



DIPLOMARBEIT

Auswirkungen möglicher Veränderungen von
Rahmenbedingungen auf siedlungswasserwirtschaftliche
Planungen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

FAKULTÄT FORST-, GEO- UND
HYDROWISSENSCHAFTEN

Fachrichtung Wasserwesen

Institut für Hydrologie und Meteorologie

verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr. sc. techn. P. Krebs

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. G. Schmitz

Dr.-Ing. H. Sieker

Dr.-Ing. J. Tränkner

Bearbeitung:

Björn Helm

Matrikelnummer 2924566

Bad Köstritz, Hoppegarten, Dresden und Florenz, Januar bis Juni 2007

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Aus fremden Quellen übernommene Passagen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Dresden, den 01. Juni 2006

Björn Helm

Annotation

Helm, Björn

Auswirkungen möglicher Veränderungen von Rahmenbedingungen auf siedlungswasserwirtschaftliche Planungen

Diplomarbeit, Technische Universität Dresden

Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften

159 Seiten – 59 Abbildungen – 31 Tabellen – 119 Quellen
im Anhang: 9 Abbildungen und 10 Tabellen

Autorenreferat

Die vorliegende Arbeit stellt ein Verfahren vor, dass es ermöglicht die Einflüsse von globalem Wandel auf Systeme der Regenentwässerung zu untersuchen, zu quantifizieren und zu bewerten. Das Vorgehen wird in Form einer Fallstudie für die Gemeinde Kupferzell und das Einzugsgebiet der Kupfer dokumentiert.

Auf Basis von Literaturstudie, statistischen Analysen und Auswertung des ist-Zustandes werden Szenarien des globalen Wandels entwickelt und auf die lokale Skale umgesetzt. Für das Gebiet werden Varianten des Entwässerungssystems etabliert, die eine Anpassung an die Szenarien ermöglichen. Untersucht werden die Erweiterung im Mischsystem, Trennsystem und durch dezentrale Entwässerungsmethoden und eine erweiterte dezentrale Variante bei der auch Anpassungen im Bestand erfolgen und Regenwasser genutzt wird. Die Varianten und Szenarien werden zu Alternativen kombiniert.

Mit einer integrierten Modellierung von Einzugsgebiet und Entwässerungssystem werden Wasser- und Stoffkreislauf im ist-Zustand und für die Alternativen untersucht. Neben den Modellergebnissen werden qualitative Parameter herausgearbeitet, die es erlauben den Nutzen der Alternativen in Bezug auf die Bereiche Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft zu beurteilen.

Der Vergleich der Alternativen erfolgt über eine Nutzwertanalyse und statistisch basierten Parametern, die zum Teil im Rahmen der Arbeit entwickelten wurden und die es erlauben die Ausgewogenheit des Nutzens über die betrachteten Teilaspekte und die Flexibilität im Umgang mit verschiedenen Arten von Zukunft zu beurteilen.

Thesen

1. Der globale Wandel umfasst die Veränderung von klimatischen, ökologischen, sozialen, wirtschaftlichen und technologischen Vorgängen.
2. Für die Abbildung des globalen Wandels auf lokale Infrastruktursysteme gibt es keine etablierte Methodik. Die Arbeit stellt anhand einer Fallstudie eine mögliche Herangehensweise vor.
3. Das Entwässerungssystem beeinflusst die hydrologische und stoffliche Dynamik im Gewässer. Der Einfluss kann über die integrierte Modellierung beider Teilsysteme quantifiziert werden. Verschiedene Varianten der Entwässerung beeinflussen dabei in unterschiedlicher Weise die maßgeblichen Prozesse.
4. Szenarien des globalen Wandels können auf der Basis von Literaturrecherche, statistischen Daten und der Kenntnis über Prozesse im System Gewässer-Entwässerung entwickelt werden. Es hat sich für die integrale Betrachtung als Vorteilhaft erwiesen die Szenarien entlang einer „storyline“ zu entwickeln, die die gesellschaftlichen Werte der Szenarienannahme vermittelt.
5. Um den Vergleich des Systemwertes einer Entwässerungsvariante umfassend beurteilen zu können, sollten qualitative Aspekte, z. B. die Möglichkeiten zur Bürgerbeteiligung, in die Betrachtung einbezogen werden. Voraussetzung für ihre Erfassung im Variantenvergleich ist aber eine Quantifizierung der Unterstützung des Aspektes durch das Entwässerungssystem
6. Die Nutzwertanalyse auf Basis der Modellierungsergebnisse und der qualitativen Aspekte erlaubt eine integrale Beurteilung des Systemwertes. Im Sinne der Nachhaltigkeit sollten Aspekte und Ergebnisse aus den Bereichen Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft Eingang finden
7. Statistisch basierte Parameter bieten eine Möglichkeit um auf Basis der Ergebnisse der Nutzwertanalyse, die Beurteilung des Nutzwerts zu der des Systemwertes zu erweitern. Dazu werden die Ausgewogenheit des Nutzens einer Entwässerungsvariante über die einzelnen Zielkriterien der Analyse und die Flexibilität im Umgang mit den verschiedenen Zukunftsszenarien in die Bewertung integriert.

Inhalt

1	zur Struktur der Arbeit.....	1
2	Einführung	2
2.1.	Allgemeines	2
2.2.	Untersuchungsgebiet.....	3
2.2.1.	Die Kupfer und ihr Einzugsgebiet	4
2.2.2.	Die Gemeinde Kupferzell	7
2.3.	Vorbetrachtungen	8
2.3.1.	Skalen	9
2.3.2.	Rückkopplung und Interrelation.....	11
2.3.3.	Unsicherheiten	12
2.4.	Begriffe und Grundsätze.....	14
2.4.1.	Integration	14
2.4.2.	Nachhaltigkeit.....	17
3	Parameter im Wandel	19
3.1.	Klima und Umwelt	19
3.1.1.	Bemerkungen zum Klimawandel.....	19
3.1.2.	Temperatur	21
3.1.3.	Wasserkreislauf.....	22
3.1.4.	Vegetation und Ökosystem.....	30
3.1.5.	Landnutzungsänderung	31
3.2.	sozioökonomische Einflüsse.....	34
3.2.1.	urbane Strukturen.....	34
3.2.2.	Gesellschaftsstruktur.....	37
3.2.3.	Gesellschaft im Wandel – neue Ideale	40
3.2.4.	wirtschaftliche Entwicklung	41
3.2.5.	Wasserbedarf.....	43
3.3.	rechtliche und legislative Situation	44

4	Modellierung und Analyse des ist-Zustandes	47
4.1.	Gebietsdaten	47
4.1.1.	Datenaufbereitung.....	47
4.2.	Das Wasser- Stoffstrommodell in Storm.....	55
4.2.1.	Modellkonzept	55
4.2.2.	Berechnungsgrundlagen.....	55
4.3.	Abbildung des ist-Zustands	56
4.3.1.	Modell-Setup	56
4.3.2.	Kalibrierung.....	60
4.4.	Analysen für den Ist-Zustand	64
4.4.1.	Sensitivitätsanalyse	64
4.4.2.	Analysen nach BWK-M3.....	69
4.4.3.	Wasserhaushalt	75
5	Szenarien und Varianten	77
5.1.	Vorbetrachtungen	77
5.1.1.	allgemeines	77
5.2.	Szenarienentwicklung.....	83
5.2.1.	lokale Szenarien des globalen Wandels.....	83
5.2.2.	Alternativen des Entwässerungssystems für Kupferzell.....	90
5.3.	Umsetzung im Modell.....	91
5.3.1.	Allgemeine Struktur	91
5.3.2.	Abbildung der Entwässerungsvarianten im Modell	91
5.3.3.	Erweiterung der Strukturen des Entwässerungssystems	94
5.3.4.	potentieller natürlicher Zustand.....	97
5.3.5.	Simulationen.....	97
5.4.	Darstellung und Diskussion einiger Ergebnisse.....	97
5.4.1.	Hydraulik.....	98
5.4.2.	stoffliche Belastung.....	101

5.4.3.	Einfluss von Trockenwetter und Oberflächenabfluss	103
5.4.4.	Wasserhaushalt	106
5.4.5.	Kostenrechnung	108
5.4.6.	Überlauf aus Retention	113
6	Multidimensionaler Vergleich von Alternativen.....	114
6.1.	Methodik des multidimensionalen Alternativenvergleichs	114
6.1.1.	Möglichkeiten beim Vergleich von Alternativen	114
6.1.2.	Vorgehen bei der Nutzwertanalyse	115
6.1.3.	Darstellung der Ergebnisse	117
6.1.4.	Parameter zur integralen Beschreibung des Systemwertes.....	118
6.2.	Umsetzung der Wertanalyse	121
6.2.1.	Zielkriterien	121
6.2.2.	Zielfunktionen.....	125
6.2.3.	Festlegung der Gewichtung	127
6.3.	Darstellung und Diskussion der Ergebnisse.....	128
6.3.1.	Vergleich der Nutzwerte	128
6.3.2.	Vergleich der Homogenität der Alternativen.....	135
6.3.3.	Synthese zum multidimensionalen multivarianten Zielerreichungsgrad	138
6.4.	Fazit.....	141
7	Schlussfolgerungen	143
7.1.	Einschränkungen	143
7.1.1.	Datengrundlage	143
7.1.2.	Modellierung.....	143
7.1.3.	Szenarienentwicklung.....	144
7.1.4.	Methodik des Alternativenvergleichs.....	144
7.2.	Ergebnisse und Erkenntnisse	145
7.2.1.	Abbildung des Ist-Zustands.....	145
7.2.2.	Ergebnisse der Alternativenuntersuchung	145

7.2.3.	Variantenvergleich	146
7.2.4.	Parameter zur integralen Beschreibung des Variantenwertes	147
7.3.	Ausblick.....	148
7.3.1.	Modellierung.....	148
7.3.2.	Szenarienentwicklung.....	149
7.3.3.	Bewertung des Variantenwertes.....	149
8	Quellenverzeichnis.....	150
Anhang.		160

Abbildungen

Abb. 1 Lage der Untersuchungsgebietes in Baden-Württemberg	3
Abb. 2 Verteilung der Böden im Einzugsgebiet nach Bodengesellschaften	5
Abb. 3 Verteilung der Landnutzung im Einzugsgebiet der Kupfer, abgeleitet aus ATKIS-Daten	6
Abb. 4 Ortsteile der Gemeinde Kupferzell und Einzugsgebiet der Kupfer, aus der Landnutzung (ATKIS) abgeleitete Verteilung von Siedlungsflächen	7
Abb. 5 Zeitliche Skalen verschiedener natürlicher, anthropogener und sozioökonomischer Prozesse (leicht verändert nach [IPCC, 2001]).....	10
Abb. 6 Entwicklung der Bevölkerungszahlen für Deutschland, Baden-Württemberg und Kupferzell für den Zeitraum 1871 bis 2004 ([LASBW, 2006] und www.geohive.com).....	10
Abb. 7. Herangehensweise bei der Bewertung von Folgen der Klimaänderung (nach [Viner, 2002])	12
Abb. 8 Extremwertstatistische Auswertung nach Niederschlägen von 15' Dauer, für Niederschlagsschreiber in 100 km Umkreis der Gemeinde Kupferzell. Zusammengefasst nach [Bartels, 2005].....	24
Abb. 9 Entwicklung und Szenarien von Einwohnerzahlen und Bevölkerungswachstum im Zeitraum 1980 - 2050 in Deutschland für verschiedene Varianten der Entwicklung der Reproduktion [UNDESA, 2004], [UNDESA, 2006].....	37
Abb. 10 Entwicklung und Szenarien von Lebenserwartung bei Geburt und Median der Altersverteilung im Zeitraum 1980 - 2050 in Deutschland für verschiedene Varianten der Entwicklung der Reproduktion [UNDESA, 2004], [UNDESA, 2006].....	39
Abb. 11 Einzugsgebiet und reduziertes Einzugsgebiet der Kupfer	48
Abb. 12 Jahresgang der mittleren und maximalen monatlichen Temperatur und Monatssumme der Verdunstung	51
Abb. 13 Schema der Abflussbildung und -konzentration im Flusseinzugsgebiet	57
Abb. 14 Schema der Abflussbildung und -konzentration im Einzugsgebiet einer Kläranlage	58
Abb. 15 Detailansicht des Teileinzugsgebietes Kupfer unterhalb Lietenbach (KU8), Umsetzung im Modell	59

Abb. 16 globale (links), zonale (Mitte) und flächenspezifische (rechts) Variation der Kalibrierungsparameter	61
Abb. 17 Ganglinien des zweijährigen und fünfzigjährigen Hochwassers für zwei verschiedene Kalibrierungen.....	63
Abb. 18 Spitzendurchflüsse für verschiedene Jährlichkeiten der gleichen Kalibrierungskonfiguration mit unterschiedlichen Bemessungsregen und statistische Jährlichkeiten	64
Abb. 19 Abflussganglinien für verschiedene Niederschlagshöhen des fünfjährigen Regens am Gewässerabschnitt oberhalb Zufluss Rinnenbach	66
Abb. 20 normierte Verläufe des Spitzendurchflusses an den drei betrachteten Gewässerabschnitten	67
Abb. 21 relative normierte Verläufe des Spitzendurchflusses an den drei betrachteten Gewässerabschnitten	67
Abb. 22 Sensitivitäten als mittlere relative normierte Verläufe des Spitzendurchflusses.	68
Abb. 23 Flächenanteile der Landnutzung im Einzugsgebiet für den potentiellen natürlichen Zustand	70
Abb. 24 Vergleich der Hochwasserwellen des einjährigen Ereignis im ist-Zustand und des zweijährigen Ereignis im potentiellen natürlichen Zustand für den Gewässerabschnitt KU771	
Abb. 25 relative Abweichung der Gewässerabschnitte vom hydraulischen Kriterium nach BWK-M3	72
Abb. 26 Vergleich der Hochwasserwellen des einjährigen Ereignis im ist-Zustand und des zweijährigen Ereignis im potentiellen natürlichen Zustand für den Gewässerabschnitt KU_EZG.....	72
Abb. 27 Konzentrationen für Sauerstoff, Ammoniakstickstoff und abfiltrierbare Stoffe sowie Durchfluss für verschiedene Regenspenden in der Kupfer	74
Abb. 28 Komponenten der Wasserbilanz für potentiell natürliches und bestehendes Einzugsgebiet und Siedlungsflächen.....	76
Abb. 29 Szenarientrichter – Veränderung der Spannweite von Parameterzuständen über die Zeit (leicht geändert nach [Weinbrenner, 1999]).....	78
Abb. 30 Szenarien nach dem UK-Foresight Projekt (Abb. leicht geändert nach [UKCIP, 2001])	80
Abb. 31 Abflussbildung und –konzentration im Trennsystem	92

Abb. 32 Abflussbildung und –konzentration des dezentralen Entwässerungssystems	93
Abb. 33 Wasserströme der erweiterten dezentralen Varianten	93
Abb. 34 Vergleich der Dimensionen für die dezentralen Elemente der Regenwasserbewirtschaftung.....	94
Abb. 35 auszutauschende Kanallängen und zusätzlich Benötigtes Retentionsvolumen in Abhängigkeit vom spezifischen Abflussverhältnis.....	96
Abb. 36 Spitzendurchflüsse des 20-jährigen Hochwasser für die Alternativen und den potentiell natürlichen Zustand	98
Abb. 37 Spitzendurchflüsse des einjährigen Hochwassers für die Alternativen und das zweijährige Hochwasser für den potentiell natürlichen Zustand.....	99
Abb. 38 Anzahl der Tage an denen das statistische MNQ für die Alternativen und den potentiell natürlichen Zustand unterschritten wird.....	100
Abb. 39 Jährliche Frachten abfiltrierbarer Stoffe als Eintrag in das Fließgewässer durch die Entwässerungsvarianten und anthropogener Anfall.....	101
Abb. 40 Jährliche Frachten Phosphor als Eintrag in das Fließgewässer durch die Entwässerungsvarianten und anthropogener Anfall.....	102
Abb. 41 Jährliche Frachten Kupfer als Eintrag in das Fließgewässer durch die Entwässerungsvarianten und anthropogener Anfall.....	103
Abb. 42 Frachten von Siedlungsflächen, im Fließgewässer, aus Trockenwetterabfluss und an den Kläranlagen für das konservierende Szenario.....	104
Abb. 43 Frachten von Siedlungsflächen, im Fließgewässer, aus Trockenwetterabfluss und an den Kläranlagen für das Lastfall Szenario	105
Abb. 44 relative Anteile der Wasserhaushaltskomponenten für die den potentiellen natürlichen Zustand und die Alternativen.....	106
Abb. 45 Absolutwerte der relativen Unterschiede der Wasserhaushaltskomponenten zwischen den Alternativen und dem potentiellen natürlichen Zustand	107
Abb. 46 Verlauf der kumulierten Kosten für die Entwässerungsvarianten im Lastfall Szenario	111
Abb. 47 Übersicht über Investitions- und Betriebskosten und Projektkostenbarwerte der Szenarien.....	112
Abb. 48 kumulierte Kosten der erweitert dezentralen Varianten mit und ohne Zisternen...	113

Abb. 49 jährliches Überlaufvolumen aus den Retentionsmaßnahmen**Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Abb. 50 Balkendiagramm der Nutzwerte für das lineare Szenario und ein virtuelles optimales System..... 117

Abb. 51 Kressektorendiagramm für die erweitert dezentrale Variante im linearen Szenario. 118

Abb. 52 Zielfunktion der abfiltrierbaren Stoffe..... 126

Abb. 53 Entwicklung der Wichtungsfaktoren für den Raumplanungspfad..... 127

Abb. 54 Nutzwerte der Alternativen im Überblick 130

Abb. 55 Nutzwerte der Alternativen für die Aggregation der Zielparameter in den Unterbereichen im Überblick..... 131

Abb. 56 Nutzwerte der Alternativen für absolut definierte Zielparameter..... 134

Abb. 57 Kressektordiagramm für erweitert dezentrales (links) und Mischsystem (rechts) im Lastfall Szenario..... 136

Abb. 58 Kressektordiagramm für erweitert dezentrales (links) und Mischsystem (rechts) im konservierenden Szenario..... 137

Abb. 59 Kressektordiagramm für erweitert dezentrales (links) und Mischsystem (rechts) im Lastfall Szenario, aggregiert zu den Hauptbereichen..... 140

Tabellen

Tab. 1 Hauptzahlen des Pegels Forchtenberg	4
Tab. 2 Räumliche und zeitliche Dimensionen klimatischer Phänomene (zusammengestellt nach (Oke, 1987) und (Lauer, 2006))	9
Tab. 3 Charakteristika der alten und aufkommenden Paradigmen der urbanen Wasserbewirtschaftung (leicht geändert nach [Mitchell, 2006]).....	16
Tab. 4 Monats-, Halbjahres- und Jahreswerte des linearen Trends der korrigierten Niederschlagshöhe [mm] der Jahre 1891-1997 für die Messstationen Karlsruhe und Bamberg. Zusammengefasst nach [Günther, 2004].....	25
Tab. 5 Veränderung der mittleren jährlichen und saisonalen Niederschläge gegenüber dem Zeitraum 1987-2003 für das Neckar-Einzugsgebiet auf Basis verschiedener Klimamodelle und Regionalisierungen.	26
Tab. 6 Änderungstendenzen für mittlere monatliche Niedrig-, Mittel- und Hochwasserdurchflüsse zusammengestellt nach [KLIWA, 2006b]	29
Tab. 7 Klimafaktoren für die Erhöhung der Spitzendurchflüsse von Bemessungshochwässern verschiedener Jährlichkeiten im Einzugsgebiet des Kochers.....	29
Tab. 8 Tägliche Änderung der Landnutzung nach Landnutzungsarten 1997-2004 in Baden-Württemberg nach [Werner, 2006].....	32
Tab. 9 kontinentale und globale Zusammenfassung von Bevölkerung, bewässerter Landfläche, Abfluss und Wasserbedarf für den Ist-Zustand 1985 und 3 Szenarien für 2025. 44	
Tab. 10 hydraulische Eigenschaften der Gewässerabschnitte.....	49
Tab. 11 Eigenschaften der Landnutzung für Flächen mit natürlichem Wasserhaushalt	50
Tab. 12 Eigenschaften der Landnutzung für Flächen mit natürlichem Wasserhaushalt	50
Tab. 13 hydraulische Eigenschaften der Böden im Einzugsgebiet.....	50
Tab. 14 Literaturwerte für die Verschmutzungskonzentration nach Ort der Entstehungs.....	52
Tab. 15 Zusammenfassung der Quellen und Arbeitsschritte der Datenrecherche und -aufbereitung	54
Tab. 16 regionalisierte Spitzendurchflüsse des reduzierten Einzugsgebiets	61
Tab. 17 Übersicht über die ausgewerteten Eingangsparameter und die Bandbreite ihrer Werte	65

Tab. 18 Werte der Sensitivitätskoeffizienten zwischen Spitzendurchfluss und den Untersuchten Parametern	68
Tab. 19 Übersicht über die qualitativen Aspekte der RIVERTWIN-Neckar Szenarien nach [RIVERTWIN, 2006]	81
Tab. 20 Übersicht über die im Modell betrachteten Parameter und ihre Umsetzung	84
Tab. 21 Übersicht über die statistische Datengrundlage und Modellannahmen für die Kriterien des linearen Szenarios, die Daten stammen aus [LSABW, 2007]	86
Tab. 22 Übersicht über die Quellen und Modellannahmen für die Kriterien des Lastfallszenarios	87
Tab. 23 Übersicht über die Quellen und Vergleich Modellannahmen für konservierendes und wachstumsorientiertes Szenario	89
Tab. 24 notwendige Längen der Schmutzwasserkanäle auf den neu angeschlossenen Flächen	95
Tab. 25 Übersicht über prozentuale Anteile nach Durchmesser und Rohrlängen für die Szenarien	97
Tab. 26 In der Kostenvergleichsrechnung berücksichtigte Aspekte	109
Tab. 27 spezifische Investitions- und Betriebskosten, Betriebsdauer von Entwässerungsanlagen	109
Tab. 28 Übersicht über die Vergleichskriterien nach hierarchischer Gliederung	122
Tab. 29 Parameterwert als Funktion von gesellschaftlicher Bedeutung der Zielgröße und deren Unterstützung durch das Entwässerungskonzept	123
Tab. 30 Übersicht über die Parameter zur Beschreibung der Systemgüte	139
Tab. 31 Parameter zur Beschreibung des Systemwertes für die verschiedenen Aggregationsebenen	141

Abkürzungen

ATKIS	Amtliches Topografisch-Kartographisches Informationssystem
BK	Betriebskosten [€/a]
BMP	best management practice
BÜK 200	Bodenübersichtskarte 1:200 000
DGM 50	Digitales Geländemodell 50m Auflösung
DN	nominaler (Rohr-)Durchmesser
DWD	Deutscher Wetterdienst
EF	Elementarflächen [m ²], [ha]
EG-WRRL	Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Gemeinschaft
ETP/R	potentielle / reale Evapotranspiration [mm/d], [mm/M], [mm/a]
EZG	Einzugsgebiet [ha], [km ²]
GCM	global climate model (globales Klimamodell)
HEC TR42	Hydraulic Engineering Corps Technical Release 42 (42. Technische Veröffentlichung des Regiments der Hydraulikingenieure)
HQ _T	Hochwasser der Jährlichkeit T [m ³ /s]
Inf	Infiltrationsrate [mm/h], [mm/min]
IK	Investitionskosten [€]
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (zwischenstaatlicher Ausschuss zum Klimawandel)
IPS	Ingenieurgesellschaft Professor Sieker mbH
K _{B/D/H/I/M/O}	Basisabfluss-/ Direktabfluss-/ Hypodermischer Makroporenabfluss- Interflow-/Oberflächenabfluss-Einzellinearspeicherkonstante [h], [min]
k _f	gesättigte Leitfähigkeit [m/s], [m/d]
KA4	4. überarbeitete Auflage der bodenkundlichen Kartieranleitung
KOSTRA	Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungsauswertung

MHQ	mittleres jährliches Niedrigwasser (von 1d Dauer) [l/s] [m ³ /s]
MNQ	Mittelwasser [l/s], [m ³ /s]
MQ	mittelres jährliches Hochwasser [l/s], [m ³ /s]
N-A-Modell	Niederschlags-Abfluss-Modell
P	Niederschlag [mm]
PKB	Projektkostenbarwert
pnZ	potentieller natürlicher Zustand
q	spezifischer Abfluss [l/s*ha], [m ³ /s*km ²]
Q	Abfluss [l/s], [m ³ /s]
RWB	Regenwasserbewirtschaftung
SRES	Special Report on Emission Scenarios (Szenarien des Sonderberichts zur Emission
TOP 50	topographische Karte 1:50 000
WABOA	Wasser und Bodenatlas Baden-Württemberg
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit stellt ein Verfahren vor, dass es ermöglicht die Einflüsse von globalem Wandel auf Systeme der Regenentwässerung zu untersuchen, zu quantifizieren und zu bewerten. Das Vorgehen wird in Form einer Fallstudie für die Gemeinde Kupferzell und das Einzugsgebiet der Kupfer dokumentiert.

In einer Literaturstudie werden Tendenzen des Wandels von sozio-ökonomischen und natürlichen Rahmenbedingungen zusammengefasst. Es werden in einer Übersicht Beispiele zu ihrer Untersuchung beschrieben und, wo möglich, die Reichweite ihrer Veränderlichkeit mit regionalem Bezug zum Untersuchungsgebiet quantifiziert.

Die Abbildung des Untersuchungsgebietes erfolgt durch die integrierte Modellierung von Fließgewässer und Entwässerungssystem mit einem Programm zur Niederschlags-Abfluss und Schmutzfrachtmodellierung.

Für den ist-Zustand werden Analysen durchgeführt, die den Einfluss der Veränderung von Randbedingungen auf den Spitzenabfluss im Gewässer beispielhaft beschreiben. Die stoffliche und hydraulische Belastung des Gewässers durch Einleitung aus dem Entwässerungssystem wird nach dem BWK-M3 Verfahren bestimmt und der Einfluss von Siedlungstätigkeit auf den Wasserhaushalt im Gebiet quantifiziert.

