakteristik der ausgewählten Regionen

- Untersuchungsstrecken aus dem BASt - Projekt FE 09.0147/2011/ARB "Risikoanalyse wichtiger Güter- und Transitverkehrsachsen" (Bild 1)
- Klimasignalkarten für die Anzahl der Starkregentage mit Niederschlagssummen > 25 mm bzw. > 40 mm (CLMATE SERVICE CENTER, 2012)

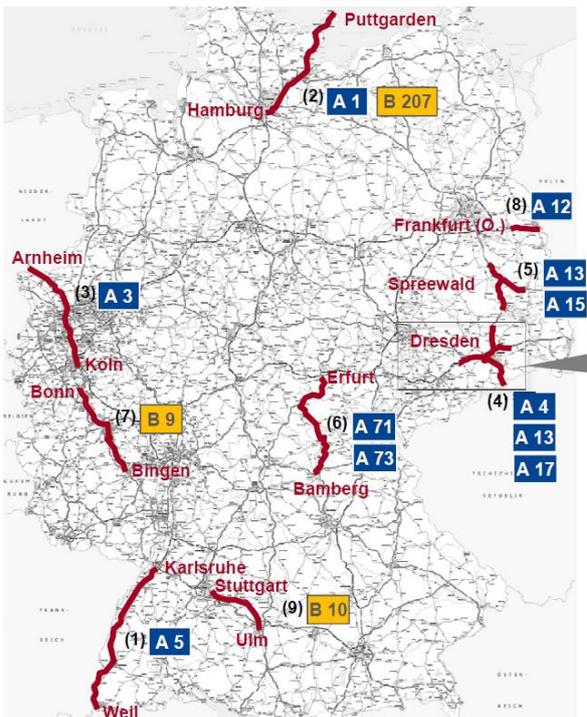


Bild 1: Streckenabschnitte des Projektes RIVA - Risikoanalyse wichtiger Güter- und Transitverkehrsachsen

Bei der Auswahl der Regionen werden insbesondere Bereiche entlang wichtiger Verkehrsachsen berücksichtigt, die ein hohes Gefährdungs- und Schadenspotenzial aufweisen.

Klimasignalkarten Starkregen

Vom Climate Service Center Hamburg wurden Klimasignalkarten erstellt, die die mittleren regionalen Klimaänderungen auf Basis eines Ensembles von 28 regionalen Klimaprojektionen zeigen.

Mit den Klimasignalkarten können Regionen in Deutschland herausgefiltert werden, bei denen sich signifikante Änderungen von unterschiedlichen klimatischen Größen (Niederschlag u. a)

ergeben werden. Durch Robustheitstests und die Verwendung mehrerer regionaler Klimamodelle sind die dort getroffenen Aussagen weitgehend abgesichert.

In Bild 2 und Bild 3 sind die Klimasignalkarten für die Zunahme von Tagen mit einer Niederschlagssumme > 40 mm dargestellt. Die Ergebnisse sind jeweils für die einzelnen Landkreise ausgewiesen.

Die in Bild 2 angegebene Klimaänderung für Starkregen entspricht dem Median der 28 Klimaprojektionen. Es ergibt sich eine flächendeckende Zunahme der Starkregentage, größtenteils mit Zunahmen > 30%.

Bild 3 zeigt das Ergebnis nach Durchführung eines 3-stufigen Robustheitstests, bei dem die Übereinstimmung der Modelle in der Richtung der simulierten Änderungen, die statistische Signifikanz der Änderungen sowie die zeitliche Homogenität der Änderungen (Sensitivität gegenüber Verschiebungen der Referenzperiode) geprüft wurden. Bereiche, an denen mindestens einer der drei Tests nicht bestanden wurde, sind grau hinterlegt. Der 3-stufige Robustheitstest wurde an vielen Orten nicht bestanden, was fast überall auf die Tests auf statistische Signifikanz und zeitliche Homogenität zurückzuführen ist (Zwischenschritte sind im Anhang 10.2, Bild 35 dargestellt). Die 1. Teststufe zur Übereinstimmung der Richtung der Änderung wurde hingegen nur in vier Kreisen nicht bestanden.

Die relativ niedrige Robustheit trotz des flächendeckenden Anstiegs hängt mit der hohen Variabilität der Starkniederschläge zusammen. Die Klimasignalkarten für die Anzahl der Tage mit einer Niederschlagssumme > 25 mm zeigen ebenfalls einen flächendeckenden Anstieg des Modellmedians und die Ergebnisse sind etwas robuster als die der seltenen Starkregen > 40 mm.

Die Ergebnisse deuten somit darauf hin, dass die Anzahl der Starkregentage in Deutschland insgesamt zunimmt. Hingegen ist davon auszugehen, dass es regional und für einzelne Zeiträume zu Abweichungen kommt.

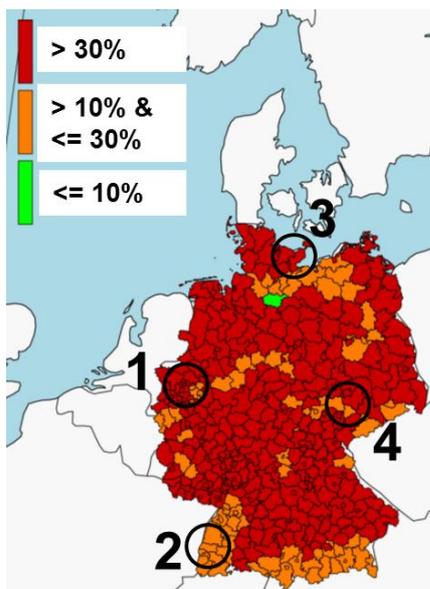


Bild 2: Relative Zunahme der Anzahl der Tage (pro Jahr) mit Starkregen >40 mm/d für den Zeitraum 2036 bis 2065 verglichen mit dem Referenzzeitraum 1966 bis 1995 [%]. Median von 28 regionalen Klimaprojektionen.

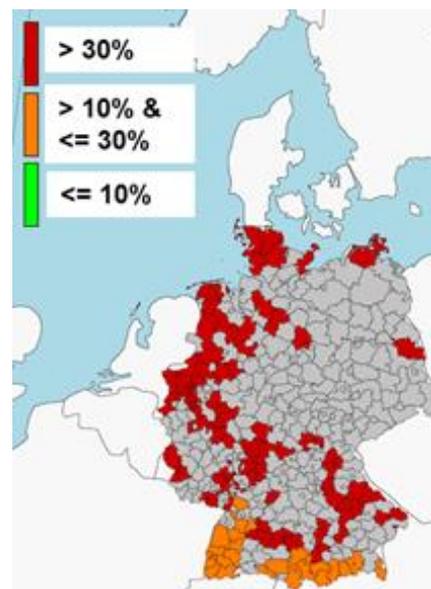


Bild 3: Relative Zunahme der Anzahl der Tage mit Starkregen >40 mm/d nach Durchführung des 3-stufigen Robustheitstests
Quelle: CLIMATE SERVICE CENTER, 2012

3.2 Untersuchungsregionen

Drei der Regionen werden aufgrund eines robusten Änderungssignals für die Zunahme von Starkregentagen ausgewählt (vgl. Kapitel 3.1). Als vierte Region wird ein Gebiet gewählt, das bereits heute durch länger anhaltende Trockenperioden geprägt ist.

Als Untersuchungsgebiete werden folgende Regionen ausgewählt (siehe auch Bild 2):

1. Duisburg – Dortmund – Bönen (BAB A3)
2. Basel – Karlsruhe (BAB A5)
3. Hamburg – Puttgarden (BAB A1 / B207)
4. Großbereich Leipzig (BAB A14)

Die Größe der Regionen wird so gewählt, dass 30 bis 40 Gitterpunkte aus dem regionalen Klimamodell CLM darin liegen. Region 2 ist hingegen kleiner, um den Einfluss des Schwarzwalds zu begrenzen.

Für Region 1 wurde die Genehmigung erhalten, die Ergebnisse aus dem BMBF-Projekt dynaklim (www.dynaklim.de) zu nutzen. Die Ergebnisse daraus sind in Kapitel 5.4.2 mit aufgeführt, das Verfahren ist in JASPER-TÖNNIES et al. (2012) beschrieben.

4 Datenbasis Klimaprojektionen und Beobachtungen

Regionale Klimaprojektionen für Europa wurden im Rahmen des vierten IPCC-Berichts (AR4, IPCC, 2007) erstellt. Für die vorliegende Untersuchung der Starkregentrends in Deutschland wurden zwei Läufe aus dem dynamischen regionalen Klimamodell CLM, basierend auf dem Globalmodell ECHAM5-MPIOM, verwendet. Die Läufe unterscheiden sich durch minimale Unterschiede in den Anfangsbedingungen im Globalmodell. Aufgrund der chaotischen Natur des Klimasystems führen bereits minimale Unterschiede in den Eingangsdaten, die im Rahmen der Messunsicherheit liegen, zu unterschiedlichen Verläufen von Temperatur und Niederschlag. Daher unterscheiden sich die beiden CLM-Läufe hinsichtlich ihrer Niederschlagstrends und werden unabhängig voneinander ausgewertet.

Die CLM-Läufe wurden zu Projektbeginn ausgewählt. Sie stellen eine Datengrundlage dar, die - bei einer relativ hohen Auflösung - eine gute Qualität und Konsistenz erwarten lässt. Aufgrund des hohen Aufwands bei der Erzeugung von hochaufgelösten Niederschlagsdaten war eine Auswertung einer größeren Anzahl von Modellläufen von regionalen Klimamodellen im Rahmen des Projektes nicht möglich.

Die CLM-Daten haben eine Horizontalauflösung von 0.165° (~18 km). Die verwendeten Läufe sind

CLM-C20_1,2 für den Referenzzeitraum 1961-1990, sowie CLM-A1B_1,2 für die Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100, basierend auf dem SRES-Emissionsszenario A1B (LAUTENSCHLAGER et al., 2009, KEULER et al., 2009 a,b,c). Die Läufe werden im Folgenden mit CLM 1 und CLM 2 bezeichnet.

Die zeitliche Auflösung des Niederschlags aus den CLM-Läufen beträgt 1 Std. Um robustere Aussagen zu Niederschlagstrends liefern zu können, wurden die Niederschläge zu Tagessummen aggregiert, die nach einer Studie von HANEL & BUIZHAN (2009b) von regionalen Klimamodellen besser abgebildet werden als 1 Std-Werte.

Beobachtungsdaten von Niederschlag und Temperatur aus den Untersuchungsgebieten wurden vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellt. Diese beinhalten:

- Stationsdaten von DWD-Klimastationen (Temperatur und Niederschlag ab 1960, Tageswerte).
- Kontinuierliche Niederschlagsdaten von Regenschreiberstationen (1950-2000 bzw. 1960-2010, zeitliche Auflösung 5 min).
- Rasterdatensatz REGNIE (regionalisierte Niederschlagsdaten für Deutschland mit einer Auflösung von ca. 1x1 km², 1951-2010, zeitliche Auflösung: 1 Tag, DWD 2011).

Zur Auswertung werden außerdem Starkniederschlagshöhen von KOSTRA (Raster 8,45 km x 8,45 km, DWD, 2005) verwendet.

Für die Region 1 (Duisburg-Dortmund-Bönen) werden die Ergebnisse des Projektes dynamik herangezogen. Da in dynamik mit Radardaten und nicht wie im vorliegenden Projekt mit Stationsdaten gearbeitet wurde, sind die resultierenden Extremwertstatistiken nicht direkt vergleichbar. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf eine Darstellung der Statistiken für Region 1 verzichtet. Nur die im Projekt dynamik berechneten Trends werden vergleichend mit aufgeführt (vgl. Kapitel 5.4.2) und ausgewertet.

5 Starkniederschläge aus regionalen Klimaprojektionen

5.1 Allgemeines

Starkniederschläge entstehen durch Fronten oder konvektive Zellen und sind in der Regel kurze und kleinräumige Ereignisse. Für die Straßenentwässerung sind insbesondere konvektive Starkregenereignisse mit hohen Niederschlagsintensitäten und einer Dauer bis zu einer Stunde relevant.

Die kleinskaligen Prozesse, die bei der Entstehung von Starkregen eine Rolle spielen, werden auch von relativ hochauflösenden regionalen Klimamodellen nicht abgebildet.

Bild 4 veranschaulicht den räumlichen Unterschied zwischen dem CLM-Gitter (Rechtecke) und einer Niederschlagsverteilung bei einem konvektiven Ereignis (Tagessumme vom 08.05.2005, gemessen von Radar auf einem 1x1 km²-Gitter). Es wird deutlich, dass die kleinräumigen Niederschlagsstrukturen auf dem Modellgitter nicht abgebildet werden können.

Indessen können nur mit globalen Klimamodellen weltweite Klimaänderungen und die Folgen von verschiedenen Emissionsszenarien simuliert werden.

Um aus den globalen Simulationen Informationen über kleinräumige Starkregen ableiten zu können, ist eine Modellkette erforderlich: eine Kombination von einem globalen und regionalen Klimamodell und einem statistischen Downscalingverfahren.

Mit einem statistischen Downscalingverfahren können Daten von Klimaprojektionen auf kleinere Skalen übertragen werden und damit zum Beispiel für die Untersuchung von hydrologischen Prozessen nutzbar gemacht werden.

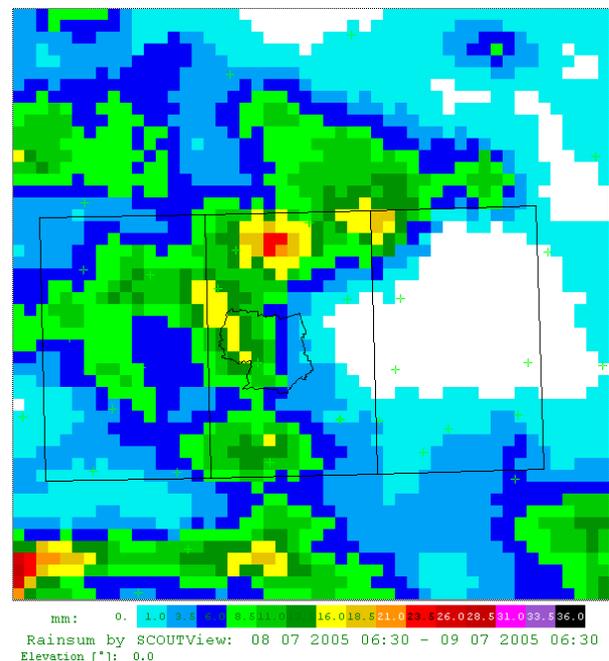


Bild 4: Niederschlagsverteilung eines konvektiven Ereignisses, 08.05.2005 (Tagessumme, angeeichte Radardaten), Vergleich mit CLM-Gitter (Rechtecke)

Dazu werden statistische Beziehungen zwischen verschiedenen Skalen verwendet, die aus Beobachtungen abgeleitet werden. Bei der Anwendung auf Projektionsdaten von Klimamodellen liegt die Annahme zugrunde, dass sich die statistischen Beziehungen zwischen den Skalen unter

zukünftigen Bedingungen nicht oder nur unbedeutend ändern. Im Rahmen dieses Projekts wurde ein statistisches Downscalingverfahren verwendet und weiterentwickelt, mit dem auf Basis der Niederschlagsdaten aus dem regionalen Klimamodell CLM hochaufgelöste Zeitreihen erzeugt werden (Kapitel 5.3).

5.2 Niederschläge aus Beobachtungen und CLM

Über den Zeitraum 1961-1990 werden Niederschlagsdaten aus CLM und Beobachtungen (REGNIE) verglichen. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den CLM-Niederschlagsdaten sind die Niederschlagswerte aus REGNIE über die Gitterpunkte des CLM-Rasters gemittelt.

Die resultierende Anzahl von Starkregentage > 40 mm/d bzw. Starkregen > 25 mm/d im Zeitraum 1961-1990 ist in Bild 5 dargestellt.

Starkregen > 25 mm/d treten mit ca. 1,2 Ereignissen pro Jahr (Median) relativ häufig auf, während Starkregen > 40 mm/d mit einer Auftretenshäufigkeit von ca. 0,17 pro Jahr seltene Ereignisse sind. Die räumliche Verteilung ist hingegen ähnlich: mit

einer erkennbaren Zunahme von Nord nach Süd sowie einer starken Abhängigkeit von der orographischen Lage.

In den CLM-Daten wird die Auftretenswahrscheinlichkeit relativ gut wiedergegeben, die räumliche Verteilung weniger gut. So sind in den CLM-Daten in Region 3 mehr Starkregen enthalten als in REGNIE, in Region 2 hingegen weniger und die Bandbreite innerhalb der Regionen wird nicht gut wiedergegeben. Abbildungen zu den kumulierten Häufigkeitsverteilungen von Starkregen aus REGNIE und CLM in den einzelnen Untersuchungsgebieten sind im Anhang 10.3 zu finden.

In den Untersuchungsgebieten wurden Stationsmessungen von Regenschreibern in Hinblick auf extreme Starkregen ausgewertet. Bei den Stationsdaten handelt es sich im Gegensatz zu den REGNIE-Rasterdaten um Messungen an einzelnen Punkten, so dass Extreme höher ausfallen als bei den räumlich gemittelten Werten.

Die zeitliche Auflösung der Regenschreibermessungen beträgt 5 min.

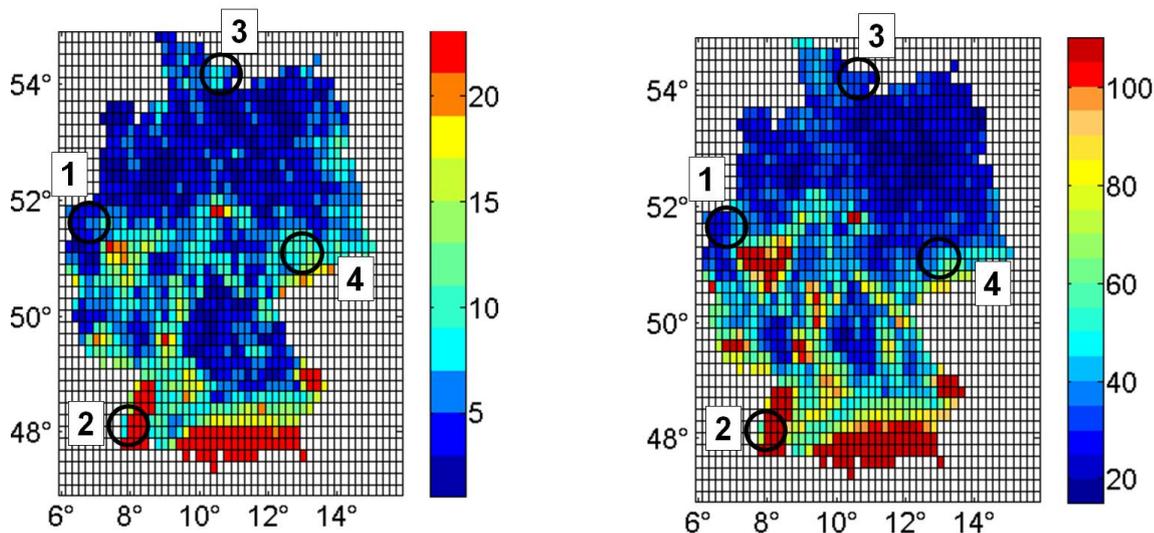


Bild 5: Anzahl Tage mit Starkregen > 40 mm/d (links) und > 25 mm/d (rechts), REGNIE, im Zeitraum 1961-1990

Starkregenstatistiken der im Projekt verwendeten Stationsdaten aus dem Zeitraum 1961-1990 sind in Bild 6, Bild 7 und Bild 8 für die Regionen 2, 3 und dargestellt.

Abgebildet sind extremwertstatistische Auswertungen entsprechend DWA-A531 (DWA, 2012) für Dauerstufen von 5 min bis 24 h und eine Wiederkehrzeit von 5 Jahren. Dazu sind die KOSTRA-Werte von den jeweiligen KOSTRA-Gitterpunkten eingezeichnet.

Für die Regionen ergibt sich eine gewisse Bandbreite, bedingt durch die unterschiedliche Lage der Stationen und die statistische Auftretenshäufigkeit der Starkregenereignisse. So fallen z. B. die Starkregen an der Station Müllheim höher aus als an den übrigen Stationen in Region 2, was sich bei der vorherrschenden Anströmrichtung West - Süd-West durch die Lage am südwestlichen Rand des Schwarzwalds erklären lässt.

Abweichungen zu KOSTRA gibt es u. a. durch die Interpolation der KOSTRA-Werte auf ein Raster von 8,45 km x 8,45 km (wodurch in Gegenden mit komplexer Topographie wie dem Rheingraben Abweichungen von über 15 % zum Stationswert auftreten können) und einen anderen Zeitraum der zugrunde liegenden Messdaten (1951-2000).

Ein Vergleich der extremen Starkniederschläge kurzer Dauerstufen in Region 4 zeigt relativ große Unterschiede zwischen den Stationsdaten und KOSTRA-Werten. Das kann vermutlich auf fehlerhafte Niederschlagsdaten an der Station Geraleumnitz zurückgeführt werden, die in KOSTRA eingehen. Dort werden über einen Zeitraum von 15 Jahren systematisch höhere Niederschläge verzeichnet als an den umliegenden Stationen.

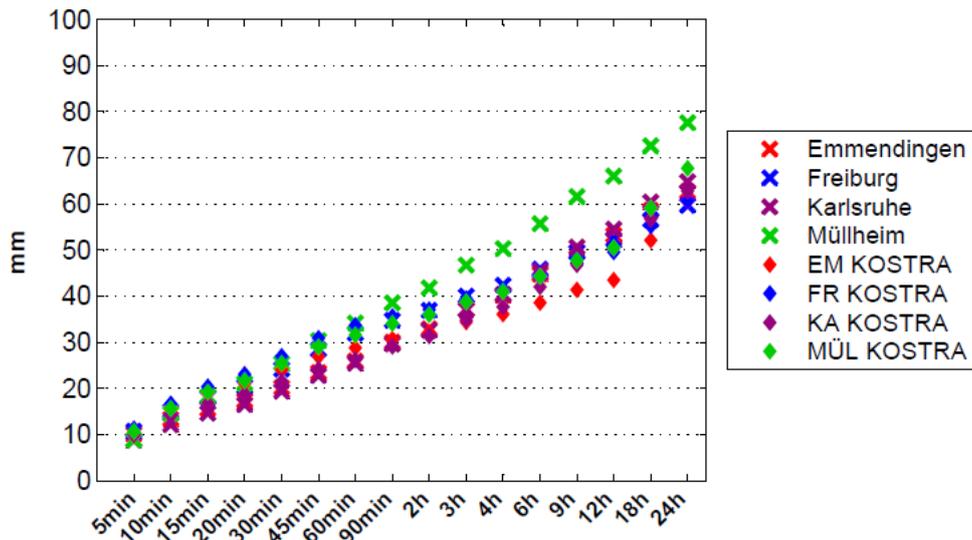


Bild 6: Starkniederschläge von Stationen (1961-1990) und KOSTRA in Region 2 (Basel-Karlsruhe), Wiederkehrzeit 5 Jahre

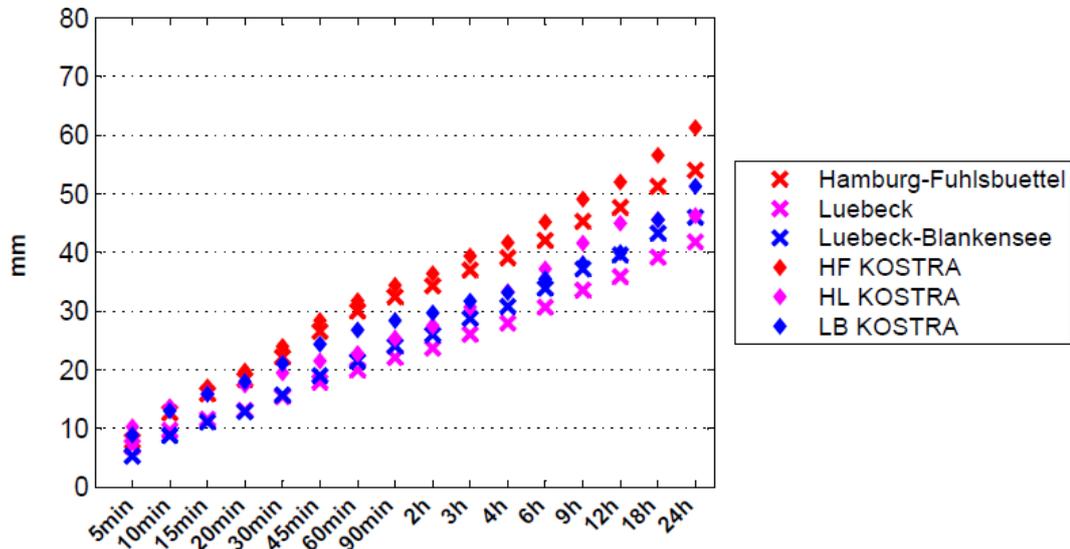


Bild 7: Starkniederschläge von Stationen (1961-1990) und KOSTRA in Region 3 (Hamburg-Puttgarden), Wiederkehrzeit 5 Jahre

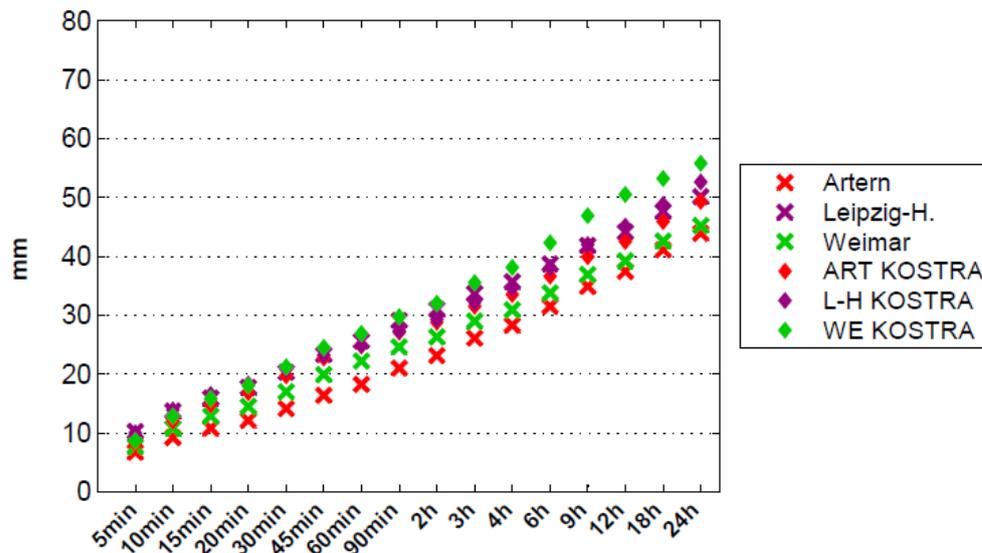


Bild 8: Starkniederschläge von Stationen (1960-2010) und KOSTRA in Region 4 (Leipzig), Wiederkehrzeit 5 Jahre

5.3 Bias-Korrektur und statistisches Downscaling

Um hochaufgelöste Zeitreihen aus den CLM-Daten abzuleiten, wurde ein empirisches statistisches Downscaling-Verfahren weiterentwickelt, mit dem sich speziell kleinräumige Niederschläge und Starkregen abbilden lassen. Dafür werden Beobachtungsdaten über einen ausreichend langen Zeitraum benötigt, sowohl auf der Modell-Skala (Tageswerte, REGNIE), als auch in hoher Auflösung von Regenschreiberstationen. In einem mehrstufigen Verfahren werden die Tagessummen von CLM auf dem Modellgitter in 5-minütige Zeitreihen überführt. Die resultierenden Daten entsprechen in ihrer Struktur Punktdaten von Stationen, d.h. es findet ein räumliches und ein zeitliches Downscaling statt. Ein Schema zum Verfahren ist in Bild 9 dargestellt. Das Downscaling-Verfahren wird für die verschiedenen Regionen separat durchgeführt und beinhaltet folgende Schritte:

1. Bias-Korrektur der CLM-Tagessummen

In Daten aus regionalen Klimamodellen treten häufig systematische Abweichungen im Vergleich zu Beobachtungen auf (Abweichungen zwischen CLM und REGNIE, siehe Kapitel 5.2). Der zeitunabhängige Modellfehler wird als Bias bezeichnet. Eine Bias-Korrektur der Niederschlags-Tagessummen in CLM erfolgt nach PIANI et al. (2010). Dabei wird die kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilung von Modell- und Messdaten über einen 30-jährigen Zeitraum verglichen und die Verteilung der Modelldaten mit Hilfe einer Korrekturfunktion an die Messdaten angeglichen. Auf Basis

der Wahrscheinlichkeitsverteilungen von CLM- und REGNIE-Daten wird die Korrekturfunktion numerisch als „Look-up-table“ bestimmt und auf die CLM-Daten im Referenzzeitraum und in der nahen und fernen Zukunft angewandt. Nähere Einzelheiten zum Verfahren sind im Anhang 10.3 beschrieben.

2. Auswahlverfahren zur Zuordnung von ähnlichen Tagen

In einem Auswahlverfahren werden zu jedem Tag in den CLM-Zeitreihen anhand der bias-korrigierten Tagessumme und der Temperatur ‚ähnliche‘ Tage im Messzeitraum gesucht. Kriterien für die Bestimmung eines ähnlichen Tages sind: die gleiche Temperaturklasse und eine ähnliche Niederschlags-Tagessumme (REGNIE-Niederschlagssumme innerhalb eines schmalen Intervalls um den vorgegebenen CLM-Wert). Aus den Ereignissen im Beobachtungszeitraum, auf die die Kriterien zutreffen, wird zufällig ein Ereignis gezogen. Wenn keine passenden Tage gefunden werden, wird schrittweise das Niederschlags-Intervall vergrößert und benachbarte Temperaturklassen werden mit einbezogen. Dabei werden nur Tage ausgewählt, zu denen sowohl REGNIE- als auch Regenschreiberdaten vorliegen. Um die Datenbasis zu vergrößern, werden zudem die Messdaten innerhalb der Gitterpunkte des Untersuchungsgebiets verschoben. Damit geben die Ergebnisse des Downscaling die regionale Niederschlagscharakteristik wieder und nicht spezielle lokale Ergebnisse für einzelne Orte innerhalb einer Region.

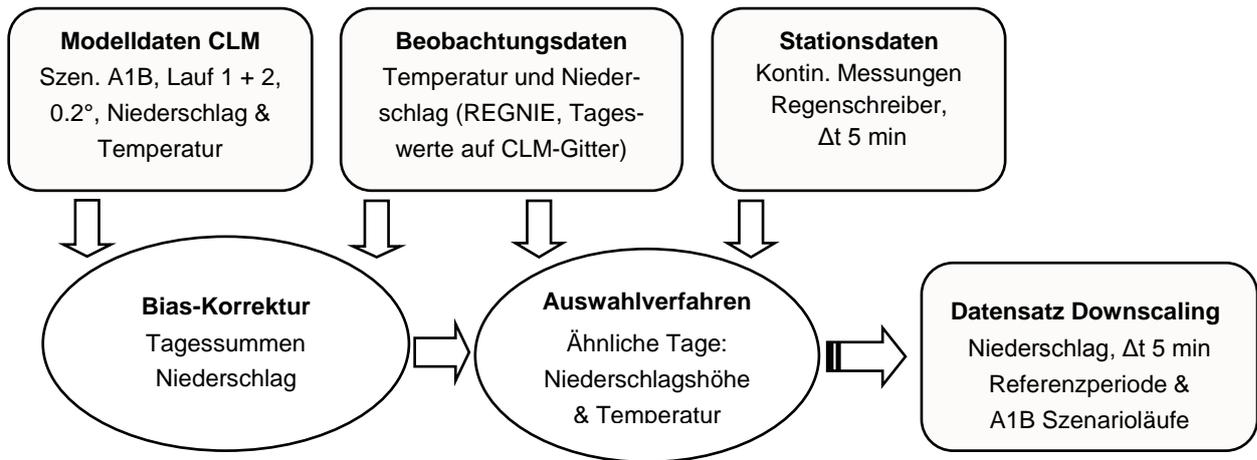


Bild 9: Schema zum Downscaling-Verfahren

Der Auswahlprozess wird jeweils für 30 Jahre durchgeführt und die zugeordneten Niederschlagsereignisse werden überprüft. Bei Ereignissen mit einer Niederschlagshöhe bis etwa 50 mm werden überwiegend passende Zuordnungen gefunden. Bei einzelnen höheren Ereignissen treten relevante Abweichungen in der Niederschlagshöhe auf. In diesen Fällen werden zugeordnete niedrigere Ereignisse aus dem Beobachtungszeitraum mit einem konstanten ‚Anreich‘-Faktor verändert, um die Tagessumme aus dem Modell zu erreichen.

3. Erzeugung von hochaufgelösten Zeitreihen

Nachdem in Schritt 2 den bias-korrigierten CLM-Zeitserien ähnliche Tage aus dem Beobachtungszeitraum der REGNIE-Daten zugeordnet wurden, werden zur Erzeugung der hochaufgelösten Zeitreihen die Regenschreiberdaten der jeweiligen Tagesverläufe verwendet. Diese werden entsprechend der Zuordnung tageweise zusammengesetzt, so dass sich neue Zeitreihen ergeben, die auf den CLM-Daten basieren und die Charakteristik von Regenschreiberzeitreihen haben.

Die resultierenden Zeitreihen haben eine zeitliche Auflösung von 5 min und innerhalb eines Tages einen konsistenten Verlauf, entsprechend der Messreihen des zugeordneten Tages. Mehrtägige Ereignisse (die für die Straßenentwässerung von untergeordneter Bedeutung sind) werden hingegen nicht konsistent abgebildet.

Zu jedem Tag in CLM können verschiedene kleinräumige Realisierungen gefunden werden. Um die dadurch entstehende Variabilität im Downscaling-Verfahren abzubilden, wird zu jeder Niederschlagsverteilung aus CLM ein Ensemble, bestehend aus 10 Downscaling-Läufen, gerechnet. Unterschiede innerhalb einer Region werden

abgebildet, indem Zeitreihen für den Median, sowie das 15 %- und 85 %-Quantil der Niederschläge erstellt werden.

Weitere Details und Zwischenschritte bei der Umsetzung des Downscaling-Verfahrens sind im Anhang 10.4 beschrieben.

5.4 Ergebnisse des statistischen Downscalingverfahrens

5.4.1 Starkregenhäufigkeit aus Modell und Beobachtungen

Die Ergebnisse des Downscaling-Verfahrens werden extremwertstatistisch ausgewertet und mit Starkregenstatistiken von Beobachtungen verglichen. Die Validierung der Ergebnisse durch den Vergleich mit Beobachtungen bezieht sich auf das eigentliche Downscaling-Verfahren. (Unsicherheiten in den CLM-Läufen und der Bias-Korrektur werden im Kapitel 5.5 diskutiert.) Da für jede Niederschlagsverteilung aus CLM mehrere Downscaling-Realisierungen gerechnet wurden, ergibt sich eine Bandbreite der Ergebnisse bezüglich der extremen Starkregen in der jeweiligen Region. Diese wird als Standardabweichung mit angegeben.

Bei den Beobachtungsdaten werden Stationsdaten aus dem Zeitraum 1961-1990 sowie KOSTRA-Daten angegeben. Die Stationsdaten stammen von 3 bis 4 Stationen pro Region, was zu wenig ist, um den Mittelwert und die Bandbreite innerhalb der Region genau zu bestimmen. Die KOSTRA-Daten sind flächendeckend vorhanden, so dass sie ergänzend mit angegeben werden. Dabei gehen in KOSTRA teilweise Daten von anderen als den im Projekt verwendeten Stationen ein, zur Interpolation zwischen den Stationen wurde in KOSTRA ein Regionalisierungsverfahren angewandt und es liegt ein längerer Beobach-

tungszeitraum als bei den im Projekt verwendeten Daten zugrunde. Abweichungen zwischen KOSTRA- und Stationsdaten treten insbesondere in Region 4 auf (vgl. 5.2).

Für die Region 3 sind die Ergebnisse der Starkregenauswertung auf Basis der Downscaling-Reihen von CLM 1 und CLM 2 im Referenzzeitraum in Bild 10 dargestellt. Eingezeichnet sind die Downscaling-Realisierungen der Niederschläge des Medians (rot), des 15 %-Quantils (grün) und des 85 %-Quantils (blau) für die statistische Wiederkehrzeit von 5 Jahren. Im Vergleich mit den Beobachtungen (vgl. Bild 7) ergeben sich nur geringe Abweichungen, die innerhalb der Bandbreite der Beobachtungen und des KOSTRA-Toleranzbereiches ($\pm 10\%$) liegen. Dabei fällt der Mittelwert der Stationen etwas niedriger und der Mittelwert von KOSTRA etwas höher aus als die

Modellergebnisse. Die tabellarischen Werte (Mittelwerte und Standardabweichungen) der Modell- und Beobachtungsdaten im Referenzzeitraum sind in Tab. 1 aufgeführt. Angegeben sind die statistischen Starkniederschlagshöhen für die Dauerstufen 15 min, 30 min, 1 h und 3 h, Wiederkehrzeit 5 Jahre. Für Region 3 und Region 4 gibt es nur geringe Abweichungen zwischen den Mittelwerten aus Modell- und Beobachtungsdaten, die innerhalb des angegebenen Unsicherheitsbereiches liegen. Für Region 2 ist die Bandbreite aufgrund der orographischen Unterschiede innerhalb der Region relativ hoch, so dass die größeren Abweichungen zwischen Stations- und Modelldaten ebenfalls im Rahmen der Erwartungen liegen. Damit ergibt sich insgesamt eine gute Übereinstimmung zwischen Modell- und Beobachtungsdaten.

		$r_{\text{Ref}} / \text{mm}$ 1961 - 1990			
		CLM1	CLM2	Stationen	KOSTRA
Region 2 Basel- Karlsruhe	15 min	19,8 ± 3,1	19,9 ± 2,7	16,7 ± 1,8	20,0 ± 2,0
	30 min	27,4 ± 5,0	27,6 ± 4,1	22,3 ± 3,0	26,4 ± 2,6
	1 h	36,9 ± 7,4	37,1 ± 5,9	29,4 ± 4,3	32,8 ± 3,3
	3 h	46,6 ± 9,2	46,5 ± 8,0	40,2 ± 4,5	41,9 ± 4,2
Region 3 Hamburg- Puttgarden	15 min	13,6 ± 0,7	13,7 ± 0,8	12,9 ± 1,7	14,6 ± 1,5
	30 min	18,7 ± 1,0	19,4 ± 1,1	17,8 ± 2,6	18,7 ± 1,9
	1 h	25,0 ± 1,4	25,2 ± 1,5	23,8 ± 3,9	22,9 ± 2,3
	3 h	32,0 ± 2,0	31,4 ± 2,7	30,6 ± 3,9	29,9 ± 3,0
Region 4 Großbereich Leipzig	15 min	12,9 ± 1,4	12,0 ± 1,0	13,2 ± 2,6	16,2 ± 1,6
	30 min	17,2 ± 2,2	16,4 ± 1,2	17,1 ± 3,1	21,6 ± 2,2
	1 h	23,2 ± 3,1	22,6 ± 1,5	22,0 ± 3,7	26,7 ± 2,7
	3 h	30,0 ± 2,8	28,6 ± 1,7	29,6 ± 3,8	34,1 ± 3,4

Tab. 1: Starkniederschlagshöhen Referenzzeitraum in mm: Mittelwert \pm Standardabweichung im Zeitraum 1961-1990. Ergebnisse des statistischen Downscaling von CLM1 und CLM2, C20-Simulation, und Beobachtungen von Stationen, dazu die klimatologischen Werte von KOSTRA. Extremwertstatistische Auswertung für die Dauerstufen 15 min, 30 min, 1 h, 3 h, Wiederkehrzeit 5 Jahre

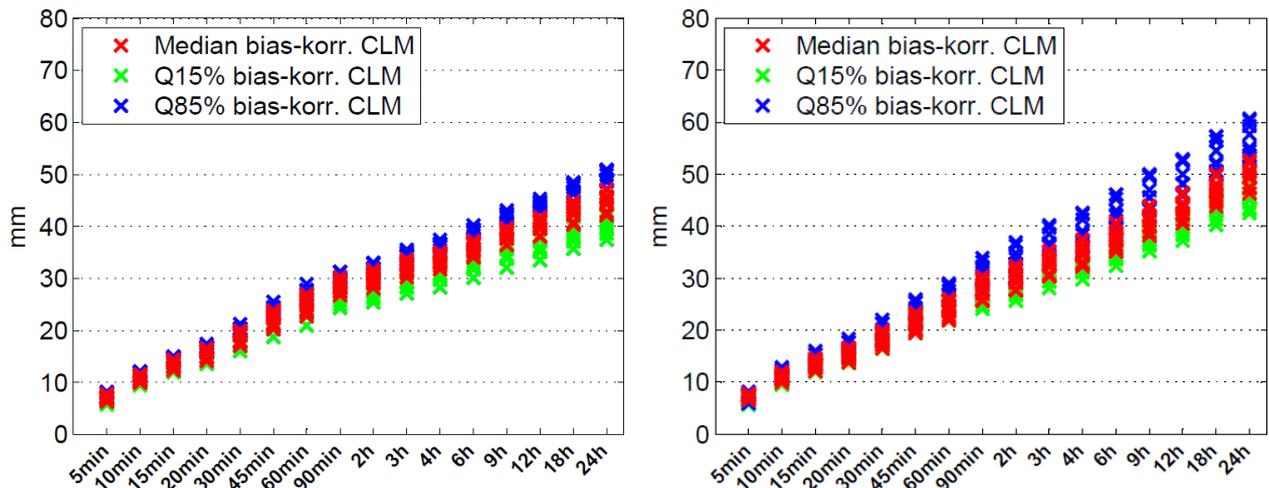


Bild 10: Downscaling-Ergebnisse Region 3 Hamburg-Puttgarden, CLM 1 (links) und CLM 2 (rechts), 1961-1990. Extremwertstatistische Auswertungen mit Wiederkehrzeit 5 Jahre. Downscaling-Realisierungen für den Median (rot), das 15 %-Quantil (grün) und das 85 %-Quantil (blau).

5.4.2 Starkregentrends für die Untersuchungsregionen

Auf Basis der Downscaling-Läufe werden Starkregenstatistiken für die nahe und ferne Zukunft erstellt und Trendauswertungen durchgeführt. Eine Auflistung der Ergebnisse, getrennt nach Region, CLM-Lauf und Dauerstufe ist in Tab. 2 aufgeführt. Hier sind auch die Ergebnisse des Projektes dynaklim enthalten, die auf einer abweichenden Datengrundlage (Radardaten) und Auswerteroutine beruhen.

Starkregenänderungen, die oberhalb des Toleranzbereiches nach KOSTRA ($\pm 10\%$) liegen und statistisch signifikant sind (Signifikanzniveau 95%), sind fett gedruckt. Der Berechnung der Signifikanz (Mann-Whitney-U-Test) liegen jeweils die verschiedenen Downscaling-Realisierungen zugrunde. Unabhängig von der statistischen Signifikanz ist die Aussagekraft der Trends dadurch begrenzt, dass diese ausschließlich auf 2 Läufen des regionalen Klimamodells CLM basieren.

Im Vergleich zum Referenzzeitraum ergeben sich überwiegend Zunahmen der Starkregenhäufigkeit. Je nach Region und CLM-Lauf fallen die Trends unterschiedlich aus: Für die Regionen 2 und 3 ergeben sich Zunahmen in der Starkregenhäufigkeit, die größtenteils statistisch signifikant sind und mit über 10 % oberhalb des Toleranzbereiches nach KOSTRA liegen. Das gleiche gilt für Region 1, wofür die Daten aus dem Projekt dynaklim übernommen wurden. In Region 4 fallen die Zunahmen niedriger aus und es treten auch Abnahmen auf, die im Rahmen des KOSTRA-Toleranzbereiches liegen.

Innerhalb einer Region treten verschiedene Starkregenhäufigkeiten auf, wobei die Bandbreite je nach Region unterschiedlich hoch ist. Eine Betrachtung der Trends der 15 %-Quantile und der 85 %-Quantile zeigt, dass die Trends innerhalb einer Region ähnlich ausfallen, unabhängig von den Absolutwerten. Ein Beispiel für die Zunahme der kurzen Starkregen mit Dauerstufen von 5 min – 90 min mit der Bandbreite aus dem Modell ist in Bild 11 für die Region 3 dargestellt. Abgebildet sind die Starkniederschlagshöhen basierend auf CLM 1 für den Referenzzeitraum, die nahe und die ferne Zukunft.

Sowohl der Median, als auch das 15 %- und 85 %-Quantil in der Region nehmen zu, wobei die Ergebnisse in der nahen Zukunft in der Bandbreite aus dem Referenzzeitraum liegen, die Ergebnisse in der fernen Zukunft hingegen signifikant höher sind.

Insgesamt ergeben sich größtenteils Zunahmen der Starkregenhäufigkeit im Bereich von + 5 % bis + 25 %. Der Median der Starkregentrends für die Regionen 1 bis 3, nahe und ferne Zukunft beträgt + 15 %. Die Ergebnisse deuten auf einen weiteren Anstieg der Starkregenhäufigkeit von der nahen zur fernen Zukunft hin und eine schwächere Zunahme in Region 4. Da die Ergebnisse durch eine Überlagerung von Trend und Klimavariabilität zustande kommen, sind jedoch die Unterschiede zwischen den Regionen und der zeitliche Verlauf der Starkregenhäufigkeit nur bedingt aussagekräftig.

	$(r_{Proj}-r_{Ref}) / r_{Ref}$	2021-2050		2071-2100	
		CLM1	CLM2	CLM1	CLM2
Region 1 Projektgebiet dynaklim (NRW)					
	15 min	16 %	8 %	15 %	5 %
	30 min	18 %	9 %	16 %	7 %
	1 h	19 %	10 %	16 %	9 %
	3 h	19 %	9 %	17 %	7 %
Region 2 Basel- Karlsruhe					
	15 min	12 %	8 %	14 %	20 %
	30 min	14 %	7 %	16 %	24 %
	1 h	14 %	7 %	16 %	27 %
	3 h	17 %	11%	16 %	24 %
Region 3 Hamburg- Puttgarden					
	15 min	7 %	8 %	19 %	17 %
	30 min	6 %	10 %	20 %	19 %
	1 h	4 %	11 %	22 %	19 %
	3 h	12 %	11 %	31 %	25 %
Region 4 Großbereich Leipzig					
	15 min	- 7 %	6 %	6 %	5 %
	30 min	- 5 %	6 %	8 %	4 %
	1 h	- 4 %	6 %	10 %	3 %
	3 h	- 6 %	11 %	6 %	2 %

Tab. 2: Änderung der projizierten Starkniederschlagshöhen r_{Proj} gegenüber der Referenzperiode r_{Ref} für Dauerstufen von 15 min bis 3 h, Wiederkehrzeit 5 Jahre. Änderungen, die statistisch signifikant sind (Signifikanzniveau 95%) und oberhalb des Toleranzbereiches nach KOSTRA liegen, sind fett gedruckt. Ergebnisse Region 1 übernommen aus dem Projekt dynaklim

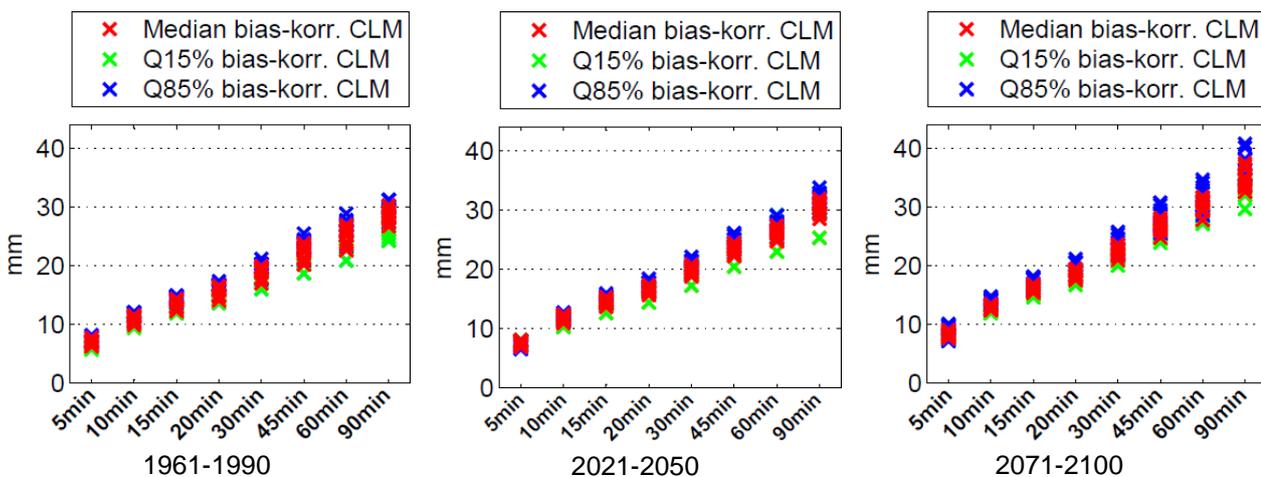


Bild 11: Extremwertstatistische Auswertung der Starkniederschläge für Referenzzeitraum, nahe und ferne Zukunft in Region 3 Hamburg-Puttgarden, CLM 1, Wiederkehrzeit 5 Jahre

5.5 Unsicherheiten der Starkniederschlagstrends

Die Auswertung der Starkniederschlagstrends erfolgt am Ende der Modellkette aus globalem Klimamodell, regionalem Klimamodell und statistischem Downscaling. In jedem Modellierungsschritt sind Unsicherheiten enthalten, die sich auf die Ergebnisse auswirken können. Relevante Unsicherheitsfaktoren sind:

1. Szenariounsicherheiten

Die Klimaprojektionen basieren auf dem Emissionsszenario A1B. Das A1B-Szenario erscheint aus heutiger Sicht einigermaßen plausibel, aber es handelt sich dabei nur um ein mögliches Szenario, das die zukünftigen Emissionen von Treibhausgasen beschreibt. Insbesondere für die ferne Zukunft können durch andere als die angenommenen Treibhausgaskonzentrationen deutliche Abweichungen auftreten.

2. Variabilität der Niederschläge

Niederschläge und Starkniederschläge sind Schwankungen in dekadischen Zeiträumen unterworfen. Im Modell CLM wird Niederschlagsvariabilität abgebildet. Aufgrund der chaotischen Natur der beteiligten Prozesse lässt sich aber nicht vorhersagen, wann überdurchschnittlich feuchte oder trockene Perioden auftreten. Extreme Starkregen entstehen zudem während spezieller Wetterlagen, die sich prinzipiell nicht für länger als ein paar Tage bis Wochen vorhersagen lassen. Wo und wann genau es lokal zu einem extremen Starkregen kommt, kann als zufällig angesehen werden. Durch die statistische Betrachtung von 30-jährigen Zeiträumen wird der Effekt von zufälligen Einzelereignissen abgemindert und es können Wahrscheinlichkeiten für extreme Starkregen angegeben werden. Durch das Auftreten oder Ausbleiben von besonders seltenen Ereignissen werden die statistisch ermittelten Wahrscheinlichkeiten aber verfälscht. Die Variabilität der Starkniederschläge ist daher ein wichtiger Unsicherheitsfaktor.

3. Modellunsicherheiten

Sowohl im globalen als auch im regionalen Klimamodell gibt es Unsicherheiten, da nicht alle relevanten Prozesse des Klimasystems vollständig abgebildet werden (z. B. Ozeanzirkulation, Parametrisierung von Wolken und Niederschlag).

Im statistischen Downscalingverfahren treten weitere Modellunsicherheiten auf, insbesondere durch die Unsicherheit der zugrunde liegenden Annahme, dass sich die aus Beobachtungen der Vergangenheit abgeleiteten statistischen Beziehungen auf die Zukunft übertragen lassen.

Durch Betrachtung von einer größeren Zahl von Modellläufen von verschiedenen Klimamodellen lässt sich die Modellunsicherheit und die Unsicherheit durch Klimavariabilitäten besser quantifizieren. Bis 2050 zeigen aktuelle Klimaprojektionen für Deutschland relativ ähnliche Verläufe und die Szenariounsicherheiten sind relativ gering. In diesem Kontext lassen sich die beiden Läufe von CLM und die ermittelten Starkregentrends einordnen (vgl. Klimasignalkarten, Kapitel 3.1).

Eine Abschätzung der Unsicherheit im Downscalingverfahren und des Effekts auf die Starkregentrends wurde durchgeführt. Dafür wurden die einzelnen Unsicherheitsfaktoren geschätzt oder berechnet und unter Annahme von Normalverteilungen die Auswirkung auf den mittleren Trend einer Region berechnet. Der mittlere Trend wird dabei als Wahrscheinlichkeitsverteilung dargestellt. Nicht berücksichtigt wurden Szenario-Unsicherheiten und Modellunsicherheiten im Regionalmodell CLM und im Globalmodell ECHAM5 (nicht abgebildete Prozesse, Rückkopplungseffekte etc.).

Die Klimavariabilität wurde auf Basis der beiden CLM-Läufe und der Downscaling-Realisierungen abgeschätzt. Dafür wurden die Unterschiede zwischen CLM1 und CLM2 in den drei untersuchten Zeiträumen jeweils für alle Untersuchungsgebiete ausgewertet. (Diese Vorgehensweise führt nur zu einer relativ groben Abschätzung. Für eine bessere quantitative Bestimmung der Klimavariabilität müsste eine größere Anzahl von Modellläufen von regionalen Klimamodellen ausgewertet werden, was im Rahmen dieses Projektes nicht durchführbar war.)

Als weitere Unsicherheitsfaktoren wurden berücksichtigt: Unsicherheiten in der Bias-Korrektur der Tagesniederschläge (insbesondere im extremen Bereich), Unsicherheiten im Downscaling-Verfahren durch Verfahrensdefizite bzw. ungenaue Annahmen, sowie Unsicherheiten bei der extremwertstatistischen Auswertung der Starkniederschläge (für Wiederkehrzeiten bis 5 Jahre).

Die Überlagerung der einzelnen Unsicherheitsfaktoren führt zu einer Verbreiterung der Wahrscheinlichkeitsverteilung und damit zu einer insgesamt größeren Bandbreite. Die Höhe der resultierenden Bandbreite ist exemplarisch für einen mittleren Trend einer Region von + 15 % in Tab. 3 angegeben. Für andere mittlere Trends ergeben sich die Wahrscheinlichkeiten durch die Verschiebung des Mittelwertes unter Beibehaltung der Bandbreite.

Änderung Starkregen	Wahrscheinlichkeit
< -5 %	4 %
-5 % bis +5 %	15 %
+5 % bis +25 %	62 %
+25 % bis +35 %	15 %
> 35 %	4 %

Tab. 3: Unsicherheitsbandbreite des Starkregentrends bei einem mittleren Trend von +15 %. Angegeben sind mögliche Starkregenänderungen und die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten

Für die Interpretation des mittleren Starkregentrends bedeutet das, dass sowohl deutlich höhere Zunahmen von bis ca. 35 % möglich sind, als auch Starkregen auf einem zu heute etwa gleichbleibenden Niveau.

Bei der Durchführung von Anpassungsmaßnahmen macht es daher Sinn, das Gefährdungspotential durch Starkregen und die Lebenszeiten der Straßenentwässerungsanlagen zu berücksichtigen. Für sicherheitsrelevante Anlagen, die sich nicht flexibel erweitern lassen, sollten die errechneten mittleren Trends gegebenenfalls um einen Sicherheitszuschlag ergänzt werden. Für Anlagen mit einem niedrigen Gefährdungspotenzial oder kurzen Anpassungszeiten kann hingegen vorerst auf eine Anpassung verzichtet werden.

6 Trockenperioden

6.1 Allgemeines

Lang anhaltende Trockenperioden können die Funktionsfähigkeit von Regenwasserbehandlungsanlagen beeinträchtigen. Dies betrifft zum einen Absetzanlagen mit einer starren Tauchwand, bei welcher der Wasserspiegel infolge Verdunstung unter die Tauchwand absinkt, so dass während Regenereignissen Schwimmstoffe und Leichtflüssigkeiten in das Einleitungsgewässer ausgetragen werden können. Zum anderen sind Bodenfilter von Trockenperioden betroffen, deren Bewuchs und Mikrobiologie auf eine ausreichende Wasserversorgung angewiesen sind.

In diesem Zusammenhang wurde untersucht, ob aktuelle Klimaprojektionen eine Zunahme von langen Trockenperioden in Deutschland zeigen.

6.2 Trockenperioden in Modell- und Beobachtungsdaten

Es existiert keine einheitliche Definition von Trockenperioden. In den Regelwerken zum Bau und Betrieb von Bodenfilteranlagen sind hierzu keine Angaben enthalten.

Im Allgemeinen werden Trockenperioden über die Mindestlänge des trockenen Zeitraumes und die

maximale Niederschlagsmenge pro Tag definiert. MANIAK (2005) schlägt z. B. für humide Gebiete einen Zeitraum von 15 bis 30 Tagen mit einer Niederschlagsmenge von $\leq 0,25$ mm/d vor.

Der Deutsche Wetterdienst definiert einen Trockentag als einen Tag, an welchem bis zu 1 mm Niederschlag gefallen ist (DWD, 2003).