Auf Basis von Literaturstudie, statistischen Analysen und Auswertung des ist-Zustandes werden Szenarien des globalen Wandels entwickelt und auf die lokale Skale umgesetzt. Für das Gebiet werden Varianten des Entwässerungssystems etabliert, die eine Anpassung an die Szenarien ermöglichen. Untersucht werden die Erweiterung im Mischsystem, Trennsystem und durch dezentrale Entwässerungsmethoden und eine erweiterte dezentrale Variante bei der auch Anpassungen im Bestand erfolgen und Regenwasser genutzt wird. Die Varianten und Szenarien werden zu Alternativen kombiniert. Für die Alternativen werden die Auswirkungen auf Wasserhaushalt und Stoffhaushalt im Gebiet betrachtet. Die Kosten des Entwässerungssystems werden auf Basis einer Vergleichsrechnung ermittelt.

Der Vergleich der Alternativen erfolgt anhand einer Nutzwertanalyse. Zusätzlich werden statistisch basierte Parameter eingeführt, die eine Bewertung der Ausgewogenheit der einzelnen Nutzen-Aspekte und der Flexibilität der Entwässerungsvarianten im Umgang mit der Bandbreite möglicher zukünftiger Rahmenbedingungen erlauben. Die Anwendung der erweiterten Wertanalyse zeigt, dass die erweiterte dezentrale Variante sowohl in Bezug auf den Nutzwert als auch unter Berücksichtigung von Ausgewogenheit und Flexibilität den höchsten Wert für die Entwässerung der Gemeinde Kupferzell besitzt.

Abstract

The present thesis describes a method to investigate, quantify and assess the influences of global change on systems of stormwater management. The approach is documented through a case study for the town of Kupferzell and Kupfer watercourse.

Tendencies of change in the environmental and socio-economic framework are identified through a literature survey. Examples for studies, methods of investigation and range of variation of parameters that are subject of global change are concluded, where possible with regional reference to the area of investigation.

Precipitation-runoff and polluting load processes of watercourse and stormwater system are represented by integrated modelling.

For the present state, the influences of varying boundary conditions on peak runoff are determined in a sensitivity analysis. The effects of discharge from the combined sewer system on pollution and hydraulic stress in the receiving water are assessed considering the BWK-M3 method. Further the influence of settlement structures on the local climate is quantified.

Concluding the results of the literature survey, statistical analyses and the performance of the present state, four scenarios of global change are developed and transformed onto local scale. Different versions of the stormwater system are established to enable an adaption on the changed conditions. Expansion by combined system, separate system and decentralized measures as well as an extended decentralized version with adaptations in the stock are compared. Scenarios and versions are combined to alternatives. Consequences of global change on water balance and balances of matters are considered for the alternatives and a comparative cost method is applied.

The comparison of the alternatives is performed through a utility analysis. Additionally statistical based parameters are developed to assess homogeneity of different aspects of utility and flexibility of the stormwater systems when facing the spectrum of possible future changes. The application of the enhanced utility analysis shows, that the extended decentralized version of the stormwater system accounts best in utility value as well as in homogeneity and flexibility for the stormwater management in the community of Kupferzell.

Es soll hier kurz die Struktur der Arbeit erläutert werden, um dem Leser die Orientierung zu erleichtern und helfen, die für ihn relevanten Aspekte zu identifizieren.

Der Abschnitt Einführung stellt das Gebiet vor, das für die Fallstudie untersucht wurde. Des weiteren werden grundsätzliche Prinzipien und Begriffe eingeführt, deren Kenntnis für die Abbildung des globalen Wandels allgemein und für die Anwendung auf wasserwirtschaftliche Systeme notwendig ist.

Der zweite Abschnitt nähert sich den Aspekten des globalen Wandels über die Ergebnisse einer Literaturrecherche. Für die in der Arbeit untersuchten Bereiche werden Angaben zur Bedeutung, Methodik der Untersuchung und Spannweiten des Wandels für einzelne Parameter getroffen.

Die Abschnitte Modellierung und Analyse des ist-Zustandes, Szenarien und Varianten und Multidimensionaler Vergleich von Alternativen umfassen jeweils in der Arbeit angewendete Methoden, Ergebnisse und Analysen. Die Kapitel folgen intern dieser Struktur um einen kontinuierlichen Lesefluss zu ermöglichen und nicht auf extensive Querverweise zurückgreifen zu müssen.

In der Modellierung und Analyse des ist-Zustandes werden Eingangsdaten und Modell vorgestellt und Aussagen zu den derzeitigen Verhältnissen im Untersuchungsgebiet getroffen. Die Szenarien und Varianten umfassen das Vorgehen bei der Entwicklung Szenarien der zukünftigen Entwicklung und Varianten des Entwässerungssystems und deren Kombination zu Alternativen. Die Umsetzung im Modell und ausgewählte Ergebnisse für den Anwendungsfall werden vorgestellt. Multidimensionaler Vergleich von Alternativen beschreibt die Auswertung auf Basis einer erweiterten Nutzwertanalyse. Es werden statistisch basierte Parameter entwickelt, die für die Bestimmung des Systemwertes einer Entwässerungsvariante genutzt werden. Sie integrieren den Nutzwert, die Ausgewogenheit des Nutzens über verschiedene Teilaspekte und die Flexibilität für verschiedenen Zukunftsszenarien.

Die Welt vollzieht einen immer schnelleren Wandel, der sich auf Natur- und Kulturraum bezieht und in weiten Teilen vom Menschen als Gestalter oder Verursacher induziert ist. Diese Veränderungen vorherzusagen und zu berücksichtigen, ist eine notwendige Voraussetzung zum Planen von Handlungen und Strukturen, aber sie ist mit Unsicherheiten verbunden.

Planung und Bewirtschaftung von Systemen der Regenentwässerung sind grundlegende stadtplanerische Aufgaben. Sie sind geprägt durch einen langen Planungshorizont, eine Vielzahl von Rahmenbedingungen und zu berücksichtigenden Zwangspunkten.

Historisch gesehen bestand das Ziel von Entwässerungssystemen vor allem im schnellen Abführen des Wassers und damit in der Minimierung seines Schadenspotentials im entwässerten Gebiet. Dieses Ziel wurde mit dem verbesserten Verständnis von Prozessen des Stofftransports und Mechanismen der Ökosysteme erweitert, um einen Erhalt von Ressourcen und anderen Schutzgütern zu gewährleisten.

Die Anforderungen an Entwässerungssysteme liegen also einerseits in der Flexibilität gegenüber veränderlichen Einflussgrößen und andererseits in einer möglichst geringen Veränderung der Energie- und Stoffhaushaltsdynamik von natürlichen Systemen.

Ökonomische Planungsgrößen gehören zu den wichtigsten Parametern bei Entwurf und Management der Entwässerungssysteme. Sie sind aber, in Abhängigkeit von den Einflussgrößen des Systems und der wirtschaftlichen Dynamik, Schwankungen unterworfen.

Die Aktualität und Relevanz des bearbeiteten Themas wird unter anderem durch die große Zahl an zitierten Publikationen belegt die in den vergangenen drei Jahren erschien. Der Nachteil dieses Umstandes besteht darin, dass kaum Standardwerke vorliegen und bisher auch noch keine etablierte Methodik entwickelt wurde. In diesem Spannungsfeld versucht die vorliegende Arbeit einen wissenschaftlich fundierten und auch pragmatischen Ansatz zu finden, wie globaler Wandel bei Planung und Bewirtschaftung von Systemen der Regenentwässerung berücksichtigt werden kann.

2.1. Allgemeines

Nach [Sundberg, 2004] ist ein System eine Entität, die Anregungen von außen aufnimmt und Reaktionen nach außen transformiert. Grundvoraussetzung für die Untersuchung von Systemverhalten ist die Definition und Abgrenzung des Systems. Im Fall der vorliegenden Arbeit besteht eine Kopplung zwischen einem natürlichen Gewässereinzugsgebiet und dem

anthropogenen Entwässerungssystem einer Gemeinde. Beide Systeme sind teilweise kongruent, sowohl in Bezug auf die räumliche Einordnung als auch auf Einfluss- und Antriebsfaktoren. Die nicht-übereinstimmenden Aspekte machen es jedoch notwendig einen weiteren Rahmen für die Betrachtung zu setzen.

Das Einzugsgebiet des Gewässers ist durch die geomorphologischen Wasserscheiden des Flusslaufs und seiner Nebengewässer definiert. Obwohl auch subkutane Fließprozesse bei der Abflussbildung berücksichtigt werden, wird das unterirdische Einzugsgebiet mit dem oberirdischen als übereinstimmend angenommen. Das urbane Entwässerungssystem umfasst Infrastrukturen, die das Regenwasser in urbanen Gebieten abführen, wasserwirtschaftliche Institutionen und Organisationen sowie Personen, die die Infrastruktur unterhalten bzw. das Wasser nutzen.

2.2. Untersuchungsgebiet

Die Arbeit wird in Form eines Fallbeispiels ausgeführt. Das betrachtete Gebiet umfasst die Gemeinde Kupferzell und die Kupfer. Das Gebiet liegt etwa 35 km östlich von Heilbronn (Abb. 1), im nordöstlichen Baden-Württemberg. Es ist der Region Franken zugeordnet und gehört zum Kulturreaum des Hohenloher Landes.

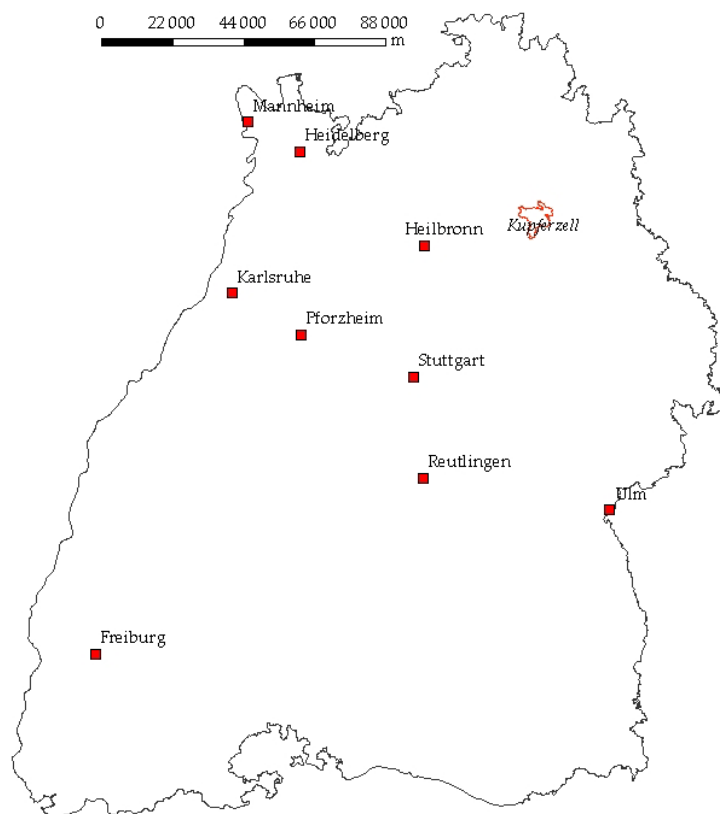


Abb. 1 Lage der Untersuchungsgebietes in Baden-Württemberg

2.2.1. Die Kupfer und ihr Einzugsgebiet

Gewässer

Die Kupfer ist ein Gewässer zweiter Ordnung. Sie gehört über Kocher und Neckar zum Einzugsgebiet des Rheins. Der Fluss hat ein Einzugsgebiet von 72,3 km². Die Quelle liegt auf 405m ü. NN bei Übrigshausen. Bei einem Fließweg von 23,8 km und einem mittleren Gefälle von 0,98% mündet die Kupfer auf 192,4 m ü. NN bei Forchtenberg in den Kocher. 0,7 km oberhalb der Mündung befindet sich der Pegel Forchtenberg. Die Hauptzahlen des seit 1931 betriebenen Pegels sind in Tab. 1 wiedergegeben. Die Hochwasserwerte wurden aus der Pegelstatistik abgeleitet, wobei die Mittel- und Niedrigwasserwerte regionalisiert wurden [LfUBW, 2004].

Tab. 1 Hauptzahlen des Pegels Forchtenberg

Hauptzahl	NN	MN	M	MH	H ₂	H ₅	H ₁₀	H ₅₀	H ₁₀₀	HH
Q [m ³ /s]	0.00	0.17	0.80	22.9	19.9	31.2	39.5	59.6	69.0	41.3
q [l/s*km ²]	0.0	2.7	11.3	320	278	436	551	832	963	577

Eine Übersicht über die Zuflüsse ist in Abb. A 1 des Anhanges dargestellt. Auf Grund der geologischen und morphologischen Gegebenheiten (s. u.) ist die Fließgewässerdichte hoch, entsprechend sind die Konzentrationszeiten des Oberflächenabflusses relativ kurz und homogen für das Gebiet. Die Isochronen des Oberflächenabflusses sind im Anhang (Abb. A 2) dargestellt.

Der Lauf der Kupfer und insbesondere die Zuflüsse sind zum Teil stark verändert. Eine Ortsbegehung ergab, dass die Kupfer in den durchflossenen Ortschaften und unterstrom von Kupferzell mit Gittersteinen befestigt und begradigt ist. Lietenbach, Feßbach, Goggenbach, Flürlesbach und Katzenbach sind mit Betonschalen gefasst und begradigt. Eine tabellarische Übersicht über die Strukturmerkmale der Gewässer fasst Tab. A 1 zusammen. Eine detaillierte Beschreibung der strukturellen Defizite gibt [Horlacher, 2002]. Im Oberlauf ist die Kupfer mit einer Gewässergüte von II – III als stark verschmutzt eingestuft, im Unterlauf bei Gewässergüte II als mäßig verschmutzt [LfUBW, 1998]

Morphologie

Das Einzugsgebiet ist morphologisch zweigeteilt. Der obere Teil liegt in der Kupferzeller Ebene, einem welligen Hügelland, das sich auf 320 bis 450 m ü. NN Höhe erstreckt. Die Täler der Gewässerläufe sind in diesem Bereich als Mulden zwischen flachen Höhenrücken ausgeprägt. Größere Reliefbewegungen herrschen nur am südöstlichen Rand vor, am Übergang

zu den Waldenburger Bergen, wo das Gebiet von 350 auf bis 509 m ü. NN ansteigt. Der Unterlauf der Kupfer fließt durch den Ohrwaldriedel, hier fließen das Gewässer und seine Zuflüsse durch Kerb- und Kerbsohlentäler. Die Wasserläufe bilden scharfe Einschnitte die durch Hochrücken abgegrenzt sind. Der Höhenunterschied beträgt hier 200 bis 412 m ü. NN. Eine Karte der Verteilung der Naturräume findet sich im Anhang (Abb. A 3)

Geologie und Böden

Die Kupferzeller Ebene ist eine Hochfläche des Muschelkalks/Unterkeupers. Sie liegt an der Südwestflanke des Schrozberger Schildes. Die Schichten steigen nach Osten hin an und bilden am Abschluss den Kochertalrand [Brunner, 1998]. Die Schichtenfolge ist durch Bundsandstein – unterer Muschelkalk – oberer Muschelkalk – Unterkeuper bestimmt. Auf den Höhenrücken liegen Lößlehmdecken. Im Anstehenden finden sich an den Hängen dolomitische Tonsteine des Unterkeupers, in den Talsohlen Kalksteine des oberen Muschelkalks und Auensedimente in den unmittelbaren Flussauen. In Bereichen, in denen der Muschelkalk durch das Tal angeschnitten wird, bestehen Karstformationen. Die Hänge im Südwesten bilden den Übergang zum Waldenburger Bergland und gleichzeitig zur geologischen Einheit des Keuperberglandes (Abb. A 4), hier ist das Anstehende von kompakten Tonsteinen geprägt.

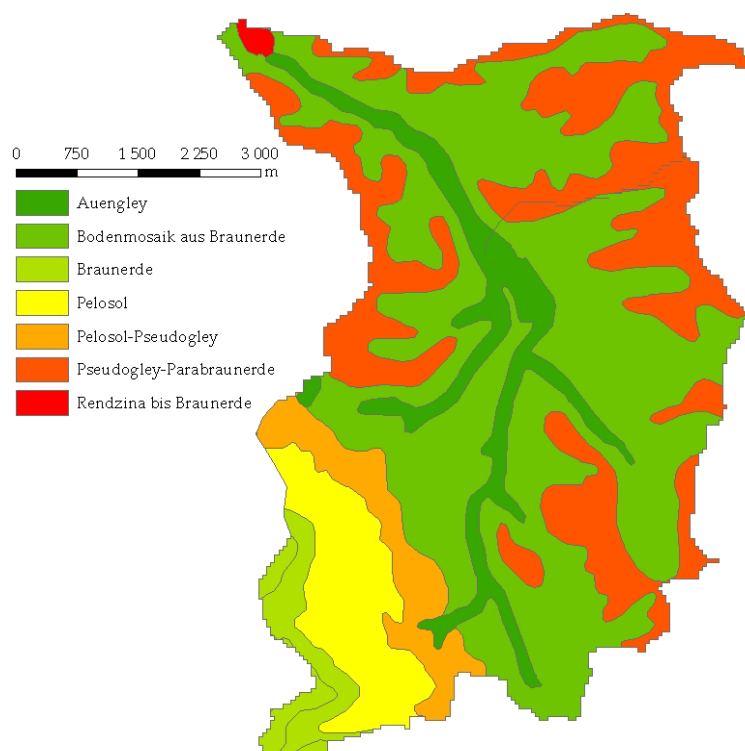


Abb. 2 Verteilung der Böden im Einzugsgebiet nach Bodengesellschaften

Die Böden sind in der Kupferzeller Ebene heterogen verteilt. Im vertikalen Verlauf der Hänge überlagern sich die Bodenentwicklungsprozesse ausgehend vom tertiären Grundgebirge

und die Umlagerung der Lößboden der Hügellücken. Die Bodenübersichtskarte 1:200 000 weist für weite Teile des Einzugsgebietes Bodenmosaiken - also Böden mit kleinräumigen Unterschieden - aus. Die Parabraunerden und Pseudogleye weisen auf eine fortgeschrittene Bodenentwicklung aus carbonathaltigen Sedimentgesteinen hin [Rehfuess, 1990]. Im Südosten liegen Pelosole in den Hangbereichen vor und belegen profiliertes Relief und zusammen mit den Braunerden der Bergkuppen abweichendes Ausgangsgestein. Die Verteilung der Böden im Einzugsgebiet kann in Abb. 2 nachvollzogen werden.

Landnutzung

Das Einzugsgebiet der Kupfer ist stark landwirtschaftlich geprägt. Grünland und Ackerflächen bedecken knapp 80% der Oberfläche. Mit 10,9% Gebäude- und Freiflächen liegt das Gebiet leicht unter dem Landesdurchschnitt für Baden-Württemberg von 13,6%. Die 11% Waldfläche liegen deutlich unter dem Landesdurchschnitt von 38,4% [Werner, 2006]. Die Verteilung der Flächen ist in Abb. 3 wiedergegeben.

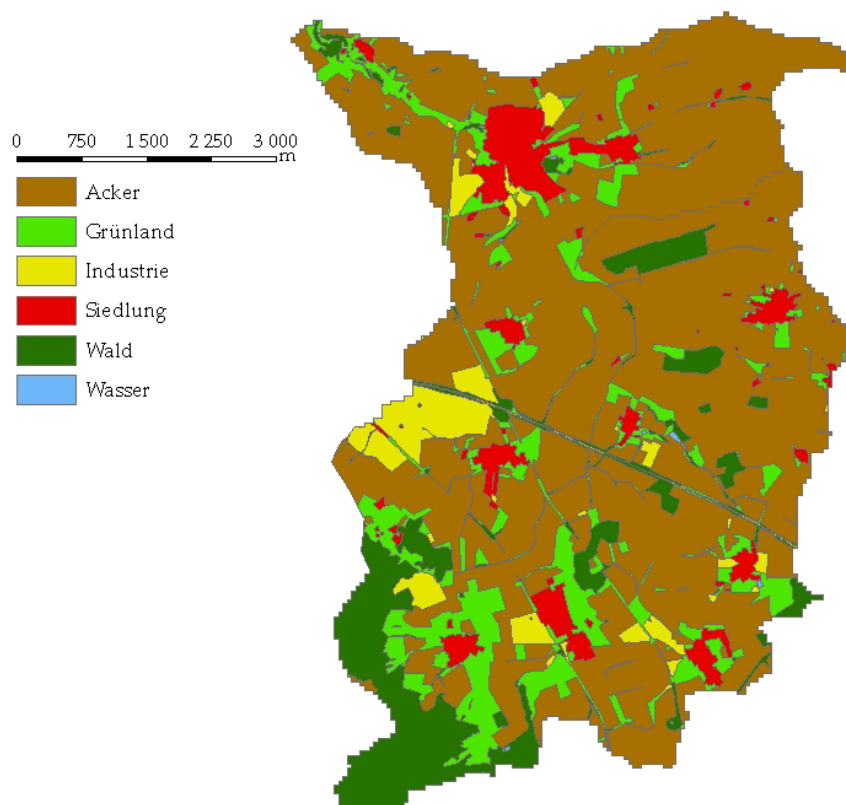


Abb. 3 Verteilung der Landnutzung im Einzugsgebiet der Kupfer, abgeleitet aus ATKIS-Daten

Potentieller natürlicher Zustand

Die potentielle natürliche Vegetation der Kupferzeller Ebene bestünde aus Eichen-Hainbuchenwäldern, im Uferbereich der Kupfer aus Erlen-Eschen-Auenwäldern [Horlacher, 2002]. Entsprechend der naturräumlichen Einordnung und dem mittleren Gefälle ist die

Kupfer nach [Pottgiesser, 2004] als feinmaterialreicher karbonatischer Mittelgebirgsbach einzustufen. Bäche dieses Typs verlaufen geschlängelt bis mäandrierend. Die Gewässerbetten sind kastenförmig mit bewegter Uferlinie. Das Sohlsubstrat ist durch einen Wechsel von Feinmaterial und Hartsubstraten geprägt.

2.2.2. Die Gemeinde Kupferzell

Die Gemeinde Kupferzell gehört zum Landkreis Hohenlohe. Sie wurde aus den sechs ehemals selbstständigen Gemeinden Eschentäl, Feßbach, Goggenbach, Kupferzell, Mangoldsall und Westernach zusammengeschlossen. Die 21 Ortschaften und Weiler verteilen sich auf einer Fläche von 54,3 km². Entsprechend der Entstehung der Gemeinde durch Zusammenschluss und Verwaltungsgemeinschaft ist die Siedlungsverteilung heterogen und es bestehen weite Freiräume zwischen den eigentlichen Ortsteilen (Abb. 4). Die Gemeindefläche deckt sich in hohem Maß mit der Fläche des betrachteten Einzugsgebietes

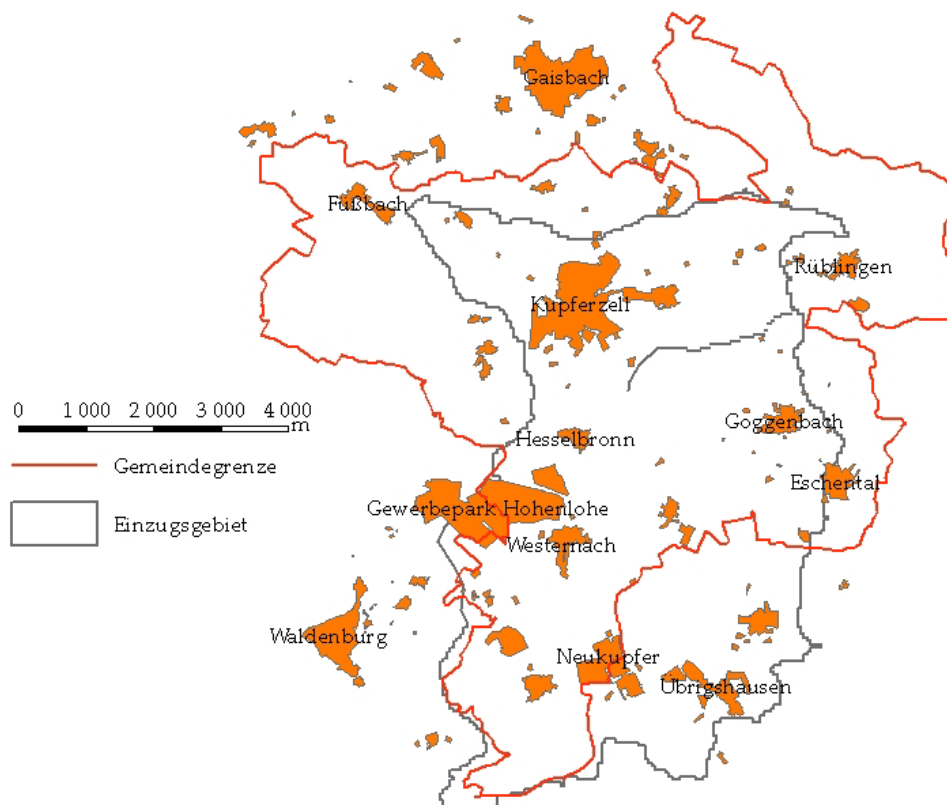


Abb. 4 Ortsteile der Gemeinde Kupferzell und Einzugsgebiet der Kupfer, aus der Landnutzung (ATKIS) abgeleitete Verteilung von Siedlungsflächen

Sozioökonomische Randbedingungen

Kupferzell hat 5733 Einwohner (Stand 2006, [LSABW, 2007]). Der Ort übernimmt entsprechend dem Landesentwicklungsplan 2002 die Funktion eines Klein zentrums [Gross, 2007] und deckt damit die Aufgaben der Versorgung und Bereitstellung von Infrastruktur für den

Nahbereich ab. Die Gemeinde wird raumplanerisch als ländlich eingeordnet, befindet sich aber in direkter Nachbarschaft zum Verdichtungsraum Schwäbisch-Hall und in weiterer Nachbarschaft zu den urbanen Räumen Heilbronn und Stuttgart.

Wie schon die Verteilung der Landnutzung im Einzugsgebiet andeutet, ist die Gemeinde in hohem Maße von der Landwirtschaft geprägt. Diese tritt allerdings in ihrer Bedeutung immer stärker in den Hintergrund. [Groß, 2007] konstatiert einen starken Rückgang der landwirtschaftlichen Haupterwerbsbetriebe, 2005 waren 4,2% der Bewohner von Kupferzell im primären Sektor beschäftigt und auf Kreisebene erfolgten nur 2,4% der Wertschöpfung durch die Land- und Forstwirtschaft [LSABW, 2007]. Produktion und Dienstleistung beschäftigen zu etwa gleichen Anteilen 45-50% der Bevölkerung, wobei die Wertschöpfung der Dienstleister schneller wächst [LSABW, 2007]. Die strukturellen Voraussetzungen für die wirtschaftliche Entwicklung sind durch die Lage an den Entwicklungsachsen Heilbronn – Öhringen – Schwäbisch Hall und Künzelsau – Schwäbisch Hall [Groß, 2007] sowie die Nähe zum Großraum Stuttgart günstig. Das Entwicklungspotential findet Ausdruck im geplanten Neuanschluss an die Stadtbahn (S-Bahn) von Stuttgart.

Entwässerungssystem

Die Gemeinde Kupferzell entwässert überwiegend im Mischsystem. Das Kanalnetz der an die Kläranlage angeschlossenen Teile der Gemeinde weist eine Länge von reichlich 50 km auf. Eine Gewerbefläche in Neu-Kupfer und eine Neubau-Wohnsiedlung in Kupferzell entwässern das Regenwasser dezentral.

Im Gemeindegebiet von Kupferzell liegen zwei Kläranlagen. Die Kläranlage Kupferzell liegt unterstrom des Ortsteiles Kupferzell etwa im Bereich des Auslasses des Einzugsgebietes. Sie entwässert die Ortsteile Bauersbach, Belzhag, Eschental, Füßbach, Goggenbach, Hesselbronn, Kupferzell Kubach, Mangoldsall und Rüblingen. Die Kläranlage Kupferzell-Süd liegt unterstrom des Ortsteiles Neu-Kupfer, an sie sind Beltersrot, Neu-Kupfer und Westernach sowie die zur Gemeinde Untermünkheim gehörende Ortschaft Kupfer angeschlossen.

2.3. Vorbetrachtungen

Die nachfolgenden Ausführungen sollen den Blick dahingehend schärfen, dass „der globale Wandel“ nicht ein Phänomen ist, sondern eine Vielzahl von Effekten erfasst, denen gemeinsam ist, dass sie sich auf die Ursache menschlichen Wirkens zurückführen lassen. Dabei ist das Wort global sowohl „mit den Globus umfassend“ als auch mit „alle Bereiche erfassend“ charakterisiert. Dass die Übertragbarkeit dieser Effekte nicht trivial ist und von zahlreichen Randbedingungen abhängt, sollen die folgenden Blickpunkte verdeutlichen.

2.3.1. Skalen

Die Berücksichtigung der Dynamik von Prozessen kann nie losgelöst von ihrem zeitlichen und räumlichen Bezug erfolgen. Die Einteilung von Skalen erfolgt nach den Wirkmechanismen und der Reichweite der Prozesse. Da kein Vorgang diskret, sondern Teil eines Kontinuums ist, überrascht es nicht..., dass der Versuch der Definition von Skalengrenzen Uneinigkeit hervorruft [Oke, 1987]. Am Beispiel des Klimas soll hier die Abgrenzung der Skalen gezeigt werden (Tab. 2).

Ähnliche Skalen lassen sich aber auch für ökologische (Sukzessionszyklen), bio-geochemische (Stoffbilanzen), soziale (Migrationsbewegungen) und ökonomische (Wirtschaftszyklen) Vorgänge darstellen. Ein Problem besteht nach [Mauser, 2002] darin, dass die unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen unterschiedliche Terme und Konzepte verwenden, aber auch unterschiedliche Skalen.

Tab. 2 Räumliche und zeitliche Dimensionen klimatischer Phänomene (zusammengestellt nach (Oke, 1987) und (Lauer, 2006))

Klimaskale	räuml. Dimension	zeitl. Dimension	Klimaphänomen
Mikro	10^2 - 10^3 m	10^0 - 10^2 s	Oberflächenturbulenz
Lokal	10^2 - 10^4 m	10^1 - 10^4 s	Sommergewitter (konvektiv)
Meso	10^3 - 10^6 m	10^3 - 10^5 s	Zyklognese
Makro	10^5 - 10^7 m	10^4 - 10^6 s	Monsum-Zyklus

Kopplung von zeitlichen und räumlichen Zusammenhängen verschiedener Bereiche

Die Dynamik der einzelnen Bereiche ist verschieden. Während sich Kulturen und Ökosysteme nur langsam ändern, können ökonomische Veränderungen unvermittelt geschehen und sind normalerweise durch die Lebenszyklen von Kapitalgütern bestimmt [Martens, 2005]. Abb. 5 zeigt die zeitlichen Skalen verschiedener, mit der anthropogenen Klimaerwärmung in Zusammenhang stehender Prozesse.

In der Regel sind zeitliche und räumliche Dimension der Skalen gekoppelt. Dies ist aber keine notwendige Voraussetzung, zum Beispiel hängt die zeitliche Skale bei Grundwasserprozessen wesentlich stärker von den hydraulischen Eigenschaften des Untergrundes, als von der räumlichen Ausdehnung ihres Auftretens ab. Ein Beispiel für die Entkopplung der räumlichen Dimension gibt nach [Mauser, 2002] auch der globale Wandel. Während die politischen und wirtschaftlichen Einflussbereiche meist lokale bis regionale Reichweiten abdecken, summieren sich ihre Auswirkungen zu globaler Tragweite.

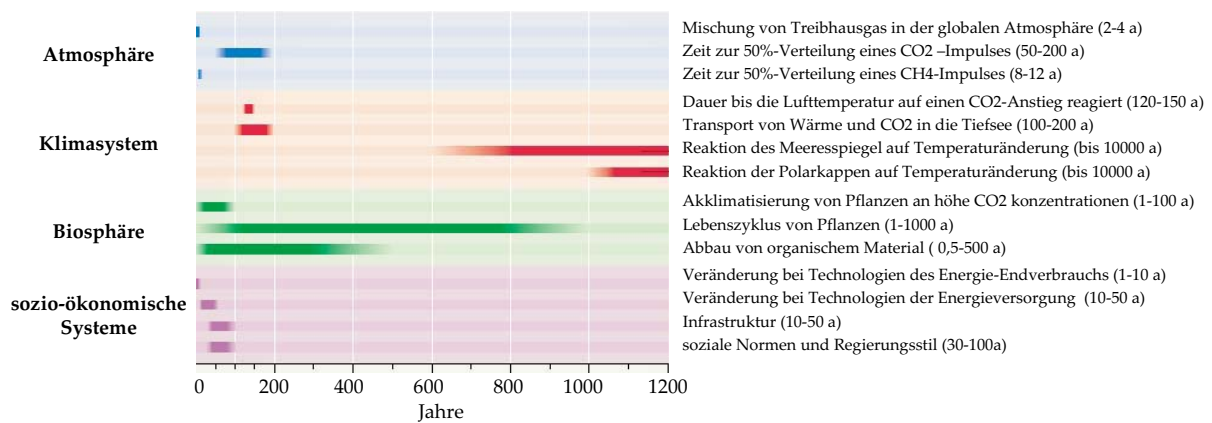


Abb. 5 Zeitliche Skalen verschiedener natürlicher, anthropogener und sozioökonomischer Prozesse (leicht verändert nach [IPCC, 2001])

Bevölkerungsentwicklung im betrachteten Gebiet

Die Bedeutsamkeit der Berücksichtigung von Skalen soll am Beispiel der Bevölkerungsentwicklung in Deutschland, Baden-Württemberg und Kupferzell Abb. 6 gezeigt werden.

Von einer unterschiedlich stark ausgeprägten, generellen Wachstumstendenz abgesehen, sind Verlauf und Proportion des Zuwachses für die drei Raumskalen verschieden. Für eine Abschätzung der Bevölkerungsentwicklung in Kupferzell wäre es also unzureichend die Prognose einer der höheren Aggregationseinheiten einfach linear "herunterzuskalieren".

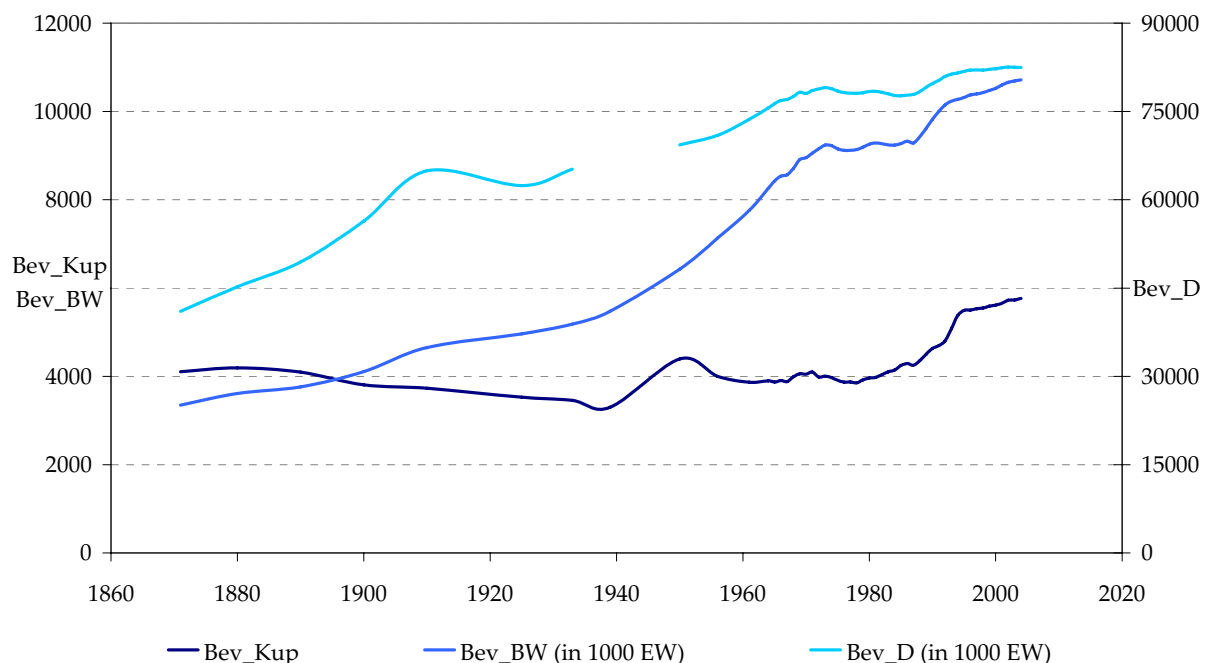


Abb. 6 Entwicklung der Bevölkerungszahlen für Deutschland, Baden-Württemberg und Kupferzell für den Zeitraum 1871 bis 2004 ([LASBW, 2006] und www.geohive.com)

Einige Beispiele zur Skalenabhängigkeit aus der Literatur

[Luijten, 2001] beschreibt, dass obwohl Kolumbien insgesamt den Schwellenwert für Knappheit bei Wasserressourcen pro Kopf um das 15-fache überschreitet, es in einigen Regionen zu Konflikten kommt, da das Wasser "temporär und räumlich heterogen verteilt ist".

Ein anderes Beispiel für die Skalenabhängigkeit der Betrachtung sind Naturkatastrophen. [Viner, 2002] nennt große Vulkanausbrüche, wie den des Pinatubo 1992, deren Einfluss auf den globalen Wasserhaushalt einige Monate, auf den globalen Klimahaushalt einige Jahre andauert, während die Auswirkungen für lokale bis kontinentale Systeme z. B. die sozio-ökonomische Entwicklung oder Ökosysteme im weiteren Umfeld der Katastrophe über Jahrhunderte beeinflusst werden können.

[van de Giesen, 2002] weist darauf hin, dass bei der integralen Modellierung von Wasserkreislauf und Wasserbewirtschaftung im Volta-Einzugsgebiet, in Zentralafrika, bedeutende Skalenprobleme bei der Schnittstelle zwischen hydrologischen Prozessen mit einer Skalenlänge von 1 m bis 10 km und meteorologischen Prozessen mit einer Skalenlänge von 1 km bis 1 000km auftreten.

2.3.2. Rückkopplung und Interrelation

Den globalen Wandel charakterisiert [Mausser, 2002] als Netzwerk von Interaktionen, bei denen der Mensch Ursache, Betroffener und Vermittler zugleich ist. Rückkopplungen umfassen Abläufe die über das einfache Ursache-Wirkungs-Prinzip hinausgehen. Sie beschreiben dämpfende (negative RK) oder verstärkende (positive RK) gegenseitige Abhängigkeiten von Prozessen. Sind mehrere Prozesse in einem Wirkungsgeflecht vernetzt und gegenseitig abhängig, spricht man von Interrelation.

Einige Beispiele zu Rückkopplung und Interrelation aus der Literatur

Ein häufig zitiertes Beispiel für positive RK zwischen Landnutzung und Lokalklima ist die Desertifikation der Sahelzone [vgl. Goldberg, 2006a]. Durch die Überweidung der Trockensavanne kommt es zu geringerer Pflanzenbedeckung und in Folge zu verminderten Transpirationsraten, dadurch ist die Luftfeuchtigkeit und Wolkenbildung abgeschwächt, was zu erhöhter Einstrahlung und verringertem Niederschlag führt. Beide Effekte verstärken den weiteren Rückgang der Vegetation.

[Kundzewicz, 2002] weist darauf hin, dass es in Folge von natürlich starker Variabilität und anthropogenen Veränderungen der Umwelt wie Urbanisierung, Entwaldung, Besiedlung flutgefährdeter Flächen und Verringerung der natürlichen Retentionskapazität schwierig ist die klimatische Komponente in Hochwasserdaten zurück zu verfolgen.

Die Komplexität der Zusammenhänge wird auch bei den Beziehungen von Wasserkreislauf und sozioökonomischen Veränderungen deutlich. [Luijten, 2001] gibt ein Beispiel für die Interrelation zwischen Bevölkerungswachstum, Intensivierung der Landwirtschaft und Änderungen im Wasserhaushalt bei verschiedenen Entwicklungsszenarien in einem zentral-amerikanischen Einzugsgebiet.

Die Interaktion verschiedener Prozesse ist eine wichtige Ursache für die Komplexität, wenn Änderungstendenzen berücksichtigt werden. Sie macht die Kooperation verschiedener Bereiche der Wissenschaft notwendig. [van de Giesen, 2002] nennt Vorhersage der Landnutzung und Optimierung der Wasserbewirtschaftung als Beispiele für Schnittstellen zwischen Natur- und Sozialwissenschaften.

2.3.3. Unsicherheiten

Die Unsicherheiten, die entstehen wenn die Auswirkungen der Änderung komplexer Systeme berechnet werden, sind erheblich. Gründe können methodisch, systematisch oder zufällig sein, wobei sich die Fehler kumulieren über die Folge der Betrachtungen. Um bspw. die Auswirkungen des Klimawandels quantifizieren zu können, muss nach [Viner, 2002] die in Abb. 7 dargestellte Abfolge bearbeitet werden. Sie stellt die klassische Herangehensweise für eine wissenschaftlich orientierte Bewertung der Folgen von Klimaänderung dar.

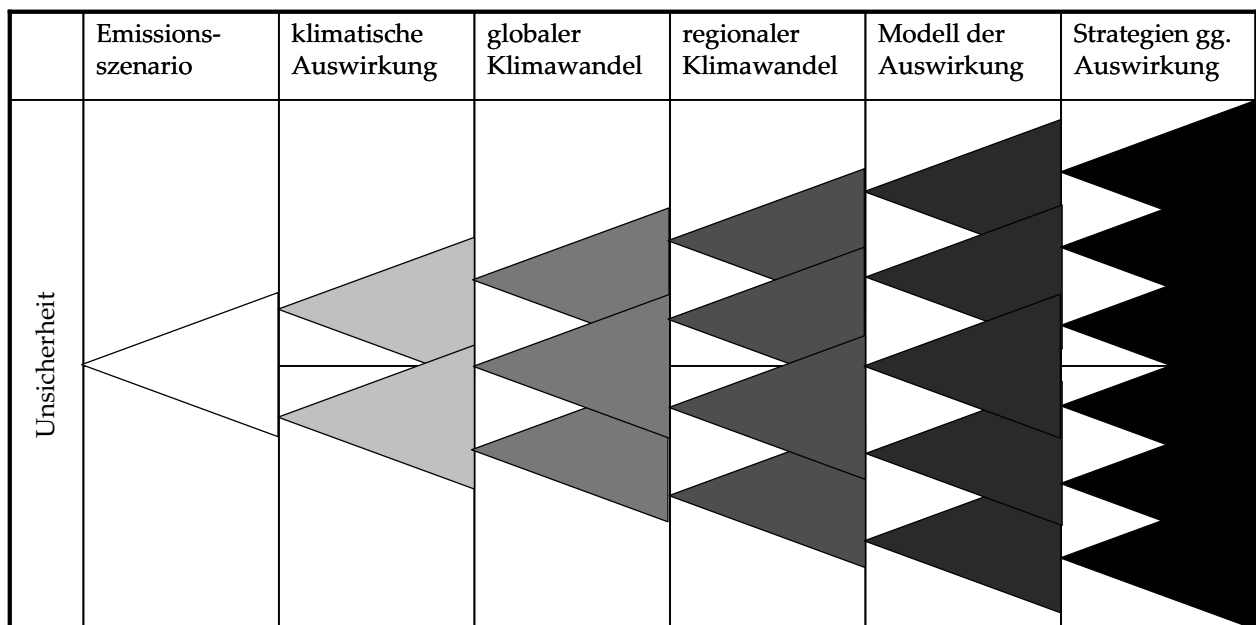


Abb. 7. Herangehensweise bei der Bewertung von Folgen der Klimaänderung (nach [Viner, 2002])

Die Abbildung verdeutlichte, dass die Fehler der einzelnen Ebenen kumulativ wirken. Daneben ist es ebenfalls wichtig zu berücksichtigen, dass das Prinzip des schwächsten Kettengliedes gilt. Die Prognose ist also in allen Bearbeitungsschritten von der Güte der zuvor gegangenen Schritte abhängig.

[van Luijteleaar, 2005] fasst die Niveaus der Unsicherheiten wie folgt zusammen:

statistische Unsicherheit, z. B. bei Messung und Auswertung,

Unsicherheit der **Szenarien**, Abschätzung zukünftiger Entwicklungen,

bekannte Unkenntnis, z. B. Stärke des Klimawandels,

totale Unkenntnis, wir wissen nicht, was wir nicht wissen, z. B. Auswirkungen von Naturkatastrophen oder Kriegen.

Stand des Wissens bei der Quantifizierung von Unsicherheiten

[Bronstert, 2002] weist darauf hin, dass es derzeit keine allgemein anerkannte Herangehensweise zur Quantifizierung der Unsicherheit im Zusammenhang mit der Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels gibt. Nach [Varis, 2004] besteht seit den späten 1990er Jahren die Erkenntnis, dass leicht geänderte Eingangsbedingungen stark variierende Klimavorhersagen bewirken. Dieses chaotische Verhalten beruht auf Rückkopplungs- und Schwellenwertmechanismen und erschwert ein Überprüfen der Plausibilität zusätzlich.

Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass kaum abgeschätzt werden kann, ob und inwieweit Maßnahmen getroffen werden, die die Auswirkung von Wandlungstendenzen abmildern. Für einige Bereiche ist die physische Machbarkeit solcher Maßnahmen eingeschränkt, etwa bei der Beeinflussung der Dauer von Trockenperioden. Andererseits spielen hierbei vor allem sozioökonomische Entwicklungen eine Rolle, etwa die politischen Ausrichtung und Planungskompetenz, aber auch der Grad der Akzeptanz von Risiken [Middelkoop, 2002]. Diese können gesellschaftlich bedingt regional unterschiedlich sein.

Seit Ende der 1990er Jahre überwiegt nach [Varis, 2004] die Bedeutung des probabilistischen Ansatzes zur Abschätzung der Unsicherheiten. So nennt die zwischenstaatliche Sachverständigengruppe für Klimaveränderungen (IPCC) [IPCC, 2001a] in ihren Reporten Kategorien wie „sehr wahrscheinlich“ für das Eintreten bestimmter Veränderungen. Die Ursache hierfür liegt vor allem im Bedarf an pragmatischen Vorgaben für politische Entscheidungen, hydrologische Entwurfsplanung und ähnliche Fragestellungen, die von der Überführung von Szenarien in Gefahrenstufen profitieren.

Bei der Analyse von hoch varianten Zeitreihen gibt [Günther, 2004] an, dass Probleme bei der Auflösung in periodische Schwankungen, kurzfristige Veränderungen und langfristige Tendenzen bestehen. Neben einem möglichen Trend nennt [Bartels, 2005] im Rahmen der KOSTRA (Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungsauswertung)-Fortschreibung für die Starkregenstatistik Unterschiede in der Datenbasis, technische Bedingungen der Messung und Methodik bei der Auswertung als Ursachen für Unterschiede in der mit verschiedenen Ansätzen und zu verschiedenen Zeiträumen berechneten Starkniederschlagshöhe.

2.4. Begriffe und Grundsätze

Der Begriff des globalen Wandels wurde oben bereits kurz eingeführt. Daneben tauchen in der vorliegenden Arbeit häufig die Begriffe Integration und Nachhaltigkeit auf, sie sollen im Folgenden kurz näher bestimmt werden.

2.4.1. Integration

In allgemeiner Form beschreibt die Integration „Herstellung eines Ganzen“, die Zusammenfassung von Teilaspekten in einen größeren Gesamtkontext. Integrierte Ansätze finden sich in vielen Bereichen, in denen komplexe Systeme in Beziehung mit ihrer Umwelt stehen, bspw. in der Landwirtschaft, Wirtschaftseinheiten und Umweltmanagement.

Integrierte Regenwasserbewirtschaftung

Nach [Sundberg, 2004] liegen die Hauptaufgaben der Siedlungsentwässerung einerseits im Abführen von Schmutzwässern um unhygienischen Zuständen vorzubeugen, andererseits im Abtransport von Regenwasser um Schäden durch Überflutung vorzubeugen. Die reine „Ableitungsmentalität“ bewirkt aber, wie [Brown, 2005] beschreibt, eine Verschlechterung des Zustands der urbanen Gewässer, indem das Fließregime, die Wasserqualität und aquatische Ökosysteme beeinflusst werden. Dabei definiert [Mitchell, 2006] für die Bewirtschaftung folgende Prinzipien:

Betrachtung **aller Bereiche des Wasserkreislaufs** – natürliche und konstruierte, ober- und unterirdische – um sie als integrales System aufzufassen,

Betrachtung sowohl **anthropogener- als auch ökologischer Anforderungen an das Wasser**
Betrachtung der **lokalen Zusammenhänge** unter Berücksichtigung der **sozialen, kulturellen, ökonomischen und Umweltperspektive**,

Streben nach Nachhaltigkeit, **Ausgleich von kurz-, mittel- und langfristigen umweltrelevanten, sozialen und ökonomischen Anforderungen**.

Die Integration im Bereich der Regenwasserbewirtschaftung kann auf zwei Ebenen erfolgen. Zum einen kann der Betrachtungsraum erweitert werden, indem z. B. außer dem unmittelbaren Siedlungsgebiet das Einzugsgebiet des Vorfluters mit einbezogen wird. Zum anderen können Aspekte, die nicht mit der Entwässerung zusammenhängen in die Betrachtung mit einbezogen werden. Ansatz der integrierten Bewirtschaftung von Regenwasser ist es, den Nutzen des Systems Entwässerungsstruktur-Umfeld zu maximieren. In der Regel gehen die Konzepte daher weit über die einfache Verhinderung von Schaden durch Niederschlag hinaus. [Mitchell, 2006] stellt fest, dass es eine Grundvoraussetzung für die integrierte RWB (Regenwasserbewirtschaftung) ist, die Interrelation zwischen einzelnen Bereichen des Wasserkreislaufs und den Handlungen von Einzelnutzern bzw. Wasserbewirtschaftern zu be-

rücksichtigen. Bspw. führt eine Erhöhung der Versiegelungsfläche oder die Nutzung von Gründachabfluss zu einer Verringerung des potentiell infiltrierten Wassers und damit dessen Nutzbarkeit als Ressource.