Da für den Bewuchs der Bodenfilteranlagen erfahrungsgemäß lang anhaltende Trockenperioden mit einer Dauer von ca. 4-6 Wochen relevant sind, wurde folgende Definition für Trockenperioden gewählt:

- Zeitraum von mindestens 30 Tagen mit einem Niederschlag pro Tag < 1 mm.

Diese langen Trockenperioden sind seltene Ereignisse, die in Deutschland im Mittel ca. 1-3 mal in 10 Jahren auftreten. Um zu testen, wie sensitiv die Ergebnisse bezüglich der Wahl des Parameters sind, wurden zusätzlich kürzere Trockenperioden von 21 Tagen betrachtet. Anhand der REGNIE-Niederschlagsdaten wurde untersucht, wie groß die zeitliche und räumliche Variabilität der Trockenperioden ist und wie gut die Strukturen in Modell und Beobachtung übereinstimmen. Um die Vergleichbarkeit mit den Klimaprojektionsdaten zu verbessern, wurden die REGNIE-Daten auf das Modellgitter umgerechnet.

Die Anzahl der Trockenperioden in den REGNIE-Daten ist in Bild 12 für Zeiträume von jeweils 10 Jahren zwischen 1961 und 2000 abgebildet. Über den Gesamtzeitraum treten Trockenperioden im Osten Deutschlands etwas häufiger und im Nordwesten etwas seltener auf. Der Vergleich der zehnjährigen Zeiträume zeigt große Unterschiede der räumlichen Verteilung von Dekade zu Dekade. Kürzere Trockenperioden mit einer Länge von mindestens 21 Tagen (Bild 13) treten häufiger auf, aber ebenfalls mit einer hohen räumlich-zeitlichen Variabilität. Aussagen zur räumlichen Verteilung der Trockenperioden sind also nicht sehr robust.

Die Auftretenshäufigkeit von langen Trockenperioden in den CLM Daten im Referenzzeitraum wurde für die Untersuchungsgebiete mit den Beobachtungen verglichen. In den originalen CLM-Daten fällt die Anzahl der Trockenperioden – auch unter Berücksichtigung der Variabilität des Parameters – zu niedrig aus. Nach Durchführung einer Bias-Korrektur (Korrektur der Tagessummen, siehe Kapitel 5.3) ist die Häufigkeit der Trockenperioden mit der aus Beobachtungen vergleichbar. Wie gut die regionale Verteilung aus den Beobachtungen in den Modelldaten wiedergegeben wird, lässt sich aufgrund der hohen Variabilität im Auftreten der Trockenperioden nicht bewerten.

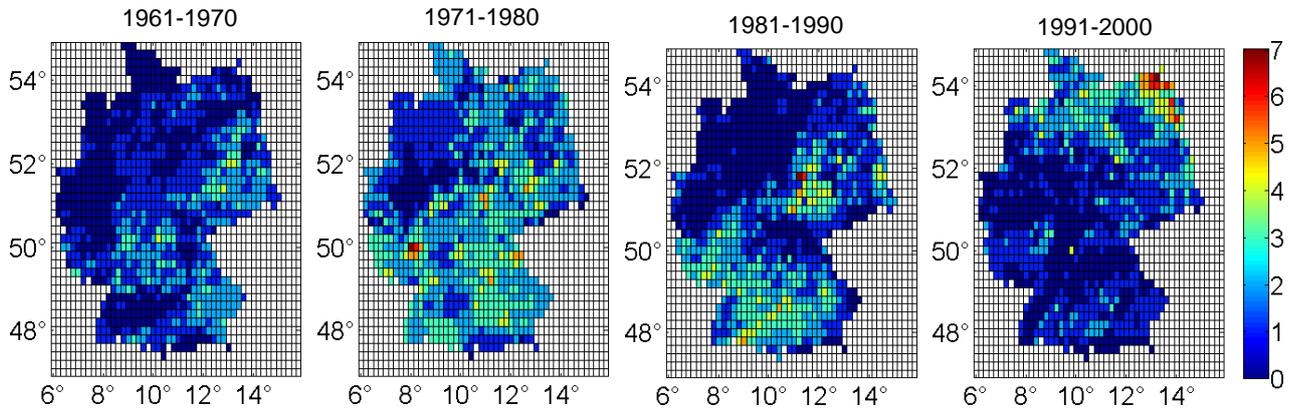


Bild 12: Anzahl Trockenperioden pro 10 Jahre zwischen 1961 und 2000. Trockenperioden mit einer Länge von mind. 30 Tagen, Niederschlag < 1 mm/Tag auf Basis der REGNIE-Daten.

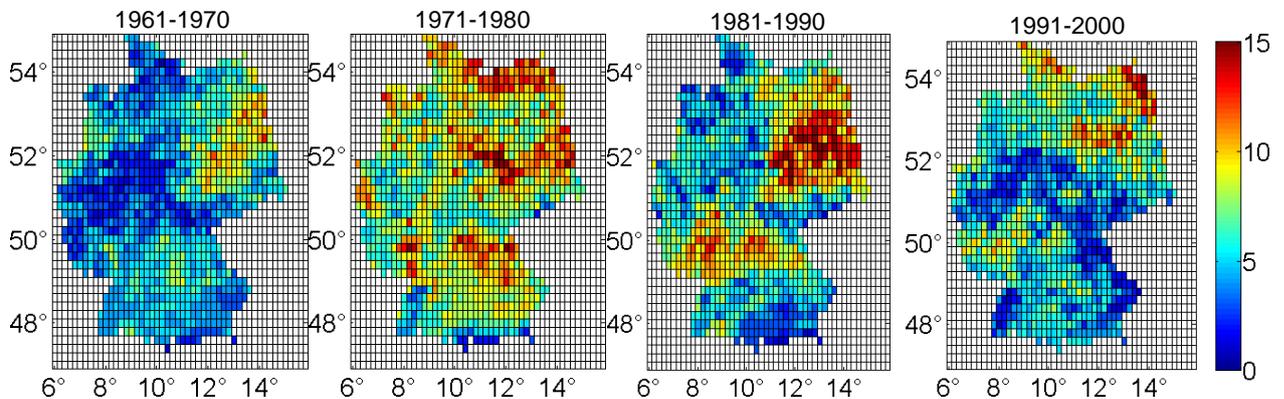


Bild 13: Anzahl Trockenperioden pro 10 Jahre zwischen 1961 und 2000. Trockenperioden mit einer Länge von mind. 21 Tagen, Niederschlag < 1 mm/d auf Basis der REGNIE-Daten.

6.3 Klimaänderungskarten Trockenperioden

Eine Klimaänderungskarte für den Parameter „Anzahl an Trockenperioden mit mind. 30 Tagen, Niederschlag < 1 mm“, wurde vom Deutschen Wetterdienst erstellt. Dafür wurden Projektionen von 23 regionalen Klimamodellen mit dem Emissionsszenario A1B ausgewertet (siehe Anhang 10.2.). In einigen der Modellläufe kommen keine Trockenperioden entsprechend der Definition vor. Es ist anzunehmen, dass in den jeweiligen Modellen der sogenannte „Drizzle“-Effekt überwiegt (Modelleffekt, durch den häufiger Tage mit geringen Niederschlagsmengen simuliert werden, als sie tatsächlich auftreten), so dass eine modellspezifische Bias-Korrektur nötig wäre, um den Parameter abzubilden. Da für die Klimaänderungskarten keine Bias-Korrekturen durchgeführt wurden, wurden lediglich die Modelle berücksichtigt, in denen auch in den originalen Daten längere Trockenperioden auftreten.

Für diese Modelle wurde untersucht, ob es Zunahmen in der Anzahl der Trockenperioden zwischen 1971-2000 und 2021-2050 gibt und die

Robustheit der Änderungen anhand eines dreistufigen Robustheitstests überprüft.

Die Ergebnisse des Robustheitstests sind in Bild 14 dargestellt. Links ist das Ergebnis von Stufe 1 „Test auf Übereinstimmung der Änderungsrichtung“ dargestellt. Die Gitterpunkte sind rot gefärbt, wenn mindestens 66% der 23 untersuchten Klimaprojektionen eine Zunahme der Anzahl an Trockenperioden verzeichnen.

Rechts ist das Ergebnis des dreistufigen Robustheitstests dargestellt. Die Gitterpunkte sind rot eingefärbt, an denen alle drei Stufen des Robustheitstests bestanden wurden. Während an der Mehrzahl der Gitterpunkte in Deutschland der Test auf Übereinstimmung bestanden wurde, wurde der dreistufige Test nur an einzelnen Gitterpunkten bestanden. Nicht bestanden wurde an den meisten Punkten der Test auf statistische Signifikanz (Stufe 2 des Robustheitstests).

Die Ergebnisse der Klimaänderungskarten zeigen eine leichte Tendenz zu einer Zunahme langer Trockenperioden. Die Zunahmen sind allerdings nicht robust und es lassen sich keine Aussagen über mögliche regionale Unterschiede treffen.

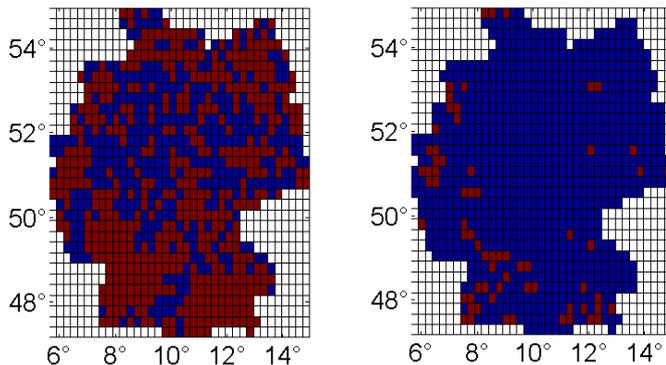


Bild 14: Klimaänderungskarten Trockenheit: Änderungssignal Trockenperioden: 1971-2000 – 2021-2050. Links: Ergebnis Stufe 1 des Robustheitstests: Der Test ist bestanden, wenn in mindestens 66% der Klimaprojektionen die Anzahl der Trockenperioden zunimmt. Rechts: Ergebnis des dreistufigen Robustheitstests. Gitterpunkte, an denen der Test bestanden wurde sind rot gefärbt, die übrigen blau. (DWD, 2013)

6.4 Trendauswertung CLM

Für die Untersuchungsgebiete 2 bis 4 wurde anhand der bias-korrigierten CLM-Daten (vgl. Kapitel 5.3) ausgewertet, ob für die nahe Zukunft (2021-2050) oder ferne Zukunft (2071-2100) ein Anstieg von langen Trockenperioden im Vergleich zum Referenzzeitraum zu verzeichnen ist. In Tab. 4 sind die Ergebnisse der beiden Läufe CLM 1 und CLM 2 aufgeführt. Für jede Region ist die mittlere Anzahl an Trockenperioden pro 30 Jahre angegeben.

Eine Zunahme ist weder für die nahe noch für die ferne Zukunft zu verzeichnen, je nach Zeitraum und CLM-Lauf ergeben sich mal mehr, mal weniger Trockenperioden als im Referenzzeitraum. Die Variabilität im Auftreten der Trockenperioden ist größer als potentielle Trends. Auch bei einer Betrachtung der kürzeren Trockenperioden mit einer Länge von mind. 21 Tagen ist keine Zunahme der Trockenperioden zu erkennen.

Anzahl Trockenperioden / 30 Jahre

Region 2 Basel - Karlsruhe	Anzahl Trockenperioden / 30 Jahre		
	1961-1990	2021-2050	2071-2100
CLM1	3.08	5.42	3.75
CLM2	2.92	1.08	3.08
Region 3 Hamburg - Puttgarden	Anzahl Trockenperioden / 30 Jahre		
	1961-1990	2021-2050	2071-2100
CLM1	6.72	7.66	1.72
CLM2	3.38	3.21	4.10
Region 4 Leipzig	Anzahl Trockenperioden / 30 Jahre		
	1961-1990	2021-2050	2071-2100
CLM1	9.55	10.74	2.45
CLM2	6.05	6.02	3.86

Tab. 4: Anzahl Trockenperioden mit einer Länge von mind. 30 Tagen, Niederschlag < 1.0 mm/d für die Zeiträume 1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100. Mittelwerte in den Regionen 2 bis 4 auf Basis der bias-korrigierten Niederschläge in CLM

6.5 Schlussfolgerung

Aus den Untersuchungen lassen sich keine robusten Trends ableiten. Die Klimaänderungskarten zeigen eine leichte Tendenz hin zu mehr Trockenheiten in der Zukunft. Mögliche regionale Unter-

schiede lassen sich hierbei nicht auflösen. Sowohl aus den Modell- als auch aus den Beobachtungsdaten wird die hohe Variabilität der Trockenperioden erkenntlich. Auf Basis dieser Daten lässt sich für die Zukunft erwarten, dass es regional mal zu mehr, mal zu weniger langen Trockenperioden

kommt, als in den vergangenen Dekaden. In Bezug auf die eingangs genannten Behandlungsanlagen besteht demnach kein Anpassungsbedarf. Der Gefahr eines Austrags von Leichtflüssigkeiten kann grundsätzlich durch die Vorgabe einer größeren Eintauchtiefe der Tauchwand bzw. durch Verwendung schwimmender Tauchwände begegnet werden. Bodenfilteranlagen müssen bei der Gefahr von Trockenstress ggf. bewässert werden.

7 Auswirkungen auf die Straßenentwässerung

7.1 Methoden

Anhand der mit dem Downscalingverfahren erzeugten Regenreihen für die vier Modellregionen und der daraus abgeleiteten Starkregenstatistiken und Trends werden die Auswirkungen auf die Straßenentwässerung untersucht.

Im ersten Schritt wird dargestellt, wie sich die Klimaänderungen auf die Dimensionierung von Straßenentwässerungseinrichtungen auswirken könnten, wenn die mittlere projizierte Starkregenzunahme in den Dimensionierungsansätzen nach RAS-Ew bzw. RiStWag berücksichtigt würden. Hierzu werden die Bemessungsregenspenden erhöht, um die Änderung der Anlagengröße für unterschiedliche Elemente der Straßenentwässerung zu errechnen.

Im zweiten Schritt wird im Detail untersucht, wie sich die mittlere projizierte Starkregenzunahme auf die Auslastung und Funktionsfähigkeit von Entwässerungseinrichtungen auswirkt, wenn die Bemessungsregenspenden nicht angepasst werden. In diesem Zusammenhang wird überprüft, welche Sicherheiten in den gängigen Dimensionierungsansätzen enthalten sind und inwieweit diese die Abflussänderungen aufgrund der projizierten Starkregenzunahme abpuffern können.

Für fünf fiktive, nach RAS-Ew bemessene und drei reale Entwässerungssituationen werden detaillierte hydraulische Berechnungen durchgeführt.

7.1.1 Hydrodynamische Berechnungen

Auslastung, Ein- und Überstauverhalten der Ableitungselemente (Kanal, Mulde) werden für die untersuchten CLM-Läufe 1 und 2 für die Referenzperiode 1961-1990, die nahe Zukunft 2021-2050 und die ferne Zukunft 2071-2100 mittels eines hydrodynamischen Berechnungsmodells mit dem Programm Hystem-Extran (ITWH, 2010) berechnet. Hierbei werden gegenüber der einfachen Berechnung mit Regenspenden die unterschiedliche Regenintensität im Verlauf eines Niederschlagsereignisses, die Abflussbildung und Konzentration

und der Abflusstransport mit Wellenverformung und Druckabfluss berücksichtigt.

Die Berechnungen werden entsprechend der Empfehlung des DWA-A118 mit Modellregen der Euler-Verteilung Typ II durchgeführt, die sowohl die für kleine Gebiete maßgeblichen hohen als auch die Spitzenwerte längerer Dauern enthält. Die Modellregen werden auf Basis der Starkregenstatistiken für jede Region erstellt.

Für die Regionen 2 bis 4 werden direkt die im Projekt ermittelten Statistiken der Medianwerte verwendet. Für die Region 1, in welcher aufgrund der Verwendung von Radardaten im Projekt dynamisch deutlich geringere statistische Regenspenden ermittelt wurden, werden für die Berechnung der Referenz die KOSTRA-Daten und für die Zukunft die KOSTRA-Daten mit Berücksichtigung der errechneten mittleren Trends verwendet. Je Region werden Berechnungen für zwei CLM-Realisierungen, drei Zeiträume und fünf Wiederkehrzeiten durchgeführt.

Die Berechnung der Abflussbildung basiert auf dem Berechnungsansatz der Grenzwertmethode (PAULSEN, 1987, VERWORN & KENTER, 1993). Für die Abflussbildung von den Straßenflächen werden folgende Parameter gewählt:

Parameter	Wert
Benetzungsverluste ¹⁾ v_b [mm]	0,90
Muldenverluste ¹⁾ v_m [mm]	0,40
Anfangsabflussbeiwert Ψ_o [-]	0,30
Endabflussbeiwert Ψ_e [-]	0,95

1) Parameter Gussasphalt nach ZIOR (1987)

Tab. 5: Abflussbildungsparameter Straßenflächen

Benetzungs- und Muldenverluste werden in Anlehnung an ZIOR (1987) angesetzt. Der Endabflussbeiwert wird so angepasst, dass sich für ein mittleres Starkregenereignis ein mittlerer Abflussbeiwert von $\Psi_m=0,9$ einstellt, wie er in der Bemessung nach RAS-Ew angesetzt wird.

Für die Berechnung der Abflussbildung auf unbefestigten Flächen wird ein modifizierter Ansatz des Infiltrationsmodells von Horton (ITWH, 2010) verwendet. Für die Berechnungen werden die im Modell implementierten Standardparameter für die Bodenart „Lehm/Löss“ gewählt.

Die Parameter für die Berechnung von Abflusskonzentration und Transport werden vom Programm Hystem-Extran anhand der Flächen und Gefälleverhältnisse je Entwässerungselement automatisiert ermittelt. Zu Modelldetails sei auf die Programmbeschreibung (ITWH, 2010) verwiesen.

7.1.2 Hydrologische Langzeitsimulation

Zum Nachweis von Anlagen der Regenwasserrückhaltung und Behandlung werden hydrologische Langzeitsimulationen mit dem Programm erwin (IFS, 2002) durchgeführt.

Durch die Langzeitsimulation werden die Abfolge von Niederschlagsereignissen und die mögliche Überlagerung von Füll- und Entleerungsvorgängen in Rückhalteräumen rechnerisch erfasst. Die Abflussbildung von befestigten Flächen wird ebenfalls nach der im Kapitel 7.1.1 genannten erweiterten Grenzwertmethode mit den in Tab. 5 angegebenen Parametern berechnet. Die Berechnung der Abflusskonzentration erfolgt ebenfalls nach dem Modell der linearen Speicherkaskade. Speicheranzahl und Speicherkonstante werden für die einzelnen Beispiele abhängig von der längsten Fließzeit im Entwässerungssystem gewählt.

Für die Durchführung der Simulationen werden die durch das Downscaling-Verfahren erstellten Zeitreihen verwendet. Für jede Region stehen je CLM-Lauf 10 Zeitreihen unterschiedlicher Downscaling-Realisierungen zur Verfügung und es werden jeweils 10 Simulationen durchgeführt.

Die statistische Auswertung für Einstauvolumina bzw. Zuflüsse erfolgt nach dem im DWA-Arbeitsblatt 117 (DWA, 2013) beschriebenen Verfahren mit der Plotting-Formel:

$$T_n = \frac{L+1}{k} * \frac{M}{L}$$

mit	T_n	Wiederkehrzeit [a]
	M	Simulationszeitraum [a]
	L	Anzahl der Werte der part. Serie
	K	Rang des Elements der part. Serie

Nach Beseitigung der Ausreißer ergibt sich eine annähernd lineare Beziehung zwischen dem Logarithmus der Wiederkehrzeit und dem Einstauvolumen (Bild 15).

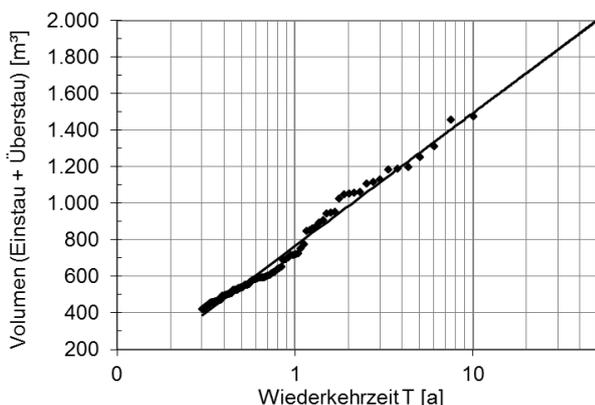


Bild 15: Beispiel für die Auswertung der partiellen Serie

Zum Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Regionen untereinander werden jeweils die Mittelwerte aus den berechneten Volumina aller 10 Downscaling-Zeitreihen gebildet.

7.2 Planungshorizont von Entwässerungseinrichtungen

Bei möglichen Anpassungen der Bemessungspraxis von Straßenentwässerungseinrichtungen ist deren durchschnittliche Nutzungsdauer zu beachten. Die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser gibt für Kostenvergleichsrechnungen folgende durchschnittliche Nutzungsdauern an (LAWA, 2012):

- Kanal und Schächte: 50-80 Jahre
- Becken: 50-70 Jahre
- Versickerung: 20-30 Jahre

Für einige Anlagen, wie z. B. Rückhaltungen in Erdbauweise ist abhängig von den örtlichen Platz- und Gefälleverhältnissen gegebenenfalls während der Nutzungsdauer eine Erweiterung möglich.

Im Falle von Kanälen und Betonbecken stellt die oben angegebene Nutzungsdauer den Planungshorizont dar. Das bedeutet, dass die Nutzungsdauer über den untersuchten Zeitraum „nahe Zukunft“ (2021-2050) hinausgeht und daher auch die Klimaprojektionen für die ferne Zukunft (2071-2100) eine Rolle spielen.

7.3 Mögliche Auswirkungen auf die Dimensionierung

Für die Bemessung von Ableitungselementen der Straßenentwässerung wird häufig die Regenspende für ein 15-Minuten Ereignis verwendet, mit einer statistischen Wiederkehrhäufigkeit von 1 Mal pro Jahr. Die im Projekt (bzw. im Projekt dynaklim) berechneten Starkregentrends für diesen Wert sind in der Tab. 6 für die vier untersuchten Regionen zusammengestellt.

Für die Regionen 1 bis 3, die anhand der Klimakarten als Gebiete mit einer signifikanten Starkregenzunahme ausgewählt wurden, ergibt sich aus den downgescalten Regenreihen ein mittlerer Trend von 8 bis 16 % für die nahe Zukunft bzw. von 9 bis 23 % für die ferne Zukunft. Für die Region 4 „Großbereich Leipzig“, die innerhalb Deutschlands als Beispielregion für lange Trockenzeiten ausgewählt wurde, ergibt sich aufgrund der Klimaprojektionen keine bzw. nur eine geringe Starkregenzunahme.

Region	2021-2050 nahe Zukunft		2071-2100 ferne Zukunft	
	CLM1	CLM2	CLM1	CLM2
1 Duisburg-Dortmund-Bönen	16%	12%	13%	9%
2 Basel – Karlsruhe	11%	9%	16%	23%
3 Hamburg – Puttgarden	8%	9%	19%	14%
4 Großbereich Leipzig	-6%	4%	3%	5%

Tab. 6: Mittlere Änderung der Regenspenden der Dauer 15 min und Wiederkehrzeit 1 a (Ergebnisse Region 1 aus dem Projekt dynaklim)

In den Bemessungsansätzen der RAS-Ew wird vereinfachend davon ausgegangen, dass der Bemessungsabfluss linear von der Regenspende abhängig ist. Geht man also davon aus, dass sich die Abflüsse im gleichen Maße erhöhen wie die Regenspenden, so hätte dies die im Folgenden genannten Auswirkungen auf die Größe der Entwässerungseinrichtungen.

1. Bordrinne

Bei Zunahme der Abflüsse in der zuvor genannten Größenordnung müssten entweder die Abstände zwischen den Straßenabläufen verringert oder die Abflussleistung der Rinnen erhöht werden. Bordrinnen werden nach RAS-Ew mit folgender Formel berechnet:

$$Q = k_{St} * h^{8/3} \sqrt{I} * \frac{0,315}{q}$$

mit Q Durchfluss [m³/s]
 k_{St} Rauheitswert [m^{1/3}/s]
h Wassertiefe am Straßenbord
I Rinnenlängsneigung [m/m]
q Gerinnequerneigung [m/m]

Aufgrund der Rinnengeometrie nehmen die Wassertiefe und somit die Wasserspiegelbreite des Abflusses in der Rinne bei Erhöhung des Abflusses in deutlich geringerem Maße zu als der Abfluss selbst.

Bei Zunahme des Abflusses um 8 % bis 23 % erhöht sich die Wasserspiegelbreite demnach nur um 2,9 % bis 8,1 %, bei einer Rinne von 50 cm Breite also nur um 2 bis 4 cm.

2. Kanal

Im Bild 16 ist dargestellt, wie sich die Abflussleistung eines Kanalrohres bei Wahl des nächstgrößeren Durchmessers erhöht.

Beim Übergang des Rohrdurchmessers von DN200 auf DN250 erhöht sich der Vollfüllabfluss bei gleichbleibendem Gefälle beispielsweise um

ca. 80 %, beim Übergang von DN900 auf DN1000 um ca. 30 %. Das bedeutet, dass bei einer Zunahme der Abflüsse in der zuvor genannten Größenordnung von 8-23 % maximal eine Durchmesserklasse höher gewählt werden müsste.

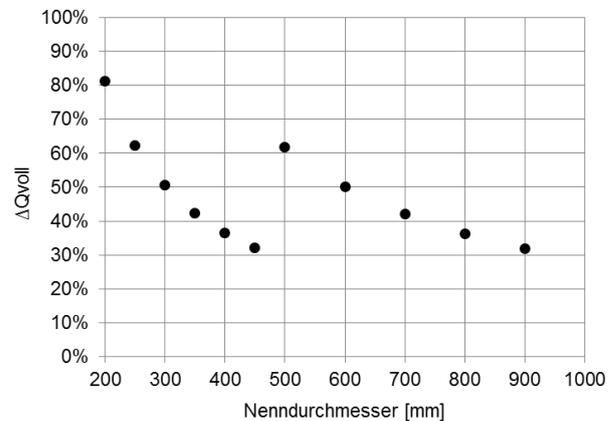


Bild 16: Erhöhung der Abflussleistung eines Kreisprofils bei Wahl des nächstgrößeren Durchmessers

3. Rasenmulde / Straßenseitengraben

Für eine Berücksichtigung der erhöhten Bemessungsabflüsse bei der Bemessung von Mulden und Gräben im Straßenseitenbereich ist deren Vollfülleistung entsprechend zu erhöhen. Hierfür kommen grundsätzlich Querschnittserweiterungen, Gefälleoptimierung oder eine Verringerung der Profilrauigkeit in Frage. In der Regel sind die Profile allerdings großzügig ausgelegt und mit einem Freibord versehen, so dass in der Praxis vermutlich nur wenige Profiländerungen erforderlich sein würden.

4. Absetzbecken / Regenklärbecken

Bei Absetzbecken, die auf den 1-jährlichen Bemessungsregen ausgelegt sind, würde sich die Abflusserhöhung direkt auf die erforderliche Beckenoberfläche auswirken.

Bei Regenklärbecken, die auf eine kritische Regenspende, z. B. 15 l/s/ha, ausgelegt werden, würde sich für die Bemessung keine Änderung ergeben. Die Reinigungsleistung der Anlage würde jedoch durch die erhöhte Starkregenbelastung herabgesetzt, da ein geringerer Anteil des Niederschlagsabflusses behandelt würde.

5. Regenrückhaltebecken

Für die Bemessung von Regenrückhaltebecken sind gegenüber den Ableitungselementen die Regenspenden größerer Dauerstufen (Größenordnung 1 bis 12 Stunden) für Wiederkehrzeiten größer/gleich 2 Jahre maßgeblich. In Tab. 7 sind exemplarisch die mittleren berechneten Trends für eine statistische Regenspende der Dauer 3 Stunden für ein Wiederkehrintervall von 2 Jahren zu-

sammengestellt. Es zeigt sich eine ähnliche Tendenz wie beim 15-Minuten-Regen (vgl. Tab. 6).

Für die Regionen 1 bis 3 ergibt sich eine projizierte Zunahme der Niederschläge in der Größenordnung 10 % bis 17 % für die nahe Zukunft und von 8 % bis 28 % für die ferne Zukunft.

Das Stauvolumen eines Regenrückhaltebeckens ergibt sich als maximale Differenz aus der zufließenden Niederschlagsmenge abzüglich des weitergeleiteten Drosselabflusses. Es ist demnach abhängig vom Drosselabfluss, wie stark sich die projizierte Zunahme des Niederschlags auf das Stauvolumen des Beckens auswirkt. Dieser Einfluss ist im Bild 17 beispielhaft dargestellt.