Seit den 1980er Jahren kam es zu entscheidenden Entwicklungen neuer Bewirtschaftungstechniken für Regenwasser. Sie sind in verschiedenem Maße geeignet, um bestehende Systeme anzupassen und neue Systeme zu etablieren. In Anbetracht der vorhandenen Verfügbarkeit, technologischen Überlegenheit und Zuverlässigkeit besteht nach [Brown, 2005] noch immer Nachholbedarf bei der großflächigen Anwendung der integrierten RWB. [Semadeni-Davies, 2005] sieht eine Tendenz zur zunehmenden Übernahme umweltfreundlicher Techniken bei Wasserbehandlung und Hochwasserschutz und nennt Urinseparation oder Regenwassernutzung als Möglichkeiten zur profunden Beeinflussung der Belastung von Kläranlagen, [Peters, 2007] zeigt diesen Effekt für ein urbanes Einzugsgebiet. Unter dem Blickwinkel der integrierten urbanen Wasserbewirtschaftung gewinnt auch der Aspekt der Nutzung von Regenwasser als Wasserressource an Bedeutung. [Mitchell, 2006] beschreibt die veränderte Sichtweise auf Ansätze und Vorgehen bei der RWB als Paradigmenwechsel und nennt die in Tab. 3 aufgeführten Punkte, um diesen Standpunkt zu belegen:

Tab. 3 Charakteristika der alten und aufkommenden Paradigmen der urbanen Wasserbewirtschaftung (leicht geändert nach [Mitchell, 2006])

altes Paradigma	aufkommendes Paradigma
menschliche Abfälle sind ein Störgut, sie sollten nach der Aufbereitung entsorgt werden	menschliche Abfälle sind eine Ressource, sie sollten zurückgehalten und effektiv verwendet werden
Regenwasser ist ein Störgut, es sollte schnellstmöglich abgeführt werden	Regenwasser ist eine Ressource. Es sollte zurückgehalten werden um dem Grundwasser, Gewässern, der Vegetation und menschlicher Nutzung zuzukommen
Nachfrage ist ein rein quantitativer Aspekt, die Mengen die von verschiedenen Verbrauchern angefordert werden sind der einzig relevante Planungsparameter für Infrastrukturen	Nachfrage ist facettenreich, Infrastruktur sollte nach den variierenden Anforderungen der Endverbraucher in Bezug auf Qualität, Quantität und Versorgungssicherheit ausgewählt werden
Durchsatzmentalität: Wasser folgt einer Einwegstraße von Aufbereitung über Einfachnutzung zu Klärung und / oder Entsorgung	Wiedernutzung und –aufbereitung: Mehrfachnutzung von Wasser von höheren zu minderen Qualitätsanforderungen. Wiederaufbereitung zur Rückführung in der Verbrauchspfad
Graue Infrastruktur aus Beton, Metall und Kunststoff	Grüne Infrastruktur: Boden und Vegetation ergänzen die klassischen Infrastrukturen
große, zentrale Systeme erlauben stabilere Bedingungen	kleine, dezentrale Systeme sind möglich und flexibler
begrenzte Komplexität und begrenzte Anzahl an standardisierten Ansätzen und Technologien legen die Infrastrukturen der Entwässerung fest	diversifizierte Ansätze, interdisziplinäre Entscheidungsträger fördern neue Bewirtschaftungsstrategien
Integration durch Zufall, Trink-, Ab-, und Regenwasser können von den selben Institutionen erfasst werden, die Systeme sind aber physisch getrennt	physische und institutionelle Integration als Systemkonzept, Verbindungen bestehen zwischen den Wasserströmen und erfordern einen hohen Koordinationsgrad
Zusammenarbeit entspricht Public Relations, andere Institutionen und die Öffentlichkeit werden einbezogen um eine getroffene Entscheidung zu bestätigen	Zusammenarbeit entspricht Engagement, andere Institutionen und die Öffentlichkeit werden bei der Suche nach effektiven Ansätzen einbezogen

Integrierte Modellierung im wasserwirtschaftlichen Bereich

Bei der integrierten Modellierung für den Bereich der Siedlungsentwässerung können zwei Integrationsstufen unterschieden werden. Einerseits die koordinierte Modellierung verschiedener Elemente eines Entwässerungssystems, andererseits die Interaktion des Entwässerungssystems mit seiner Umwelt. [Semadeni-Davies, 2005] und [Zimmerman, 2005] geben Beispiele für die Untersuchung des Zusammenwirkens von Entwässerungssystem und Vorfluter. [Peters, 2007] soll als ein Beispiel für die Umsetzung der Integration von Kläranlage und Kanalnetz genannt sein. Je nach Zielstellung und Betrachtungsskala können die Detaillierungsgrade der Abbildung dabei stark variieren.

Für einzelne Bereiche der Umwelt wie Luftqualität, Regenwasserabfluss oder Grundwasserströmung gibt es bereits etablierte Modelle [Burian, 2002]. Allerdings besteht nach wie vor ein Mangel an Konzepten und auch an Modellen, um die Schnittstellen und Übergänge zwischen diesen Systemen zu beschreiben.

[Rauch, 2005a] hebt die Bedeutung von integrierter Modellierung für den Betrieb von Regenwassersystem hervor, er nennt als mögliche zukünftige Perspektive, die Entwicklung von Programmen, die es erlauben das System von Kanalnetz, Kläranlage und Vorfluter in Echtzeit zu modellieren und zu steuern.

2.4.2. Nachhaltigkeit

In einer allgemeinen Form kann man, [Ravetz, 2000] folgend, Nachhaltigkeit als bevorzugte Entwicklungsrichtung definieren, bei der ein System sich einem Zustand annähert, in dem die Überlebensfähigkeit zeitbeständig gesichert ist und das Potential auf verschiedene Randbedingungen zu reagieren und sich an lang- und kurzfristige Veränderungen anzupassen möglichst hoch ist. Das Grundanliegen von nachhaltigen Systemen liegt darin, die gegenwärtigen Bedürfnisse einer Gesellschaft zu befriedigen, ohne dieselbe Möglichkeit für zukünftige Generationen einzuschränken. [UNDSD, 2005] nennt soziale, umweltbezogene, wirtschaftliche und institutionelle Belange als Dimensionen der Nachhaltigkeit. Es werden 48 Parameter zur Bewertung vorgestellt, die sich aber vor allem auf die Skala staatlichen Agierens beziehen.

Der Begriff Nachhaltigkeit muss als uneindeutig beurteilt werden, da beim Abwägen von sozio-kulturellen, ökonomischen und ökologischen Aspekten unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt werden können [Martens, 2005]. Die Definition des Begriffs ist normativ aber auch subjektiv, da sie eine Abschätzung gegenwärtiger und zukünftiger Bedürfnisse benötigt und unterstellt, zu wissen, wie sie befriedigt werden können. [Rauch, 2005a] urteilt, dass die Begriffe „integriert“ und „nachhaltig“ mehr eine persönliche Perspektive zusammenfassen als an objektiven Kriterien beurteilt werden zu können. Dem Anspruch alle relevanten Umstän-

de zu berücksichtigen, wird mit einer subjektiven Auswahl begegnet, die schwer auf Systeme mit anderen Randbedingungen übertragen werden kann.

In diesem Kontext betont [Sundberg, 2004], dass Nachhaltigkeit von Systemen nicht beurteilt werden kann, ohne die Interrelationen mit untergeordneten, parallelen und übergeordneten Systemen zu berücksichtigen. Beispielsweise ist die Nachhaltigkeit der Regenentwässerung vom physischen Zustand des Entwässerungssystems, der Gesellschaft und der Umwelt abhängig. Nach [Rijsberman, 1999] erfüllen nachhaltige Systeme der Wasserver- und -entsorgung die hygienischen, ästhetischen und sicherheitsbezogenen Ansprüche der Gesellschaft unter Beibehaltung der hydrologischen, ökologischen und naturräumlichen Integrität.

Ihr solltet lieber Kinder bleiben und mit Vermutungen spielen wie mit Seifenblasen, sie anschauen, sie betrachten, sie wiegen, sie werfen, sie verlieren, sie wieder fangen. Denn ihr werdet nie zu etwas anderem imstande sein, als mit Vermutungen zu spielen.

Eric-Emmanuel Schmitt, Hotel zu den zwei Welten

3 PARAMETER IM WANDEL

Das Kapitel fasst die Ergebnisse eines Literaturstudiums zusammen. Es wird in den einzelnen Abschnitten auf die Bedeutung eines Parameters eingegangen, Ansätze und Studien zu seiner Berücksichtigung im Überblick vorgestellt und soweit kenntlich Beispiele für die Reichweite der Veränderung gegeben, die nach Möglichkeit in räumlichem Bezug zum Untersuchungsgebiet stehen. Um den Umfang der Arbeit im Rahmen zu halten, wird der Schwerpunkt auf Parameter gelegt, die in den späteren Kapiteln Eingang in die weiteren Betrachtungen finden. Es soll hier betont werden, dass es sich nicht um den Versuch einer vollständigen Übersicht handelt. Insbesondere für Tendenzen in der sozialen und technologischen Entwicklung fällt es schwer in quantitativer Form Aussagen zu treffen. Es wird versucht den Bezug der einzelnen Parameter zur Wasserwirtschaft deutlich zu machen.

Die Untersuchungen zur Veränderung beziehen sich sowohl auf Ergebnisse von Modellierung als auch auf statistische Auswertungen. Es soll an dieser Stelle betont werden, dass sowohl konzeptionell als in ihrer Relevanz für die zukünftige Entwicklung zwischen beiden klar zu trennen ist.

3.1. Klima und Umwelt

3.1.1. Bemerkungen zum Klimawandel

Das Klima kann als Faktor oder Ressource angesehen werden, das auf viele natürliche und soziale Systeme limitierend wirkt, seien es marine Ökosysteme, Tourismus oder Hochseebauwerke [von Storch, 1999].

Seit den ersten Publikationen zum sich ändernden Klima durch den Club of Rome [Meadows, 1972] in den 1970er Jahren, wird eine lebhafte Debatte zu Ursachen bzw. dem Anteil menschlichem Zutuns zu dieser Entwicklung geführt. In den letzten Jahren hat sich, insbesondere durch die Arbeiten des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), die Ansicht durchgesetzt, dass der Klimawandel anthropogen geprägt ist und die im 20. Jahrhundert beobachteten Effekte der Erwärmung in ihrer Geschwindigkeit und Amplitude deutlich über die Bereiche beobachteter natürlicher Schwankungen hinausgehen. Bspw. zeigt

[Rahmstorf, 2003], dass der Einfluss durch die CO₂ Emission in den letzten 100 Jahren einen viermal so starken Effekt auf die globale Strahlungsbilanz hat wie die schwankende Sonnenaktivität. Um Emissionsszenarien aufstellen zu können, ist es nötig festzulegen, wie sich die sozioökonomischen Systeme in Zukunft entwickeln werden. Allein aus dieser Grundlage ergibt sich die Notwendigkeit alle weiteren Schritte der Abschätzung von Folgen des Klimawandels als Szenarien und nicht als Prognosen anzusehen [Viner, 2002].

Die Basis für die physikalisch basierte Vorhersage von regionalen Änderungen bilden, wie in der Abb. 7 gesehen, globale Klimamodelle (global climate models, GCM). Diese sind aber darauf ausgerichtet, den mittleren Zustand des Klimas abzubilden, deshalb kann wenig über ihre Fähigkeit ausgesagt werden auch Ereignisse kurzer Dauer, wie Starkregenereignisse vorherzusagen [Kundzewicz, 2002]. Entsprechend ergab eine Grundsatzstudie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich das Fazit, dass derzeit noch kein optimales Verfahren zur Regionalisierung von Klimaszenarien aus GCMen verfügbar ist. Aber auch an Ausrichtung und Entwicklungspraxis der Modelle können nach [Varis, 2004] Kritikpunkte formuliert werden. Bspw. wird die Unsicherheit von Modellen und Politik nicht berücksichtigt, Pluralismus der Ansätze wird vermieden und Modellierer ignorieren die sozialen und politischen Dimensionen der Klimaforschung. Auf die Probleme und Ungenauigkeiten in Folge der Regionalisierung weist auch [van de Giesen, 2002] hin. Eine besondere Herausforderung stellt das downscaling im Bereich der Klimamodellierung dar. Ursache sind einerseits die Unsicherheiten auf der Ebene der globalen Klimamodelle, andererseits die Berücksichtigung anderer Antriebskräfte auf der räumlich höher aufgelösten Ebene. Möglichkeiten für das downscaling bestehen über Interpolation, empirische und statistische Wettergeneration sowie die Parametrisierung regionaler Klimamodelle mit den Ergebnissen auf globaler Ebene als Randbedingung. Eine Auswertung bezüglich der Zuverlässigkeit und Genauigkeit dieser Methoden liegt nach [Viner, 2002] nicht vor. Eine gängige Methode das Klimasignal auf hydrologische Modelle zu übertragen, beschreibt [Andersson, 2006] mit dem „delta change“ Ansatz, dabei werden Klimavariablen aus dem GCM abgeleitet und auf eine beobachtete Datenbasis übertragen. Er wendet diesen Ansatz zur Skalierung der monatlichen Änderung von Niederschlag, Minimal-, mittlerer und Maximaltemperatur an.

Die Auswirkungen des Klimawandels umfassen sowohl die meteorologischen Klimagrößen als auch Landnutzung und Wasserhaushalt. [Zierl, 2002] zeigt in einer Trendanalyse der Jahre 1969 bis 1998 bei 10605 Schweizer Waldstandorten, dass die Temperatur schweizweit zunimmt, damit verbunden wird die Transpiration der Pflanzen intensiviert, die Vegetationsperiode verlängert sich und Trockenperioden nehmen zu. Ein Trend für die saisonale oder jährliche Niederschlagshöhe konnte nicht nachgewiesen werden.

Auf den Mangel an Prognosen für den Klimawandel auf Einzugsgebietsskala weist [Schmitt, 2005] hin. Weder GCMe noch die statistische Analyse von Klima- und Niederschlagsdaten erlauben eine ausreichende zeitliche und räumliche Differenzierung in der für die Kanalisation maßgeblichen Skale.

3.1.2. Temperatur

Aussagen zum Temperaturanstieg in Folge des anthropogenen Treibhauseffektes gehörten zu den ersten Abschätzungen zum Klimawandel. Einfache Modelle wie das bereits vor etwa 30 Jahren entwickelte 2-Schicht Modell, das den Einfluss einer veränderten Absorbtivität und Gegenstrahlung der Atmosphäre zu quantifizieren erlaubt [vgl. Krauss, 2004]. Die derzeit gängigste Vorgehensweise besteht in der Regionalisierung von GCM Ergebnissen. Verschiedene Verfahren hierzu werden an anderer Stelle im Text diskutiert. Generell können die Szenarien zur Temperatur als robust eingeschätzt werden, da sie in geringerem Maße der kleinräumigen Dynamik und lokalen Effekten unterliegen als bspw. der Niederschlag und auch von weniger Randbedingungen abhängen. In der Regel findet die Temperatur Eingang in die Simulation von Niederschlagsszenarien [z. B. Bronstert, 2002] und ist auch prägend für die Wasserhaushaltskomponenten Verdunstung und Bodenfeuchte [vgl. Zierl, 2002].

Für die Temperaturerhöhung auf globaler Skale bis zum Jahr 2100 gibt [Menzel, 2004] als Zusammenfassung der Ergebnisse verschiedener GCMe und Entwicklungsszenarien eine Spannweite von 1,4 – 5,8°C an. Er bewertet dies als größte Veränderung seit dem Ende der letzten Eiszeit und warnt im gleichen Zusammenhang, dass bislang als selten eingestufte Extreme mit größerer Häufigkeit auftreten werden. Das [IPCC, 2001] gibt als Synthese aus Literaturstudien einen Anstieg der Temperaturmaxima, Temperaturminima und Hitzetage, sowie eine Abnahme der Kälte- und Frosttage und diurnalen Temperaturschwankungen über allen Landmassen als zu 90 – 99% wahrscheinlich an.

Im Rahmen einer Klimastudie für Nordrheinwestfalen wurde der Temperaturanstieg im Zeitraum 2001-2055 für die mittlere maximale Lufttemperatur mit 1,7°C, für die mittlere Lufttemperatur mit 1,5°C und für die minimale Lufttemperatur mit 1,4°C ermittelt. Damit einher geht im Vergleich zum Referenzzeitraum 1950-2000 ein Rückgang der Frosttage um durchschnittlich 30% (Minimaltemperatur kleiner 0°C), von 27 auf 20 Tage sowie eine Zunahme der heißen Tage (Maximaltemperatur größer 30°C) um 136% auf 18 Tage [Gerstengarbe, 2004]. Für Baden Württemberg [KLIWA, 2003a] werden für den Vergleich der Zeiträume 1961-2000 und 2021-2050 ähnliche Tendenzen mit leicht abweichenden Werten angegeben: Zunahme der mittleren Wintertemperatur (November bis April) um 2°C, der mittleren Sommertemperatur (Mai bis Oktober) um 1,4°C, Abnahme der Frosttage um bis zu 50%, Zunahme der heißen Tage um bis zu 100%. Für die Region Franken gibt [Günther, 2004] im

Zeitraum 1931 - 2000 einen Anstieg der Jahrestemperatur um durchschnittlich $0,8^{\circ}\text{C}$ an, für den Monat Dezember liegt der Anstieg sogar bei $2,4^{\circ}\text{C}$.

3.1.3. Wasserkreislauf

Durch eine Erhöhung der Temperatur wird der Wasserkreislauf intensiviert. Dies lässt sich direkt für die Verdunstung und den Niederschlag zeigen und wirkt sich in der Konsequenz auch auf Abflussdynamik und Speicheränderung aus.

Neben den atmosphärischen Antriebskräften, wird der Kreislauf des Wassers auch von naturräumlichen Eigenschaften der Oberfläche und des Untergrundes im Betrachtungsgebiet geprägt. Nach [Varis 2004] ergeben sich sogar für die gleichen Szenarien und Modellansätze bei benachbarten EZG (Einzugsgebiete) deutlich unterschiedliche Veränderungen der Wasserhaushaltskomponenten in Abhängigkeit von der gegenwärtigen Landnutzung und Bewirtschaftung sowie der geologischen Situation.

Niederschlag

Bei der Betrachtung von Wasserhaushalt und Niederschlags-Abfluss-Prozessen sind zwei Aspekte des Niederschlags wesentlich. So erlauben die über die Zeit integrierten Niederschlagshöhen Aussagen über Speicherfüllung, Nutzungspotentiale und Entwicklung von hydrologischen Randbedingungen, etwa der Bodenfeuchte, andererseits ist die Kenntnis von Dynamik und Intensitäten wesentlich für die Abschätzung abflussbildender Vorgänge. Atmosphärische Prozesse verlaufen stark nicht linear und können geographisch nicht genau abgegrenzt werden. Die Reichweite und Intensität der Auswirkung von Veränderungen ist daher nur unsicher vorhersagbar. [Mares, 2002] weist bspw. auf einen, wenn auch schwachen, Zusammenhang zwischen dem "El Niño" Phänomen im Südpazifik und Sommerniederschlägen in Europa hin.

Insbesondere für die Abbildung von Änderungstendenzen der vom Niederschlag beeinflussten Systeme ist die Berücksichtigung von Zeitskalen relevant. Die Werte im Minuten- bis Stundenbereich bilden die Grundlage für siedlungswasserwirtschaftliche Aussagen, Tages- oder Ereigniswerte sind bedeutend für die direkten Abflussprozesse und z. B. agronomische Betrachtungen; Episoden von bis zu 4 Wochen erlauben die Rückkopplungsmechanismen zwischen Bodenfeuchte, Landnutzung und Niederschlag zu erfassen und schließlich mehrjährige Klimasimulationen, die den Einfluss von regionalem und globalem Wandel bewertbar machen [van de Giesen, 2002].

[Schmitt, 2005] führt aus, dass sich die bisherigen Prognosen von Klimamodellen auf großräumige Gebiete beziehen und die zukünftige Angaben zur Veränderung für die Skala der Regenentwässerung ungeeignet oder mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Zum Beispiel

[van de Giesen, 2002] weist darauf hin, dass auf Basis der Regionalisierung (doppeltes nesting) eines GCM für ein tropisches EZG die Abbildung des Niederschlags mit 48% Abweichung gegenüber den Messungen erfolgte und ein Einfluss von Landnutzungsänderung nicht nachweisbar war. Es muss also generell hinterfragt werden, ob die Regionalisierung einer globalen Klimaprognose zulässig ist, um Niederschlagsdaten auf kleinerer räumlicher Skale zu generieren. Auch [Bronstert, 2002] nennt Probleme beim downscaling, insbesondere bei der Abbildung kleinräumiger konvektiver Niederschlagsereignisse, da diese im subskaligen Bereich der GCM Erfassung liegen.

Auf die große Bedeutung der lokalen Skale bei der Betrachtung von Starkniederschlägen weist [Funke, 2004] hin. Er zeigt an einer Analyse der 50-jährigen Reihen von Niederschlagsdaten verschiedener Hamburger Stadtteile, dass sowohl Höhe und Häufigkeit des Niederschlags als auch Jahrzehnt des Auftretens des höchsten beobachteten Niederschlags und Vorhandensein eines Trends für Höhe und Häufigkeit bereits innerhalb des Stadtgebietes deutlich variieren. Da die Jahresmenge des Niederschlags im Stadtgebiet konstant blieb, treten für die Stadtteile mit größeren Starkregen auch längere Trockenperioden auf. Für Baden-Württemberg gibt [Günther, 2004] auf Basis einer Analyse von Langzeitreihen der Tageswerte an, dass die Starkniederschlagshöhen zugenommen haben. [Goldberg, 2006b] weist darauf hin, dass für den Zeitraum 1900-2000 in Mitteleuropa die Häufigkeit von Starkregen verursachenden Wetterlagen pro Jahr um 150% zugenommen hat. In der Fortschreibung des KOSTRA-Atlas, auf Basis des Vergleichs der Zeiträume 1951-1980 und 1951-2000 konstatiert [Bartels, 2005] eine Zunahme der Starkniederschläge für alle Saisons. Am stärksten fällt diese Zunahme für Winterereignisse hoher Jährlichkeiten und langer Dauerstufen aus. Für den 24-stündigen Regen mit einer Jährlichkeit von 100 zeigen 7% aller Rasterzellen eine Zunahme von mehr als 25%. Die Veränderungen im Sommerhalbjahr fallen weniger ausgeprägt und geographisch kleinräumiger aus. Auf regionaler Ebene weist die KOSTRA-Fortschreibung für einen Großteil der Dauerstufen und Jährlichkeiten die stärksten Zunahmen im nördlichen Bayern und Baden-Württemberg, also der Region in der Kupferzell liegt auf. Für Ereignisse kurzer Dauer fallen die Ergebnisse weniger deutlich aus. Für einen Vergleich von 4 Messstationen in weniger als 100 km Abstand zu Kupferzell sind die Ergebnisse in Abb. 8 dargestellt. Der Vergleich der partiellen Serien 1951-80, 1961-90 und 1971-2000 mit 50-jährigen Niederschlagsreihen 1951-2000 zeigt keine eindeutige Tendenz für die Entwicklung der Niederschlagsintensitäten. Zwar sind die partiellen Reihen 1971-2000 häufig diejenigen mit der größten Intensität, die Reihen 1961-1990 zeigen aber im Gegenzug häufig eine geringere Intensität als die noch zehn Jahre frühere. Im gleichen Beobachtungszeitraum gibt [Bartels, 2005] für eine Auszählung der extremwertstatistisch über-50jährigen Ereignisse von unter 60 Minuten Dauer eine Häufung am Anfang und Ende des Betrachtungszeitraums an.

Die Abweichungen für die Niederschlagshöhen der partiellen Reihen liegen jeweils im 95-Perzentil der Reihe 1951-80, so dass die Veränderungen statistisch eine geringe Signifikanz aufweisen. Entsprechend empfiehlt [Bartels, 2005] die KOSTRA-Werte für die Niederschlagsintensitäten der Dauerstufen bis eine Stunde beizubehalten. Auch für die 4 betrachteten Stationen sind Ausrichtung und Amplitude der Veränderung unterschiedlich, so dass sich keine allgemeinen Aussagen über Entwicklungstendenzen treffen lassen.

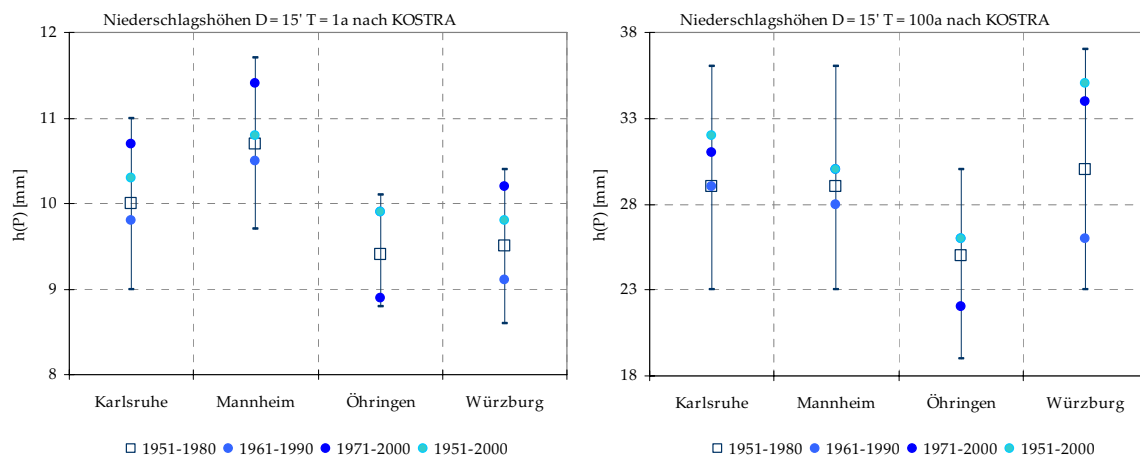


Abb. 8 Extremwertstatistische Auswertung nach Niederschlägen von 15' Dauer, für Niederschlagsschreiber in 100 km Umkreis der Gemeinde Kupferzell. Zusammengefasst nach [Bartels, 2005]

[Schmitt, 2005] zitiert verschiedene europäische Studien, die keinen oder einen negativen Trend der Starkniederschläge ausweisen, die teilweise mit überlagernden Effekten wie der Urbanisierung begründet werden. Er fasst aber auch einen DWD-Bericht zusammen, nach dem der flächenhafte Vergleich einer regionalisierten Starkregenanalyse mit den Angaben des KOSTRA-Atlas für Süddeutschland deutliche Abweichungen ausweist. Er sieht auf dieser Basis keine Veranlassung, im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft die derzeitigen Bemessungsansätze in Deutschland zu verändern. Auf der Basis der IPCC Studien wertete [Kundzewicz, 2002] die Entwicklung des Niederschlags für die mittleren Breiten der nördlichen Hemisphäre aus und stellte eine mittlere Zunahme des Jahresniederschlags von 0,5 – 1% pro Dekade fest. Er gibt dabei als statistisch wahrscheinlich an, dass die Zunahme für Starkregenereignisse noch stärker ausfällt. An 20% der Messstationen in Europa konnte sowohl ein statistisch signifikanter Anstieg des Jahresniederschlags als auch des 5-Perzentils der Tageshöchstniederschläge festgestellt werden. Von einer Zunahme feuchter Großwetterlagen, z. B. der westzyklonalen über den Zeitraum 1881 bis 1989 berichtet [Bardossy, 1990] für den Raum Südwest-Deutschland. Diese Wetterlagen sind eine der Hauptaussgangslagen für hochwasserverursachende Niederschlagsereignisse. Für die Entwicklung der Starkniederschläge nennt die IPCC Studie [IPCC, 2000] eine Zunahme der Starkniederschläge in Mitteleuropa als sehr wahrscheinlich. Nach [May, 2005] nimmt die Zahl der feuchten Tage in

Mitteleuropa insbesondere in den Sommermonaten ab. Eine ähnliche Tendenz besteht für die mittleren Tagesintensitäten, während die Intensitäten von Starkregenereignissen zunehmen. Den Trend ansteigender Intensitäten für Starkniederschläge kann [Rauch, 2005b] bei der statistischen Analyse 6 mittel- und westeuropäischer Niederschlagsmesser nicht bestätigen. Er weist darauf hin, dass die Ergebnisse einer Trendanalyse in hohem Maße von der statistischen Methode und der Wahl des betrachteten Zeitintervalls abhängen und führt an, dass seine Ergebnisse nicht in Einklang mit den Ergebnissen von Klimamodellierungen stehen.

Für die mittleren monatlichen Niederschläge nimmt die Dynamik im Jahresverlauf zu. Unter anderem für 2 Klimastationen in weniger als 100 km Entfernung von der Gemeinde Kupferzell gibt [Kunze, 2004] die Veränderungen entsprechend Tab. 4 an. Für den Zeitraum 1891 bis 1997 werden die relativen Abweichungen der monatlichen Niederschlagshöhen verglichen. Die Stationen weisen in den Einzelmonaten deutlich unterschiedliche Amplituden und Vorzeichen der Abweichung auf. Bspw. unterscheiden sich die Vorzeichen der Abweichung (also die Monate bei denen es an einer Station zu einer Niederschlagszunahme, an der anderen zu einer -abnahme kam) für die Monate Januar, März und April. Für die Halbjahres- und Jahreswerte fällt die Tendenz jedoch wieder eindeutig aus. Auch auf Basis dieser Auswertung lässt sich also festhalten, dass die Entwicklung der Niederschläge regional variabel ist und noch auf der Skale der Monatswerte nicht zu einem globalen Trend korreliert.

Tab. 4 Monats-, Halbjahres- und Jahreswerte des linearen Trends der korrigierten Niederschlagshöhe [mm] der Jahre 1891-1997 für die Messstationen Karlsruhe und Bamberg. Zusammengefasst nach [Günther, 2004]

Station	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ja	So	Wi
Karlsruhe	8	18	-3.8	-2.6	26	21	-10	-24	-25	-5.7	18	11	23	-15	38
Bamberg	-2.4	4.8	8.1	0.5	0.5	13	-7.7	-12	-6.6	-5.9	8.5	13	13	-19	32

Die Regionalisierung von statistischen Klimamodellergebnissen für Nordrhein-Westfalen prognostiziert für die meisten Regionen einen Anstieg des Jahresniederschlags bis zum Jahr 2055. Die Veränderung der Niederschlagsmuster gestaltet sich heterogen: während in einigen Regionen die Tage ohne Niederschlag abnehmen und mit Starkniederschlägen für andere Gebiete zunehmen, ist diese Entwicklung aber auch mit umgekehrten Vorzeichen angezeigt [Gerstengarbe, 2004]. Für das EZG der Lein, in Baden-Württemberg, kommt es nach [Bronstert, 2002] kaum zu Veränderungen im Jahresniederschlag, sondern vor allem zu einer jahreszeitlichen Verschiebung der niederschlagsintensiven Abschnitte und zu einer höheren

Variabilität der Extremniederschläge. Die Steigerung der Variabilität kann zu deutlich höheren Niederschlagshöhen von Einzelereignissen führen. [KLIWA, 2003a] quantifiziert diese Aussage dahingehend, dass in Baden-Württemberg für den Zeitraum 2021-2050 die Sommerniederschläge wahrscheinlich um durchschnittlich 10% abnehmen werden. Bei den Winterniederschlägen wird im Mittel eine Zunahme von 35% als wahrscheinlich angegeben.

Für das Projekt RIVERTWIN [Gaiser, 2006] wurden für das Neckar-Einzugsgebiet, zu dem auch das Flussgebiet der Kupfer gehört, 2 GCMe in jeweils 2 Realisationen regionalisiert. Tab. 5 gibt eine Übersicht über die so ermittelten veränderten Niederschlagsszenarien.

Tab. 5 Veränderung der mittleren jährlichen und saisonalen Niederschläge gegenüber dem Zeitraum 1987-2003 für das Neckar-Einzugsgebiet auf Basis verschiedener Klimamodelle und Regionalisierungen.

	Jahresmittel	Sommer	Winter
A2	12.6	2.37	27.37
B2	22.2	7.66	43.63
Enke_Trocken	8.24	-3.58	26.52
Enke_Feucht	13.6	0.03	33.46

Da Aussagen über die Veränderung von Starkniederschlägen verschiedener Jährlichkeiten und Dauerstufen noch nicht flächendeckend zur Verfügung stehen, legt [KLIWA, 2006a] nahe, die Faktoren für die Erhöhung von Bemessungsniederschlägen so zu wählen, dass die für Baden-Württemberg und Bayern eingeführten Klimafaktoren der Bemessungsabflüsse (siehe Abschnitt Abflüsse) durch N-A-Modelle (Niederschlags-Abfluss-Modelle) abgebildet werden.

Die Anzahl von Trockenperioden, definiert als mindestens 11 aufeinander folgende Tage mit weniger als 1mm Niederschlag, wird nach [KLIWA, 2003a] für den Zeitraum 2021-2050 in Baden-Württemberg abnehmen, im Sommer allerdings leicht (um weniger als 2%) zunehmen. Die mittlere Dauer der Trockenperioden wird nicht zunehmen. Die Anzahl der Trockentage wird dagegen im Sommerhalbjahr voraussichtlich zunehmen. [KLIWA, 2006b] gibt für die nördliche Neckarregion einen Wert von 5 bis 8 Tagen (4,5 bis 7%) an.

Bodenfeuchte und Grundwasser

Die Bodenfeuchte ist eine der entscheidenden Anfangsbedingungen bei der Simulation von Niederschlags – Abfluss – Prozessen. Einerseits hängen Infiltrationsgeschwindigkeit und hydraulische Leitfähigkeit nichtlinear vom Wassergehalt ab und andererseits ist der Abfluss in Folge Infiltrationsüberschuss vom Speicherfüllungsgrad determiniert. Neben diesen direkten Einflüssen, kann aber auch ein Rückkopplungseffekt mit dem regionalen Wasserhaushalt nachgewiesen werden. Nach [van de Giesen, 2002] bewirkt eine Verdoppelung oder

Halbierung der Anfangsbodenfeuchte bei einem Modellierungszeitraum von 4 Wochen, eine Änderung von 2 bis 15% in der Niederschlagsintensität, da einerseits lokal die Verdunstung zunimmt oder abnimmt (direkter Effekt) und andererseits der durch Verdunstung oder Advektion ins Betrachtungsgebiet eingetragene Wasserdampf vermehrt oder verringert wird (indirekter Effekt). Insbesondere die Abhängigkeit des indirekten Effekts von Betrachtungsskale und Stärke der Änderung machen einen einfachen Zusammenhang zwischen Verdunstung und Niederschlag in einem Gebiet sehr unwahrscheinlich.

Bei der Simulation einer Landnutzungsänderung von Mischwald zu semiarid für den Monat Juli in einem spanischen Untersuchungsgebiet, ermittelte [Hasler, 2002] in Folge der verstärkenden Effekte von Temperaturanstieg, Änderung des latenten Wärmestroms und Verringerung des Niederschlages, stieg die Zahl der Tage unter Wasserstress von 10 (Mischwald) auf 25 (semiarid).

Bei einer Untersuchung im deutschen Teil des EZGs der Donau konnte eine geringe aber signifikante Korrelation zwischen Bodenfeuchte als Wassergehalt des Bodens und Niederschlagsereignissen in der zeitlichen Nachfolge nachgewiesen werden [Früh, 2003]. Ein deutlicher Zusammenhang bestand bei saisonaler Integration der Zeitskale. In 80% der Jahre mit überdurchschnittlich feuchten Frühjahren (überdurchschnittlicher Bodenwassergehalt), waren die Sommer überdurchschnittlich niederschlagsreich.

Abfluss

Der Abfluss ist Ergebnisparameter der Einflüsse aus Geologie, Landnutzung, Morphologie anthropogenen und klimatischen Randbedingungen. Im Zusammenhang mit der Bewirtschaftung von Flussgebieten schlägt [Varis, 2004] die Parameter mittlerer Durchfluss, mittlere Grundwasserneubildung, mittlere saisonale Änderung des Abfluss, 95-Perzentil des Durchfluss, kumulierter Abfluss, mittleres jährliches Hochwasser und Hochwasser bestimmter Jährlichkeit vor um die Auswirkung der Änderung von Rahmenbedingungen zu quantifizieren.

Für das EZG des Volta, zeigt [van de Giesen, 2002], über eine Niederschlags – Abfluss – Regression, dass eine Verminderung des Niederschlages von nur 10% zu einer Abnahme des Abflusses um 64% führen würde, da 85% des Jahresniederschlags evaporativ oder transpirativ verdunsten und die Speicheränderung in Folge der Trockenzeit stark dynamisch verläuft. Auf einen ähnlichen, bereits beobachtbaren Effekt weist [Liu, 2000] am chinesischen Gelben Fluss hin, wobei hier die Ursache für die Abflussreduzierung vor allem im in den 90er Jahren um 160% gesteigerten, anthropogenen Wasserverbrauch liegt, der damit höher als der natürliche Abfluss des Gewässers liegt.

Für 6 schwedische EZGe verschiedener Klimate und geomorphologischer Situationen untersucht [Gardelin, 2002], die Abflussentwicklung auf Basis von 2 verschiedenen Szenarien des globalen Klimawandels in den nächsten 50 – 100 Jahren. Die Tendenzen in der Veränderung des mittleren jährlichen Abflusses sind heterogen, in nördlichen Gebieten mit nivalem Regime, kommt es zu einer Zunahme des mittleren Abflusses, während er in den südlichen Gebieten eher abnimmt. Dagegen sind Entwicklungen beim Verlauf des Jahresgangs relativ eindeutig, in den Herbst- und Wintermonaten kommt es zu einer Zunahme des Abflusses, während der Frühjahrspeak deutlich abgeschwächt wird, beide Tendenzen stehen vor allem mit einem veränderten Verhalten der Schneespeicherung in Zusammenhang. Für Hochwasserereignisse liegt die Tendenz ähnlich, die Frühjahrshochwässer nehmen ab (Änderung um +1 - -51%) während Hochwässer während des restlichen Jahres eher zunehmen (Änderung um -33 - +92%).

[Kundzewicz, 2002] gibt als Zusammenfassung einer Literaturstudie zum Einfluss des Klimawandels auf den Abfluss, dass sich die Jährlichkeiten für Hochwasserereignisse verringern, also große Durchflüsse wahrscheinlicher werden. Es aber noch keine Studie gibt, die diese Ergebnisse in einer flächendeckenden Arbeit mit regionaler Perspektive quantifiziert. Für eine Untersuchung zur Abhängigkeit des Fließregimes von Sozioökonomie, Landesentwicklung und Klimaänderung im Okavangogebiet stellt [Andersson, 2006] heraus, dass die Inputdaten verschiedener GCMe die größte Sensitivität in Hinsicht der Abflussgenese verursachen, deren Unsicherheit also die Auswirkung der Entwicklungsszenarien überdeckt.

In zwei britischen Studien [Reynard, 1998; Naden, 1996] zum Einfluss des Klimawandels auf Hochwasserereignisse, schwankte die Größenordnung der Zunahme des Spitzendurchflusses bei Hochwässern mit mittlerem Wiederkehrintervall (5-50 Jahre) zwischen -1,8 und 21%, in Abhängigkeit von Modellen und Emissionsszenarien.

[Bardossy, 2006] weist auf die Probleme bei der Prognose von Niedrigwasser hin, da dieses deutlich von Landnutzung, baulichen Maßnahmen und Fremdwassereinleitung abhängt, bspw. machen am den Pegel Rockenau, der das Gesamt-EZG des Neckars fasst, bei Niedrigwasser Abwässer 40% des Durchflusses aus. Für eine Simulation des Wasserhaushaltes am Neckar ergab sich in Folge Klimawandel ein 10 bis 20% geringerer Niedrigwasserdurchfluss.

Für die in der Regenwasserbewirtschaftung maßgeblichen Dauerstufen des Niederschlags (15' bis 6h) und Wiederkehrintervalle (2 bis 20a) gibt es nach [Schmitt, 2005] für Süddeutschland keine Angaben zu veränderten Hochwasserabflüssen. Damit sieht er auch keine Notwendigkeit für die veränderte Planung von Anlagen der Siedlungsentwässerung.

Auf Basis der statistischen Analyse historischer Zeitreihen in Baden-Württemberg und Bayern [KLIWA, 2003b] lässt sich bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt (2003) kein flächendeckender oder regionaler Trend bei den mittleren jährlichen Abflüssen feststellen. Zwar zeigen einzelne Pegel (7% des Gesamtkollektivs) eine signifikante Veränderung des Abflusses, diese sind aber in ihrer räumlichen Verteilung und der Richtung der Veränderung uneindeutig. Für die mittleren monatlichen Abflüsse im Dezember bis Juni kann seit Mitte der 1960er Jahre eine Zunahme konstatiert werden, die die Autoren vor allem auf erhöhte Niederschläge zurückführen. Teilweise im Widerspruch dazu stehen die Angaben von [KLIWA, 2006b], in dem Klimaszenarien auf der Basis unterschiedlich regionalisierter GCMe getroffen werden. Für die mittleren monatlichen Abflüsse werden Änderungen von +5 bis 40% angegeben. Für die Sommermonate ist die Änderung allerdings mit -11 bis Niedrigwasserabflüsse ändern sich für verschiedene Zielgrößen und in ihrer Tendenz heterogen. [KLIWA, 2006b] geben an, dass die mittleren Niedrigwasserabflüsse in Bayern und Baden-Württemberg zunehmen, im Sommerhalbjahr aber abnehmen. Die Veränderungen werden mit +4,5 bis +22% im Kalenderjahr und mit -16 bis +12% im Sommerhalbjahr angegeben.

Tab. 6 Änderungstendenzen für mittlere monatliche Niedrig-, Mittel- und Hochwasserdurchflüsse zusammengestellt nach [KLIWA, 2006b]

Abflusskennzahl	Jahr [%]	Sommer [%]	Winter [%]
MoMQ	+5.0 - +40	-11 - +18	+17 - +50
MoMnQ	+4.5 - +32	-16 - +12	+13 - +45
MoMHQ	+5 - +39	-7 - +26	+16 - +44

Beim Antrieb von Wasserhaushaltsmodellen mit den veränderten Klimaszenarien für Baden-Württemberg [KLIWA, 2003a] erhöhen sich an fast allen Pegeln des Neckar-Einzugsgebietes die Hochwasserabflüsse. Als Konsequenz wurden pegelspezifische Klimafaktoren eingeführt, die eine Erhöhung des Bemessungsabflusses für wasserwirtschaftliche Anlagen bewirken. Beispielsweise werden durch den Faktor 1,15 an Pegeln des Kocher-Einzugsgebietes die Bemessungsabflüsse beim 100-jährigen Hochwasser um 15% erhöht.

Tab. 7 Klimafaktoren für die Erhöhung der Spitzendurchflüsse von Bemessungshochwässern verschiedener Jährlichkeiten im Einzugsgebiet des Kochers

Jährlichkeit [a]	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
Klimafaktor	1.5	1.45	1.4	1.33	1.23	1.15	1.08	1.03	1

Das Auftauen der Permafrostböden in der zirkumpolaren Region in Folge fortschreitender Erwärmung führt zur Freisetzung großer Mengen von in Untergrund gespeichertem Kohlendioxid und Methan, also zwei der Haupttreibhausgase.

Große Wetterzyklen wie Monsun und El Niño Ereignisse können in Ihrer Dynamik beeinflusst werden. Sie können derzeit noch nicht hinreichend mit Klimamodellen abgebildet werden. Statistisch waren aber El Niño Ereignisse im Zeitraum der Auszeichnungen nie so häufig wie in den letzten 20 Jahren.

3.1.4. Vegetation und Ökosystem

Die Veränderung chemischer und hydraulischer Eigenschaften bewirkt einen Wandel in der Ökologie des Gewässers. Die negativen Effekte umfassen nach [Achleitner, 2005] eine Abnahme der Fitness von Organismen, Instabilität von Habitaten und Verringerung der Variabilität von Habitatstrukturen im lateralen Gewässerverlauf.

Natürliche und anthropogene Sukzession

Durch den Klimawandel, aber auch durch anthropogene Einflüsse wie Überweidung oder Brandrodung, können Ökosysteme nachhaltig beeinflusst und verändert werden. Bekannte Beispiele für die derzeitige Entwicklung sind die Ausweitung der Desertifikation in der Sahelzone Nordafrikas oder die Austrocknung des Aralsees. Historische Ereignisse, die die potentielle Schalterwirkung, solcher Veränderungen belegen sind z. B. die Bodenerosion und Versteppung der dalmatinischen Küstenregion (Kroatien) durch die Waldrodung der Römer oder die durch Bewässerung verursachte Versalzung der Ebene zwischen Euphrat und Tigris. Die dramatischen wirtschaftlichen und kulturellen Implikationen, die solche Veränderungen mit sich bringen, können kaum abgeschätzt werden.

Ein Problem, dass schon seit längerem in der Extremwertstatistik von Hochwässern diskutiert wird, besteht in der Berücksichtigung der veränderten Landnutzung und Bebauungssituation bei der Auswertung historischer Hochwassermarken [Payraastre, 2004].

Im Zusammenhang mit den Prognosen einer deutlichen Verringerung des Sommer- und Jahresniederschlages in Teilen Ostdeutschlands [Enke, 2005], spricht [Goldberg, 2006b] von der Gefahr der Versteppung einiger Regionen und leitet die Notwendigkeit veränderter Maßnahmen u. a. in den Bereichen Trinkwasserbewirtschaftung, Hochwasserschutz, Forstwirtschaft und Tourismus ab.

Anforderungen und Ansprüche

Mit dem erhöhten Siedlungsdruck und der Landnutzung durch den Menschen entstehen Einschränkungen für das Potential an natürlichen Flächen. Seit etwa den 1970er Jahren be-

steht jedoch zunehmend die Forderung nach einem Erhalt und der Wiederherstellung von Ökotopten und häufig ergeben sich in Folge Ihres Bestehens auch deutliche Vorteile für die angegliederten anthropogenen Strukturen, etwa der positiv Effekt von Feucht- und Waldgebieten auf kleinere Hochwässer und das Lokalklima, [Oke, 1999], [Hasler, 2002] u. a. dokumentieren solche Effekte.

Auch im Kontext mit der Regenwasserentsorgung ergeben sich Möglichkeiten und Notwendigkeiten für Schutz und Erhalt natürlicher Gebiete, bspw. weist [Sundberg, 2004] darauf hin, dass integrierte RWB über den Abtransport des Wassers hinaus eine Möglichkeit bietet den ökologischen und ästhetischen Wert einer urbanen Umgebung zu steigern.

[Kalman, 2000] untersucht für ein urbanes kalifornisches EZG das Nutzen-Kostenverhältnis für drei Stufen der Aufbereitung von Regenwasser unter besonderer Berücksichtigung der Freizeitnutzung des Vorfluters. Er bezieht die Bootsnutzung, Nutzung zur Fischerei und Erholungswert des Gewässers in die Betrachtung ein und definiert nutzungsspezifische Grenzwerte für verschiedene Parameter der Wasserqualität.

3.1.5. Landnutzungsänderung

In der vorliegenden Arbeit beschreibt der Begriff Landnutzung die Nutzung und den Zustand der Oberfläche eines Gebietes. Das umfasst die Art der Nutzung aber auch ihre Auswirkung auf die Komponenten des Wasserhaushalts. In ihrer Struktur steht die Landnutzungsänderung an der Schnittstelle zwischen natürlichen und sozioökonomischen Veränderungen. Ihre Ursache ist meist durch gesellschaftliche Vorgaben geprägt die Auswirkungen beziehen sich aber auf die Prozesse des natürlichen Wasserhaushaltes. Die Sensitivität des Gebietswasserhaushaltes gegenüber einer Änderung der Landnutzung hängt von den bestehenden Verhältnissen der Komponenten und der Landnutzung ab.

[Andersson, 2006] beschreibt für eine Kombination aus „maximaler plausibler“ Bewässerung und Entwaldung im EZG des Okavango, eine maximale Verminderung des monatlichen Abfluss in der Trockenzeit um 17% bzw. eine Zunahme in der Regenzeit um maximale 6%. Neben den Flächenanteilen der Landnutzung ist auch die räumliche Verteilung bedeutsam. Für ein Untersuchungsgebiet in Spanien konnte [Hasler, 2002], bei gleichen Flächenanteilen und verschiedenen Szenarien der Verteilungskonfiguration von bewaldeten und unbewaldeten Flächen, signifikante Unterschiede der globalen Mittelwerte von Verdunstung und Bodenfeuchte und leichte Unterschiede bei Temperatur und Niederschlag nachweisen. Für die Verdunstung liegen die Unterschiede im monatlichen Mittel bei 7%, bei Tagen unter Wasserstress kommt es zu Unterschieden von bis zu 6 Tagen im Betrachtungsmonat. Für eine Verteilung als große zusammenhängende Flächen ist auch visuell in den Niederschlagsfeldern ein Einfluss der Landnutzung auszumachen. Die Unterschiede werden für alle 4 Klimagrö-

ßen signifikant, wenn sich auch die Anteile der Landnutzung deutlich ändern. Beispielsweise regnet es, unter sonst gleichen Randbedingungen über semiariden Flächen 5% weniger als über Mischwald.

In Deutschland findet im Zuge der postindustriellen Wirtschafts- und Strukturentwicklung ein kontinuierlicher Rückgang der landwirtschaftlich genutzten Flächen statt. Die Umwidmung erfolgt in zwei Richtungen. Einerseits werden Flächen für Gewerbe und Wohngebiete erschlossen, andererseits kommt es, insbesondere auf landwirtschaftlich wenig ergiebigen Flächen, entweder zu Stilllegung und Umwandlung in Grünlandbrache (vgl. [Gaiser, 2005]) oder zu Renaturierungsmaßnahmen, wie Wiederaufforstung und Wiederherstellung von Feuchtgebieten. Der derzeitige Trend der Stilllegung von Landwirtschaftsflächen könnte durch den Anbau von Energiepflanzen umgekehrt werden. [Kaltschmitt, 2002] sieht für die Europäische Union ein Potential von 10% Flächennutzung von Acker und Weideland für die Produktion von Energiepflanzen. Im Zeitraum 1997 bis 2004 fasst [Werner, 2006] für Baden-Württemberg die Entwicklungstendenzen entsprechend Tab. 8 zusammen:

Tab. 8 Tägliche Änderung der Landnutzung nach Landnutzungsarten 1997-2004 in Baden-Württemberg nach [Werner, 2006]

Landnutzung	Änderung des Flächenanteils [ha/d]
Landwirtschaft	-14.5
Siedlungs- und Verkehrsfläche	11.2
Wohnfläche	6
Gebäudefreifläche	6
Erholungsfläche	1.4
Verkehrsfläche	1.8
Waldfläche	3.4

Landwirtschaft

Auf die derzeitigen Tendenzen der Umwidmung landwirtschaftlicher Flächen wurde bereits im vorigen Abschnitt hingewiesen. [Menzel, 2004] nennt im Zusammenhang mit dem Klimawandel eine Verschiebung der Anbauzonen zu höheren Breiten und Lagen und verändertes Risiko für Krankheiten und Schädlingsbefall der Anbaukulturen. Allerdings gehen [WBGU, 2003] von einer globalen Erhöhung des Getreideertrags durch höhere Temperaturen, stärkere Niederschläge und erhöhte CO₂-Verfügbarkeit aus. Die durch Trockenheit erwarteten Mindererträge der südlichen Länder werden dabei durch Mehrerträge der nördlichen Länder überkompensiert.

Am Beispiel der Landwirtschaft soll hier kurz diskutiert werden, wie unterschiedlicher Umgang mit dem Klimawandel zu deutlich unterschiedlichen Auswirkungen für den Wasser-

haushalt führen kann: Die im Abschnitt Niederschlag als wahrscheinlich beschriebene Abnahme der Sommerniederschläge kann dazu führen, dass der Wasserbedarf klassischer Feldfrüchte mit hohem Bedarf, wie Zuckerrüben, nicht mehr gedeckt werden kann. Drei mögliche Ansätze für den Umgang mit diesem Umstand sind (1) Bewässerung und Beibehaltung der Anbaustruktur, (2) Anbau besser trockenadaptierter Arten oder (3) Umwidmung der Landnutzung des Anbaugebietes, z. B. zur forstlichen Nutzung. Alle drei Varianten wirken sich in veränderten Volumenströmen der Komponenten des Wasser- und Stoffhaushalts aus.

Erosion von landwirtschaftlich genutzten Flächen stellt vor allem in stofflicher Hinsicht eine Belastung für die Vorfluter dar. Der Eintrag von Feinmaterial führt zur Kolmation der Gewässersohle und des korrespondierenden Intersitals, dadurch werden die Lebensräume der benthischen Arten eingeschränkt und die Strukturvielfalt des Gewässers vermindert. An den eingetragenen Partikeln sind Nährstoffe und Spurenstoffe z. B. Schwermetalle gebunden, die eine zusätzliche Belastung für das Gewässer darstellen. [Liu, 2002] weist darauf hin, dass die bodenkonservierenden Maßnahmen am Gelben Fluss in China, durch die der Sedimentatrag um 50% verringert werden konnte, gleichzeitig zu einer Verminderung des jährlichen Abflusses führten.