Bei der Bemessung mit der geringeren Drosselabflussspende von 5 l/s/ha wirkt sich die Zunahme des Niederschlags weniger stark aus als bei einer Drosselabflussspende von 10 l/s/ha. Insgesamt wird die prozentuale Zunahme des Stauvolumens immer größer ausfallen als die Zunahme der Bemessungsregenspenden. So wird z. B. bei einer maßgeblichen Regenspende von 20 l/s/ha und einer Drosselabflussspende von 5 l/s/ha eine Zunahme der Regenspende um 20 % zu einer Zunahme des erforderlichen Stauvolumens um 27 % führen.

Region	2021-2050 nahe Zukunft		2071-2100 ferne Zukunft	
	CLM1	CLM2	CLM1	CLM2
1 Duisburg-Dortmund-Bönen	17%	10%	15%	8%
2 Basel – Karlsruhe	15%	10%	16%	24%
3 Hamburg – Puttgarden	12%	11%	28%	23%
4 Bereich Leipzig	-5%	9%	6%	2%

Tab. 7: Mittlere Änderung der Regenspenden der Dauer 3 h und Wiederkehrzeit 2 a (Region 1 aus dynamik)

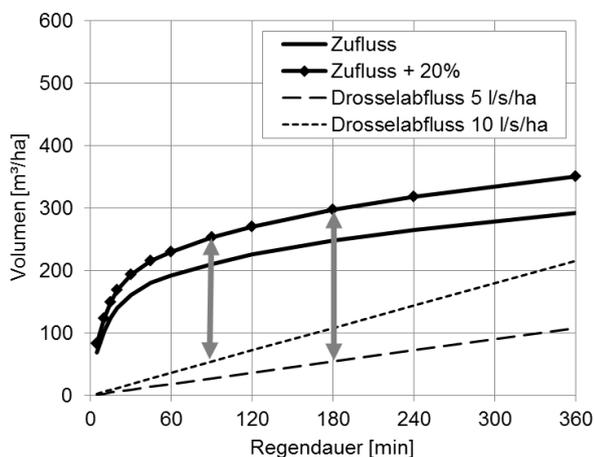


Bild 17: Bemessung des Beckenvolumens bei unterschiedlichen Drosselabflüssen

7.4 Berechnung typischer Entwässerungseinrichtungen

Es werden fünf charakteristische fiktive Entwässerungseinrichtungen untersucht, die jeweils für typische Gebietsgrößen und Gefällesituationen mit den für die Referenzperiode ermittelten Regenspenden der einzelnen Modellregionen nach RAS-Ew bemessen werden.

Durch detaillierte hydrologische bzw. hydrodynamische Niederschlag-Abfluss-Berechnungen werden die Leistungsfähigkeit, Ein- und Überstauhäufigkeit der Anlagen für den Referenzzeitraum und die nahe und ferne Zukunft nachgewiesen.

Es werden folgende fiktive Beispiele untersucht:

1. System Bordrinne & Straßenablauf
2. Kanal
3. Rasenmulde
4. Regenrückhaltebecken
5. Abfluss aus Außengebieten

Die Beispiele 1 bis 4 repräsentieren den Weg der Straßenabflüsse von der Anfallstelle bis zur Einleitung in ein Gewässer. Als 5. Beispiel wird der Abfluss aus Außengebieten gewählt, der insbesondere bei der Auslegung von Kreuzungsbauwerken zu berücksichtigen ist.

Die Details der gewählten Beispiele, deren Bemessung und Nachweisrechnung werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

7.4.1 System Bordrinne & Straßenablauf

Als erstes Beispiel wird die hydraulische Leistungsfähigkeit des Systems „Bordrinne & Straßenablauf“ untersucht. Die hydraulische Leistungsfähigkeit des Systems wird zum einen durch den Abfluss in der Rinne bestimmt, der im Wesentlichen vom Längsgefälle und vom Quergefälle abhängt. Zum anderen wird sie durch das Schluckvermögen der Straßenabläufe beeinflusst, das vom Ablauftyp und vom Längsgefälle abhängt.

Während bei geringem Gefälle die Rinne das begrenzend Element ist, ist es bei großem Gefälle der Straßenablauf. Aus diesem Grund werden im Beispiel zwei Varianten untersucht:

- a) Längsneigung $s=6\%$; Querneigung $q=6\%$; Straßenbreite 10 m; Ablauf 500 x 500; Ablaufabstand 62 m
- b) Längsneigung $s=0,5\%$; Querneigung $q=3\%$; Straßenbreite 5 m; Ablauf 500 x 500; Ablaufabstand 14 m

Die Rinnen werden für die Häufigkeit $n=1/a$ ($T=1$ a) ausgelegt. Die Rauigkeit wird mit $k_{St} = 70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ angesetzt.

Der Sicherheitsfaktor κ wird mit 1 angesetzt. Der in den RAS-Ew empfohlene Sicherheitsfaktor von 1,5 zur Berücksichtigung einer möglichen Einengung des Abflussquerschnitts durch Ablagerungen wird nicht angesetzt, da dieser Aspekt im Rahmen der vorliegenden Studie nicht untersucht wird.

Der Nachweis des Systems erfolgt über eine Tabellenrechnung unter Berücksichtigung der Ablaufleistung, abhängig vom Zufluss und der sich einstellenden Gerinnegrundlast unterhalb des Straßenablaufs. Für das für $n=1/a$ ($T=1$ a) und den Referenzzeitraum bemessene System wird mit den statistischen Regenspenden unterschiedlicher Häufigkeiten der Läufe CLM1/2 für die nahe und ferne Zukunft die sich einstellende Wasserspiegelbreite berechnet. Zudem werden auch Wiederkehrzeiten bis $T=50$ a mit einbezogen, die jedoch nur in Sonderfällen (Trogstrecke mit Straßentiefpunkt u. a.) relevant sind.

Im Bild 18 sind die Ergebnisse exemplarisch für die Region 2 und die Variante b dargestellt. Für die Bordrinne wurde in der Bemessung eine Breite von 0,5 m gewählt. Bei zunehmendem Abfluss erhöht sich die Wasserspiegelbreite, allerdings – wie bereits im Kapitel 7.3 erläutert – in deutlich geringem Maße als der Abfluss. Selbst beim 50-jährlichen Ereignis liegt die Wasserspiegelbreite noch unterhalb von 0,8 m.

Die Tabellen Tab. 8 und Tab. 9 geben einen Überblick über die Ergebnisse für die vier Regionen jeweils für die Varianten a und b.

Für die nahe bzw. ferne Zukunft erhöht sich die Wasserspiegelbreite bei der 1-jährlichen Regenspende demnach um maximal 3 cm (6 %) bzw. 4 cm (8 %).

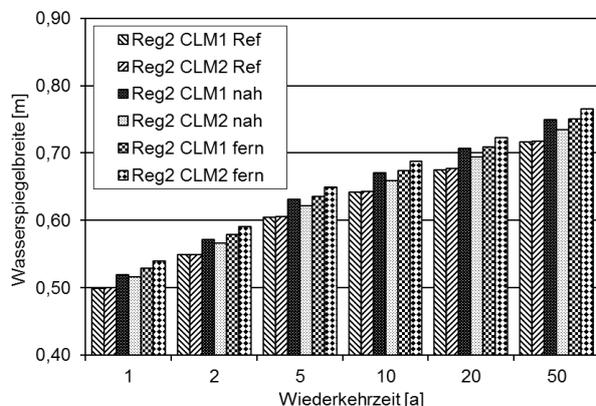


Bild 18: Zunahme der Wasserspiegelbreite in der Bordrinne, Variante b ($s=0,5\%$; $q=3,0\%$); Rinnenbreite 0,5 m; Region 2

Zeitraum	T [a]	Reg. 1	Reg. 2	Reg. 3	Reg. 4
		Duisburg - Dortmund [m]	Basel – Karlsruhe [m]	Hamburg – Puttgarden [m]	Leipzig [m]
Referenzperiode	1	0,46	0,46	0,46	0,46
	10	0,59	0,62	0,63	0,62
	Mittelwert CLM1/2	0,66	0,71	0,72	0,71
nahe Zukunft	1	0,49	0,48	0,46	0,46
	10	0,62	0,65	0,63	0,62
	Mittelwert CLM1/2	0,69	0,73	0,72	0,71
ferne Zukunft	1	0,49	0,50	0,50	0,47
	10	0,61	0,67	0,68	0,64
	Mittelwert CLM1/2	0,68	0,75	0,78	0,72

Tab. 8: Wasserspiegelbreiten Bordrinne, Variante a ($s=6,0\%$; $q=6,0\%$)

Zeitraum	T [a]	Reg. 1	Reg. 2	Reg. 3	Reg. 4
		Duisburg - Dortmund [m]	Basel – Karlsruhe [m]	Hamburg – Puttgarden [m]	Leipzig [m]
Referenzperiode	1	0,50	0,50	0,50	0,50
	10	0,61	0,64	0,65	0,64
	Mittelwert CLM1/2	0,67	0,72	0,73	0,72
nahe Zukunft	1	0,52	0,52	0,50	0,50
	10	0,64	0,67	0,65	0,64
	Mittelwert CLM1/2	0,70	0,74	0,73	0,72
ferne Zukunft	1	0,52	0,53	0,53	0,50
	10	0,63	0,68	0,69	0,66
	Mittelwert CLM1/2	0,69	0,76	0,78	0,73

Tab. 9: Wasserspiegelbreiten Bordrinne, Variante b ($s=0,5\%$; $q=3,0\%$)

Auch für die anderen Wiederkehrzeiten liegen die Änderungen der Wasserspiegelbreite für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode nur im Zentimeterbereich.

Zusammenfassung & Folgerungen

Aus den Berechnungen wird deutlich, dass die Unterschiede in der Wasserspiegelbreite, die sich aufgrund der Starkregenzunahme ergeben, sehr gering sind. Eine Erhöhung der Wasserspiegelbreite im Zentimeterbereich ist in Bezug auf eine mögliche Beeinträchtigung des Verkehrs als unkritisch zu bewerten. Zudem werden die Rinnen in der Praxis mit einem zusätzlichen Sicherheitsfaktor von 1,5 ausgelegt, der hier nicht angesetzt wurde.

Eine Anpassung der Bemessungsregenspenden für Bordrinnen ist demnach nicht erforderlich.

7.4.2 Kanal

Es wird folgendes Beispiel gewählt:

- 1 km Kanalnetz, unterteilt in 20 Haltungen
- Entwässerungsfläche 1,5 ha
- Längsgefälle 0,5 %

Die Streckenentwässerung wird je Region mit den statistischen Regenspenden der Referenzperiode bemessen. Hierbei werden 2 Fälle unterschieden:

- Normalfall:
Bemessungshäufigkeit $n=1/a$ ($T=1$ a)
- Extremfall (z. B. Trogstrecke):
Bemessungshäufigkeit $n = 0,1/a$ ($T=10$ a)

Das Kanalnetz wird mit Modellregen unterschiedlicher Häufigkeiten für die CLM-Realisierungen 1 und 2 und die drei Zeiträume (Referenzperiode, nahe und ferne Zukunft) belastet.

In den RAS-Ew werden bezüglich der Häufigkeit nur Aussagen zur Bemessungsregenspende getroffen, geforderte Überstau- und Überflutungshäufigkeiten sind nicht angegeben. Als Orientierungswerte liegen jedoch die Empfehlungen des DWA-Arbeitsblattes 118 (DWA, 2006a) vor:

Häufigkeit (1 mal in n Jahren)	Ländliche Gebiete	Unterirdische Verkehrsanlagen, Unterführungen
Bemessungsregen	1 in 1	1 in 10
Überstau	1 in 2	1 in 10 bzw. 50
Überflutung	1 in 10	1 in 50

Tab. 10: Empfohlene Häufigkeiten nach DWA-Arbeitsblatt 118 (DWA, 2006a)

a) Ergebnisse Normalfall

Im Folgenden sind die Ergebnisse für die Region 2 „Basel-Karlsruhe“ für den Normalfall dargestellt.

Bild 19 zeigt das Gesamtüberstauvolumen, das bei Nachrechnung des Kanalnetzes mit Modellregen für die Referenzperiode („Ref“), die nahe („nah“) und die ferne Zukunft („fern“) auftritt. Bild 20 zeigt das maximale Überstauvolumen, das jeweils an einem einzelnen Schacht berechnet wurde.

Bei der maßgeblichen Überstauhäufigkeit (1 mal in 2 Jahren) gemäß DWA (vgl. Tab. 10) tritt mit Ansatz der mittleren projizierten Starkregenzunahme weder für die Referenzperiode noch für die Zukunft ein Überstau auf.

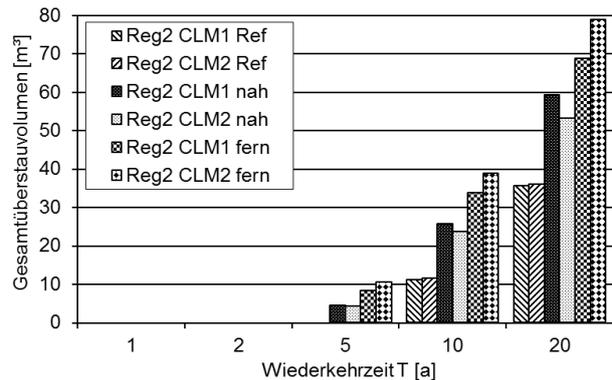


Bild 19: Gesamtüberstauvolumen auf dem 1 km langen Streckenabschnitt, Normalfall, Region 2

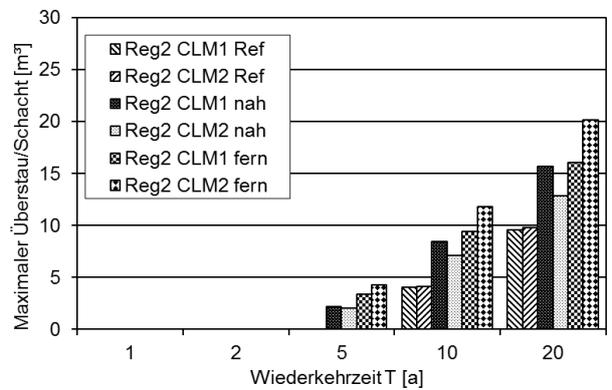


Bild 20: Maximaler Überstau an einem Schacht, Normalfall, Region 2

Beim 10-jährlichen Regenereignis tritt in den Berechnungen ein Überstau bis maximal 12 m³ pro Schacht auf (Lauf CLM2, ferne Zukunft). Legt man dieses Volumen auf den 50 m langen an eine Kanalhaltung angeschlossenen Straßenabschnitt um, so ergibt sich bei einer angesetzten Querneigung von 3 % ein Einstau bis zu einer Höhe von 0,12 m (~ Bordhöhe) und eine Wasserspiegelbreite von 4 m.

Die mögliche Schadwirkung eines derartigen Überstaus ist im konkreten Fall aufgrund der örtlichen Situation zu beurteilen. Bei einem derart seltenen und heftigen Starkregenereignis erscheint es tolerierbar, dass sich Wasser bis in den Fahrbereich anstaut. Aufgrund der hohen Niederschlagsintensität und der damit verbundenen Sichtverminderung und Aquaplaning-Gefahr wird sich der Verkehr ohnehin nur im Schrittempo fortbewegen.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse für alle vier Regionen ist in Tab. 11 und Tab. 12 enthalten. Es wird jeweils der Mittelwert aus den Ergebnissen für das Gesamtüberstauvolumen auf dem Streckenabschnitt und das maximale Überstauvolumen an einem Schacht für die CLM-Läufe 1 und 2 dargestellt.

Zeitraum	T [a]	Reg. 1	Reg. 2	Reg. 3	Reg. 4
		Duisburg - Dortmund [m ³]	Basel – Karlsruhe [m ³]	Hamburg – Puttgarden [m ³]	Leipzig [m ³]
Referenzperiode Mittelwert CLM1/2	1				
	2				
	5				0,7
	10	5,9	11,3	4,8	9,9
	20	18,6	35,7	16,0	29,9
nahe Zukunft Mittelwert CLM1/2	1				
	2				
	5	3,1	4,3	0,9	0,4
	10	15,5	24,6	8,5	9,1
	20	37,9	56,2	23,6	28,8
ferne Zukunft Mittelwert CLM1/2	1				
	2				
	5	2,2	9,4	4,3	2,0
	10	12,6	36,3	17,6	15,7
	20	32,5	73,8	41,9	43,8

Tab. 11: Gesamtüberstauvolumen Kanalnetz, Regionen 1-4, Normalfall, Mittelwerte aus CLM1/2

Zeitraum	T [a]	Reg. 1	Reg. 2	Reg. 3	Reg. 4
		Duisburg - Dortmund [m ³]	Basel - Karlsruhe [m ³]	Hamburg - Puttgarden [m ³]	Leipzig [m ³]
Referenzperiode Mittelwert CLM1/2	1				
	2				
	5				0,3
	10	2,1	4,1	2,1	4,9
	20	6,2	9,7	6,4	13,2
nahe Zukunft Mittelwert CLM1/2	1				
	2				
	5	1,2	2,1	0,7	0,2
	10	5,1	7,8	3,1	4,7
	20	11,1	14,3	8,9	13,1
ferne Zukunft Mittelwert CLM1/2	1				
	2				
	5	0,9	3,8	2,0	0,9
	10	4,3	10,6	6,9	8,1
	20	9,7	18,1	13,1	17,4

Tab. 12: Maximaler Überstau an einem Schacht, Regionen 1-4, Normalfall, CLM1/2

Aus den Tabellen ist ersichtlich, dass die Überstauvolumina der Regionen 1, 3 und 4 insgesamt geringer ausfallen als in Region 2. Damit sind die für die Region 2 beschriebenen Ergebnisse auf die Regionen 1, 3 und 4 „auf der sicheren Seite“ übertragbar, wobei die dort auftretenden Überstauvolumina geringer und somit weniger schädlich sind als in Region 2.

b) Ergebnisse Extremfall

In besonders sensiblen Bereichen, wie beispielsweise Trogstrecken mit Tiefpunkt, wird die Straßenentwässerung auf Starkregenereignisse bemessen, die deutlich seltener als 1 mal pro Jahr auftreten. Auch für einen solchen Fall werden die Auswirkungen der projizierten Starkregenzunahmen untersucht.

Das Beispiel b) entspricht weitgehend dem Beispiel a). Die Rohrdurchmesser werden jedoch für ein 10-jährliches Ereignis dimensioniert und das Kanalnetz für noch seltenerere Ereignisse (bis zur Wiederkehrzeit T=50 a) nachgerechnet.

Im Bild 21 sind die errechneten Gesamtüberstauvolumina für die Region 2 Basel-Karlsruhe dargestellt. Die Tab. 13 fasst die Ergebnisse für alle Regionen als Mittelwert der CLM-Läufe 1 und 2 zusammen. Erst beim 50-jährlichen Ereignis wird für die Zukunft ein geringer Überstau ausgewiesen, für die Referenzperiode ist das 50-jährliche Ereignis, mit Ausnahme von Region 4, überstaufrei.

Die berechneten Volumina sind insgesamt gering (< 10 m³) und hinsichtlich ihrer Schadwirkung in den meisten Fällen tolerierbar, wobei im Einzelfall eine örtliche Prüfung durchzuführen ist. Bei korrekter Dimensionierung des Kanalnetzes in sensiblen Bereichen wie beispielsweise Trogstrecken (Extremfall) – und insbesondere unterhalb der sensiblen Bereiche – wird demnach auch bei Berücksichtigung der Klimaprojektionen nur äußerst selten ein Überstau auftreten.

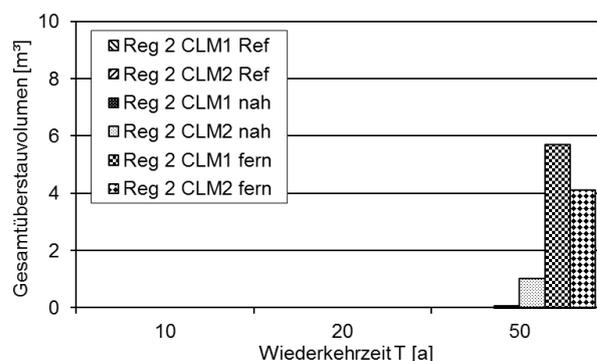


Bild 21: Gesamtüberstauvolumen Kanalnetz auf dem 1 km-Streckenabschnitt, Extremfall, Region 2

Zeitraum	T [a]	Reg. 1	Reg. 2	Reg. 3	Reg. 4
		Duisburg – Dortmund [m ³]	Basel – Karlsruhe [m ³]	Hamburg – Puttgarden [m ³]	Leipzig [m ³]
Referenz- periode	10				
	20				
	Mittelwert CLM1/2				0,7
nahe Zukunft	10				
	20				
	Mittelwert CLM1/2	4,4	0,6		0,4
ferne Zukunft	10				
	20				
	Mittelwert CLM1/2	3,7	4,9	0,2	2,0

Tab. 13: Gesamtüberstauvolumen Kanalnetz, Regionen 1-4, Extremfall, Mittelwerte aus CLM1/2

Zusammenfassung & Folgerungen

Die Kanäle einer Streckenentwässerung werden abhängig vom örtlichen Schadenspotenzial auf eine definierte Regenhäufigkeit ausgelegt.

Im Beispiel wurde eine Streckenentwässerung einmal für den Normalfall ($n = 1/a$) und einmal für den Extremfall ($n = 0,1/a$) dimensioniert und anschließend jeweils mit Modellregen geringerer Häufigkeiten nachgerechnet. Dabei wurden jeweils die Regendaten der Referenzperiode sowie die aus den Klimaprojektionen der Modellläufe CLM 1 und CLM 2 abgeleiteten Regendaten für die nahe und die ferne Zukunft verwendet.

Bei hydrodynamischer Nachrechnung des für den Normalfall ($n=1/a$) bemessenen Kanalnetzes tritt beim 2-jährlichen Regenereignis weder für die Referenzperiode noch für die Zukunft ein Überstau auf. Der Überstau nachweis für die im DWA-A 118 empfohlene Häufigkeit ist demnach für alle Regionen auch unter Berücksichtigung der projizierten Starkregenzunahme erbracht.

Beim 10-jährlichen Ereignis, das im Normalfall nach DWA-A118 für die Überflutungsprüfung empfohlen wird, kommt es sowohl für die Referenzperiode als auch für die Zukunft zu Überstauungen bis zu einem Maximum von 12 m³/Schacht (Bild 20, Region 2). Die mögliche Schädigung der Überflutung ist im Einzelfall zu beurteilen.

Bei hydrodynamischer Nachrechnung des für den Extremfall ($n=0,1/a$) bemessenen Netzes treten bei dem für die Überflutungsprüfung maßgeblichen 50-jährlichen Ereignis im Referenzzeitraum keine und in der Zukunft nur geringe Überstauungen (< 5 m³) auf. Die Überstauungen sind angesichts der kleinen Volumina hinsichtlich ihrer möglichen Schädigung im Regelfall tolerierbar.

Insgesamt erfüllen die mit den gegenwärtigen Bemessungsregenspenden dimensionierten Kanäle auch bei Berücksichtigung der projizierten Starkregenzunahme die im DWA-A 118 empfohlenen Überstauhäufigkeiten. Die im Bemessungsverfahren enthaltenen Sicherheiten (z. B. Berechnung ohne Wellenverformung und Druckabfluss) sind demnach ausreichend, um die mittlere projizierte Starkregenzunahme abzupuffern.

Eine Anpassung der Bemessungsregenspenden ist unter den hier untersuchten Randbedingungen in den vier Untersuchungsregionen nicht erforderlich.

7.4.3 Rasenmulde

Es wird folgendes Beispiel gewählt:

- 800 m Rasenmulde, unterteilt in 16 Abschnitte
- Fahrbahnbreite 10 m (RQ 26); Böschung 13,5 m (analog Beispiel RAS-Ew, Bild 22)
- Längsgefälle 0,5 %

Die Mulde wird je Region mit den statistischen Regenspenden der Referenzperiode für die Häufigkeit $n=1/a$ bemessen. Für die Böschungflächen wird nach RAS-Ew eine Versickerung von 100 l/s/ha angesetzt. Es wird ein einheitlicher Muldenquerschnitt über die gesamte Strecke gewählt. Dieser ergibt sich aus dem Querschnitt zur Ableitung des Bemessungsabflusses zuzüglich 0,1 m Freibord.

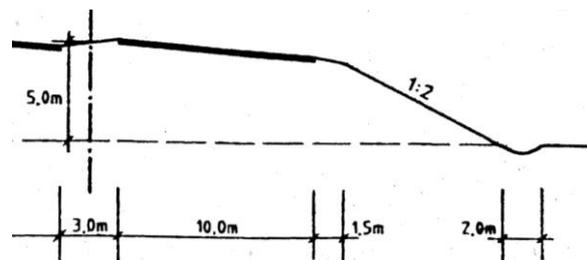


Bild 22: Straßenquerschnitt Beispiel RAS-Ew (FGSV, 2005)

Die Mulde wird analog dem Kanal (Kapitel 7.4.2) mit Modellregen unterschiedlicher Häufigkeiten für die CLM-Realisierungen 1 und 2 und die drei Zeiträume (Referenzperiode, nahe und ferne Zukunft) belastet. Die Mulde wird im Modell als reines Ableitungselement berechnet, eine Versickerung der Oberflächenabflüsse von der Fahrbahnfläche in der Mulde kann im Modell nicht abgebildet werden. Die Versickerung des Niederschlagswassers von den Böschungflächen wird im Modell über den Versickerungsansatz von Horton berechnet.

Im Bild 23 ist das berechnete Überstauvolumen für die 800 m lange Rasenmulde exemplarisch für die Region 2 dargestellt. Die Ergebnisse für alle vier

Regionen sind in Tab. 14 für die CLM-Läufe 1 und 2 zusammengefasst.

Bei der maßgeblichen Überstauhäufigkeit $n=0,5/a$ ($T=2$ a) gemäß DWA-A 118 wird bei Ansatz der projizierten Starkregenzunahme weder für die Referenzperiode noch für die Zukunft ein Überstau berechnet. Mit dem angesetzten Freibord von 0,1 m (bei rd. 0,3 m Muldentiefe) ist in der Bemessung demnach eine ausreichende Sicherheit enthalten, um die aufgrund der projizierten Starkregenzunahme erhöhte hydraulische Belastung abzupuffern.

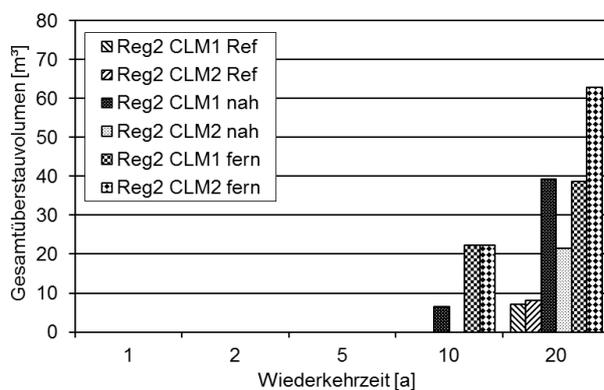


Bild 23: Gesamtüberstauvolumen Rasenmulde, Region 2

Zeitraum	T [a]	Reg. 1	Reg. 2	Reg. 3	Reg. 4
		Duisburg - Dortmund [m³]	Basel - Karlsruhe [m³]	Hamburg - Puttgarden [m³]	Leipzig [m³]
Referenzperiode Mittelwert CLM1/2	1				
	2				
	5				
	10			12,6	0,4
	20		7,6	37,8	15,7
nahe Zukunft Mittelwert CLM1/2	1				
	2				
	5			2,9	
	10		3,3	24,7	1,3
	20	3,6	30,3	55,7	16,8
ferne Zukunft Mittelwert CLM1/2	1				
	2				
	5			13,9	
	10		22,3	45,2	5,2
	20	2,6	50,7	83,4	27,9

Tab. 14: Gesamtüberstauvolumen Rasenmulde, Regionen 1-4, Mittelwerte aus CLM1/2

Bei der maßgeblichen Überflutungshäufigkeit $n=0,1/a$ ($T=10$ a) gemäß DWA tritt für die Referenzperiode nur in Region 3 ein maßgeblicher Überstau auf. Auch bei der Berechnung für die nahe Zukunft 2021-2050 wird nur für die Region 3 ein Überstau größer 10 m^3 berechnet. Für die ferne Zukunft tritt sowohl in Region 2 als auch in Region 3 ein größerer Überstau auf.

Die mögliche Schädigung eines derartigen Überstaus ist im konkreten Fall aufgrund der örtlichen Situation zu beurteilen. In einer Vielzahl von Fällen wird durch das Ausuferen der Mulde eine landwirtschaftliche Nutzfläche betroffen und das Schadpotenzial entsprechend gering sein.

Zusammenfassung & Folgerungen

Im gewählten Beispiel wurde eine Rasenmulde für den Normalfall ($n = 1/a$) nach RAS-Ew dimensioniert und anschließend mit Modellregen höherer Wiederkehrzeiten für Referenzperiode und Zukunft nachgerechnet.

Beim 2-jährlichen Regenereignis tritt weder für die Referenzperiode noch für die Zukunft ein Überstau auf. Der Überstaunachweis für die im DWA-A 118 empfohlene Häufigkeit ist demnach auch unter Berücksichtigung der projizierten Klimaänderungen erbracht.

Beim 10-jährlichen Ereignis, das nach DWA-A 118 für die Überflutungsprüfung empfohlen wird, treten hauptsächlich in der Region 3 und für die ferne Zukunft auch in der Region 2 maßgebliche Überstauungen ($> 10 \text{ m}^3$) auf. Die mögliche Schädigung der berechneten Überflutung ist im Einzelfall zu beurteilen.

In den RAS-Ew ist keine Vorgabe für einen Freibord bei Rasenmulden bzw. Gräben enthalten. Durch den im Beispiel gewählten Freibord von 0,1 m wird die Abflussleistung der Mulde erhöht. Aus diesem Grund tritt ein Überstau erst bei einem deutlich selteneren als dem Bemessungs-Ereignis auf. Ohne Freibord sähe das Ergebnis schlechter aus, da bei einer offenen Ableitung im Gegensatz zur Ableitung im Kanal keine Sicherheiten aufgrund von DN-Übergängen und Druckabfluss enthalten sind.

Geht man davon aus, dass Mulden und Gräben in der Praxis – auch aufgrund der notwendigen Realisierung von Durchlässen - eher großzügig ausgelegt werden, so ist eine Anpassung der Bemessungsregenspenden aufgrund der projizierten Starkregenzunahme wahrscheinlich nicht erforderlich.

Es wird jedoch angeregt, bei der Fortschreibung der RAS-Ew eine Empfehlung für den Ansatz eines Freibordes bei offenen Ableitungselementen abzugeben.

7.4.4 Regenrückhaltebecken

Während bei den Ableitungselementen die Auslastung bei Maximalabfluss entscheidend ist, sind bei der Berechnung von Rückhaltebecken das Abflussvolumen und der zeitliche Verlauf der Regenereignisse maßgeblich.

Es wird folgendes Beispiel gewählt:

- Einzugsgebiet: 3 ha befestigte Fläche
- Längste Fließzeit: 15 min
- Drosselabflussspende: 5 l/s/ha

Das Rückhaltebecken wird mit den Regenspenden der Referenzperiode nach dem einfachen Verfahren gemäß DWA-A 117 für die nach RAS-Ew maximal zulässige Häufigkeit $n=0,5/a$ ($T=2$ a) bemessen. Für die Region 2 ergibt sich z. B. ein erforderliches Volumen von 834 m^3 .

Durch Langzeitsimulation mit den durch das Downscaling-Verfahren erzeugten Regenreihen wird das tatsächliche Einstau- und Überlaufverhalten des Beckens nachgerechnet. Die Auswertung der Einstauereignisse wird je Region, CLM-Lauf und Zeitraum mit den Ergebnissen von 10 Downscaling-Zeitreihen vorgenommen.

Im Bild 24 sind die für die Region 2 „Basel-Karlsruhe“ berechneten Volumina für die Wiederkehrzeiten 2, 5 und 10 Jahre für Referenzzeitraum, nahe und ferne Zukunft dargestellt.

Für den Referenzzeitraum und die Wiederkehrzeit $T=2$ a wird mit der Langzeitsimulation ein Volumen in der Größenordnung 912 m^3 bis 936 m^3 errechnet. Dieses Volumen ist rd. 10 % größer als das in der einfachen Bemessung berechnete Volumen von 834 m^3 .

HUHN (1999) hat anhand von 600 Beispielrechnungen mit unterschiedlichen Regenreihen, Häufigkeiten und Drosselabflüssen nachgewiesen, dass aufgrund der Vernachlässigung der Intensitätsvariabilität natürlicher Ereignisse beim einfachen Verfahren das Risiko einer Unterbemessung besteht. Aus diesem Grund ist im DWA-Arbeitsblatt 117 ein Zuschlagfaktor f_z eingeführt, der abhängig vom Risikomaß zwischen 1,1 und 1,2 angesetzt wird. In den RAS-Ew wird bei den außerörtlichen Straßen auf diesen Zuschlagfaktor verzichtet bzw. es wird der Wert $f_z = 1$ gewählt.

Im Bild 25 ist die Zunahme des erforderlichen Beckenvolumens aufgrund der projizierten Klimaänderung dargestellt. Als Vergleichswert wird das Ergebnis der Langzeitsimulation für die Referenzperiode herangezogen, so dass die zuvor beschriebene Abweichung zum Bemessungswert des einfachen Verfahrens berücksichtigt ist.

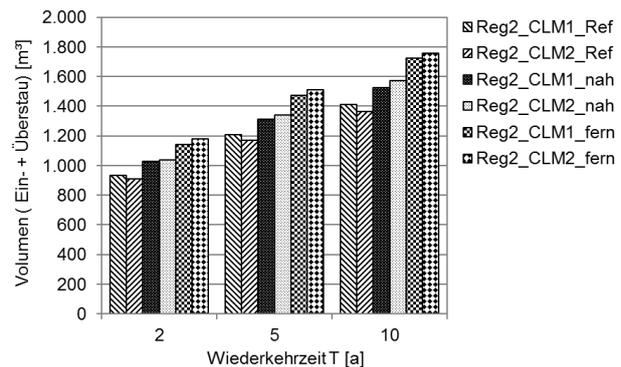


Bild 24: Beckenvolumen abhängig von der Wiederkehrzeit, Region 2, Mittelwerte aus jeweils 10 Zeitreihen

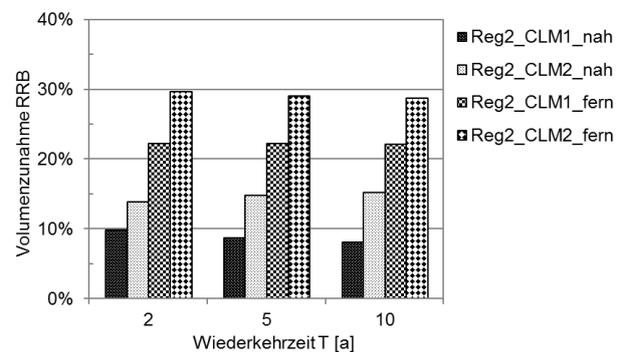


Bild 25: Zunahme des Beckenvolumens abhängig von der Wiederkehrzeit, Region 2

Für die Region 2 ergibt sich für die nahe Zukunft ein ca. 10-15 % größeres, für die ferne Zukunft ein ca. 20-30 % größeres Volumen. Die prozentualen Zunahmen sind für die unterschiedlichen Wiederkehrzeiten nahezu identisch.

In Tab. 15 ist die berechnete Volumenzunahme für die untersuchten Wiederkehrzeiten dargestellt. Während die Änderung des Volumens weitgehend unabhängig von der Wiederkehrhäufigkeit ist, gibt es große regionale Unterschiede.

Für die Region 1 wird die größte Volumenzunahme von rd. 40 % für die Kombination CLM1/nahe Zukunft errechnet. Für die Region 2 ergibt sich die größte Zunahme von 30 % für die Kombination CLM2/ferne Zukunft, für Region 3 weist die Kombination CLM1/ferne Zukunft mit einer Zunahme von 43 % den größten Wert auf. Für die Region 4 wird in einigen Fällen eine Volumenabnahme errechnet.

Insgesamt ist für die Regionen 1 bis 3 eine Zunahme in der Größenordnung von 10 % bis 40 % zu verzeichnen, im Mittel aller Kombinationen ergibt sich eine Volumenzunahme von 20 %. Diese Volumenzunahme entspricht bei einer Drosselabflussspende in der Größenordnung 2 l/s/ha bis 10 l/s/ha für die Bemessung nach dem einfachen Verfahren einem Zuschlag auf die Regenspende von 15 % bis 16 %.

Nahe Zukunft 2021-2050					
T [a]	Lauf	Reg. 1 Duisburg - Dortmund	Reg. 2 Basel - Karlsruhe	Reg. 3 Hamburg - Puttgarden	Reg. 4 Leipzig
2	CLM1	35%	10%	13%	-5%
	CLM2	18%	14%	12%	11%
5	CLM1	41%	9%	13%	-5%
	CLM2	20%	15%	10%	12%
10	CLM1	44%	8%	13%	-5%
	CLM2	21%	15%	10%	12%
Mittelwert	CLM1	40%	9%	13%	-5%
	CLM2	20%	15%	11%	12%
Ferne Zukunft 2071-2100					
T [a]	Lauf	Reg. 1 Duisburg - Dortmund	Reg. 2 Basel - Karlsruhe	Reg. 3 Hamburg - Puttgarden	Reg. 4 Leipzig
2	CLM1	26%	22%	43%	4%
	CLM2	5%	30%	20%	3%
5	CLM1	30%	22%	43%	2%
	CLM2	4%	29%	20%	3%
10	CLM1	32%	22%	43%	2%
	CLM2	4%	29%	20%	3%
Mittelwert	CLM1	29%	22%	43%	3%
	CLM2	4%	29%	20%	3%

Tab. 15: Änderung des Beckenvolumens bei einer Drosselabflusspende von 5 l/s/ha, Regionen 1-4

Ohne eine Anpassung der Bemessungspraxis würde sich die Überlaufhäufigkeit der Becken in die Einleitungsgewässer bzw. in nachgeschaltete Kanalnetze deutlich erhöhen.

Bild 26 zeigt am Beispiel der Region 2 „Basel-Karlsruhe“ die Verkürzung des Überlaufintervalls für die nahe und ferne Zukunft und die CLM-Läufe 1 und 2.

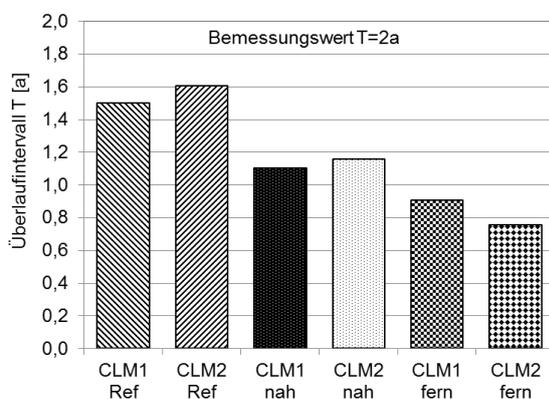


Bild 26: Überlaufintervall des nach RAS-Ew bemessenen Beckens, Region 2

Das Becken wurde nach RAS-Ew mit dem einfachen Verfahren ohne Berücksichtigung eines Zuschlagfaktors für ein Wiederkehrintervall von 2 Jahren ausgelegt. Bei der Langzeitsimulation wird für die Referenzperiode ca. alle 1,5 Jahre ein Überlauf berechnet. Für die nahe Zukunft findet bereits rund 1 mal pro Jahr ein Überlauf statt, für die ferne Zukunft 1 mal pro 8 Monate.

Eine Überflutungsgefahr für das Beckenumfeld besteht im Regelfall nicht, da oberhalb des Stauziels bis zur Geländeoberkante noch ein Freibord vorhanden ist.

Die hydraulische Gewässerbelastung nimmt hingegen zu, da deutlich häufiger als bei der Bemessung angenommen große Abflussspitzen in das Gewässer gelangen.

Zusammenfassung & Folgerungen

Das im Beispiel mittels Langzeitsimulation errechnete Stauvolumen ist größer als das nach dem einfachen Verfahren gemäß RAS-Ew berechnete Volumen. Dies hängt damit zusammen, dass bei der einfachen Bemessung der Zuschlagfaktor nach DWA-A117 für die zeitliche Variabilität der Niederschläge nicht berücksichtigt wird. Es wird daher grundsätzlich empfohlen, die Beckenbemessung an die Vorgaben der DWA anzupassen, die zum Ausgleich für das einfache Verfahren mit einem Volumenzuschlag von 10 bis 20 % rechnet, wenn kürzere Überlaufintervalle nicht toleriert werden können.

Für die Regionen 1 bis 3 ist aufgrund der Berechnungen mit den downgescalten Regenreihen des Modells CLM für die Zukunft mit einer Zunahme der erforderlichen Beckenvolumina zu rechnen. Diese Zunahme ist weitgehend unabhängig von der Wiederkehrzeit, für welche das Becken bemessen wurde, sie schwankt jedoch abhängig vom CLM-Lauf und Zeitraum zwischen 10 % und 40 %, im Mittel ca. 20 %. Für die Region 4 wird keine signifikante Volumenerhöhung berechnet.

Unter der Maßgabe, dass die durch Beckenüberläufe verursachte hydraulische Gewässerbelastung in der Zukunft nicht zunehmen soll, ist aufgrund der für die Regionen 1 bis 3 projizierten Starkregenzunahme zusätzlich zum oben genannten Zuschlagfaktor nach DWA-A117 eine Vergrößerung des Beckenvolumens in der Größenordnung von im Mittel ca. 20 % erforderlich.

Allerdings wäre zu diskutieren, ob die in den RAS-Ew vorgegebene maximale Häufigkeit von $n=0,5/a$ ($T=2 a$) grundsätzlich einzuhalten ist. Nach dem Merkblatt M 3 des BWK (2001) ist abhängig vom Einleitungsgewässer eine Erhöhung der Häufigkeit auf $n=1/a$ bis maximal $2/a$ zulässig. Maßgeblich für die Festlegung sind nach BWK-M3 die Strukturgü-

te und das Wiederbesiedlungspotenzial des Gewässers. Dabei wird bei geringem Wiederbesiedlungspotenzial strukturverbessernden Maßnahmen der Vorzug gegenüber emissionsseitigen Maßnahmen wie z. B. dem Bau von Becken gegeben.

7.4.5 Abfluss aus Außengebieten

Bei der Bemessung von Kreuzungsbauwerken sind neben den Straßenabflüssen oftmals Abflüsse natürlicher Einzugsgebiete zu berücksichtigen. Der maximale Abfluss am Kreuzungsbauwerk ist abhängig von der zeitlichen Überlagerung der Abflusswellen aus den natürlichen Außengebieten und von der Straße.

Für die Untersuchungen wird folgendes Beispiel gewählt:

- Straßenfläche 1 ha, Fließzeit 15 min
- Außengebiet 50 ha, Fließzeit 240 min
- Abflussbildungsparameter Außengebiet: Anfangsverlust 4 mm; Muldenverlust 2,5 mm; Endabflussbeiwert 0,2

Für das kombinierte Einzugsgebiet aus Straße und natürlicher Fläche werden Langzeitsimulationen mit den downgescalten Regenreihen der CLM-Läufe 1 und 2 für Referenzzeitraum, nahe und ferne Zukunft durchgeführt. Es erfolgt eine statistische Auswertung der Spitzenabflüsse mit dem im Kapitel 7.1.2 beschriebenen Verfahren.

Bild 27 zeigt die relative Zunahme für die Zukunftsszenarien in Bezug auf den Referenzzeitraum beispielhaft für die Region 2. In Tab. 16 sind die Ergebnisse für alle vier Regionen zusammengestellt.

Für die Regionen 1 bis 3 liegt die Abflusszunahme für die nahe Zukunft - mit Ausnahme von CLM1 für die Region 1 - in der Größenordnung von 10 %. Für die ferne Zukunft sind die Ergebnisse breiter gestreut, im Mittel der Regionen 1 bis 3 ergibt sich eine Zunahme in der Größenordnung von 15 %.

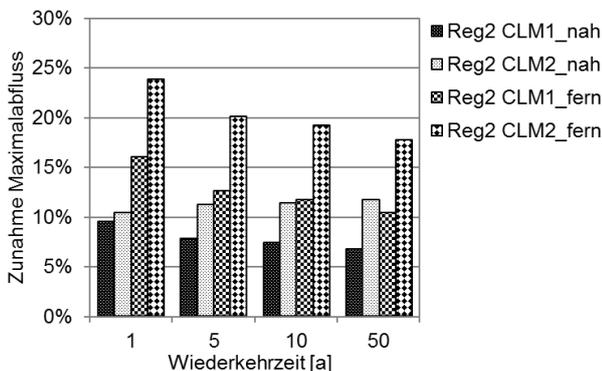


Bild 27: Zunahme des Maximalabflusses Straße + Außengebiet, Region 2

Nahe Zukunft 2021-2050					
T [a]	Lauf	Reg. 1 Duisburg - Dortmund	Reg. 2 Basel - Karlsruhe	Reg. 3 Hamburg - Puttgarden	Reg. 4 Leipzig
2	CLM1	16%	10%	10%	-5%
	CLM2	8%	10%	12%	8%
5	CLM1	25%	8%	10%	-5%
	CLM2	8%	11%	10%	10%
10	CLM1	27%	7%	9%	-6%
	CLM2	7%	11%	10%	10%
Mittelwert	CLM1	23%	8%	10%	-5%
	CLM2	8%	11%	11%	9%
Ferne Zukunft 2071-2100					
T [a]	Lauf	Reg. 1 Duisburg - Dortmund	Reg. 2 Basel - Karlsruhe	Reg. 3 Hamburg - Puttgarden	Reg. 4 Leipzig
2	CLM1	11%	16%	32%	6%
	CLM2	1%	24%	17%	4%
5	CLM1	15%	13%	33%	5%
	CLM2	-1%	20%	17%	4%
10	CLM1	16%	12%	33%	5%
	CLM2	-2%	19%	17%	4%
Mittelwert	CLM1	14%	13%	33%	5%
	CLM2	-1%	21%	17%	4%

Tab. 16: Änderung des Maximalabflusses Straße + Außengebiet für die Regionen 1-4

Zusammenfassung & Fazit

Zur Berechnung der Abflüsse aus natürlichen Außengebieten werden in den RAS-Ew keine klaren Vorgaben gemacht. Es wird kein Verfahren zur vereinfachten Berechnung von Abflussbildung und Konzentration empfohlen. Für die vorliegende Untersuchung wurde ein fiktives Beispiel mit üblichen Flächengrößen und Fließzeiten ausgewählt. Die Abflussbildung und Konzentration wurde mit einem hydrologischen Modell berechnet, dessen Parameter für das natürliche Gebiet aufgrund von Literaturwerten gewählt wurden.

Für die Maximalabflüsse aus dem Außengebiet ergibt sich aufgrund der Langzeitsimulation mit den modifizierten Regenreihen der Regionen 1 bis 3 für die nahe Zukunft eine mittlere Zunahme der Maximalabflüsse in der Größenordnung von 10 %, für die ferne Zukunft von 15 %. Eine detaillierte hydrodynamische Berechnung eines Kreuzungsbauwerks wurde im Rahmen der Untersuchung nicht durchgeführt. Die mittlere Zunahme der Maximalabflüsse zwischen 10 % und 15 % durch den Klimawandel ist jedoch verglichen mit den möglichen Abweichungen durch Verwendung von unter-

schiedlichen Ansätzen zur Abflussbildung und Abflusskonzentration als eher gering einzustufen.

Es wird daher empfohlen, bei der Fortschreibung der RAS-Ew näher auf die Berechnung natürlicher Außengebiete einzugehen.

7.5 Berechnung realer Entwässerungssysteme

Im Rahmen des Projektes werden neben den fiktiven idealisierten Systemen auch reale Entwässerungssysteme betrachtet. Um das Spektrum der untersuchten Entwässerungselemente zu erweitern, werden neben einem Beispiel zur Streckenentwässerung zwei Beispiele mit Anlagen zur Regenwasserbehandlung ausgewählt, die im vorangegangenen Kapitel noch nicht behandelt wurden.

Es werden folgende reale Systeme untersucht

1. Streckenentwässerung BAB NRW
2. Retentionsbodenfilter Hamburg
3. RiStWag-Anlage Köln

Die Details zu den gewählten Beispielen und deren Nachweisrechnung, werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

Die Berechnungen werden jeweils mit den Regenreihen der nächstgelegenen Modellregion nachgerechnet, das heißt für die Beispiele 1 und 3 werden die Daten der Region 1, für das Beispiel 2 die Daten der Region 3 verwendet.

7.5.1 Streckenentwässerung BAB NRW

Berechnet wird eine Streckenentwässerung der BAB 45 innerhalb eines Wasserschutzgebietes. Die Niederschlagsabflüsse werden vollständig gefasst und über Bordrinnen, Straßenabläufe und Regenwasser-Kanäle einer Behandlungsanlage (RiStWag) zugeleitet.

Aufgrund der örtlichen Höhenverhältnisse kommt es bei Volleinstau der Anlage bzw. deren Staulammele zum Rückstau in die Streckenentwässerung. Der hydraulische Nachweis wird für den Extremfall „Volleinstau Becken + Starkregenereignis“ geführt.

Kenndaten des Beispiels:

- Länge 3,2 km; befestigte Fläche 10,95 ha
- Zufluss zur Regenwasserbehandlungsanlage aus 2 Richtungen
- Längsgefälle rd. 2 %, Fließzeit 20-25 min

Das Kanalnetz wird durch hydrodynamische Berechnung mit Modellregen für die Region 1 (Dortmund) nachgewiesen. Als Referenz werden die KOSTRA-Daten gewählt, die Berechnung für die Klimaszenarien erfolgt durch Aufschlag der im

Projekt ermittelten Trends auf die 5-Minuten-Werte der Modellregen.

Nachgerechnet wird der ungünstigste Fall, dass der Volleinstau der Behandlungsanlage mit dem Starkregenereignis zusammentrifft. Die nachfolgend angegebenen Wiederkehrzeiten beziehen sich nur auf das Starkregenereignis, nicht auf das Zusammentreffen von Volleinstau und Starkregenereignis, das seltener auftritt.

Im Bild 28 ist das für die unterschiedlichen Wiederkehrzeiten für die Referenz (KOSTRA) und die CLM-Realisierungen für die nahe und die ferne Zukunft berechnete Gesamtüberstauvolumen dargestellt.

Beim 2-jährlichen Ereignis, für das nach den Empfehlungen des DWA-A118 der Überstau nachweis zu erbringen ist, tritt auf dem Streckenabschnitt kein Überstau auf.

Beim 10-jährlichen Ereignis, für das nach den Empfehlungen des DWA-A118 der Überflutungsnachweis zu führen ist, tritt ein Überstau von rd. 20 m³ für die Gegenwart (KOSTRA) und ein Überstau von bis zu 60 m³ für die Zukunft (CLM1 nah) auf. Das Überstauvolumen tritt nach der Berechnung an einem einzelnen Schacht aus.

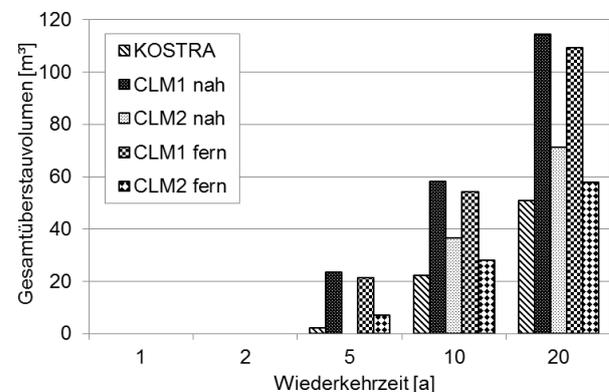


Bild 28: Gesamtüberstauvolumen Beispiel BAB NRW

Der überstauende Schacht liegt im Seitenbereich einer Auffahrt in einem Geländeeinschnitt (Tiefpunkt), in welchem der Kanal mit deutlich vermindertem Gefälle verlegt ist. Das Schadenspotenzial ist anhand der örtlichen Gefälleverhältnisse abzuschätzen. Im Zuge der anstehenden Überplanung des Kanalnetzes sollte der lokale Überstau durch eine Änderung der Höhenplanung oder durch Einbau eines druckdichten Deckels am Geländetiefpunkt vermieden werden.

Zusammenfassung & Fazit

Für die untersuchte reale Streckenentwässerung wird der Überstaunachweis sowohl für die Gegenwart als auch unter Berücksichtigung der projizierten Starkregenzunahme erbracht.

Im Kanalnetz ist ein lokaler Schwachpunkt vorhanden, der bereits im Ist-Zustand bei einem 10-jährlichen Ereignis zu Schäden führen könnte. Die Überlastung an diesem Punkt erhöht sich bei Ansatz der projizierten Starkregenzunahme und es tritt ein deutlich größerer Überstau auf.

7.5.2 Retentionsbodenfilter Hamburg

Berechnet wird ein Retentionsbodenfilter im Stadtgebiet von Hamburg. Die Niederschlagsabflüsse aus dem angeschlossenen Wohn- und Mischgebiet sowie von einer hoch belasteten Stadtstraße werden über ein Regenwasser-Kanalnetz der zentralen Bodenfilteranlage zugeleitet.

Der Bodenfilter ist nicht nach den RAS-Ew bemessen worden, sondern in Anlehnung an das DWA-M178. Vorgabe seitens der Genehmigungsbehörde war eine Überlaufhäufigkeit von $n \leq 2/a$.

Die Kenndaten des Beispiels sind:

- Einzugsgebiet: 30,2 ha; befestigt 13,9 ha; davon 2,1 ha hoch belastete Stadtstraße
- Filterfläche 1.050 m²; Einstauhöhe ca. 1 m; Stauvolumen 1.180 m³; Drossel 0,03 l/s/m² (bezogen auf die Filterfläche)
- Nachweisgrößen: hydraul. Wirkungsgrad 97 %; mittl. Filterflächenbelastung 49 m/a

Die hydraulische Belastung und das Überlaufverhalten des Bodenfilters werden durch hydrologische Langzeitsimulation mit den Regenreihen der Region 3 für Referenzzeitraum, nahe und ferne Zukunft nachgerechnet.

Bild 29 zeigt die Zunahme der Überlaufhäufigkeit infolge der projizierten Starkregenzunahme für die nahe und ferne Zukunft der Modellläufe CLM 1 und 2. Bereits im Referenzzeitraum tritt ca. 2,5 Mal pro Jahr ein Überlauf auf, der die Bemessungsvorgaben überschreitet. Grund dafür ist die Bemessung des Bodenfilters unter Belastung mit einer örtlichen Regenreihe, die sich von der hier verwendeten Regenreihe für den Referenzzeitraum unterscheidet.

Für die mittlere hydraulische Flächenbelastung des Filters wird im Referenzzeitraum der Zielwert des DWA-Merkblattes 178 von ≤ 50 m/a knapp eingehalten (Bild 30). Für CLM1/ferne Zukunft liegt die Flächenbelastung mit 59 m/a deutlich über dem empfohlenen Wert.

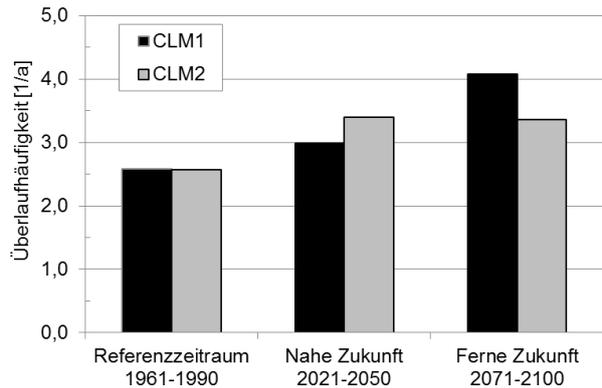


Bild 29: Überlaufhäufigkeit des Bodenfilters Hamburg

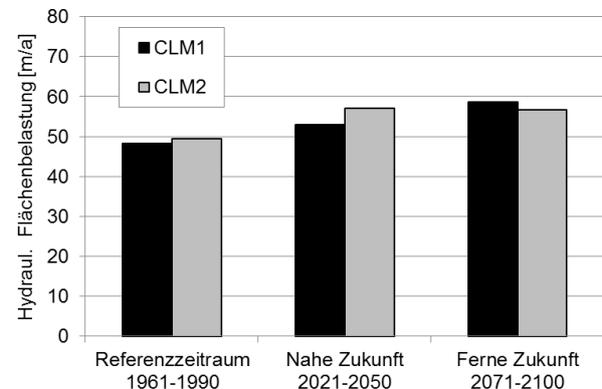


Bild 30: Hydraulische Flächenbelastung des Bodenfilters Hamburg

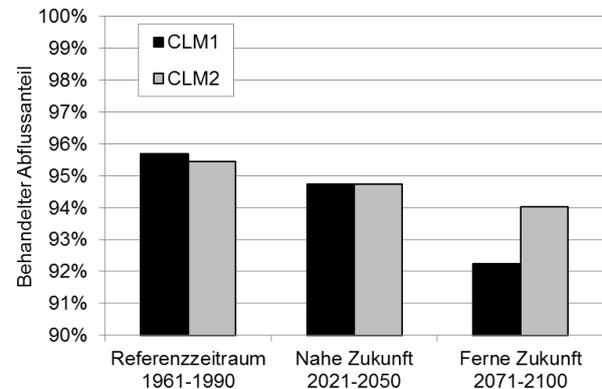


Bild 31: Behandelter Abflussanteil des Bodenfilters Hamburg

Hier ist anzumerken, dass in der zurzeit stattfindenden Überarbeitung des DWA-M178 zum DWA-A178 voraussichtlich die zulässige Flächenbelastung in m/a durch eine zulässige AFS-Belastung pro Filterfläche abgelöst werden wird.