Nach [Gaiser, 2006] legen Simulationsergebnisse für das Neckareinzugsgebiet nahe, dass die Nitratauswaschung unter den veränderten klimatischen Bedingungen leicht zurück geht. Als Ursache wird die temperaturbedingte Hemmung der Nitratreisetzung genannt. Durch die Umstrukturierung von Landwirtschaftsflächen und die veränderte sozioökonomische Situation der RIVERTWIN Szenarien kommt es im Neckargebiet zu einer Verminderung des Stickstoffaustrags aus Landwirtschaftsflächen um 10%, des Phosphorausstrags um 7,5% [Ruf, 2006]. Ohne Fortschritte in der Siedlungsentwässerung werden diese Werte jedoch durch Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum auf Stickstoff -6,4% und Phosphor +2,7% relativiert.

Das Gemeindegebiet von Kupferzell, wie auch das Einzugsgebiet der Kupfer sind mit knapp 70 Prozent Acker und Grünlandfläche an der Gesamtfläche Abb. A 5 in hohem Maße landwirtschaftlich geprägt. Nach [Gross, 2007] nahm im Zeitraum von 1991 bis 2003 die Anzahl der landwirtschaftlichen Betriebe von 181 auf 104 um 42% ab, dabei verringerte sich die Zahl der Haupterwerbsbetriebe proportional stärker als die Zahl der Betriebe mit Nebenerwerbswirtschaft. Ursachen hierfür können in der gesteigerten Effizienz der Bewirtschaftung gesehen werden, die eine größere bewirtschaftete Fläche erlaubt und erfordert, oder zeitlich einen größeren Raum für zusätzliche Beschäftigung lässt. Mittelfristig ist aber auch mit verringerter Anbaufläche zu rechnen, da insbesondere die Gley- und Pelosolstandorte für den Feldbau nur bedingt geeignet sind.

3.2. sozioökonomische Einflüsse

Um die Folgen von globalem Wandel abzuschätzen, ist die Betrachtung von Wahrnehmung, Wissen, Werten und Handlungen einer Gesellschaft bedeutsam [WBGU, 1993]. Die globalen Veränderungen werden nicht von einer inaktiven, starren Gesellschaft aufgenommen, sondern von deren eigener Dynamik verstärkt, gedämpft oder antizipiert. Mögliche Reaktionen auf den globalen Wandel können Ignoranz, Anpassung, oder Abminderung sein. Ignoranz, also das nicht-reagieren auf Veränderung ist einer Gesellschaft nur dann möglich, wenn die Veränderung sie nicht betrifft, bspw. hat der Anstieg der Meeresspiegel nur periphere Bedeutung für ein Binnenland wie die Schweiz. Durch Anpassung werden die Veränderungen nicht selbst beeinflusst, sondern ihre Auswirkungen auf menschliches Leben und Wohlbefinden zu begrenzen. Ein Land wie die Niederlande könnte zum Beispiel mit Erhöhung der Dämme auf den Meeresspiegelanstieg reagieren. Für die Anpassung gibt es Grenzen, über die hinaus die Stabilisierung des veränderten Zustandes ökonomisch nicht sinnvoll oder physikalisch nicht machbar ist. Im Kontext des Klimawandels werden solche Grenzen als Sensitivitäten bezeichnet. Die Sensitivitäten sind von naturräumlichen und gesellschaftlichen Umständen abhängig. [IPCC, 2001a] nennt eine Temperatursensitivitäten von 1,5 bis 4,8K auf globaler Ebene, [WBGU, 2003] gibt 0,2K pro Dekade an. Abminderungen sollen unerwünschte Veränderungen verhindern, verzögern oder eindämmen. Um beim Beispiel des Meeresspiegels zu bleiben könnten globale Aktionen zur Verminderung des anthropogenen Treibhauseffektes, also die Änderung menschlichen Verhaltens auf verschiedenen Ebenen, dazu beitragen den Anstieg der Meeresspiegel abzumindern. Zentrale Bedeutung kommt der Antizipation zukünftiger Zustände zu. Sie unterstützt die Einsicht in präventive Maßnahmen und erhöht den Zeitraum der Vorbereitung auf eintretende Veränderungen.

Bei der Berücksichtigung von nicht-klimatischem Wandel besteht Nachholbedarf. Bspw. agieren Innovationen im Betrieb oder bei der Rehabilitierung von Infrastrukturen als Puffer zwischen den bio-physikalischen Prozessen und ihren Auswirkungen auf die Gesellschaft [Semadeni-Davies, 2005].

3.2.1. urbane Strukturen

Die Auswirkungen von Urbanisation auf die saisonale und jährliche Wasserbilanz beschreibt [Mitchell, 2003] für das Beispiel eines australischen EZGes. Die jährliche Wasserbilanz unterliegt im Gebiet beträchtlichen Variationen. In trockenen Jahren bildet die Trinkwasserzufuhr den größten Input der Bilanz und die Entwässerung den zweitgrößten Output nach der Verdunstung. Es ist besonders auffällig, dass sich das Wasserverbrauchsverhalten unabhängig von den anderen Komponenten des Wasserhaushalts verhält bzw. sogar entgegengesetzt, bspw. weil in trockenen Jahren bzw. Jahreszeiten der Wasserbedarf für Außenanwen-

dungen erhöht ist. In diesem Zusammenhang betont [Mitchell, 2003], dass klimatische und saisonale Variationen von Regen- und Abwasserverfügbarkeit sowie Wasserbedarf, bei der Bewertung von Alternativen der Wasserbewirtschaftung berücksichtigt werden sollten.

Versiegelung und Verdichtung

In Deutschland nahm die Versiegelung im 20. Jahrhundert von 0,9% auf 12% der Gesamtfläche zu [Funke, 2004], [Kundzewicz, 2002] nennt eine Zunahme des Anteils urbaner Fläche von 6% im Jahr 1950 auf 13% im Jahr 1995.

Wie auch die Landnutzung allgemein befindet Versiegelung sich in ihrer Zuordnung an der Schnittstelle zwischen umweltrelevanten und sozioökonomischen Einflussgrößen. Während die Ursache für eine Zunahme versiegelter Flächen meist wirtschaftliches oder demographisches Wachstum ist, bedeutet sie gleichzeitig einen Eingriff in Ströme und Bilanzen des Wasser- und Stoffhaushalts im Gebiet. Bspw. beschreibt [Tetzlaff, 2001] den Einfluss der Urbanisierung auf die Hochwasserparameter für 19 deutsche EZGe. Er zeigt den Zusammenhang zwischen urbaner Landnutzung und Konzentrationsbeschleunigung, Spitzendurchfluss und Hochwasservolumen, wobei die Stärke des Einflusses auf Grund der Abhängigkeit von anderen Parametern, wie EZG-größe, -geometrie und mittlerem Gefälle nicht linear prognostizierbar ist. Für drei stark urbanisierte, kleine Gebiete in Nordrhein-Westfalen (15 – 22% urbane Fläche) liegt die Zunahme der Konzentrationsbeschleunigung bei 78 – 250%, für den Spitzenabfluss bei 2 – 32%. [Bronstert, 1996] hebt die Bedeutung direkter Effekte der Urbanisierung für kleine und mittlere Hochwässer hervor, die längerfristig einen erheblichen Anteil an Flutschäden verursachen.

Im Zeitraum 1997 bis 2004 erhöhte sich in Baden-Württemberg der Anteil der Siedlungsflächen um 7,2% [Werner, 2006], vor allem zu Lasten der Landwirtschaftsflächen (s. Tab. 8). Die Siedlungsfläche im betrachteten Gebiet liegt mit 14,7% (s. Abb. A 5) leicht über dem bundesdeutschen (12,8%) und landesweiten (13,6%) Durchschnitt. Das Landesamt für Statistik, Baden-Württemberg zeigte über Modellrechnungen einen engen Zusammenhang zwischen Einkommens- und Wirtschaftsentwicklung und Flächenverbrauch. In den vergangenen zwei Jahrzehnten hatte die Bevölkerungsentwicklung deutlich weniger Einfluss auf die Ausweitung urbaner Strukturen [Werner, 2006]. Unterstellt man dass die wesentlichen Faktoren für Flächenumwidmung weiterhin greifen, kann man bis 2015 von einer täglichen Ausweitung der Siedlungs- und Verkehrsflächen von etwa 8,9 bis 13,5 ha in Baden-Württemberg ausgehen.

Änderung der Siedlungsstrukturen

Die Ausweitung der Siedlungsstrukturen und die Separation der einzelnen Funktionsbereiche, also Wohnen, Arbeit, Versorgung und Freizeit, wurde in den letzten Jahren deutlich. Die

zunehmende Vereinheitlichung der strukturellen Bedeutung von Stadtrand und Zentrum, wird von Stadtplanern als „Ruralisierung des urbanen Raums“ bzw. „Urbanisierung des ländlichen Raums“ bezeichnet. Diese Tendenzen sind mit Einschränkungen der Vorteile urbaner Strukturen (Kompaktheit, Diversität) verbunden. Die bedeutenden urbanen Entwicklungen des 20. Jahrhunderts fanden nach [Wiegandt, 2000] nicht im Stadtkern, sondern im suburbanen Raum statt. Stadtplaner verwenden auf diesen Raum noch nicht genügend Aufmerksamkeit. Mit Bezug auf das Beispiel Potsdam-Kirchsteigfeld, bei dem der Versuch einer Integration von gewerblichen Arbeitsplätzen in ein Wohnumfeld erfolglos verlief, stellt [Wiegandt, 2000] aber fest, dass Prinzipien der Stadtplanung nicht gegen die Forderungen des Marktes implementiert werden können.

Durch die Entmischung der Siedlungsfunktionen wird auch der Input in einzelnen Abschnitten des Entwässerungssystems vereinheitlicht. Die Dynamik der Trockenwetterabflüsse ist, abhängig von der Hauptfunktion des Gebietes, synchronisiert und intensiver. Angeschlossene Flächen mit hohem Versiegelungsgrad in einem gleichförmigen Umfeld verursachen große Abflussmengen, die im Entwässerungssystem vermittelt werden müssen.

Insbesondere die Ausweitung von Wohngebieten nimmt in europäischen Gebieten breiten Raum ein, daher hebt [Kasanko, 2006] die Bedeutung von Landnutzungsparametern hervor, die die Entwicklung dieser Wohngebiete beschreiben, bspw. Verhältnis von Wohnnutzung zu gesamter urbaner Landnutzung oder Wachstumsrate von Wohngebieten. Mit der Ausweitung der Wohnsiedlungen steht scheinbar die Bevölkerungsentwicklung in engem Zusammenhang. Die meisten europäischen Regionen erfahren jedoch derzeit einen Bevölkerungsrückgang, oder zumindest einen Rückgang der Geburtenzahlen (siehe Abschnitt Bevölkerungsentwicklung). Die dennoch zu beobachtende Ausweitung der Siedlungen geht meist mit einem Rückgang der Siedlungsdichte einher. Für den Zeitraum Mitte der 1980er Jahre bis Ende der 1990er Jahre nennt [Kasanko, 2006] einen durchschnittlichen Rückgang der Einwohnerzahlen um 2,8% bei gleichzeitigem Zuwachs der bebauten Fläche um 9%. Die Übersicht Tab. 8 (Abschnitt Landnutzungsänderung) zeigt, dass die Zunahme urbaner Flächen vor allem auf die Zunahme von Wohnflächen zurückgeht. Es kommt allerdings nach [Werner, 2006] zu einer Verlangsamung der urbanen Flächenzunahme, während sie im Jahr 1997 noch 12,2 ha betrug, lag sie 2004 noch bei 8,8 ha.

Im Zusammenhang mit der dynamisierenden Wirtschaftsentwicklung bezeichnet [Wiegandt, 2000] die urbane Entwicklung in vielen Gesichtspunkten als unklar und planungsbedürftig. Da in Deutschland die Grundstrukturen der Siedlungsräume schon weitgehend vorhanden sind, sollte sich ein großer Teil der zukünftigen Aktivitäten auf Umbau und Weiterentwicklung der bestehenden Strukturen konzentrieren. Leerstehende gewerbliche und industrielle Flächen entstehen durch den wirtschaftlichen Strukturwandel. Ihre Ursache ist der Weggang

oder die Umsiedelung von Unternehmen. Im Rahmen der Umstrukturierung und Wiedernutzung verlassener oder freier innerstädtischer Flächen, sieht [Wiegandt, 2000] einen Bedarf für finanzielle, planerische und organisatorische Unterstützung von Seiten der lokalen Entscheidungsträger.

3.2.2. Gesellschaftsstruktur

Einwohnerzahlen

Auf die großen Unterschiede bei der Bevölkerungsentwicklung auf verschiedenen räumlichen Ebenen wurde bereits im Abschnitt Skalen (s. a. Abb. 6) hingewiesen. Je kleiner die Betrachtungsebene ist, desto stärker wird der Einfluss von Einzelereignissen und lokalen Veränderungen, insbesondere im wirtschaftlichen, sozialen und administrativen Bereich. So kann etwa die Ansiedlung oder der Wegfall eines Arbeitgebers, die Erschließung eines Wohn- oder Gewerbegebietes oder die lokale soziale Infrastruktur einen erheblichen Einfluss auf die Bevölkerungsentwicklung einer Gemeinde haben, während dies bereits auf regionaler Ebene kaum noch Auswirkungen hat.

Doch selbst für die nationale Ebene reichen die Prognosebereiche für die Bevölkerungsentwicklung weit auseinander. Die statistische Vorrausrechnung der UNO (Abb. 9) gibt bspw. bis 2050 nach verschiedenen Szenarien eine Spannweite der Bevölkerung von 64,1 bis 85,7 Mio. Einwohnern an.

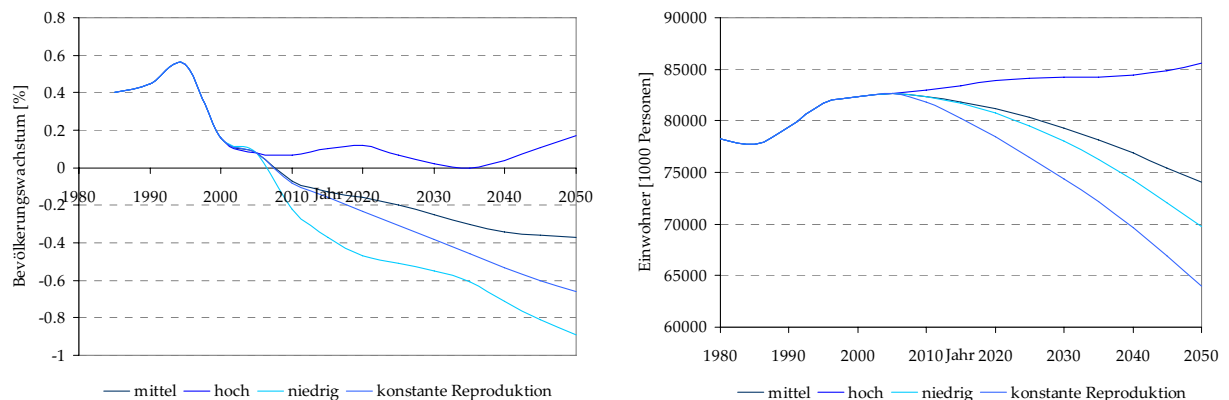


Abb. 9 Entwicklung und Szenarien von Einwohnerzahlen und Bevölkerungswachstum im Zeitraum 1980 - 2050 in Deutschland für verschiedene Varianten der Entwicklung der Reproduktion [UNDESA, 2004], [UNDESA, 2006]

Für Baden-Württemberg gibt [Cornelius, 2007] auf Basis einer statistischen Vorrausrechnung an, dass die Einwohnerzahlen bis 2020 steigen werden und 2050 eine Veränderung zwischen -8 bis 10% gegenüber dem Niveau von 2000 eintritt. Haupteinflussfaktor für Zu- oder Abnahme sind demnach die Wanderungsbilanzen in das Gebiet. Der Regionalplan für die Region Franken [RVHF, 2006] formuliert als Ziel eine langfristige Stabilisierung der Bevölke-

rungszahlen. [Kröhnert, 2006] bewertet den Kreis Künzelsau als einen der deutschen Kreise mit der höchsten Zuzugsattraktivität und stellt bis 2020 einen Bevölkerungszuwachs von 5 bis 10% in Aussicht. Im Rahmen des RIVERTWIN-Projektes liegen die Szenarien für die Bevölkerungsentwicklung im Neckarraum bei einem Zuwachs von 0,02% p. a. für ein endogen orientiertes, konservierendes Szenario bis 0,59% p. a. für ein wachstums- und globalisierungsorientiertes Szenario

Altersstruktur

Die Reproduktionsraten bzw. Nachkommensraten pro Frau werden in hohem Ausmaß durch gesellschaftliche Umstände und Rahmenbedingungen, aber auch durch Eingriffe in das öffentliche Gesundheitswesen, Familienpolitik und Möglichkeiten des Arbeitsmarktes beeinflusst. Seit den 1970er Jahren begegnet Deutschland stetig nachlassenden Reproduktionsraten, für 2000 lag sie bei 1,3 Kindern pro Frau. Nach dem mittleren Szenario für die Bevölkerungsentwicklung bis 2020 liegt die Reproduktionsrate unter der für konstante Bevölkerungszahlen. In Deutschland waren 2006 14% der Bevölkerung jünger als 15 Jahre [UNSD, 2006].

Allgemein geht man in Deutschland von einer alternden Gesellschaft aus. Diese Annahme ist auf der derzeitigen demografischen Entwicklung begründet. Es können im Wesentlichen zwei Ursachen für die Alterung der Gesellschaft ausgemacht werden: einerseits die Zunahme der Lebenserwartung und andererseits die verminderte Reproduktionsrate.

Die alternde Gesellschaft bewirkt verschiedene Veränderungen in den sozioökonomischen Strukturen und hat auch, z. B. über Wasserverbrauchsverhalten Auswirkungen auf qualitative und quantitative Aspekte der Wasserwirtschaft. Der erhöhte Medikamentenverbrauch in der geriatrischen Medizin forciert ein aktuelles Problem der Wasserwirtschaft, den Austrag und die Beseitigung von Mikroschadstoffen z. B. medizinischen Wirkstoffen und Hormonen. Bei der Erforschung ihrer Wirkung auf Ökosysteme besteht noch viel Nachholbedarf.

In anderen Bereichen nennt [Anderson, 2000] z. B. erhöhte Versicherungskosten, geringen Anteil der arbeitenden Bevölkerung an der Gesamtbevölkerung und geringeres durchschnittliches pro Kopf Einkommen. Andererseits beschreibt Anderson, im Vergleich 8 industrialisierter Länder, dass die politischen Vorgaben einen starken Einfluss auf die Entwicklung dieser Parameter zeigen.

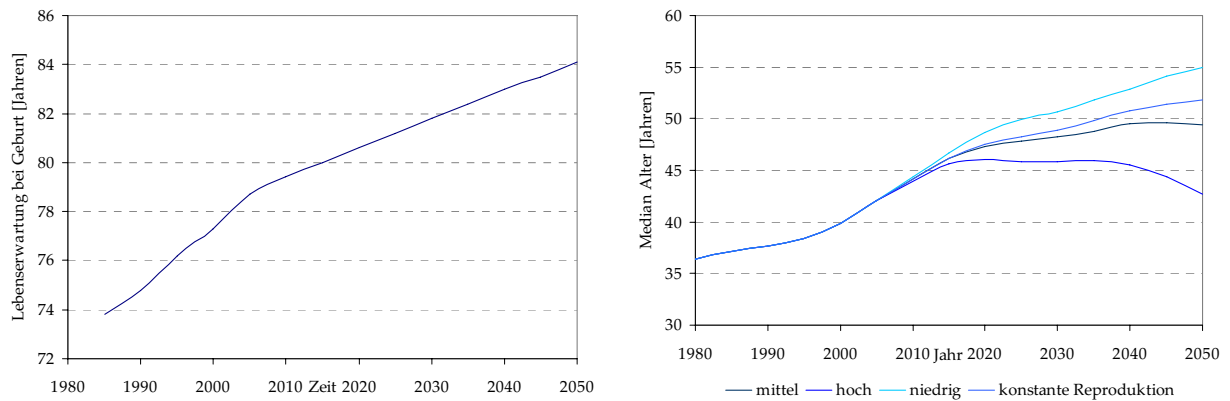


Abb. 10 Entwicklung und Szenarien von Lebenserwartung bei Geburt und Median der Altersverteilung im Zeitraum 1980 - 2050 in Deutschland für verschiedene Varianten der Entwicklung der Reproduktion [UNDESA, 2004], [UNDESA, 2006]

[Anderson, 2000] gibt auf Basis von OECD und UN Studien an, dass im Zeitraum 2000 bis 2020 in Deutschland der Anteil der über 65-jährigen von 16,4% auf 21,6% um 32% zunimmt und gibt in diesem Zusammenhang an, dass die jährlichen pro Kopf Krankenkosten der Älteren beim 2,7 fachen der durchschnittlichen pro Kopf Kosten liegen, die Kombination dieser Zahlen kann als Indikator für eine erhöhte zu erwartende Medikamentenbelastung der Abwässer gesehen werden.

Für die Region Heilbronn-Franken fasst [Gross, 2007] die Tendenzen der demographischen statistischen Analyse des RV im Zeitraum 2003 - 2033 zu drei Hauptaspekten zusammen:

junge Bevölkerungsteile schrumpfen zunächst und stagnieren auf niedrigem Niveau,
die Zahl der Erwerbstätigen steigt zunächst und sinkt nachfolgend ab,
ältere Bevölkerungsteile expandieren kontinuierlich.

Migration

Nach Angaben der UN [UNDESA, 2006b] leben in Deutschland derzeit 10,1 Mio. Migranten, das entspricht einem Bevölkerungsanteil von 12,1%. In den Jahren 2000 bis 2005 lag die Netto-Migrationsrate bei 2,7% p. a. und damit leicht über dem europäischen Durchschnitt von 2,2%. Nach UN-Angaben sind die Eckpfeiler der zukünftigen deutschen Migrationspolitik ein Beibehalten des Zuwanderungsniveaus bei verstärkter Ausrichtung auf qualifizierte Arbeiter und Anstrengungen zur verstärkten Integration. Für ein konstant angenommenes Migrationsniveau und bei gleich bleibender Anzahl deutscher Einwohner, würde in 50 Jahren der Migrantenanteil bei 78% liegen. [Anderson, 2000] weist darauf hin, dass die Migrationsraten für Deutschland, wie auch für andere industrialisierte Länder, nicht ausreichen um die Altersstruktur der Gesellschaft in bedeutendem Maße zu beeinflussen, nennt sie aber unter veränderten politischen Rahmenbedingungen als Möglichkeit der Alterung der Bevölkerung zu begegnen.

3.2.3. Gesellschaft im Wandel – neue Ideale

In den modernen Konsumgesellschaften sind Lebensstile meist wichtiger geworden als Schicht- und Einkommensunterschiede [WBGU, 2003]. Durch den Lebensstil drücken Menschen persönliche und gruppenspezifische Identität aus, er prägt aber auch im Umkehrschluss die Werte und Entwicklungsziele einer Gesellschaft.

[Wiegandt, 2000] spricht von zunehmender Polarisierung der deutschen Gesellschaft und insbesondere von Tendenzen der sozialen Entmischung im urbanen Umfeld, in dem öffentliche Räume ihre soziale Funktion verlieren. Die derzeitige Entwicklung der Siedlungsstrukturen in Deutschland ist vor allem vom Strukturwandel der postindustriellen Gesellschaft, zunehmender Polarisierung der sozialen Schichten und den beginnenden Anforderungen einer alternden und schrumpfenden Gesellschaft geprägt.

Nach [Wiegandt, 2000] veränderte sich in den letzten Jahren die Interaktion zwischen öffentlichen und privaten Akteuren. Aus diesem Grund besteht Bedarf, das Verständnis von Verantwortlichkeit und Verantwortungsbewusstsein neu zu definieren. Bezug auf die Regenwasserbewirtschaftung konstatiert [Rauch, 2005a] eine zunehmende Abkehr von der klassischen top-down Entscheidungsfindung, hin zu Bürgerbeteiligung und Einbindung von Stakeholdern in den Planungsprozess und bei der Auswahl von Bewirtschaftungsmethoden. Man nimmt an, dass diese Ansätze zu gesteigertem öffentlichen Bewusstsein führen und veränderte soziale Praktiken und Verhaltensweisen bewirken. Als wichtige Voraussetzung um die weitreichende öffentliche Beteiligung zu gewährleisten nennt [Rauch, 2005a] aber eine Verbesserung der organisatorischen Verwaltung und die Ausbildung von Verantwortlichen im Siedlungswasserwesen.

Zurück zur Natur vs. consumerism

[Wiegandt, 2000] hält fest, dass der städtische Bürger, der sich für die Wohlfahrt seines Umfeldes engagiert zunehmend durch den Nutzer ersetzt wird, der einzelne urbane Bereiche „verbraucht“. Der Grad und die Neigung der einzelnen sozialen Gruppen sich der Beteiligung zu entziehen ist dabei unterschiedlich ausgeprägt. Nach [WBGU, 2003] lässt sich nicht-nachhaltiger Konsum aber nicht nur auf Eigenschaften der Verbraucher etwa Egoismus zurückführen, sondern muss im gesellschaftlichen Kontext bewertet werden. Da sich Konsumpotential und Lebensstil auch das Sozialprestige betreffen, haftet umweltbewusstem Verhalten häufig ein negatives soziales Image an. Insbesondere unter dem Eindruck der Ölkrisen der 1970er und 80er Jahre wurde diese Weltsicht aber zunehmend in Frage gestellt. Mittlerweile ist die Entkopplung von wachsendem Energieverbrauch und höherem Lebensstandard für viele entwickelte Länder empirisch nachgewiesen [WBGU, 2003].

Bürgerbeteiligung und Private Public Partnership

Der Umfang der Diskussion über Information und Beteiligung von Stakeholdern beim Planen und Bewirtschaften von urbaner Entwässerung hat in den 1990er Jahren deutlich zugenommen. [Rauch, 2005a] hebt die Bedeutung von Bürgerbeteiligung als weitreichendes Mittel zur Kontrolle von Schadstoffquellen hervor. Einerseits sind strukturelle Maßnahmen zur Ursachenvermeidung nur bedingt in der Lage auf Haushalts- und Einzugsgebietsebene erzeugte Verschmutzung zu kompensieren, andererseits sind häufig die Möglichkeiten eingeschränkt, um strukturelle Maßnahmen in bestehenden Systemen zu implementieren.