Durch die erhöhte hydraulische Belastung verringert sich der Anteil des Gesamtzuflusses, der über die Bodenfilteranlage behandelt wird (Bild 31) und es erhöht sich die Stofffracht, die in das Einleitungsgewässer eingetragen wird. Für die nahe Zukunft verringert sich der behandelte Anteil von etwa 96 % auf etwa 95 %; für die ferne Zukunft können noch 93 % der Wassermenge im Filter

gereinigt werden. Die im Bodenfilter zurückgehaltene Stofffracht wird sich dadurch etwa im gleichen Maße reduzieren. Eine höhere Gewässergefährdung durch den Klimawandel kann daraus mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht abgeleitet werden.

Zusammenfassung & Fazit

Aufgrund der Starkregenzunahme kommt es am betrachteten Bodenfilter häufiger zu Überläufen. Die hier angesetzte Zielgröße eines maximal 2-maligen Überlaufs pro Jahr ($n \leq 2/a$) des Bodenfilters wird überschritten. Der Filter müsste theoretisch vergrößert werden. Ein konkreter gewässerbezogener Anlass, die Bodenfilterentlastung auf $n = 2/a$ zu begrenzen, war jedoch beim konkreten Beispiel nicht vorhanden. Bezogen auf die Reduzierung der in das Gewässer eingeleiteten Stofffracht wird bei einer nur leichten Verringerung der behandelten Wassermenge bei Ansatz der projizierten Klimaänderungen von 96 % auf 93 % kein Handlungsbedarf gesehen.

7.5.3 RiStWag-Anlage Köln

Im Beispiel werden die Zuflüsse zu einer RiStWag-Anlage bei Köln berechnet, die bereits in einem anderen Vorhaben der BAST untersucht wurde (GROTEHUSMANN et al., 2006).

Die Kenndaten des Beispiels sind:

- Absetzbecken nach RiStWag
- befestigte Fläche 6,68 ha
- Beckenoberfläche 183 m²
- Oberflächenbeschickung bei der Bemessungsregenspende $r_{15,1}=113$ l/s/ha: 13,4 m/h

Für den Zufluss aufgrund der Bemessungsregenspende können die Zielwerte der RiStWag (Oberflächenbeschickung 9 m/h, horizontale Fließgeschwindigkeit unter und vertikale Fließgeschwindigkeit hinter der Abflusstauchwand 0,05 m/s) nicht eingehalten werden. Der Abscheider wäre demnach zu klein dimensioniert. Bei Berücksichtigung der Abflussverformung in einem hydraulischen Modell ergeben sich jedoch geringere Oberflächenbeschickungen.

Die hydraulische Belastung des Absetzbeckens wird durch hydrologische Langzeitsimulation mit den Regenreihen der Region 1 für Referenzzeitraum, nahe und ferne Zukunft nachgerechnet.

Im Bild 32 ist die Oberflächenbeschickung für unterschiedliche Wiederkehrzeiten dargestellt, die sich aufgrund der statischen Auswertung der in der Simulation errechneten Maximalabflüsse ergibt.

In der Langzeitsimulation wird für das 1-jährliche Ereignis ein deutlich geringerer Maximalabfluss und somit eine geringere maximale Oberflächenbeschickung errechnet als bei Ansatz der Bemessungsregenspende, weil im hydrologischen Modell neben dem Prozess der Abflussbildung auch die Verformung der Abflusswelle auf dem Fließweg berücksichtigt wird. Bei den Nachrechnungen bestehender RiStWag-Anlagen mit Langzeitsimulation von GROTEHUSMANN et al. (2006) wurde ebenfalls eine deutlich geringere Oberflächenbeschickung berechnet, als bei der Bemessung zugrunde gelegt wird.

Auch bei Ansatz der projizierten Starkregenzunahme bleibt die Oberflächenbeschickung beim 1-jährlichen Ereignis unter dem in den RiStWag (FGSV, 2002) geforderten Wert von 9 m/h.

Die Änderung der Oberflächenbeschickung, die sich aufgrund der projizierten Starkregenzunahme ergibt, bewegt sich mit Ausnahme von CLM1/nah Zukunft in der Größenordnung 5 % (Bild 33).

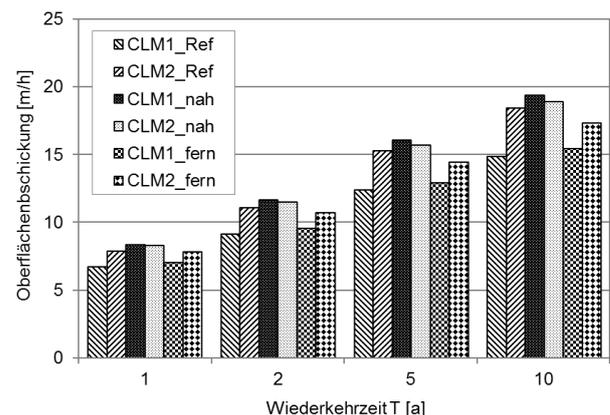


Bild 32: Oberflächenbeschickung des Abscheiderbeckens für Referenzperiode, nahe und ferne Zukunft, CLM1/2

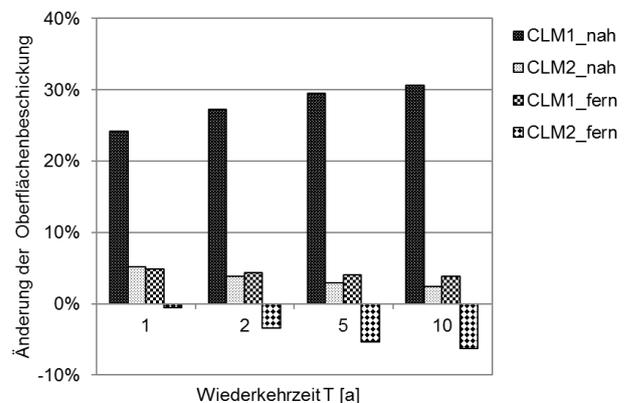


Bild 33: Änderung der Oberflächenbeschickung für nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode

Zusammenfassung & Fazit

Bei der hydrologischen Langzeitsimulation wird für das Absetzbecken beim einjährigen Zuflussereignis eine deutlich geringere Oberflächenbeschickung errechnet als bei der Berechnung mit der statistischen einjährigen Regenspende der Dauer 15 Minuten. Die Zielgrößen der Bemessung nach RiStWag werden eingehalten.

Bezogen auf feinpartikuläre Stoffe im Niederschlagsabfluss, die einen Großteil der Schadstofffracht transportieren, haben Absetzanlagen mit einer Oberflächenbeschickung von 9 m/h jedoch nur begrenzte Wirkung (z. B. FUCHS et al. 2010). Weiter kann ein Anstieg der Oberflächenbeschickung und damit der Fließgeschwindigkeiten im Becken zu einer Remobilisierung von bereits abgelagerten Feststoffen führen. Durch geeignete konstruktive Ausbildung des Zulaufbereiches lassen sich solche Effekte abmildern (GROTEHUSMANN et al. 2006).

7.6 Unsicherheiten hydraulischer Berechnungen

In hydraulischen Bemessungen und Nachweisrechnungen sind Unsicherheiten in den Grundlagendaten und Berechnungsverfahren enthalten. Hierzu wird im Folgenden ein kurzer Überblick gegeben:

Niederschlagsdaten

Ein wesentlicher Aspekt sind Fehler bei den Niederschlagsmessungen. HOPPE (2008) hat die Spannweiten volumetrischer Fehler von Niederschlagsaufzeichnungen aus unterschiedlichen Quellen zusammengestellt. Demnach treten durch die Benetzung des Sammelbehälters (Verlust 2-10%), mechanische Störungen des Wippensystems (Verlust 0%-16%) oder den Einfluss von Wind (Abweichung 2%-15%) Fehler in den Messdaten auf, die sich von der Größenordnung her im Bereich der projizierten Änderungen der Niederschlagscharakteristik bewegen.

In den KOSTRA-Auswertungen des DWD werden Fehler aufgrund mechanischer Störungen anhand von Vergleichsmessungen nach dem Wägeprinzip bereinigt. Die Fehler aufgrund von Windfelddeformation werden für die Starkregenauswertungen nicht bereinigt. In den KOSTRA-Auswertungen ist jeweils ein von der Wiederkehrzeit abhängiger Toleranzbereich zwischen +/- 10 % und +/- 20 % angegeben. Streng genommen müsste dieser bei wasserwirtschaftlichen Planungen berücksichtigt werden, was in der Praxis jedoch im Regelfall nicht geschieht.

Ungleichmäßige Überregnung

Weitere Unsicherheiten ergeben sich bei der Übertragung gemessener Punktniederschläge in die Fläche. VERWORN (2008) hat für drei Regionen mit sehr dichten Messnetzen Verfahren zur Abschätzung eines Abminderungsfaktors abhängig von Einzugsgebietsfläche und Dauer entwickelt. Danach würden sich im Falle von Straßenentwässerungen mit angeschlossenen Flächen in der Größenordnung < 1 km² nur geringe Abminderungen ergeben.

Für extreme Niederschläge kurzer Dauerstufen sind insbesondere die räumlichen Unsicherheiten höher, das heißt die Frage, inwieweit eine Punktmessung für eine Fläche repräsentativ ist. Ähnlich ist es bei der linienförmigen Ausdehnung der Straßen-Einzugsgebiete, die von einer Gewitterzelle nicht im gleichen Maße betroffen sind.

Einzugsgebietsdaten

Auch die Grunddaten für die hydraulischen Berechnungen sind eine nicht zu unterschätzende Fehlerquelle. Wird beispielsweise ein befestigter Mittelstreifen als unbefestigte Fläche angesetzt oder bei Ableitung über einen Graben dessen Versickerungsleistung nicht berücksichtigt, so können sich Fehldimensionierungen ergeben, die sich in der gleichen Größenordnung bewegen wie die Dimensionierungen unter Berücksichtigung projizierter Klimaänderungen.

Der Abflussbeiwert, der bei stadthydrologischen Untersuchungen eine relativ große Streubreite aufweist, ist bei der Berechnung von Straßenentwässerungen hingegen weniger kritisch. Der durch die RAS-Ew (2005) vorgegebene Wert $\Psi=0,9$ gibt nach Abflussmessungen an Autobahnen (IFS, 2009/2010) die Realität gut wieder. Bei der Berücksichtigung der Abflüsse aus Außengebieten ist die Schätzung des Abflussbeiwertes jedoch mit sehr großen Unsicherheiten behaftet.

Modellunsicherheiten

Die hydraulischen Berechnungsansätze zur Abflussbildung, Abflusskonzentration und zum Abflusstransport sowie zur Versickerung auf unbefestigten Flächen und die jeweils gewählten Modellparameter sind ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet. Eine Anpassung der Berechnungen kann im Einzelfall nur durch die Kalibrierung des Modells mit gemessenen Niederschlag-Abfluss-Ereignissen erzielt werden. Allerdings sind die Unsicherheiten im Bereich der Entwässerung außerörtlicher Straßen in der Regel geringer als im Bereich heterogener städtischer Einzugsgebiete, weil die Spitzenabflussbeiwerte der Straßenbefestigungen in einem engeren Bereich (ca. 0,9-1,0) liegen.

8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Änderung von Starkregen

Regionale Klimamodelle projizieren für Deutschland neben nassen und moderaten Wintern insbesondere heißere Sommer als bisher, die durch längere Trockenperioden und häufiger wiederkehrende Starkregenereignisse geprägt sind.

Eine Zunahme von Starkregenereignissen kann die Funktionsfähigkeit von Straßenentwässerungseinrichtungen erheblich beeinflussen, wenn es häufiger zu hydraulischen Überlastungen und infolgedessen zu Schädigungen im Umfeld der Entwässerungseinrichtungen und ggf. zu Verkehrsbeeinträchtigungen kommt. Auch Trockenperioden können sich negativ auswirken, wenn beispielsweise der Bewuchs einer Bodenfilteranlage durch Trockenstress geschädigt wird.

Im Projekt werden daher für vier über Deutschland verteilte Regionen die Änderungen von Starkregenereignissen und Trockenperioden sowie die resultierenden Auswirkungen auf die Straßenentwässerung untersucht. Diese wurden auf Basis von Klimamagnalkarten, aus denen die projizierte zukünftige Änderung von Tagen mit Starkregen hervorgeht, sowie vor dem Hintergrund des RIVA-Projektes der BASt (BAB-Abschnitte) festgelegt.

Die regionalen Klimamodelle haben derzeit eine zeitliche und räumliche Auflösung, die für kleinräumige hydrologische Fragestellungen nicht ausreicht. Die für die Straßenentwässerung maßgeblichen konvektiven Starkregenereignisse mit hohen Niederschlagsintensitäten und einer Dauer bis zu einer Stunde werden von den regionalen Klimamodellen nicht abgebildet. Es wird daher im Projekt ein statistisches Downscalingverfahren verwendet, mit dem die Daten der regionalen Klimaprojektionen auf eine kleinere Skala mit höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung übertragen werden.

Für die Untersuchungen werden die Ergebnisse von zwei Realisierungen des Klimamodells CLM verwendet, die jeweils für drei Zeitperioden (Referenz 1961-1990, nahe Zukunft 2021-2050 und ferne Zukunft 2071-2100) und zwei Modellläufe (CLM1, CLM2) vorliegen. Die Läufe basieren auf dem Klimaszenario A1B, das zur Zeit der Projektbearbeitung hinsichtlich der zukünftigen Emissionsentwicklung als „globaler Mittelweg“ betrachtet und in zahlreichen Projekten auch in Deutschland verwendet wird. Für die Bias-Korrektur der Projektionsdaten werden die regionalisierten Niederschlagshöhen aus REGNIE verwendet. Für das Downscaling werden je Region die Niederschlags-

daten von Stationen des Deutschen Wetterdienstes eingesetzt.

Als Ergebnis des Downscaling-Verfahrens liegen für die Regionen jeweils 10 Niederschlagszeitreihen mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten für die Referenzperiode, die nahe und die ferne Zukunft vor. Durch statistische Auswertung der Zeitreihen werden für definierte Niederschlagsdauern und Wiederkehrzeiten die Trends für die projizierte zukünftige Entwicklung errechnet.

Im Vergleich zum Referenzzeitraum ergeben sich überwiegend Zunahmen der statistischen Starkregenhöhen. Für die Regionen 1 (Duisburg-Dortmund-Bönen, übernommen aus dynaklim), 2 (Basel-Karlsruhe) und 3 (Hamburg-Puttgarden) ergeben sich Zunahmen der Starkregen, die überwiegend statistisch signifikant sind und mit über 10 % über dem Toleranzbereich nach KOSTRA liegen. In Region 4 (Leipzig) fallen die Zunahmen deutlich geringer aus und es treten auch Abnahmen auf. Die Ergebnisse variieren nicht nur zwischen den Regionen, sondern auch zwischen den zwei CLM-Realisierungen sowie für die nahe und ferne Zukunft.

Insgesamt ergeben sich größtenteils Zunahmen der statistischen Starkregen im Bereich von + 5 % bis + 25 %.

Die Ergebnisse zu den Starkregentrends sind mit Unsicherheiten behaftet, denn sie basieren auf einem definierten Szenario für die zukünftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen sowie auf einem Klimamodell, durch das nicht alle relevanten Prozesse des Klimasystems vollständig abgebildet werden. Die Unsicherheiten können durch die Betrachtung einer größeren Anzahl von Modellläufen reduziert werden. Insgesamt zeigen die gegenwärtig für Deutschland vorliegenden Regionalmodelle bis 2050 ähnliche Verläufe und geringe Unterschiede zwischen den Emissionsszenarien. Die Ergebnisse der zwei untersuchten CLM-Läufe für die nahe Zukunft sind demnach belastbarer als für die ferne Zukunft.

Auch das im Projekt angewandte Downscaling-Verfahren ist mit Unsicherheiten behaftet, insbesondere aufgrund der Annahme, dass sich aus Beobachtungen der Vergangenheit abgeleitete statistische Beziehungen auf die Zukunft übertragen lassen. Nach der im Projekt durchgeführten Unsicherheitsabschätzung tritt bei einer projizierten Starkregenzunahme von 15 % mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 62 % eine Zunahme im Bereich 5 bis 25 % ein.

Die Projektergebnisse weisen also insgesamt auf eine Starkregenzunahme hin. Allerdings treten Unterschiede zwischen den Regionen und CLM-Läufen auf und die Unsicherheiten der Klimapro-

jektionen müssen berücksichtigt werden. Die Erkenntnisse werden durch die Klimasignalkarten gestützt, die 28 regionale Klimaprojektionen auswerten. Diese zeigen mit hoher Übereinstimmung eine Zunahme der Starkregentage in Deutschland an, es treten aber kaum robuste regionale Trends auf.

Aufgrund der genannten Unsicherheiten bietet es sich an, vor einer direkten Übernahme der Trends in die Bemessungsrichtlinien die Spielräume zu berücksichtigen, die sich aufgrund vorhandener Sicherheiten in den Bemessungsverfahren ergeben. Die die entwässerungstechnischen Anlagen sollten, soweit möglich, flexibel gestaltet werden.

Außerdem wird empfohlen, bei Vorliegen verbesserter Klimaprojektionen für Deutschland, die vorliegenden Auswertungen entsprechend nachzuführen, um ggf. erforderliche Anpassungen vornehmen zu können.

Auswirkungen auf die Straßenentwässerung

Im zweiten Teil des Projektes werden die Auswirkungen der projizierten Starkregenzunahme auf verschiedene Einrichtungen der Straßenentwässerung untersucht.

Zunächst werden mögliche Auswirkungen auf die Dimensionierung diskutiert. Bei einem Aufschlag auf die Bemessungsregenspenden in der zuvor genannten Größenordnung von 5 % bis 25 % würde sich die Wasserspiegelbreite in Bordrinnen um 2 % bis 9 % erhöhen, bei der Bemessung von Kanälen würde sich maximal eine Querschnittsvergrößerung um eine Durchmesser-Klasse ergeben. Die größten Auswirkungen ergäben sich bei den Speicherbauwerken. Durch die Weiterleitung eines vorgegebenen Drosselabflusses wirkt sich eine Zunahme des Bemessungsregens um 5-25 % stärker auf das Stauvolumen aus (ca. +10-30 %).

Bei der gemäß RAS-Ew üblichen Bemessung nach dem Lastfallkonzept wird die Überlastungshäufigkeit einer Entwässerungseinrichtung mit der Regenhäufigkeit gleichgesetzt. Prozesse der Abflussbildung und Konzentration sowie des Abflusstransportes in Rinnen und Kanälen werden nicht detailliert abgebildet. Dies wirkt sich insbesondere bei den Abflussspitzen aus, die bei der einfachen Bemessung mit Regenspenden in der Regel überschätzt werden. Das bedeutet, dass in den Bemessungsverfahren der RAS-Ew teilweise Sicherheiten enthalten sind, die die projizierten Starkregenzunahmen kompensieren könnten.

Um diese Sicherheiten einzuschätzen, werden fünf fiktive und drei reale Entwässerungssituationen detailliert mit hydrodynamischen und hydrologischen Niederschlag-Abflussmodellen nachgerechnet, um die tatsächliche Aus- und Überlastung der

nach RAS-Ew bemessenen Anlagen zu bewerten. Hierbei werden Berechnungen sowohl mit den durch das Downscaling-Verfahren erzeugten Regenreihen für den Referenzzeitraum als auch für die nahe und ferne Zukunft durchgeführt.

Aus den Ergebnissen der Beispielrechnungen lassen sich für die vier untersuchten Regionen folgende Schlussfolgerungen ableiten:

Für das System „**Bordrinne+Straßenablauf**“ ergibt sich bei Ansatz der projizierten Starkregenzunahme eine Zunahme der Wasserspiegelbreite im Zentimeterbereich. Dieser geringe Wert erscheint tolerierbar, vor allem unter dem Aspekt, dass die Rinnen aufgrund einer möglichen Einengung des Abflussquerschnittes durch Ablagerungen ohnehin auf einen um 50 % erhöhten Abfluss ausgelegt werden. Eine Anpassung des Bemessungsverfahrens an den Klimawandel ist demnach nicht erforderlich.

Für die mit den gegenwärtigen Regenspenden und nach aktuellem Regelwerk bemessenen **Kanäle** wird der nach DWA-A118 geforderte Überstau nachweis sowohl für den Referenzzeitraum als auch für die nahe und ferne Zukunft erbracht. Bei der nach DIN EN 752 geforderten zusätzlichen Überflutungsprüfung erhöht sich der Überstau in der Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum. Die mögliche Schädigung ist im Einzelfall zu prüfen. Im Allgemeinen erscheint ein Teil-Einstau der Fahrbahn bei sehr seltenen heftigen Starkregenergie Ereignissen tolerierbar, da die Fahrzeuge aufgrund der Sichtverminderung und der Aquaplaning-Gefahr ohnehin im Schrittempo fahren. Eine Anpassung des Bemessungsverfahrens für Rohrleitungen ist unter den im Projekt untersuchten Randbedingungen nicht erforderlich. Diese Aussage gilt für das Bemessungsziel „Bemessungsabfluss / Vollfüllabfluss ≤ 1 “. Bei Ansatz des im DWA-Regelwerk vorgegebenen Verhältnisses von $\leq 0,9$ werden die vorhandenen Sicherheiten weiter erhöht.

Bei der offenen Ableitung in **Mulden** sind im Gegensatz zum Kanal keine Sicherheiten aufgrund von Durchmesser-Übergängen und Druckabfluss enthalten. In der Praxis werden Mulden jedoch zumeist großzügig ausgelegt und mit einem Freibord oberhalb des Bemessungswasserstandes versehen. Für das im Projekt untersuchte Beispiel mit einem Freibord von 0,1 m wird der Überstau nachweis sowohl für den Referenzzeitraum als auch für die projizierte zukünftige Starkregenzunahme erbracht. Da in den RAS-Ew keine Vorgaben zum Ansatz eines Freibordes gemacht werden, kann aus der durchgeführten Berechnung keine verbindliche Schlussfolgerung gezogen werden. Unter der Annahme, dass Mulden im Regelfall großzügig ausgelegt werden, ist auch hier kei-

ne Anpassung des Bemessungsverfahrens erforderlich.

Bei der untersuchten **RiStWag-Anlage** ist die maximale Oberflächenbeschickung, die sich aus der Nachrechnung mittels hydrologischer Langzeitsimulation ergibt, deutlich geringer als der Wert, der sich aus der Bemessungsregenspende ableitet. Auch bei Ansatz der projizierten Starkregenzunahme bleibt die Oberflächenbeschickung unter dem in den RiStWag geforderten Wert von 9 m/h.

Für den untersuchten **Bodenfilter** erhöht sich bei zunehmenden Starkregenereignissen ähnlich wie beim Rückhaltebecken die Überlaufhäufigkeit und damit die nicht über den Filter behandelte Wassermenge. Bei akuten stofflichen Belastungen (z. B. Ammoniaktoxizität) kann das in Abhängigkeit vom Wiederbesiedlungspotenzial im Gewässer eine Vergrößerung des Bodenfilters notwendig machen, um die geforderte Entlastungshäufigkeit einzuhalten. Steht der Frachtrückhalt im Vordergrund, spielt die zusätzlich über die Bodenfilterentlastung ins Gewässer eingetragene Stofffracht im Vergleich zur zurückgehaltenen Jahresfracht in der Regel keine Rolle.

Eine **Versickerungsanlage** wurde im Rahmen des Projektes nicht detailliert untersucht, da das Prinzip der Bemessung dem für Regenrückhaltebecken entspricht, wobei statt des Drosselabflusses eine Versickerungsleistung des Untergrundes angesetzt wird. Die für Rückhaltebecken gewonnenen Erkenntnisse (siehe nächster Absatz) sind daher weitgehend auf die Versickerungsanlagen übertragbar.

Bei den im Projekt durchgeführten hydrologischen Langzeitsimulationen von **Regenrückhaltebecken** ergeben sich bereits für den Referenzzeitraum ohne Ansatz der Starkregenzunahme größere Beckenvolumina als bei der Bemessung nach RAS-Ew. Dies hängt damit zusammen, dass die zeitliche Variabilität der Niederschlagsereignisse bei der Bemessung nach RAS-Ew nicht berücksichtigt wird. Im DWA-Regelwerk ist für die einfache Bemessung von Rückhaltebecken ein Zuschlag von 10 % bis 20 % eingeführt. Dieser wird in den RAS-Ew nicht angewandt.

Für die Zukunft wird für die Regionen 1 bis 3 eine deutliche Zunahme der Beckenvolumina in einer Größenordnung von 10 % bis 40 % berechnet, im Mittel ca. 20 %. Für die Region 4 ergibt sich keine eindeutige Volumenzunahme. Ohne eine Anpassung der Bemessungspraxis würden nach gegenwärtigem Stand bemessene Becken in der Zukunft häufiger überlaufen als bei der Bemessung angesetzt (ca. doppelt so häufig). Hierdurch würde die hydraulische Belastung des Einleitungsgewässers zunehmen. Wenn die durch die RAS-Ew bzw. durch die zuständige Wasserbehörde vorgegebe-

ne Überlaufhäufigkeit auch in Zukunft eingehalten werden soll, ist gegenüber der bisherigen Bemessung ein Volumenzuschlag erforderlich.

Es wird daher vorgeschlagen, zum einen den Zuschlagfaktor von 10-20 % für das einfache Verfahren von der DWA (A117) zu übernehmen und zusätzlich für die Anpassung der Beckenvolumina an den Klimawandel einen Zuschlag von 20 % bei der Volumenberechnung vorzusehen.

Um unnötig große Anlagen zu vermeiden, wäre die in den RAS-Ew vorgegebene maximale Überlaufhäufigkeit von $n=0,5/a$ zu diskutieren. Nach dem Merkblatt 3 des BWK (BWK, 2001) ist abhängig von der Strukturgröße und dem Wiederbesiedlungspotenzial des Einleitungsgewässers eine Überlaufhäufigkeit von $n=0,5/a$ bis $n=2/a$ vorgesehen. Bei Erhöhung von $n=0,5/a$ auf $n=1/a$ würde der zuvor genannte Zuschlag von 20 % ungefähr wieder aufgehoben.

Trockenperioden

Neben der Zunahme von Starkregenereignissen wird im Projekt die Zunahme von Trockenperioden untersucht, die die Funktionsfähigkeit von Behandlungsanlagen beeinträchtigen können.

Für die Auswertungen wurden vom Deutschen Wetterdienst Klimaänderungskarten für Trockenperioden >30 Tage mit <1 mm Niederschlag/Tag erstellt, die auf den Ergebnissen verschiedener regionaler Klimamodelle basieren. Diese zeigen eine leichte Tendenz zu einer Zunahme von Trockenperioden. Die Zunahmen sind allerdings nicht robust und über regionale Unterschiede sind keine Aussagen ableitbar. Zusätzlich werden im Projekt für die Regionen 2, 3 und 4 Trendauswertungen mit den bias-korrigierten CLM-Daten durchgeführt. Eine Zunahme von Trockenperioden ist in den Regionen demnach weder für die nahe noch für die ferne Zukunft zu verzeichnen. Eine Anpassung der Bemessungspraxis und Gestaltung der Behandlungsanlagen ist aufgrund der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse nicht erforderlich.

Den negativen Auswirkungen langer Trockenperioden kann generell durch konstruktive und betriebliche Maßnahmen begegnet werden. So kann beispielsweise der Austrag von Schwimmstoffen aus Abscheidern über eine mehrere Dezimeter eingetauchte oder auch eine schwimmende Tauchwand vermieden werden. Bei bewachsenen Bodenfilteranlagen ist während länger anhaltenden Trockenperioden ggf. eine Bewässerung erforderlich.

Resümee

Die wesentlichen Erkenntnisse aus dem Projekt seien abschließend noch einmal zusammengefasst.

1. Aus den Ergebnissen der Klimaprojektionen des Regionalmodells CLM werden unter Verwendung vorliegender Messdaten mit einem statistischen Downscalingverfahren hoch aufgelöste Regenreihen generiert, die Aussagen zu Starkregenereignissen kurzer Dauerstufen ermöglichen.
2. Für die vier untersuchten Regionen ergeben sich mittlere Zunahmen der statistischen Starkregen für die in der Straßenentwässerung maßgeblichen Dauern (5 min bis 2 h) und Wiederkehrzeiten (1-10 Jahre) im Bereich von +5 % bis +25 %.

Die Starkregenzunahme in den Regionen 1-3 im Westen, Südwesten und Norden Deutschlands fällt dabei deutlich größer aus als in der Region 4 um Leipzig.

3. Für die untersuchten Straßenentwässerungseinrichtungen ergibt sich aufgrund der projizierten Starkregenzunahme hauptsächlich ein Anpassungsbedarf bei den Speicherbauwerken (RRB, Versickerung). Neben dem Zuschlagfaktor für das einfache Bemessungsverfahren analog DWA-A117 wird aufgrund der Ergebnisse zur Berücksichtigung zukünftiger Klimaänderungen ein zusätzlicher Volumenzuschlag in der Größenordnung von 20 % vorgeschlagen. Demgegenüber wird angeregt, sich bei der Vorgabe für die maßgebliche Überlaufhäufigkeit von Rückhaltebecken an den Empfehlungen des BWK-Merkblattes 3 (BWK, 2001) zu orientieren, das abhängig vom Einleitungsgewässer auch Häufigkeiten größer $0,5/a$ ($T=2$ a) zulässt.

Für die Ableitungselemente, die auf einen maßgeblichen Spitzenabfluss ausgelegt werden, ergibt sich aus den im Projekt untersuchten Beispielen kein Anpassungsbedarf der RAS-Ew an den Klimawandel, da in den einfachen Bemessungsverfahren ausreichend Sicherheiten enthalten sind, um die mittlere projizierte Starkregenzunahme abzupuffern.

4. Aus den Projektionsdaten ergeben sich bei der Untersuchung von Trockenzeiten keine signifikanten Veränderungen. Damit ist für die Anwendungen, die sensibel auf längere Trockenperioden reagieren (Abscheider, Bodenfilter), derzeit kein Handlungsbedarf erkennbar.

9 Literatur

- ARNBJERG-NIELSEN, K. (2008): Quantification of climate change impacts on extreme precipitation used for design of sewer systems. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008
- ATV-DVWK (2004): ATV-DVWK-M 165: Anforderungen an Niederschlag-Abfluss-Berechnungen in der Siedlungsentwässerung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 01/2004
- BWK (2001): Ableitung immissionsorientierter Anforderungen an Misch- und Niederschlagswassereinleitungen unter Berücksichtigung örtlicher Verhältnisse; Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e.V., Düsseldorf, 2001
- CLIMATE SERVICE CENTER (2012): Starkregenänderungskarte für Deutschland auf Kreisebene - Version 0: Zunahme der Anzahl der Tage mit Niederschlag > 40 mm 2036-2065 vs. 1966-1995. Climate Service Center, 2012
- CHRISTENSEN, J.H., RUMMUKAINEN, M., LENDERINK, G. (2009): Formulation of very-high-resolution regional climate model ensembles for Europe. ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project, Met Office Hadley Centre, Exeter, UK.
- DIN EN 752 (2008): Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden; Deutsche Fassung EN 752:2008
- DITTRICH, V. (2007): Folgen des Klimawandels – Müssen Straßenentwässerungseinrichtungen neu bemessen werden? Straße & Autobahn, 12/2007
- DWA (2005a): DWA-A 138 Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 04/2005
- DWA (2005b): DWA-M 178: Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb von Retentionsbodenfiltern zur weitergehenden Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 10/2005
- DWA (2006): Klimawandel – Herausforderungen und Lösungsansätze für die deutsche Wasserwirtschaft, DWA-Themenband, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 2006
- DWA (2006a): DWA-A 118 Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 03/2006
- DWA (2006b): DWA-A 110 Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Abwasserleitungen und –kanälen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 08/2006
- DWA (2007): DWA-M 153 Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 08/2007
- DWA (2012): Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer, Arbeitsblatt DWA-A 531, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 2012
- DWA (2013): DWA-A 117 Bemessung von Regenrückhalteräumen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 12/2013
- DWD (2003): Klimastatusbericht 2003, Deutscher Wetterdienst, Offenbach 2003
- DWD (2005): KOSTRA-DWD-2000 - Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951 – 2000) – Grundlagenbericht, Deutscher Wetterdienst, Offenbach 2005
- DWD (2011): Abteilung Hydrometeorologie: REGNIE (REGionalisierte NIEeder-schläge): Verfahrensbeschreibung & Nutzeranleitung, interner Bericht im Deutschen Wetterdienst, Offenbach 2011.
- DWD (2013): Klimaänderungskarten Trockenheit: Änderungssignal Trockenperioden: 1971-2000 – 2021-2050, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 2013, unveröffentlicht
- DYNAKLIM: Projekt „Dynamische Anpassung regionaler Planungs- und Entwicklungsprozesse an die Auswirkungen des Klimawandels in der Emscher-Lippe-Region (Ruhrgebiet)“
<http://www.dynaklim.de/>

- FGSV (2002): RiStWag – Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wasserschutzgebieten, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, 2002
- FGSV (2005): Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Entwässerung - RAS-Ew, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, 2005
- FREI, C., SCHÖLL, R., FUKUTOME, S., SCHMIDLI, J., VIDALE, P. L. (2005): Future change of precipitation extremes in Europe: an intercomparison of scenarios from regional climate models. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 111, D06105
- FUCHS, S.; LAMBERT, B.; GROTEHUSMANN, D. (2010): Neue Aspekte in der Behandlung von Siedlungsabflüssen, Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung, Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie, Nr. 6 2010
- GÖRGEN, K., BEERSMA, J., BRAHMER, G., BUIVEVELD, H., CARAMBIA, M., DE KEIZER, O., KRAHE, P., NILSON, E., LAMMERSEN, R., PERRIN, C., VOLKEN, D. (2010) Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project, CHR report, I-23, 229 pp., Lelystad, ISBN 978-90-70980-35-1
http://www.chr-khr.org/files/CHR_I-23.pdf
- GROTEHUSMANN, D.; KASTING, U.; HUNZE, M. (2006): Optimierung von Absetzbecken, *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* Heft 944, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
- HANEL, M., BUISHAND, T. A. (2009a): Analysis of precipitation extremes in an ensemble of transient regional climate model simulations for the Rhine basin. *Climate Dynamics* 36 (5-6), 1135-1153
- HANEL, M., BUISHAND, T. A. (2009b): On the value of hourly precipitation extremes in regional climate models. *Journal of Hydrology* 393 (3-4), 265-273
- HANSON, C. E., PALUTIKOF, J. P., LIVERMORE, M. T. J., BARRING, L., BINDI, M., CORTE-REAL, J., DURAO, R., GIANNAKOPOULOS, C., GOOD, P., HOLT, T. (2007): Modelling the impact of climate extremes: an overview of the MICE project, *Climatic Change* 81, 163-177
- HOPPE, H. (2008): Impact of input data uncertainties on urban drainage models: climate change - a crucial issue? 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008
- HOLLWEG, H.-D., U. BÖHM, I. FAST, B. HENNEMUTH, K. KEULER, E. KEUPTHIEL, M. LAUTENSCHLAGER, S. LEGUTKE, K. RADTKE, B. ROCKEL, M. SCHUBERT, A. WILL, M. WOLDT, C. WUNRAM (2008): Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios, Technical Report 3, Modelle and Daten at the Max Planck Institute for Meteorology, 150.
- HOSKING, J. R. M., WALLIS, J.R. (1997): Regional frequency analysis: an approach based on L-moments. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 224 S., ISBN 0-521-43045-3
- HUHN, V. (1999): Nachweis und Bemessung von Regenrückhalteräumen in Siedlungsgebieten, *Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz*, Band 19, SuG-Verlag Hannover
- IFS (2002): Programm: erwin. Regenwasserbewirtschaftung, Version 4.03, Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie, Hannover, 2002
- IFS (2009): Abflussmessungen am RRB Gasselbach BAB A2 (Kreuz Bielefeld) - Weitergehende Datenauswertung, Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie i. A. des Landesbetriebes Straßen NRW, unveröffentlichter Bericht, 2009
- IFS (2010): Niederschlags- und Abflussmessungen an der RWBA Schwerte-Ergste BAB A45, Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie i. A. des Landesbetriebes Straßen NRW, unveröffentlichter Bericht, 2010
- ITWH (2010): Kanalnetzberechnung HYSTEM-EXTRAN – Modellbeschreibung; Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH, Hannover, 2010
- JACOB, D., BÜLOW, K., KOTOYA, L., MOSELEY, C., PETERSEN, J., RECHID, D. (2012): CSC Report 6, Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble-Simulationen für die Klimafolgenforschung. ISSN 2192-4058

- <http://klimzug-nord.de/index.php/page/2012-05-29-csc-report-nr.-6-erschienen>
- JASPER-TÖNNIES, A., EINFALT, T., QUIRMBACH, M., JESSEN, M. (2012): Statistical downscaling of CLM precipitation using adjusted radar data and objective weather types. Abstract for 9th International Workshop on Precipitation in Urban Areas. December 2012, St. Moritz, Switzerland.
- KEULER, K., M. LAUTENSCHLAGER, C. WUNRAM, E. KEUP-THIEL, M. SCHUBERT, A. WILL, B. ROCKEL, U. BOEHM (2009a): Climate Simulation with CLM, Climate of the 20th Century run no.2, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. DOI: 10.1594/WDCC/CLM_C20_2_D2.
- KEULER, K., M. LAUTENSCHLAGER, C. WUNRAM, E. KEUP-THIEL, M. SCHUBERT, A. WILL, B. ROCKEL, U. BOEHM (2009b): Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no.1, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. DOI: 10.1594/WDCC/CLM_A1B_1_D2.
- KEULER, K., M. LAUTENSCHLAGER, C. WUNRAM, E. KEUP-THIEL, M. SCHUBERT, A. WILL, B. ROCKEL, U. BOEHM (2009c): Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no.2, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. DOI: 10.1594/WDCC/CLM_A1B_2_D2.
- KLIMZUG NORDWEST 2050 (2010): Werkstattbericht „Klimaszenarien: für Nordwest2050 Teil 2: Randbedingungen und Beschreibung“, Juni 2010
http://www.nordwest2050.de/index_nw2050.php?obj=file&aid=8&id=184&unid=b8a7f20d8235a0c7a9f357afe6986342
- KLIWA (2011): Klimawandel in Süddeutschland, Veränderung von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen, Monitoringbericht, 2011
http://www.kliwa.de/download/KLIWA_Monitoringbericht_2011.pdf
- KRAUSE, A. (2010): Auswertung von Extremereignissen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen, Nr. 3: Trockenperioden – Werkstattbericht, Institut für Meteorologie und Klimatologie, Universität Hannover, 2010
- LANUV (2010a): Klimawandel und Kanalnetzbeurteilung: Auswertung von Überflutungsereignissen in NRW und Hinweise zur Bemessung von Entwässerungssystemen vor dem Hintergrund des Klimawandels, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Düsseldorf, 2010
- LANUV NRW (2010b): Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW (ExUS), Abschlussbericht erstellt für das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) durch die Arbeitsgemeinschaft aqua_plan GmbH, hydro-meteo GmbH & Co. KG und dr.papadakis GmbH,
http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/klimawandel/bericht_exus_teil1.pdf
http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/klimawandel/bericht_exus_teil2.pdf
- LAUTENSCHLAGER M., KEULER K., WUNRAM C., KEUP-THIEL E., SCHUBERT M., WILL A., ROCKEL B., BOEHM U. (2009): Climate Simulation with CLM, Climate of the 20th Century run no.1, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. DOI:10.1594/WDCC/CLM_C20_1_D2.
- LAWA (2012): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien); Herausgabe in Kooperation DWA und DVGW; Miturheber und Lizenzgeber: Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) , 8. überarbeitete Auflage, Juli 2012.
- PASCHE, E., HELLMERS, S. (2011): Quantification of climate change impacts on flood probability in urban areas and adaptation measures using climate model data with a high spatial resolution and a semi-distributed rainfall runoff model", Proceedings, Abstract + Paper, Exhibition and International Conference on Climate Impact, Flood Protection and Hydraulic Engineering, October 2011, Hamburg
http://acqua-alta.de/fileadmin/design/acqua-alta/pdf/abstracts/paper/11_10/Hellmers_Pasche_full%20paper.pdf
- PAULSEN, O. (1987): Kontinuierliche Simulation von Abflüssen und Stofffrachten in der Trennentwässerung, Universität Hannover.

- QUIRMBACH, M., FREISTÜHLER, E., JESSEN, M. (2012): Bereitstellung hoch aufgelöster Niederschlagsdaten für wasserwirtschaftliche Modellanwendungen, dynaklim-Kompakt Nr. 09, März 2012
- REGKLAM (2011): Bericht „Klimaprojektionen für die REGKLAM-Modellregion Dresden“, Bernhofer, C., Matschullat, J., Bobeth, A., Nov. 2011
http://www.regklam.de/fileadmin/Daten_Redaktion/Publikationen/REGKLAM_Heft2-Klimaprojektionen_download.pdf
- RIVA (2013): BASt -Projekt FE 09.0147/2011/ARB "Risikoanalyse wichtiger Güter- und Transitverkehrsachsen", Präsentation Alfen Consult GmbH, Okt. 2013, unveröffentlicht
- SAWA (2009): „Fachliche Analyse des Klimazuschlags für Bemessungsabflüsse im Einzugsgebiet der Wandse“, Bericht SAWA
http://www.sawa-pro-ject.eu/uploads/documents/Endbericht_Wandse_2_Titelblatt_Sawa.pdf
- SEMMLER, T., JACOB, D. (2004): Modeling extreme precipitation events – a climate change simulation for Europe, Global and Planetary Change 44: 119-127
- SIEKMANN, T.; MÜLLER, K. (2011): Anpassungspotenziale der konventionellen Regenwasserbehandlung im Mischsystem an Auswirkungen des Klimawandels; Artikel aus: Energie Wasser-Praxis; ISSN: 1436-6134; Jg.: 62, Sondernr., 2011
- SIEKMANN, T.; HÜBEN, S. (2011): Anpassungsmöglichkeiten der konventionellen Regenwasserbehandlung im Mischsystem an Auswirkungen des Klimawandels, dynaklim Publikation Nr. 17, 11/2011
- STARKREGENRISIKO 2050: Machbarkeitsstudie „Starkregenrisiko 2050“, Abschlussbericht http://www.climate-service-center.de/037859/index_0037859.html.de
- STAUFER, P., LECKEBUSCH, G., PINNEKAMP, J. (2010): Die Ermittlung der relevanten Niederschlagscharakteristik für die Siedlungsentwässerung im Klimawandel. Korrespondenz Abwasser, Abfall, 57(12):1-10
- VERWORN, H.R. und KENTER, G. (1993): Abflussbildungsansätze für die Niederschlags-Abfluß-Modellierung. Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz 24, 3-50.
- VERWORN, H.-R. (2008): Flächenabhängige Abminderung statistischer Regenwerte - KW-Korrespondenz Wasserwirtschaft, 1, H.9, 493-498
- ZIOR, F. (1987): Regenwasserabfluß auf Fahrbahnoberflächen: experimentelle und theoretische Untersuchungen; Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik, TU Darmstadt, 38/198

10 Anhang

10.1 Literatur: Projekte Starkregen

Eine Übersicht zu Projekten und Studien, die zukünftige Klimaänderungen in Deutschland unter anderem von extremen Niederschlägen mit Hilfe von regionalen Klimamodellen untersuchen, ist in den Tabellen Tab. 17 und Tab. 18 aufgeführt

Die Studien unterscheiden sich hinsichtlich der Wahl der Klimaszenarien, der räumlich erzielten Auflösung und der untersuchten Kennwerte von extremen Niederschlägen. Grund dafür sind unterschiedliche Zielsetzungen, Vorgehensweisen und Datenverfügbarkeit innerhalb der Projekte. Dadurch ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse auch bei Überschneidung der Untersuchungsregionen eingeschränkt. Während einige Projekte Klimaänderungsfaktoren für extremen Niederschlag angeben (z.B. KLIWA für Tagessummen), werden in anderen Projekten (z.B. RHEINBLICK2050) die Projektionen für Niederschlag und Temperatur direkt für Hochwasser- oder Niederschlags-Abfluss-Simulationen verwendet und die Zielgrößen auf Klimaänderungssignale untersucht. Ob und wie stark diese auf eine Änderung im Niederschlagssignal reagieren, hängt wesentlich von den hydrologischen Eigenschaften der Gewässer wie Größe und Orographie des Einzugsgebiets ab.

Daher sind Arbeiten wie die des Climate Service Center von Bedeutung, in denen eine große Anzahl von RCM-Läufen mit einheitlichen Kriterien für ganz Deutschland untersucht werden (siehe Anhang 10.2, Bild 35). Die resultierenden Klima-Signalkarten werden hier vorrangig zum Vergleich und zur Auswahl der Untersuchungsregionen genutzt.

Einige der in Tab. 17 aufgeführten Studien kommen zu dem Schluss, dass die Unsicherheiten oder die Abweichungen zwischen Modell- und Beobachtungsdaten so groß sind, dass Rückschlüsse auf Extremereignisse nicht oder nur eingeschränkt sinnvoll sind. HANEL & BUIHAND (2009b) fanden bei der Untersuchung von Extremwertstatistiken von Stundendaten von 13 regionalen Klimamodellen erhebliche Abweichungen zwischen den betrachteten Modellläufen und Radardaten, so dass sie von der direkten Verwendung der RCM-Stundendaten abraten. Im Projekt RHEINBLICK2050 wurden Bias-korrigierte Tagessummen für Sommer und Winter getrennt ausgewertet. Für den Sommerzeitraum waren die Abweichungen zwischen Tageswerten aus Modell und Beobachtungsdatensatz im Referenzzeitraum so groß, dass keine Auswertung der simulierten Niederschlagsdaten für die Zukunft durchgeführt wurde.

In diesem Zusammenhang kann die Wahl der Beobachtungsdaten eine entscheidende Rolle spielen: Bild 34 zeigt 3 Beobachtungsdatensätze (Monatsmittelwerte im Jahresgang, REGNIE, E-OBS, CRU) für Deutschland im Vergleich. Die Unterschiede zwischen den Beobachtungsdatensätzen sind erheblich, was unter anderem mit der (fehlenden) Prüfung bzw. Korrektur der Niederschlagsdaten und der Interpolation auf das Gitter zusammenhängt. Beide Effekte wirken sich verstärkt auf extreme Niederschläge aus, so dass für die Untersuchung von kleinräumigen Starkniederschlägen nicht auf interpolierte Datensätze zurückgegriffen werden sollte. Bei Untersuchungen zu Klimaänderungen ist die Auswahl der Messdaten sowohl bei der Bias-Korrektur der Modelldaten, beim weiteren Downscaling als auch bei der Evaluierung von entscheidender Bedeutung. In den Projekten KLIWA, KLIF und dynaklim wurden Messdaten von Stationen bzw. Radar als Datenbasis für Downscaling und Evaluation verwendet. Um die Unsicherheit des Auftretens von extremen Starkniederschlägen zu reduzieren, werden in einigen Projekten Messdaten räumlich zusammengefasst (HANEL & BUIHAND, 2009a, JASPER-TÖNNIES et al., 2012). Dabei wird von der Annahme Gebrauch gemacht, dass das Auftreten von Starkniederschlägen innerhalb eines begrenzten Gebiets gleich wahrscheinlich ist („index flood assumption“, HOSKING & WALLIS, 1997).

Nur ein paar der genannten Projekte (KLIF, RHEINBLICK2050, dynaklim, KLIMZUG-NORD) nutzen statistische Downscaling-Methoden in Kombination mit dynamischem Downscaling durch regionale Klimamodelle. Dadurch ist die räumliche Auflösung der Ergebnisse im Allgemeinen gleich der der Regionalmodelle und die zeitliche Auflösung für die Auswertung von Extremwerten nicht kleiner als ein Tag. Einige Projekte greifen auf Daten des statistischen Modells WETTREG zurück und erhalten dadurch höher aufgelöste Daten (z.B. KLIWA). Ungeachtet der genannten Unterschiede der in Tab. 17 aufgeführten Studien, werden überwiegend positive Trends der Starkniederschläge projiziert. Die Bandbreiten der Ergebnisse unterscheiden sich, bedingt durch die Anzahl der Modellläufe, die Größe der Untersuchungsgebiete und die Datenauswahl: Bei der Auswertung von einzelnen Stationen treten größere Streuungen auf als bei zusammengefassten Gebieten oder RCM-Gitterpunkten.

Zusätzlich zu den genannten Projekten gibt es eine Anzahl von noch andauernden Projekten, in denen Klimaänderungen und Auswirkungen für Deutschland auch in Hinblick auf Extremereignisse untersucht werden (z.B. KLIFF, KLIWAS, KLIMZUG-NORDHESSEN). Ab 2014 wird sich die Datengrundlage durch weitere regionale Klimamodelle vergrößern. In der Nachfolge des Projekts ENSEMBLES steht das Projekt EURO-CORDEX zur Koordination von Downscaling-Projekten im Rahmen des 5. Sachstandsberichts des IPCC. Dabei werden Modellläufe mit den neuen RCP-Klimaszenarien („Representative Concentration Pathways“) und einer Horizontalaufösung von 0.11° für ganz Europa gerechnet. Die Ergebnisse werden demnächst für Klimaanpassungsprojekte verfügbar sein.

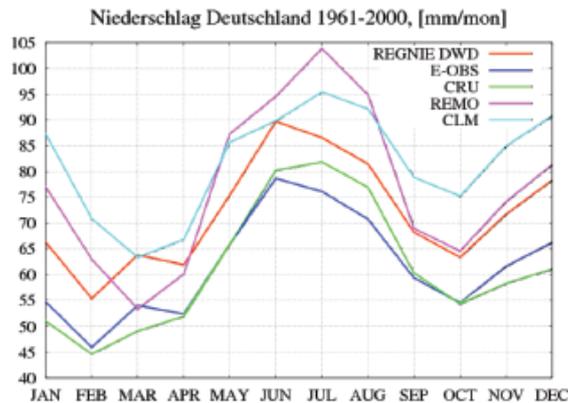


Bild 34: Aus CSC-Bericht Nr. 6: Jahreszyklen Niederschlag (mm/Monat) von drei Beobachtungsdatensätzen und den Regionalmodellen CLM und REMO für den Zeitraum 1961-2000, gemittelt über Deutschland.

Projekt / Studie	Region	Globalmodell (GCM)	Regionalmodell (RCM) (+Anz. Läufe)	Szenario (SRES)	Zeitraum	Statistische Downscaling Methode	Räuml. Downscaling
<i>dynaklim</i>	NRW	Echam5	CLM (2 Läufe)	A1B	1961-90 2021-50 2071-2100	Biaskorrektur Quantile Mapping + Analogmethode mit Radar-Ereignissen	1x1km ²
Frei et al.	Europa Alpen	HadAM3H	PRUDENCE (10 Läufe)	A2	1961-90 2071-2100	–	–
Hanel & Buishand 1	Rheingebiet	ENSEMBLES (5 Modelle)	ENSEMBLES (15 Läufe)	A1B	1961-90 2031-50 2070-99	–	–
Hanel & Buishand 2	Rheingebiet	ENSEMBLES (5 Modelle)	ENSEMBLES (13 Läufe)	A1B	1961-90 2070-99	–	–
KLIFF	Niedersachsen	Echam5	CLM REMO	A1B	1961-90 2021-50 2071-2100	Wetterlagen-Klassifikation mit fuzzy-Regeln (Bardossy, 2010), 14 Stationen	Stationen
Klimzug: Nordwest2050	Niedersachsen	Echam5 Hadley	CLM 1 REMO WETTREG RCAO	A1B A2 B1	1961-90 2036-65 2071-2100	Einfache Bias-Korrektur: Differenz auf Referenzwerte	–
Klimzug-Nord	Großbereich Hamburg	Echam5	REMO	A1B B1	1971-2000 2041-2070	Bias-Korrektur: prozentuale Änderung auf Referenzwerte	–
KLIWA	BW, Bayern	Echam4	WETTREG REMO	B2	1932-2010 2021-2050	Basis: Wetterlagen / –	Stationen / 1x1km ² /
MICE	Europa	HadCM3 HadAM3H	HadRM3H	A2 B2	1961-90 2070-99	–	–
RegioExAKT	Deutschland	Echam5	–	A1B	1971-2000 2071-2100	Verschiebung der Gumble-Verteilung auf Basis von KOSTRA	anonym. KOSTRA-Feld
regklam	Region Dresden	Echam5	CLM REMO WETTREG WEREX	A1B A2 B1	1961-90 1991-2010 2071-2100	–	–
Rheinblick 2050	Rheingebiet	ENSEMBLES (5 Modelle)	ENSEMBLES + CLM + REMO (22 Läufe)	A1B	1961-90 2021-50 2071-2100	Statistische Bias-Korrektur	–
SAWA	Einzugsgebiet Wandse	Echam5	REMO	A1B	1961-90 2071-2100	–	–
Semmler & Jacob	Europa	HadAM3H	REMO	A2	1960-90 2070-2100	–	–
Starkregen risiko 2050	Deutschland	ENSEMBLES (5 Modelle)	ENSEMBLES + CLM +REMO (28 Läufe)	A1B A2 B1	1966-95 2036-65	–	–

Tab. 17: Übersicht zu Studien und Projekten zum Thema: Auswirkung des Klimawandels auf das Auftreten von Starkregenereignissen in Deutschland. Es sind lediglich die Läufe und Szenarien gelistet, zu denen auch Ergebnisse vorgestellt wurden. Wenn mehrere Kennwerte für Extremwerte untersucht wurden, wurden die relevantesten in Bezug auf Starkniederschläge ausgewählt.

Projekt / Studie	Extremwerte: Zeitskala	Extremwerte: Kennwert	Ergebnisse / Bemerkungen	Referenzen
dynaklim	5 min – 1 d	Dauerstufe und Wiederkehrzeit	mittl. Zunahmen (1h, 5a) bis 2050: 16-19%, Spannbereich: -3% bis +32%	JASPER-TÖNNIES et al., 2012
Frei et al.	1 d	Wiederkehrzeit 5 a	Ca. -20 bis +50%	FREI et al., 2005
Hanel & Buishand 1	1 d	Wiederkehrzeit	Ca. 0-20% Zunahme, Wiederkehrzeit 2-20a	HANEL & BUISHAND, 2009a
Hanel & Buishand 2	1 h, 1 d	Wiederkehrzeit	Ca. 15-30% Zunahme, Wiederkehrzeit 5-50a, bei konst. shape Parameter	HANEL & BUISHAND, 2009b
KLIFF	–	–	Noch nicht verfügbar	Noch nicht verfügbar
Klimzug: Nordwest2050	1 d	Anzahl Tage > 20 mm	Deutliche Zunahmen, ca. 15-45% (CLM), ca. 20-65% (REMO)	Bericht „Klimaszenarien: für Nordwest2050 Teil 2: Randbedingungen und Beschreibung“, Juni 2010
Klimzug-Nord	1 h	Tage > 25 mm Wiederkehrzeit	Zunahmen für A1B / B1: (1h,5a): 23% / 3%	PASCHE & HELLMERS, 2011
KLIWA	1 d	Jahres-Maximum	Starkniederschlag: region. sehr unterschiedlich: -24% bis +42%; Zuschlag auf Hochwasserabfl. 15-25%	Klimawandel in Süddeutschland, Monitoringbericht 2011
MICE	1 d	Anzahl Tage > 20 mm	Leichte Zunahmen in der Anzahl von Starkregentagen	HANSON et al., 2007
RegioExAKT	1 h	Wiederkehrzeit	Zunahmen: 13- 28%	STAUFER et al., 2010
regklam	1 d	Anzahl Tage > 20 mm Wiederkehrzeit	14% Zunahme 1991-2010 zu 1961-90 Zukünftige Trends: uneinheitlich	Bericht „Klimaprojektionen für die REGKLAM-Modellregion Dresden“, Nov. 2011
Rheinblick 2050	10 d	Wiederkehrzeit	Winter: 5-20% Zunahmen Sommer: 0-25% Abnahmen, keine Auswertung der Tagessummen Som.	GÖRGEN et al., 2010
SAWA	2 h-6 d	Dauerstufe und Wiederkehrzeit	Änderung Bemessungsniederschläge, 12-26% (Tagessummen)	„Fachliche Analyse des Klimazuschlags für Bemessungsabflüsse im Einzugsgebiet der Wandse“, Bericht SAWA
Semmler & Jacob	1 d	Wiederkehrzeit	überwiegend Zunahmen	SEMMLER & JACOB, 2004
Starkregenrisiko 2050	1 d	Anzahl Tage > 25 mm	Starkregenänderungskarten mit Robustheitstest	Machbarkeitsstudie „Starkregenrisiko 2050“, Abschlussbericht

Tab. 18: Übersicht zu Studien und Projekten zum Thema: Auswirkung des Klimawandels auf das Auftreten von extremen Niederschlägen. Wenn mehrere Kennwerte untersucht wurden, wurden die relevantesten aufgeführt.