[Rauch, 2005a] beschreibt nicht-strukturelle Maßnahmen zur Ursachenvermeidung als Eingriffe, die die soziale Dimension der Landnutzung im Einzugsgebiet ansprechen. Dies schließt administrative Ansätze, Regulationen der Raumplanung, kommunale Aktivitäten, privater Grundstücksunterhalt und Fahrzeugnutzung ein. Die Untersuchungen, insbesondere zu quantitativen Effekten nicht-struktureller Maßnahmen sind wenig fortgeschritten und mit beträchtlicher Unsicherheit behaftet. Insbesondere der integrale Ansatz der EG-WRRL bietet zahlreiche Möglichkeiten, den klassischen Prozess der Entwässerungsplanung um Ansätze der Bürgerbeteiligung zu erweitern. Erlerntes Wissen und gesteigertes Bewusstsein für die Probleme der Siedlungsentwässerung erlauben gesteigerten öffentlichen und politischen Einsatz für die Implementierung innovativer und nachhaltiger Maßnahmen der RWB.

Im Gegensatz zu den klassischen top-down Ansätzen bei der Entwässerungsplanung, stellen die Anforderungen an gesteigerte Nachhaltigkeit nach [Rauch, 2005a] die Bürgerbeteiligung auf lokaler Ebene zum zentralen Mittel der Entscheidungsfindung

3.2.4. wirtschaftliche Entwicklung

Im Kontext der Dynamik von Wandel verschiedener Systeme, weist [Martens, 2005] darauf hin, dass sich Kulturen und Ökosysteme langsam verändern, während wirtschaftliche Systeme schnellen zeitlichen Schwankungen unterworfen sind.

Insbesondere bei Betrachtung der wirtschaftlichen Entwicklung ist es wichtig die Prozesse verschiedener Skalen zu berücksichtigen. Die Entwicklung auf der lokalen Skala hängt in hohem Maße von den Rahmenbedingungen der nationalen Entwicklung und mit fortschreitender Globalisierung der Weltmärkte ab.

Für die Entwicklung der Wirtschaft legen die Szenarien des RIVERTWIN-Projektes im Neckarraum ein jährliches Wachstum von ein bis zwei Prozent zu Grunde. Die statistische Entwicklung der Jahre 1990 bis 2004 deutet für den Kreis Hohenlohe ein jährliches Wachstum von 4,4% an [LASBW, 2007].

Infrastrukturen und Transport

Der Aus- und Umbau von Infrastrukturen ist in industrialisierten Ländern bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt vor allem durch eine Erweiterung bestehender Strukturen geprägt. Die zukünftige Entwicklung ist auf lokaler Ebene von Entwicklungskonzept und administrativer Ausrichtung der Planungsinstanzen abhängig, aber auch in größerem Zusammenhang von den demographischen und wirtschaftlichen Tendenzen geprägt. Die Effekte des Ausbaus von Straßen sind im Abschnitt Versiegelung beschrieben. Neben dem Effekt auf die Abflussbildung wirken Straßen auch als bedeutende Vermittler diffuser Schadstoffe. Auf die Möglichkeiten und Grenzen des Ausbaus konventioneller Entwässerungssysteme weisen bspw. [Funke, 2004] und [Schmitt, 2006] hin.

Nach [Wiegandt, 2000] sind Lebenswandel, Konsumorientierung, wirtschaftliche Produktionsstrategien und insbesondere relativ niedrige Energiepreise von bedeutendem Einfluss auf den motorisierten Verkehr. Dessen Zunahme bewirkt negative Effekte für den urbanen Raum, unter anderem Staubbildung, Geräusches- und Schadstoffemission. Die Zunahme von Möglichkeiten bei Arbeit, Konsum und Freizeitgestaltung sowie der niedrige Preis für Mobilität erweitern den Bezug des täglichen Lebens, vom lokalen auf den regionalen Kontext.

Der für die Schmutzbelastung von Regenentwässerung besonders bedeutsame innerstädtische Verkehr wird in Deutschland bisher kaum reglementiert, während in anderen europäischen Ländern bereits Handlungsinitiativen bestehen. Ein Vorreiter in diesem Gebiet ist London, die bereits 2003 mit der Congestion Charge eine Maut für den innerstädtischen Verkehr eingeführt haben. In Schweden bestehen nach [Semadeni-Davies, 2005] konkrete Reduktionsziele für Stadtverkehr bis 2010 und 2050. In Deutschland haben Städte wie Mannheim oder Bremen Luftreinhaltepläne eingeführt. In 37 deutschen Städten (stand 03.05.2007) wurde die Umweltplakette eingeführt, die Kommunen erlaubt, im Rahmen der Feinstaubverordnung, Fahrverbote für nicht-zertifizierte Fahrzeuge zu verhängen.

[WBGU, 2003] prognostiziert für Europa bis 2020 ein jährliches Wachstum des Energieverbrauchs im Verkehrssektor um 1,6%. Das wachsende Verkehrsaufkommen wird die Effizienzsteigungen im Kraftstoffverbrauch überkompensieren. Die Auswertung der Daten des [LASBW, 2007] für den Zeitraum 1990 – 2004 ergab eine Zunahme der Jahreskilometerleistung von 27,7% für alle Straßen und 53,7% für die innerörtlichen Straßen.

3.2.5. Wasserbedarf

Bei einer unsicheren Entwicklung der verfügbaren Wasserressourcen besteht, zumindest auf internationaler Ebene, ein kontinuierlicher Mehrverbrauch an Wasser. In diesem Zusammenhang beschreibt Punkt 4. in den Erwägungen zum Erlass der EG-WRRL: Die Nachfrage nach Wasser in ausreichender Menge und angemessener Güte steigt permanent in allen An-

wendungsbereichen; dies bringt die Gewässer der Gemeinschaft unter wachsendem Druck. [EG-WRRL, 2000].

[Sundberg, 2004] nennt Regenwasser als bedeutsame Eingangsgröße für Süßwasser in urbanen Gebieten. Sie stellt eine lokale, dezentrale Ressource dar und kann die Nachhaltigkeit der urbanen Wassernutzung verbessern, indem Effektivität und Anpassungsfähigkeit des Systems erhöht werden.

Der anthropogene Wasserverbrauch lässt sich grob in 3 Sektoren unterteilen, den häuslichen, industriellen und landwirtschaftlichen. Da unter den derzeitigen Bedingungen die beiden erstgenannten Bereiche stark vom „Entwicklungsstand“ eines Landes abhängen und miteinander korrelieren, schlägt [Vörösmarty, 2000] vor sie in einer Kategorie zusammenzufassen. Regional können auch andere Einflussfaktoren bedeutsam werden, beispielsweise erwähnt [Andersson, 2006] das im namibischen Teil des Okavango durch die Touristen saisonal der Wasserverbrauch um -50 bis +70% gegenüber der Situation ohne Touristen variiert wird.

Als Parameter für den Grad des Wassermangels schlägt [Vörösmarty, 2000] das Verhältnis aus Gesamtabfluss zu anthropogenem Wasserverbrauch vor. Für Werte kleiner 0,2 liegt kein Wasserstress vor, für Werte von 0,2 bis 0,4 ist dieser moderat und für Werte größer 0,4 herrscht erhöhter Wasserstress. [Vörösmarty, 2000] weist ebenfalls darauf hin, dass der sinkende pro Kopf Wasserverbrauch durch Bevölkerungswachstum überkompensiert wird, für die globale Skale nennt er für den Zeitraum 1985 – 2025 einen Rückgang von $640 \text{ m}^3 / (\text{P}^* \text{a})$ auf $580 \text{ m}^3 / (\text{P}^* \text{a})$, dennoch nimmt der globale anthropogene Wasserverbrauch im gleichen Zeitraum von $4,7 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ auf $5,4 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ zu. Auf Basis einer Modellierung des Abflusses für monovariante Szenarien von Klimawandel und Wirtschafts/Bevölkerungswachstum und die Kombination beider Effekte ermittelt er den Einfluss der beiden Komponenten auf das Verhältnis Wasserverbrauch zu Abfluss. In der Analyse bestimmt er Bevölkerungswachstum und wirtschaftliche Entwicklung als wichtigste Antriebskräfte für regional zunehmende Wasserknappheit.

Tab. 9 gibt eine Übersicht über die Verhältnisse auf kontinentaler Skale. Die Spalten Bevölkerung und Abfluss geben die absoluten Werte der Parameter zu Anfang und Ende des Simulationszeitraums wieder. Die Spalte WV/Q beschreibt den Grad des Wassermangels, die drei Spalten Bspw. verursacht der Klimawandel auf des Verhältnisses Wasserbedarfs zu Abfluss eine Änderung von -12 bis +4%, dies liegt deutlich unter den Änderungen in Folge Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum. Es fällt auch auf das für die Kombination der Effekte der Mehrverbrauch über der Summe beider Einzeleffekte liegt.

Tab. 9 kontinentale und globale Zusammenfassung von Bevölkerung, bewässerter Landfläche, Abfluss und Wasserbedarf für den Ist-Zustand 1985 und 3 Szenarien für 2025

Gebiet	Bevölkerung		bewäss. Fl	Abfluss		WV/Q	Δ WV/Q [%]		
	[10 ⁶ Pers.]		[10 ³ km ²]	[10 ¹¹ m ³ /a]		[%]			
	1985	2025		1985	2025	1985	Klima	Bev.	B&K
Afrika	543	1440	118	4.52	4.10	0.32	10	73	92
Asien	2930	4800	1690	13.7	13.3	12.9	2.3	60	66
Australien	22	33	26	0.71	0.69	2.5	2	30	44
Europa	667	682	273	2.77	2.79	15.4	-1.9	30	31
N.amerika	395	601	317	5.89	5.87	10.5	-4.4	23	28
S.amerika	267	454	95	11.7	10.4	0.9	12	93	121
global	4830	8010	2520	39.3	37.1	7.8	4.1	50	61

In einer Rasterdarstellung gibt [Vörösmarty, 2000] einen Überblick für die Veränderungen der einzelnen Region, für Südwestdeutschland liegt die Veränderung des Verhältnisses aus Wasserverbrauch zu Abfluss nach bei +/-20% am Ende des Simulationszeitraums es ist also keine deutliche Zunahme der Wasserverknappung zu erwarten.

3.3. rechtliche und legislative Situation

Es sollen in diesem Abschnitt repräsentativ und ohne Anspruch auf Vollständigkeit einige Beispiele vorgestellt werden, wie gesetzliche Rahmenbedingungen die Entwicklung der Wasserwirtschaft determinieren.

In der Europäischen Union besteht eine Vielzahl von Richtlinien, die einzelne Gesichtspunkte der Wasserver- und -entsorgung regulieren. Bis Anfang der 1990er Jahre wurden diese ursachenbezogenen Ansätze als ausreichend betrachtet, um die Gewässer in Hinsicht des Umweltzustandes zu schützen [Achleitner, 2005]. Zunehmende Probleme qualitativer und quantitativer Aspekte der Gewässer führten zur Entwicklung integrativer Ansätze der Wasserbewirtschaftung. Mit der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Gemeinschaft (EG-WRRL) verschieben sich auch die Anforderungen an die Regenentwässerung als Konsequenz aus der integralen Beurteilung der Gewässergüte. Eine besondere Herausforderung bei der Implementierung der EG-WRRL besteht nach [Achleitner, 2005] in der Überführung in nationales Recht und der Organisation der Durchsetzung. Um die regionalen Unterschiede des Naturraums zu berücksichtigen, wird keine stringente Definition der zu erreichenden Kriterien gegeben, sondern ein „guter Zustand“ der Ökologie, Beschaffenheit usw. gefordert, der von den verantwortlichen Überwachungsinstanzen in konkretere Vorgaben überführt wird. Um dem hohen Urbanisierungsgrad in Teilen Europas Rechnung

zu tragen, werden die Gewässer in natürliche und stark veränderte unterteilt. [Achleitner, 2003] weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass dies in den einzelnen Mitgliedsstaaten zu einer unterschiedlichen Interpretation und Umsetzung der Richtlinie führen könnte.

Die Bedeutung der Planung auf EZG-Basis wird zunehmend erkannt, wie auch in der EG-WRRL, fordert [Liu, 2002] für den Gelben Fluss eine Stärkung der Position der Flusskommission und die Einführung eines "Gelber Fluss Gesetzes", das die Administration, aber auch ökonomisch nachhaltige Entwicklung und die Umweltbelange regelt.

In den USA nennt [Kalman, 2000] den Clean Water Act (CWA) als rechtlichen Rahmen für die integrale Betrachtung von Einleitung und Gewässer. Bei der Umsetzung des CWA sind die Bundesstaaten aufgefordert numerische und narrative Indikatoren zu entwickeln die Nährstoffe, mineralische Stoffe, physische und biologische Eigenschaften beschreiben und den Schutz von Habitaten, Wasserversorgung und Freizeitnutzung zu ermöglichen. Das Gesetz schreibt vor, die Verschmutzung mit Hilfe von „best management practices“ bis zu einem „maximalen praktikablen Ausmaß“ einzuschränken. Allerdings räumt [Kalman, 2000] ein, dass die Entwicklung von rechtlichen Werkzeugen stark an die gesellschaftliche und technologische Entwicklung gekoppelt ist und damit autonom nicht prognostiziert werden kann.

Als Meilenstein in der Schaffung von Handlungsrahmen bezeichnet [Achleitner, 2005] die Integration des Immissionsprinzips in die EG-WRRL. Durch die Definition von Qualitätszielen für den Vorfluter einerseits und Grenzwerte für die Einleiter andererseits, soll der maximale notwendige Schutz der Gewässer unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Machbarkeit gewährleistet werden. In Abhängigkeit von Eigenschaften des Systems Entwässerungsgebiet - Gewässer wirkt entweder der Standard für Beschaffenheit des Gewässers oder Schadstoffemission beschränkend.

In Abhängigkeit von der administrativen Einordnung der Planungseinheit, etwa des Einzugs- oder Entwässerungsgebietes, kann die Legislative entscheidende Anreize und Handlungsrahmen schaffen, die die Ausrichtung der Entwässerungsplanung prägen. [Funke, 2004] zeigt am Beispiel der Stadt Hamburg, wie über die Handlungsgrundsätze im umweltpolitischen Aktionsprogramm (1984) bis hin zu konkreten Ansätzen wie dem Abwasserbeseitigungsplan (2000) oder der Abschaffung des Anschluss- und Benutzungszwangs für Regenwasser (2001), Anreize für die Nutzung oder den Flächenrückhalt von Regenwasser geschaffen werden können.

Das Programm zum Urban Pollution Management in Großbritannien gibt Planungsanleitungen für wasserqualitätsgestützte RWB. Dabei werden die Auswirkungen von Verschmutzung über vereinfachte Modelle und Extremwertstatistik ausgewertet, wobei der Betrachtung

tungsschwerpunkt bei Sauerstoffgehalt und Ammoniumkonzentration im Vorfluter liegt [Rauch, 2005a]. In der Schweiz bestehen weitreichende Regulationen für die Planung von Abwassersystemen, wobei die Morphologie und ökologische Struktur des Vorfluters berücksichtigt wird. Eine Verbesserung der Wasserqualität im Vorfluter kann so nicht nur eine Verbesserung im technischen System erfordern, sondern auch am Gewässer nötig sein [Rauch, 2005a]. In den USA sind die Regeln ebenfalls an der Wasserqualität orientiert, nur für punktförmige Einleiter bestehen Vorgaben, die die maximale praktikable Reinigung, für Einzeleinleiter fordern, es Vorgaben für maximale tägliche Frachten, die in Abhängigkeit von eingeleiteten Stoffen und Trocken- und Regenwetterbelastung an der Einleitstelle des Vorfluters bestimmt werden. Ähnlich wie beim deutschen BWK-M3 Verfahren werden Zeitreihen von Durchfluss und Stoffkonzentrationen simuliert und statistisch ausgewertet, die Ergebnisse werden mit Grenzwerten und der Dauer von deren Überschreitung verglichen.

Einen weiteren Schritt der Integration beschreibt [Burian, 2002]. In England werden über lokale Umweltbehördenpläne Flusseinzugsgebiete unter Berücksichtigung von Wasser-, Stoff- und Luftqualität überwacht.

[Brown, 2005] fasst zusammen, dass die derzeitige administrative Ausrichtung die Etablierung von integrierter RWB hemmt und fordert folglich eine Neudefinition der Rahmenbedingungen. Als Hauptursachen für die Zurückhaltung bei der Adaption integrierter Umweltpolitik nennt [Brown, 2005] rechtliche und institutionelle Trennung von Aufgaben die durch integrierte Ansätze zusammengefasst werden. Damit einhergehen Überschneidungen oder Lücken in der Verantwortlichkeit von Stakeholdern sowie Nachholbedarf bei der Information und Weiterbildung von Verantwortlichen zu den neuen Methoden.

In einer integraleren Sicht auf die Problematik der Regenentwässerung sind auch die politischen Rahmenbedingungen für die Flächenversiegelung zu berücksichtigen. Im Jahr 2002 hat die Bundesregierung im Rahmen der Nachhaltigkeitsstrategie das Ziel formuliert bis 2020 den Flächenverbrauch auf 30 ha/d zu reduzieren, allerdings stagniert der Wert seit einigen Jahren um 115 ha/d. Für Baden-Württemberg würde dies bedeuten, dass statt der derzeitigen 11 ha/d nur noch 3 ha/d versiegelt würden [Werner, 2006]

Allerdings fehlen nach [Semadeni-Davies, 2005] bisher weitgehend rechtliche Vorgaben und Rahmen um mit Parametern im Wandel umzugehen.

In diesem Abschnitt wird die Grundlage für den Entwurf von Szenarien geschaffen; der ist-Zustand wird abgebildet. Der erste Teil 4.1 stellt die Gebietsdaten vor, die zum Teil schon Grundlage für die in der Einführung gegebene Beschreibung des betrachteten Gebietes waren. Die Aufbereitung der Daten für die Anforderungen eines Modells wird zusammengefasst. Der Teil 4.2 stellt das für die Niederschlags-Abfluss- und Schmutzfrachtmodellierung verwendete Programm vor und gibt einen Überblick über die Berechnungsgrundlagen. In 4.3 wird erläutert, wie das Modell des Gebietes erstellt wird. Schließlich werden im Teil 4.4 einige Analysen für den ist-Zustand gegeben, die es erlauben sollen das System besser zu verstehen und das Augenmerk für die Szenarienentwicklung in eine relevante Richtung zu lenken.

4.1. Gebietsdaten

[Sundberg, 2004] hebt die Bedeutung der Eingangsdaten als Grundlage für die Auswahl von Beurteilungsparametern des Systems hervor. In vielen Fällen schränkt das Fehlen von verfügbaren und nachvollziehbaren Daten die Zahl möglicher Parameter ein.

Die für die Erstellung des Modells verwendeten Daten können in drei Kategorien eingeteilt werden. Die gebietsspezifischen Parameter erfassen Gerinne, Landoberfläche, Untergrund und urbanes Einzugsgebiet. Sie lagen als Datensätze für ein GIS, in Berichtform als Ergebnis einer durchgeführten Gewässerbegehung und als bestehende Teilmodelle der Kanaleinzugsgebiete vor. Diese Daten wurden aufbereitet, plausibilisiert und gegebenenfalls auf die Modellanforderungen angepasst. Die Prozessparameter beschreiben die Eigenschaften der gebietsspezifischen Parameter, die für die Modellprozesse relevant sind. Sie umfassen die hydraulischen und hydrologischen Kennwerte für Gebiet, Fließgewässer und Entwässerungssystem, ihre Werte wurden aus Studien von Literatur und Regelwerken zusammengestellt. Die klimatischen Eingangsgrößen Temperatur, Niederschlag und Verdunstung und die stofflichen Parameter bilden Randbedingungen; sie entstammen Datenbanken, wurden berechnet oder aus der Literatur abgeleitet.

4.1.1. Datenaufbereitung

Die Bearbeitung der georeferenzierten Datensätze erfolgte einheitlich mit dem Programm Arc-Gis.

Fließgewässer

Etwa 16 km unterstrom von Kupferzell befindet sich der Pegel Forchtenberg. Eine Übersicht über die Pegeldata gibt Tab. 1. Nach [Sahm, 2006] befindet sich der Pegel allerdings in einem schlechten Zustand und es wurden wiederholt Inkonsistenzen in der W-Q-Beziehung festgestellt. Diese Umstände mögen einige Auffälligkeiten in der Pegelstatistik teilweise erklären, so ist das mittlere gemessene Hochwasser (MHQ) größer als das statistische zweijährige Hochwasser (HQ_2) und das höchste jemals beobachtete Hochwasser entspricht, trotz der über 70-jährigen Beobachtungsreihe, in etwa einem 15-jährigen Ereignis.

Auf Grund der geringen Vertrauenswürdigkeit der Pegelwerte sowie in Anbetracht des Umstandes, dass Informationen zu Landnutzung und Gewässer im Bereich des Unterlaufs fehlen, wurde das Einzugsgebiet auf die oberen 40 km² reduziert (Abb.11). Dadurch kann auch einer Zielstellung der Arbeit, den Siedlungseinfluss der Gemeinde Kupferzell zu bewerten, besser Rechnung getragen werden, da die stofflichen und hydraulischen Einflüsse nicht durch den Fließweg abgedämpft werden.

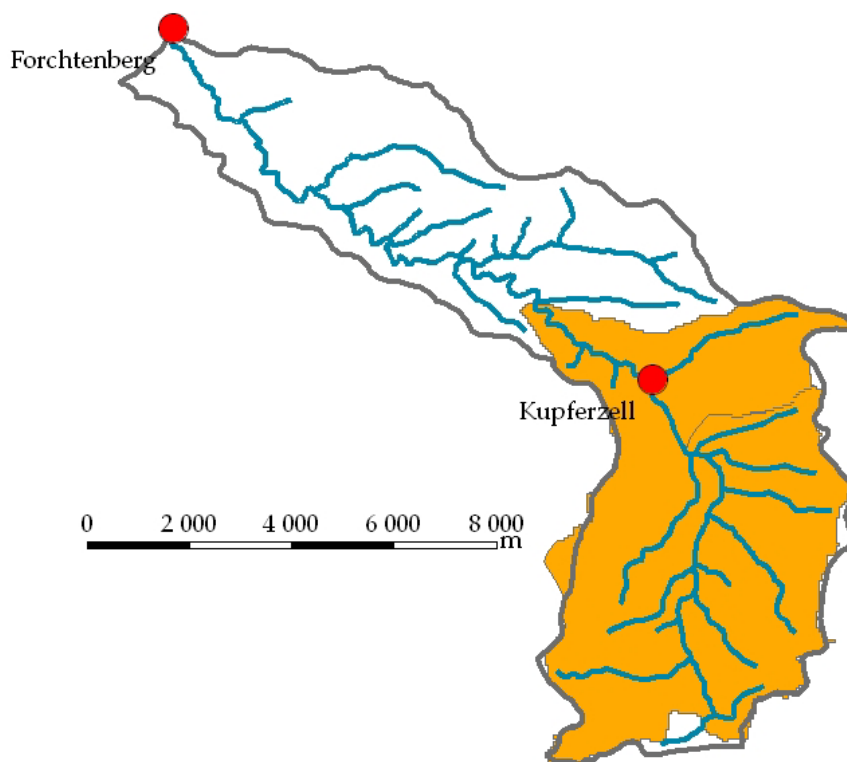


Abb. 11 Einzugsgebiet und reduziertes Einzugsgebiet der Kupfer¹

¹ Die leicht abweichenden Umrisse der Einzugsgebiete entstehen durch unterschiedliche Generierungsalgorithmen, für das Gesamteinzugsgebiet durch [LfUBW, 2004] und für das reduzierte Gebiet durch den ArcGis-internen Algorithmus aus dem DGM 50.

Zur Generierung von Einzugsgebiet und Teileinzugsgebieten wurde im Spatial Analyst die Watershed Routine auf das DGM 50 angewendet. Da das Einzugsgebiet im Bereich des Katzenbachs, in der Nähe des Gewerbeparks Hohenlohe, deutliche Abweichungen vom manuell auf der topografischen Karte 1:50 000 (TOP 50) bzw. nach [LfUBW, 2004] ermittelten Einzugsgebiet aufwies, wurde der Verlauf korrigiert. Auch die Fließgewässer wurden mit der Flow Accumulation des Spatial Analyst ermittelt und durch die StreamShape Routine wurde das Fließnetz aus den Rasterdaten des DGM 50 vektorisiert. Für Geometrie und Struktur der Gewässer wurden die Ergebnisse der Gewässerbegehung (Tab. A 1) verwertet. Die daraus abgeleiteten, hydraulisch relevanten Parameter sind in Tab. 10 zusammengefasst.

Tab. 10 hydraulische Eigenschaften der Gewässerabschnitte

Gewässerabschnitt	Länge [m]	Breite [m]	Tiefe [m]	Gefälle [o/oo]	Böschung [1:x]	kStrickler [m ^{1/3} /s]
Kupfer oh. Flürlesbach	854	1.5	1	8.26	1	40
Kupfer oh. Richtbach	754	2	1	7.39	1	35
Kupfer oh. Bauersbach	1645	2.5	1.5	5.4	1.5	35
Kupfer oh. Apfelbach	554	2.5	1.5	2.2	2	30
Kupfer oh. Goggenbach	1245	3	1.5	5.81	2	30
Kupfer oh. Feßbach	1769	5	2	0.85	1	40
Kupfer oh. Auslass	2984	5	2	3.06	2	35
Rinnenbach uh. Katzenbach	421	3	1.5	6.82	2	35

Landnutzung und Oberflächeneigenschaften

Die Landnutzungsinformationen lagen als ATKIS-Daten (Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem) vor, die Landnutzung wurde mit dem Einzugsgebiet verschnitten, auf Grund der Verwaltungsstruktur in ATKIS mussten Flächen mit doppelter Attributbelegung bereinigt werden. Die Landnutzungskategorien wurden zu den sechs Klassen Acker, Grünland, Industrie, Siedlung, Wald und Wasser zusammengefasst, eine Übersicht über die Flächenanteile findet sich in Abb. A 5 im Anhang, die räumliche Verteilung der Landnutzungsflächen ist im Abschnitt die Kupfer und ihr Einzugsgebiet - Landnutzung in Abb. 3 dargestellt. Die Einteilung der Flächennutzung erfolgte im Wesentlichen mit Blick auf unterscheidbare hydrologische Eigenschaften. Die Parameter der befestigten und durchlässigen Flächen sind für die Landnutzungsarten Industrie und Siedlung relevant, sie werden von den Standardeinstellungen des Programms Storm übernommen und entsprechen den Vorgaben von [ATV- A128, 1992]. Die Tabellen Tab. 11 und Tab. 12 geben eine Übersicht über die relevanten Eigenschaften der Landnutzung.