10.2 Klimasignalkarten / Klimaänderungskarten: Robustheitstests

In die Erstellung der Klimasignalkarten des Climate Service Center gehen 17 Kombinationen aus regionalen und globalen Klimamodellen von dem Projekt ENSEMBLES, sowie Läufe von CLM und REMO ein. (Vollständige Liste unter http://www.climate-service-center.de/031452/index_0031452.html.de).

Zu den Klimasignalkarten wird ein 3-stufiger Robustheitstest durchgeführt, der auf Übereinstimmung der Klimaprojektionen, statistische Signifikanz und zeitliche Homogenität testet. Der Test gilt an einem Punkt als bestanden, wenn die Testkriterien von mindestens 66% der Klimaprojektionen erfüllt werden. Die Zwischenergebnisse der 3 Stufen des Robustheitstests bezüglich der Klimasignalkarte mit dem Parameter: Starkregen > 40 mm/d sind in Bild 35 dargestellt. Der Test auf Übereinstimmung (Stufe 1) wird nur in vier Landkreisen nicht bestanden, der Test auf zeitliche Homogenität (Stufe 3) wird hingegen an der Mehrzahl der Orte nicht bestanden. Durch die Seltenheit der hohen Starkregenereignisse führen Verschiebungen des Zeitraums schnell zu Abweichungen der ermittelten Trends. Ein repräsentativeres Klimamittel ließe sich durch die Betrachtung von noch längeren Zeiträumen als 30 Jahre erhalten. (siehe http://www.climate-service-center.de/031451/index_0031451.html.de).

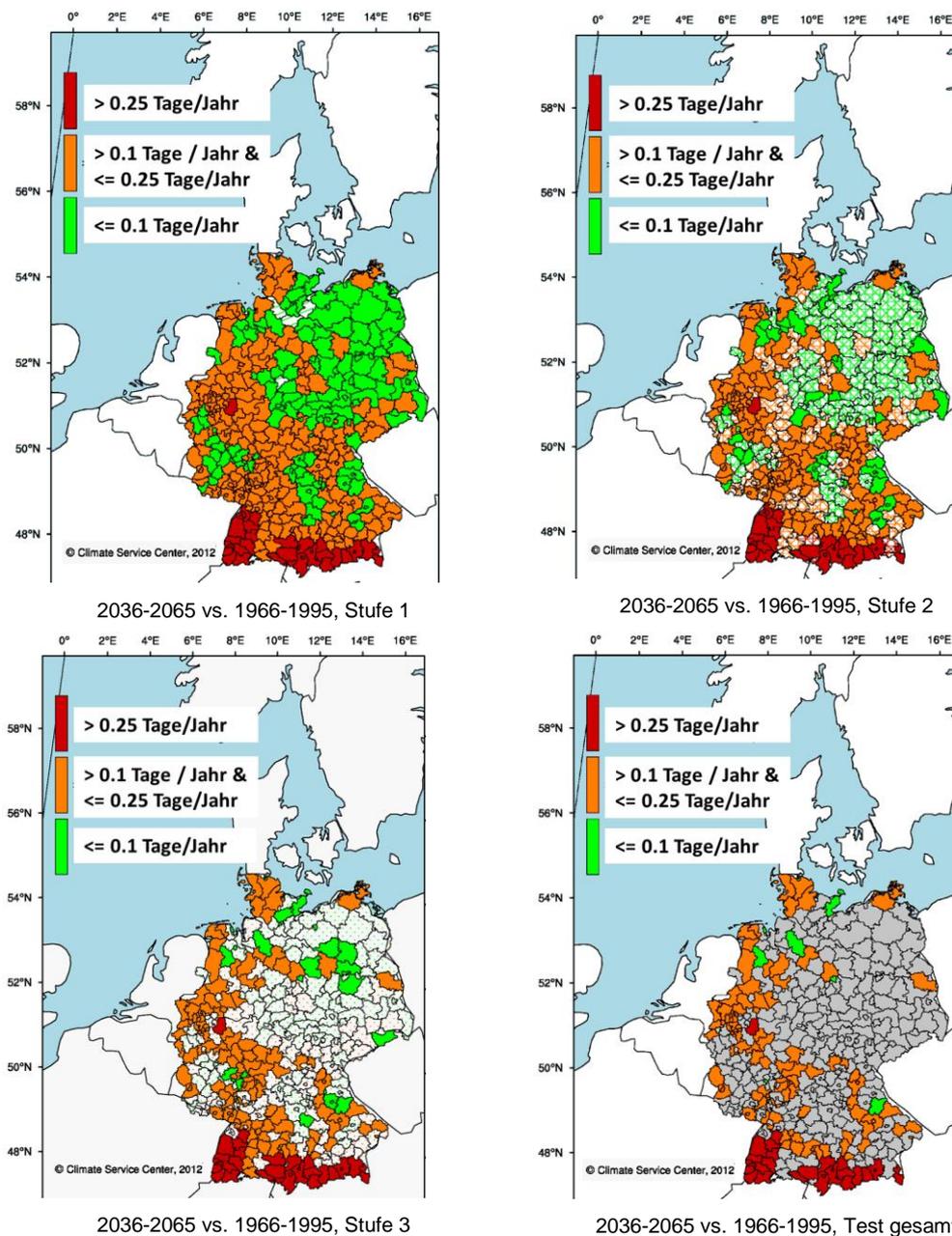


Bild 35: Klimasignalkarte: Zunahme der Anzahl der Tage mit Niederschlag > 40 mm/Tag (Tage/Jahr). Zwischenergebnisse Stufe 1-3 des Robustheitstests und gesamt (r. u.). Landkreise mit nicht bestandenem Test sind schraffiert/ grau dargestellt.

Die Klimaänderungskarten mit dem Parameter Trockenperioden mit einer Länge von mindestens 30 Tagen wurden vom Deutschen Wetterdienst erstellt.

Diese sind vergleichbar mit den Klimasignalkarten des Climate Service Center. Zur Prüfung der Robustheit wurde der gleiche 3-stufige Test durchgeführt. Im Gegensatz zu den Klimasignalkarten des CSC wurde die Auswertung auf Basis von Modellgitterpunkten ($0,2^\circ \times 0,2^\circ$) statt von Landkreisen durchgeführt und es gingen nur Klimaprojektionen mit dem Szenario A1B ein: 15 regionale Klimaprojektionen aus dem ENSEMBLES-Projekt sowie Läufe von CLM und REMO. Die Liste der Klimamodelle (ohne WETTREG und STAR) findet sich unter:

http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=P30200537501343712813218

10.3 Tagessummen in CLM und REGNIE: Ergänzung zu 5.2

Ein Vergleich der CLM und REGNIE-Daten wurde mit Hilfe von Häufigkeitsverteilungen durchgeführt. Kumulierte Häufigkeitsverteilungen von Tagesniederschlägen im Referenzzeitraum von CLM 1 und REGNIE sind in Bild 36 - Bild 38 für die Regionen 2 bis 4 dargestellt. Für Niederschlagssummen bis ca. 20 mm gibt CLM die Verteilung insgesamt gut wieder. Dabei ist die Bandbreite in Region 2 zu groß, in Region 3 dagegen zu klein. Ab dem 99%-Quantil gibt es deutlich größere Abweichungen des Medians in der Größenordnung von 5-10 mm. Unterschiede zwischen CLM 1 und CLM 2 (nicht abgebildet) sind kleiner im Vergleich mit den Unterschieden von CLM 1 und REGNIE.

Mithilfe von Korrekturfunktionen (Bias-Korrektur nach Piani et al., 2010) werden die Unterschiede für den Median, das 15 %-Quantil und das 85%-Quantil der Verteilungen korrigiert. Für sehr hohe Ereignisse ab ca. 40 mm gibt es durch das seltene Auftreten eine erhöhte Unsicherheit bei der Bestimmung der Korrekturfunktion. Die Sensitivität bezüglich der Bias-Korrektur wird durch Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Korrekturfunktionen (Median und Quantile) abgeschätzt.

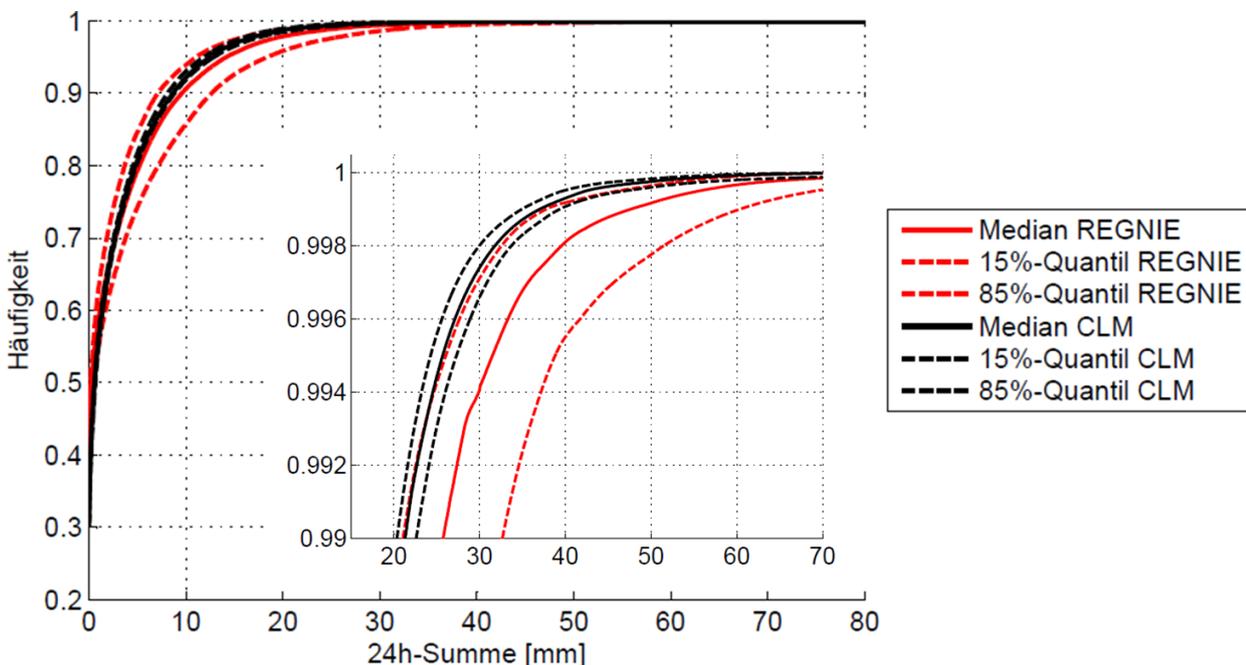


Bild 36: Region 2, Niederschlagsverteilung aus CLM 1 (vor Durchführung der Bias-Korrektur) und REGNIE, 1961-1990. Kumulierte Häufigkeitsverteilung mit Zoom ab 99%.

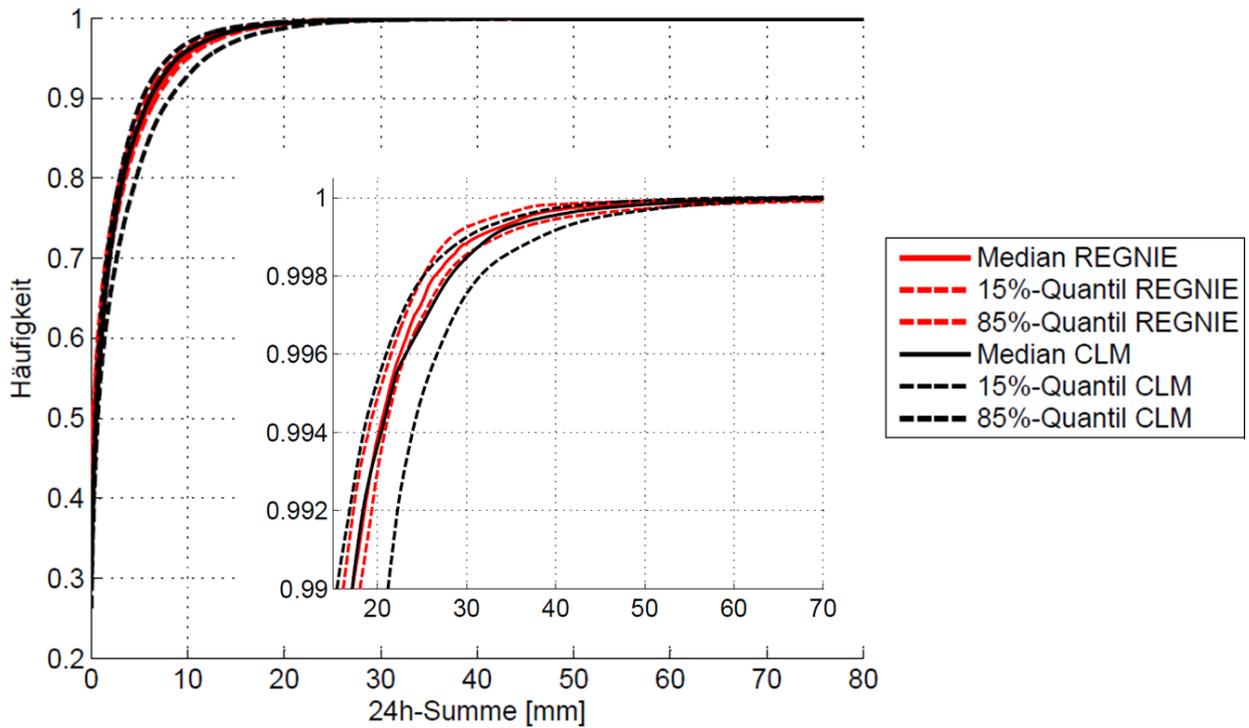


Bild 37: Region 3, Niederschlagsverteilung aus CLM 1 und REGNIE, 1961-1990. Kumulierte Häufigkeitsverteilung mit Zoom ab 99%

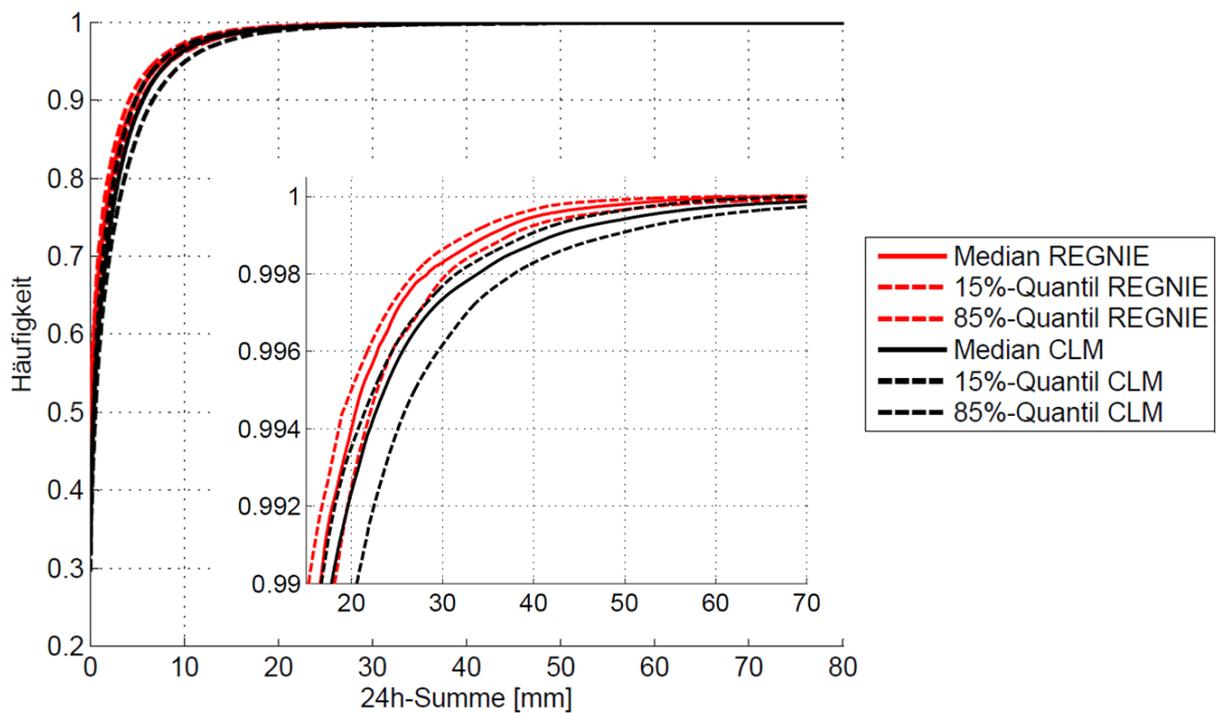


Bild 38: Region 4, Niederschlagsverteilung aus CLM 1 und REGNIE, 1961-1990. Kumulierte Häufigkeitsverteilung mit Zoom ab 99%

10.4 Zwischenschritte Downscalingverfahren

Im Downscaling-Verfahren (vgl. Kapitel 5.3, Bild 9) werden vor der Bias-Korrektur und dem Auswahlverfahren die folgenden Schritte durchgeführt:

10.4.1 Einteilung von Temperatur-Klassen

Wie die zeitliche und räumliche Verteilung von Niederschlägen ausfällt, hängt statistisch mit der Temperatur zusammen, wobei bei höheren Temperaturen häufiger konvektive Ereignisse auftreten (Berg, 2013). Daher wird die absolute Temperatur im Downscalingverfahren als Kriterium für die Zuordnung von ähnlichen Niederschlagsereignissen berücksichtigt. Die Tage werden dafür anhand ihrer Tagesmitteltemperatur in 5 Temperaturklassen eingeordnet. Die Temperaturklassen entsprechen den 0-20%, 20-40%, 40-60%, 60-80% und 80-100% Quantilen im Zeitraum 1961-1990 (Temperatur der Klimastationen bzw. beide Läufe CLM, jeweils im Mittel über die Region). In den Projektionsdaten von CLM für die Zukunft treten mehr Tage mit höheren Temperaturklassen auf. Histogramme der Temperatur von Region 2 und 3 und die resultierenden Temperaturklassen sind in Bild 39, Bild 40 und Tab. 19 dargestellt.

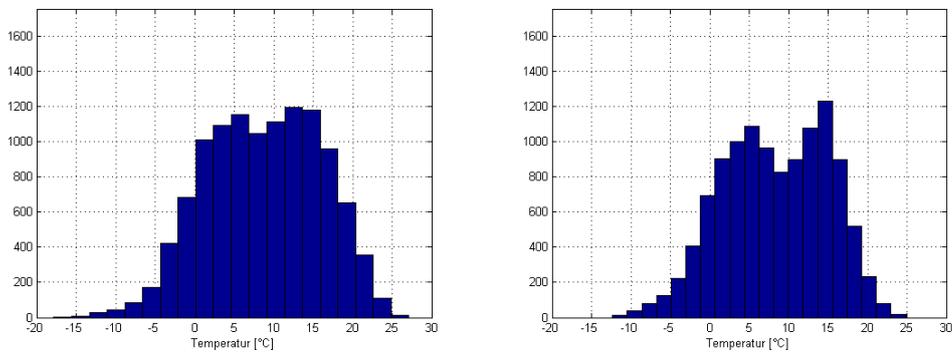


Bild 39: Histogramm mittlere Temperatur [°C], Beobachtungen von Klimastationen, in Region 2 (links) und Region 3, 1961-1990.

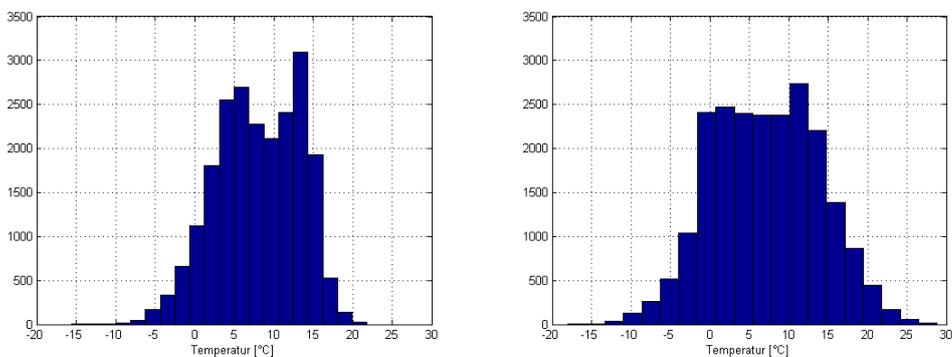


Bild 40: Histogramm mittlere Temperatur [°C] von CLM 1 und CLM 2, in Region 2 (links) und Region 3, 1961-1990.

T-Klasse	Region 2: CLM	Region 2: Stationen	Region 3: CLM	Region 3: Stationen
1	< 3.2°C	< 2.2°C	< 0.6°C	< 1.9°C
2	3.2 - 6.3°C	2.2 - 6.7°C	0.6 – 4.8°C	1.9 - 6.0°C
3	6.3 – 9.9°C	6.7 – 11.3°C	4.8 – 9.2°C	6.0 – 10.7°C
4	9.9 – 13.2°C	11.3 – 15.7°C	9.2 – 13.1°C	10.7 – 14.7°C
5	> 13.2°C	> 15.7°C	> 13.1°C	> 14.7°C

Tab. 19: Temperaturklassen für Region 2 und 3, CLM und Stationsdaten entsprechend den 0-20%, 20-40%, 40-60%, 60 80% und 80-100% Quantilen im Zeitraum 1961-90

10.4.2 Resampling der CLM-Zeitreihen für die Untersuchungsgebiete

Als Eingangsdaten für das Downscaling-Verfahren werden die mittleren Niederschlagsverteilungen der jeweiligen Region (Median, sowie 15%- und 85%-Quantil) genutzt, nicht die Niederschlagszeitreihen an den einzelnen Gitterpunkten. Dadurch werden zufällige Effekte an einzelnen CLM-Gitterpunkten weniger stark gewichtet. Um aus den mittleren Niederschlagsverteilungen die für das Downscaling benötigten Zeitreihen zu erzeugen, wird ein Resampling der Zeitreihen durchgeführt. Dabei werden der zeitliche Verlauf der Niederschläge und die zugehörigen Temperaturwerte aus den originalen CLM-Zeitreihen übernommen und die Niederschlagshöhe wird unter Beibehaltung der Rangfolge an die vorgegebene Niederschlagsverteilung angepasst. Auf diese Weise werden jeweils eine Anzahl von Zeitreihen mit der gleichen Niederschlagsverteilung, aber unterschiedlichen zeitlichen Verläufen und Temperaturen erzeugt. Diese Zeitreihen gehen in das weitere Downscaling-Verfahren ein, wodurch man zu einer Niederschlagsverteilung aus CLM ein Ensemble von Downscaling-Realisierungen erhält.

10.5 Vergleich der Berechnungsverfahren nach RAS-Ew/RiStWag und DWA

Berechnungsverfahren	Fließzeitverfahren	Hydrodynamische Modelle			Hydrologische Modelle		
DWA-Regelwerk	A 118 / A 110	A 118 / M 165			A 118 / M 165		
Abflussbildung befestigte Flächen	Spitzenabflussbeiwert abh. v. Befestigung, Geländeneigung, Bezugsregenspende	Einzelverlustansätze			Einzelverlustansätze		
Abflussbildung unbefestigte Flächen	Spitzenabflussbeiwert (s. o.) RAS-Ew: Ansatz von Versickerungsraten	Einzelverlustansätze, Infiltrationsmodelle			Einzelverlustansätze, Infiltrationsmodelle		
Abflusskonzentration	Berücksichtigung über gewählte Regendauer	Speichermodelle, Einheitsganglinie			Speichermodelle, Einheitsganglinie		
Kanalabfluss	Berücksichtigung über gewählte Regendauer	Lösungsansätze für die Saint-Venant-Gleichungen			Übertragungsfunktion, empirische Ansätze		
Zielgröße(n)	Spitzenabfluss	Abfluss- und Wasserstandsganglinien je Haltung/Schacht			Summarische Abflussganglinien, Wassermengen		
Vollfüllabfluss	Prandtl-Colebrook, Manning-Strickler	Prandtl-Colebrook, Manning-Strickler			-		
Niederschlagsbelastung	Regenspendenlinie, Blockregen rD,T	Modellregen Euler Typ II	Modellregen-gruppen	Gemessene Starkregenserien	Modellregen Euler Typ II	Modellregen-gruppen	Gemessene Starkregenserien
Aufgabenstellung							
Neubemessung	empfohlen	möglich			möglich		
Nachrechnung bestehender Systeme	möglich	empfohlen	empfohlen	empfohlen	möglich	möglich	möglich
Sanierungsvarianten	möglich	empfohlen	möglich		möglich	möglich	möglich
Überstau-, Überflutungshäufigkeit		empfohlen	empfohlen	empfohlen			

Standard RAS-Ew (2005)

Tab. 20: Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen nach DWA A118 (03/2006), DWA A110 (03/2011), ATV-DVWK M165 (01/2004) bzw. DIN EN 752:2008-04 im Vergleich mit den Vorgaben der RAS-Ew (2005)

Berechnungsverfahren	Einfaches Verfahren			Hydrologische Langzeitsimulation		
	Rückhaltebecken A 117	Versickerung A 138	Bodenfilter RAS-Ew	Rückhaltebecken A 117	Versickerung A 138	Bodenfilter M 178
Anwendungsbereich	Einfache Systeme	dezentrale Anlagen	Bemessung analog Versickerung	Komplexe Systeme	zentrale, gekoppelte Anlagen	alle
Anwendungs-voraussetzungen	$A_{E,k} \leq 200 \text{ ha}$; $t_F \leq 15 \text{ min}$; $T \leq 10 \text{ a}$; $q_{Dr,R,u} \geq 2 \text{ l/s/ha}$	$q_s \geq 2 \text{ l/s/ha}$		Niederschlagskontinuum mind. > 10 Jahre und > vorgegebene Wiederkehrzeit		
Zielgröße(n)	Volumen	Volumen, Entleerungsdauer, Versickerungsfläche		Volumen, Überstauhäufigkeit	Volumen, Entleerungsdauer, Versickerungsfläche, Versagenshäufigkeit	Volumen, Entlastungsrate, hydr. Wirkungsgrad, hydr. Flächenbelastung
Niederschlagsbelastung	Regenspenden versch. Dauerstufen			Niederschlagskontinuum		
Abflussbildung befestigte Flächen	Mittlerer Abflussbeiwert abh. v. Flächentyp			Einzelverlustansätze		
Abflussbildung unbefestigte Flächen	Mittlerer Abflussbeiwert abh. v. Flächentyp			Einzelverlustansätze, Infiltrationsmodelle		
Abflusskonzentration	Abminderungsfaktor f_A zur Berücksichtigung der Fließzeit			Speichermodelle, Einheitsganglinie		
Kanalabfluss	Berücksichtigung der Fließzeit			Übertragungsfunktion, empirische Ansätze		
Drosselabfluss bzw. Versickerungsrate	konstant			h-Q-Kennlinie		
Abminderungsfaktor f_A	$f(t; q_{Dr,R,u}; n) \approx 1$			-		
Zuschlagsfaktor f_z	DWA: 1,1 - 1,2; RAS-Ew: 1,0		-			
Aufgabenstellung						
Neubemessung	empfohlen	empfohlen		empfohlen	empfohlen	empfohlen
Sanierungsvarianten	geeignet	geeignet		geeignet	geeignet	geeignet
Überstau-, Überflutungshäufigkeit				empfohlen	empfohlen	empfohlen

Standard RAS-Ew (2005)

Tab. 21: Bemessung von Regenrückhalteräumen, Versickerungsanlagen und Bodenfiltern nach DWA A117 (04/2006), DWA A138 (04/2005) und DWA M 178 (10/2005) im Vergleich mit den Vorgaben der RAS-Ew (2005)

Anlagentyp	Regenklärbecken		Absetzbecken	Abscheider	Absetzanlagen als Vorstufe (Straßenentw.)		
Regelwerk	DWA M153	RAS-Ew	RAS-Ew	RiStWag	DWA M153	DWA M178	RAS-Ew
Oberflächenbeschickung q_A [m/h]	10	9	9	9	18	7,5 / 10	18
Regenspende [l/s/ha]	15 / 30 / 45	≥ 15	$r_{D,1}$	$r_{D,1} - r_{D,5}^{1)}$	15 / 30 / 45 / $r_{15,1}$	15	$r_{D,1}$
Zielgröße(n)	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche
Spitzenabflussbeiwert	DWA A118	RAS-Ew	RAS-Ew	RAS-Ew	DWA A118	DWA A118	RAS-Ew

1) Grundwasserschutzgebiete: T=1a; Talsperren: T=1-5a

Standard RAS-Ew (2005)

Tab. 22: Bemessung von Behandlungsanlagen nach DWA M153 (08/2007) und DWA M178 (10/2005) im Vergleich mit den Vorgaben der RAS-Ew (2005) und der RiStWag (2002)