Tab. 11 Eigenschaften der Landnutzung für Flächen mit natürlichem Wasserhaushalt

natürliche Flächen	max. Interzeption [mm]	Wurzeltiefe [m]	max Makroporenflussrate [mm/h]	Strickler-Beiwert der Oberfläche
Acker	3	1	36	10
Grünland	3	1	36	8
Wald	5	1.5	36	5
Wasser	0.1	0.1	0	1

Tab. 12 Eigenschaften der Landnutzung für Flächen mit natürlichem Wasserhaushalt

befestigte Flächen	Benetzungsverlust [mm]	Muldenverlust [mm]	Anfangs- / End-Abflussbeiwert	Anf. / End Infiltrationsrate [mm/h]
Standard	0.5	1.8	0.25 / 1	
Rasen	2	3	0 / 0.3	60 / 3

Boden und Geologie

Die Böden wurden auf Grundlage der BÜK 200 (Bodenübersichtskarte 1:200 000) ermittelt (Abb. A 4), wobei sie nach hydraulischen und hydrologischen Unterschieden zu Braunerde, Pelosol, Rendzina und Gley zusammengefasst wurden. Entsprechend den Modellanforderungen werden den Böden verschiedene Schichten von Bodenarten zugeordnet, sie orientieren sich an [Hydrotec, 2005] der ROSETTA Bodendatenbank [USSL, 1999] und der KA4, die Eigenschaften fasst Tab. 13 zusammen.

Tab. 13 hydraulische Eigenschaften der Böden im Einzugsgebiet

Boden	Bodenart	d_s [m]	k_f [m/s]	max. Inf. [mm/h]	WP [%]	FK [%]	GPV [%]	nFK [%]
Braunerde	stark lehmiger Sand oben	0.7	4.17E-06	21.0	12	28.5	42	16.5
	schwach toniger Sand unten	0.5	6.94E-07	21.0	12	27	40	15
Gley	mittel lehmiger Schluff oben	1	1.39E-06	8.5	13	37	44	24
	lehmig schluffiger Sand unten	1	6.94E-07	21.0	11	30	42	19
Pelosol	lehmiger Ton oben	0.7	1.39E-06	4.0	20	38	53	18
Rendzina	schwach lehmiger Sand oben	0.3	4.17E-06	21.0	6	22	41	16
	grober Sand unten	0.2	8.70E-05	75.0	6	18	38	12

Die Geologie geht nicht direkt in das Modell ein, sie wird nur implizit über die Speicherkonstante des Basisabflusses berücksichtigt. Da der Untergrund im Gebiet nach [GLABW, 1998] weitgehend homogen ist, wurde für das Gebiet global eine Rückgangskonstante des Basisabflusses von 400 h angenommen. Aus der Verschneidung von Teileinzugsgebieten, Landnutzung und Bodendaten wurden Elementarflächen erzeugt, diese bilden die unterste Aggregationseinheit des natürlichen Einzugsgebietes. Mit DGM50, Teileinzugsgebieten und Landnutzung konnte die Zeit-Flächen-Funktion ermittelt werden, die die Impulsantwort des Oberflächenabflusses beschreibt.

Klimatische Randbedingungen

Die modellrelevanten klimatischen Randbedingungen des Gebietes sind einerseits Niederschlag und andererseits Temperatur und Verdunstung. Für den Niederschlag liegen für Baden-Württemberg 30-jährige synthetische Zeitreihen vor. In Anbetracht der Gebietsgröße wurde nur ein Regendatensatz eingeführt und als homogen über die Fläche betrachtet.

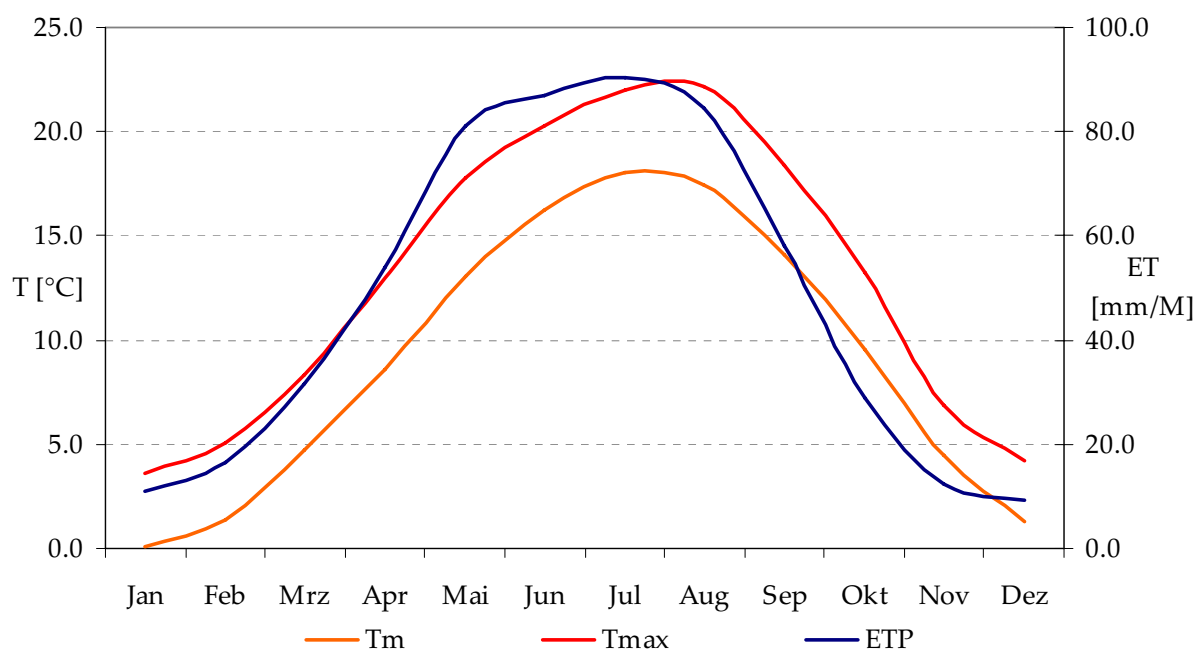


Abb. 12 Jahresgang der mittleren und maximalen monatlichen Temperatur und Monatssumme der Verdunstung
Als Referenztemperatur wurde die der Klimastation in Öhringen angenommen, da sich die Station nur 10 km entfernt vom Gebiet und auf annähernd gleicher geodätischer Höhe befindet.

Die Berechnung der Verdunstung erfolgte nach der Formel nach Hargreaves (F. 1), diese benötigt wenige externe Zusatzinformationen und erwies sich nach [Andersson, 2006] als robust.

$$ETP = 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot S_0 (T + 17.8) \cdot \sqrt{(T_{\max} - T)}$$

F. 1 Hargreaves Formel

mit: ETP potentielle Verdunstung [mm/d]

S_0 Wasseräquivalent der extraterrestrischen Strahlung [mm/d]

T mittlere Monatstemperatur [°C]

$T_{\max}$ maximale Monatstemperatur [°C]

Die extraterrestrische Strahlung wurde für 49 °N nach [Bernhofer, 2005] berechnet. Der Jahresgang für mittlere und maximale Temperatur und Verdunstung ist in Abb. 12 dargestellt. Eine Übersicht über die Zahlenwerte enthält Tab. A 2 im Anhang.

Verschmutzung

Für die Betrachtung der Schmutzkonzentrationen des Regenwassers wurde konzeptionell zwischen Siedlungsflächen, Industrieflächen und Straßenflächen unterschieden. Für Trockenwetterabfluss wurden einheitliche Belastungen vorgesehen, die Trockenwetterelemente werden nach der in [IPS, 2007] und [IGN, 2005] angegebenen, hauptsächlichen Nutzung in häusliche und gewerbliche Einleiter unterteilt. Die Werte der Konzentrationen entstammen [Boller, 1997], [Brombach, 2002], sowie den Zusammenstellungen von [Krebs, 2000], [Peters, 2007] und [Sommer, 2007]. Zum Teil lagen die Angaben zu Frachten oder jährlichen Abtragsraten vor, in diesen Fällen wurden sie über den Abfluss bzw. den mittleren Niederschlag skaliert. Die in Tab. 14 wiedergegebenen Werte fassen die jeweils kleinsten (min) und größten (max) mittleren Werte der verschiedenen Quellen zusammen, aus allen Werten wurde der Median ermittelt und als relevant angenommen. Für die Angaben des Trockenwetterabflusses, für die keine Spannweite angegeben sind, wurden die einwohnerspezifischen Frachten nach [ATV-A 131, 2000] über den Wasserbedarf in Konzentrationen umgerechnet.

Tab. 14 Literaturwerte für die Verschmutzungskonzentration nach Ort der Entstehungs

	Siedlung			Industrie			Straße			Trockenwetter		
Stoff [mg/l]	min	med	max	min	med	max	min	med	max	min	med	max
CSB	33.3	81.0	107	40	53.3	66.7	57	88.1	117	1159		
BSB	2.8	14.3	18.1	2.4	13.7	23.7	5.8	15.0	32	579		
NH ₄ -N	0.4	2.8	3.8	0.1	2.2	4.7	0.18	1	2.8	4.6	20.4	65
SS	43.3	141	196	50	153	233	28	210	450	108	249	757
N	3.3	6.7	10.8	1.4	5.0	6.7	1.2	2.8	6.7	106		
P	0.50	1.0	1.33	0.67	0.75	1.33	0.1	0.9	1.33	17.4		
Cu	0.09	0.17	1.32	0.03	0.24	1.14	0.01	0.08	0.21	0		
Pb	0.02	0.05	0.44	0.03	0.10	0.23	0.01	0.18	0.31	0		

Kanalnetz

Die Daten der Kanalnetze und der Trockenwettereinleitung lagen bereits als Modelle vor. Für die Kläranlage Süd wurde das Modell durch [IGN, 2005] im Rahmen eines Antrags auf wasserrechtliche Einleiterlaubnis erstellt, das Modell für den Einzugsbereich der Kläranlage Kupferzell entstand im Zusammenhang mit dem Generalentwässerungsplan für die Gemeinde [IPS, 2007].

Zusammenfassung

Tab. 15 gibt eine Übersicht über die Arbeitsschritte bei der Datenrecherche und Aufbereitung

Tab. 15 Zusammenfassung der Quellen und Arbeitsschritte der Datenrecherche und -aufbereitung

Datentyp	Quelle	Bearbeitung
Pegeldaten	[RPS, 2007] [LfUBW, 2004]	Plausibilität, statistische Analyse; Interpolation für Bezugsgebiet
EZG / TEZG	DGM 50 TOP 50	Arc-Gis Spatial Analyst Watershed Routine zur Spearation Abgleich mit topographischer Karte und Nachbe- arbeitung
Fließgewässer	DGM 50 Gewässerbegehung [Horlacher 2004]	Arc-Gis Spatial Analyst Flow Accumulation und StreamShape Routine Zuordnung von hydraulischen, hydrologischen und strukturellen Eigenschaften
Landnutzung	ATKIS HEC TR42	Verschneidung mit EZG Bereinigung von Restflächen / Inkonsistenzen Generalisierung der Landnutzungsarten Zuordnung hydrologischer Eigenschaften
Boden	BÜK 200 BKA 4 ROSETTA [NASIM, 2005]	Verschneidung mit EZG Generalisierung der Böden Zuordnung von Bodenarten zu den Böden Zuordnung hydraulischer Eigenschaften
Geologie	WABOA	Zuordnung hydraulischer Eigenschaften
Regendaten	synthetische 30- jährige Reihe; DVWK	Generierung der DVWK-Regen mit einem HYSTEM-EXTRAN Modul auf Basis der korres- pondierenden Niederschlagshöhen nach KOSTRA
Temperatur	DWD	
Verdunstung	-	Berechnung nach Hargreaves-Gleichung
Schmutzwasser- konzentrationen	[Boller, 1997] [Brombach, 2002] [Krebs, 2000] [Peters, 2007] [Sommer, 2007] [ATV-A131,2000]	Zusammenstellung relevanter Informationen, z. T. Umrechnung nach Einheiten
Kanalnetz Trockenwetter- abfluss	[IPS, 2007], [IGN, 2005]	Integration der Teilmodelle Homogenisierung von Bezeichnungen Plausibilitätsprüfung

4.2. Das Wasser- Stoffstrommodell in Storm

Das Programm Storm [IPS, 2007] kombiniert die Ansätze Niederschlag-Abfluss-Modellierung für das urbane und natürliche Einzugsgebiet mit einem Schmutzfrachtmodell.

4.2.1. Modellkonzept

Das Modell hat konzeptionellen Charakter und verwendet empirische und physikalisch begründete Gleichungen. Die Modellergebnisse sind deterministisch und werden aus Bilanzbetrachtungen abgeleitet. Hydraulische und stoffliche Bilanzen von Einzelementen werden über Bilanzobjekte als aggregierende Objekte erstellt. Die Bilanzen werden mit der Mindestdiskretisierung der Simulationszeitschritte nach dem Prinzip finiter Differenzen gebildet. Oberflächen und Elemente des Entwässerungssystems, die an einem gemeinsamen Punkt entwässern, werden zu Gebieten zusammengefasst. Die Gebiete werden über Translationselemente wie Leitungen und Fließgewässer verbunden, die gleichzeitig die Aufnahme von Teilbilanzen erlauben. Die Wasserbilanz kann je nach Zielstellung der Betrachtung für ein Teilgebiet, das unterliegende Fließgewässer, das Grundwasser, die Kläranlage oder die vorgenannten integrierend am Auslass des Gebietes berechnet werden. Für die Untersuchung von Ganglinien und Konzentrationen werden die Bilanzwerte über die Simulationszeitschritte bzw. den Durchfluss differenziert.

4.2.2. Berechnungsgrundlagen

Die in diesem Abschnitt getroffenen Angaben fassen im Wesentlichen die Angaben aus der Modellbeschreibung des Programms zusammen.

Hydrologie

Bei der Bildung des Oberflächenabflusses werden 3 Flächenkategorien unterschieden. Auf versiegelten Flächen wird der Ansatz nach der Grenzwertmethode verwendet, dabei werden Verluste durch Benetzung/Interzeption und Mulden berücksichtigt. Für unbefestigte Flächen werden zusätzlich die Versickerungsverluste mit dem Ansatz nach Horton einbezogen. Bei natürlichen Flächen kann darüber hinaus der Jahresgang der Interzeption, der Makroporenfluss, Durchwurzelung und Verschlammung sowie die hydraulischen Eigenschaften der unterliegenden Bodenschichten beachtet werden.

Die oberflächliche Abflusskonzentration wird über eine extern ermittelte Zeit-Flächen-Funktion oder Einzellinearspeicher berücksichtigt, die unterirdischen Komponenten werden über Kaskaden von Einzellinearspeichern konzentriert. Die Durchflusstransformation wird optional als reine Translation nach der Manning-Strickler-Formel in Gewässern oder nach

Prantl-Colebrook in Leitungen berechnet bzw. unter Berücksichtigung der Retention nach dem Kalinin-Miljukov-Verfahren.

Aus einer größeren Zahl von Speicherelementen werden nur die im Modell verwendeten kurz vorgestellt. Zisternen werden als einfache Speichervolumen mit Entnahmeganglinie und vom Überstau abhängigem Überlauf abgebildet. Rigolen und Gründächer transformieren den Zufluss in wasserstandabhängige Versickerung, konstanten Drosselabfluss und Überlauf als Restglied der Bilanz. Das Speichervolumen der Gründächer verdunstet. Die Speicherelemente des Kanalnetzes werden ebenfalls über Volumenbilanzen berücksichtigt.

Schmutzfracht

Die Berechnung der Schmutzfrachten erfolgt nach der Komponentenmethode. Dabei überlagern sich die Teilströme einzelner Schmutzstoffe. Die Teilströme können flächendifferenziert verschiedenen Quellen zugeordnet werden, für die die Zusammensetzung der Schmutzstoffe variiert. Die Konzentration der Regenwasserverunreinigung wird über den Simulationszeitraum als konstant angenommen, für die Trockenwetterbelastung können Ganglinien der Belastung spezifiziert werden.

Schmutzkonzentration und -transport werden als konservativ angenommen, und es wird vollständige Durchmischung mit dem Regenwasser unterstellt, die Prozesse sind direkt an die Abflussprozesse gekoppelt.

4.3. Abbildung des ist-Zustands

4.3.1. Modell-Setup

Klimatische Randbedingungen

Die klimatischen Randbedingungen werden im Modell als Zeitreihen verwaltet. Für den Regen wurde die vorhandene Zeitreihe eingelesen, bei Verdunstung und Temperatur wurden aus den Eingangswerten modellintern Jahres- und Tagesganglinien ermittelt.

Fließgewässer

Um das Modell zu erstellen, wurden zunächst die Fließgewässer und ihre Teileinzugsgebiete angelegt. Entsprechend dem Modellkonzept stellen Fließgewässer Translationselemente dar, die den Input einer Gebietsbilanz vermitteln. Daher werden physische Fließgewässer erst für angeschlossene Oberlieger auch im Modell als Fließgewässer verwaltet und in einem Gebiet als Teil desselben betrachtet. Nach diesem Grundsatz sind nur die Kupfer ab Zusammenfluss mit dem Beltersroter Bach und der Rinnenbach nach Zusammenfluss mit dem Katzen-

bach (s. Abb. A 1, dunkel hervorgehobene Gewässerabschnitte) Fließgewässer. Den Gewässern wurden die Eigenschaften entsprechend Tab. 10 zugeordnet.

Abflussbildung und -konzentration im Flusseinzugsgebiet

Die Teileinzugsgebiete der Zuflüsse und der Gewässerabschnitte bilden die Bilanzgebiete des Flusseinzugsgebietes. Die aus der Verschneidung von Landnutzung, Boden und Teileinzugsgebiet gebildeten Elementarflächen wurden den Gebieten zugeordnet. Die Flächen mit den Landnutzungsarten Acker, Grünland, Wald und Wasser sind als natürlich kategorisiert, Siedlungs- und Industrieflächen als urban, die Abflussbildungsparameter wurden entsprechend den Landnutzungseigenschaften zugewiesen. Für die urbanen Flächen erfolgte eine weitere Unterteilung in befestigte und durchlässige Flächen. Bei den Industrieflächen wurde ein Befestigungsgrad von 85% angenommen, bei Siedlungsflächen von 40%. Die Böden für das gesamte EZG wurden entsprechend den Eigenschaften in Tab. 13 angelegt, werden aber nur für die natürlichen Flächen berücksichtigt. Für das weitere Vorgehen, werden die Oberflächenabflüsse von durchlässigen Flächen (Endabflussbeiwert 0,3) als Straßen interpretiert. Eine schematische Darstellung der Abflussbildung gibt Abb. 13. durchgängige Pfeile verdeutlichen Abflussbildungsprozesse, gestrichelte Pfeile die Abflusskonzentration über verschiedene Speicherkonstanten bzw. die Zeit-Flächen-Funktion.

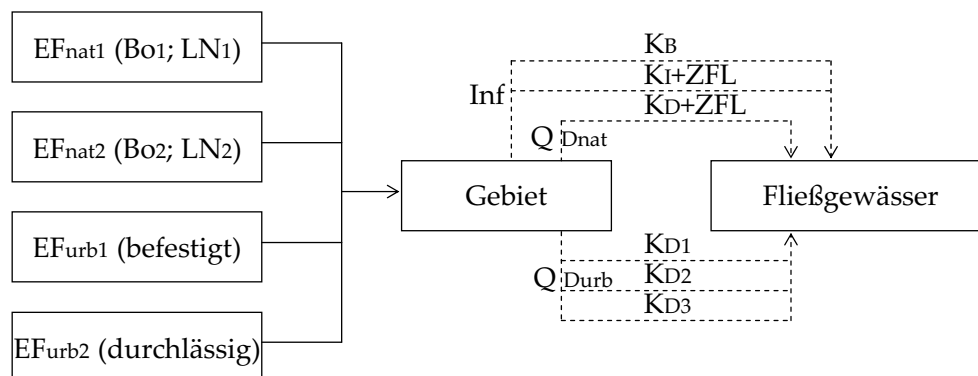


Abb. 13 Schema der Abflussbildung und -konzentration im Flusseinzugsgebiet

Abflussbildung und -konzentration im Einzugsgebiet der Kläranlagen

Für die Teileinzugsgebiete der Kläranlagen dienen Sammelleitungen oder Rückhaltebecken als Bilanzpunkte, sie werden durch Verbindungsleitungen aggregiert. Da sich die Einzugsgebiete der Kläranlagen physisch im Flusseinzugsgebiet befinden, wurden die befestigten Flächen der Gewässerteileinzugsgebiete um die Flächen der korrespondierenden Gebiete der Kläranlage reduziert. Die Entwässerungsgebiete Belzhag, Einweiler, Eschental, Kubach, Mangoldsall, Rechbach, Rüblingen und Ulrichsberg liegen außerhalb des Fluss-EZGs, sie wurden dem Gesamtsystem hinzugefügt, so dass sich die Gebietsgröße von 39,96 km² auf 40,65 km² erhöht.

Für die Gebiete außerhalb des Fluss-EZG wird nur der Abfluss im Kanal wirksam, das Überlaufvolumen wird in den jeweiligen Vorflutern, namentlich Kupfer (unterstrom der EZG-Grenze), Kocher und Sall, zugeschlagen.

An die urbanen Gebiete sind einerseits die befestigten und durchlässigen Flächen und andererseits Trockenwetterelemente angeschlossen (Abb. 14). Sie verwalten über Einwohnergleichwerte, Fremdwasseranfall, nutzungsspezifischen Wasserverbrauch und Ganglinie des Trockenwetteranfalls den Trockenwetterabfluss im Kanalsystem.

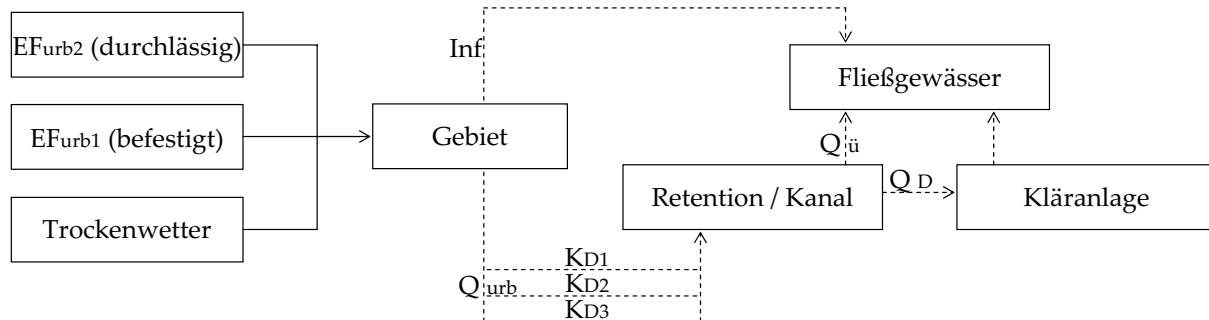


Abb. 14 Schema der Abflussbildung und -konzentration im Einzugsgebiet einer Kläranlage

Abb. 14 zeigt analog zu Abb. 13 die Vorgänge der Abflussbildung und -konzentration. Der Durchfluss in den Retentionselementen wird über die Volumenbilanz überwacht, kommt es zum Überlaufen, wird das Wasser in den nächstgelegenen Vorfluter abgeschlagen.

Zwischen den versiegelten Flächen nach Landnutzung und den an das Kanalnetz angeschlossenen Flächen besteht eine Differenz. Diese geht zum Teil auf nicht angeschlossene Flächen, vor allem Weiler und Einzelgehöfte zurück. Zum Teil fehlen aber auch Angaben zum Kanalnetz, insbesondere für die Ortslagen, die nicht zum Gemeindegebiet gehören, wie Übrigshausen oder den Gewerbepark Hohenlohe. Für diese Flächen wurde nur der Oberflächenabfluss berücksichtigt.

Trockenwetteranfall, Schmutzfracht und Kläranlage

Über die Trockenwetterelemente werden die Parameter der stofflichen Belastung aus der Trinkwassernutzung verwaltet. Die Belastung aus Oberflächenabfluss wird den Oberflächen direkt zugeordnet. Analog zur Landnutzung wird auch für den Trockenwetteranfall in Siedlung- und Industrie/Gewerbe kategorisiert. Die Zuordnung der Konzentrationen erfolgte nach Tab. 14. Für die natürlichen Flächen wie auch für das Fremdwasser wurde keine Verschmutzung angenommen. Diese Vereinfachung spiegelt zwar nicht die realen Verhältnisse wieder, mit den verwendeten Ansätzen kann aber der Stoffhaushaltsdynamik natürlicher Flächen nicht Rechnung getragen werden. Insbesondere die Prozesse von Nährstoffeintrag und -auswaschung auf den Ackerflächen kann zu zeitlich varianten Belastungen aus diesen Quellen führen. Mit dem Modellansatz werden also nicht die realen Verhältnisse der stoffli-

chen Belastung im Vorfluter wiedergegeben, sondern der Anteil der Siedlungsentwässerung an der Schmutzfracht.

Die Funktion der Kläranlagen wird statisch betrachtet. Stoffspezifisch wird ein Anteil der Belastung des zufließenden Wasservolumens zurückgehalten. Für den CSB wurde die Reinigungsleistung mit 95%, bei einer minimalen Ablaufkonzentration von 20mg/l festgelegt, für die anderen Stoffe pauschal mit 90% Reinigungsleistung.

Beispiel der Modellstruktur

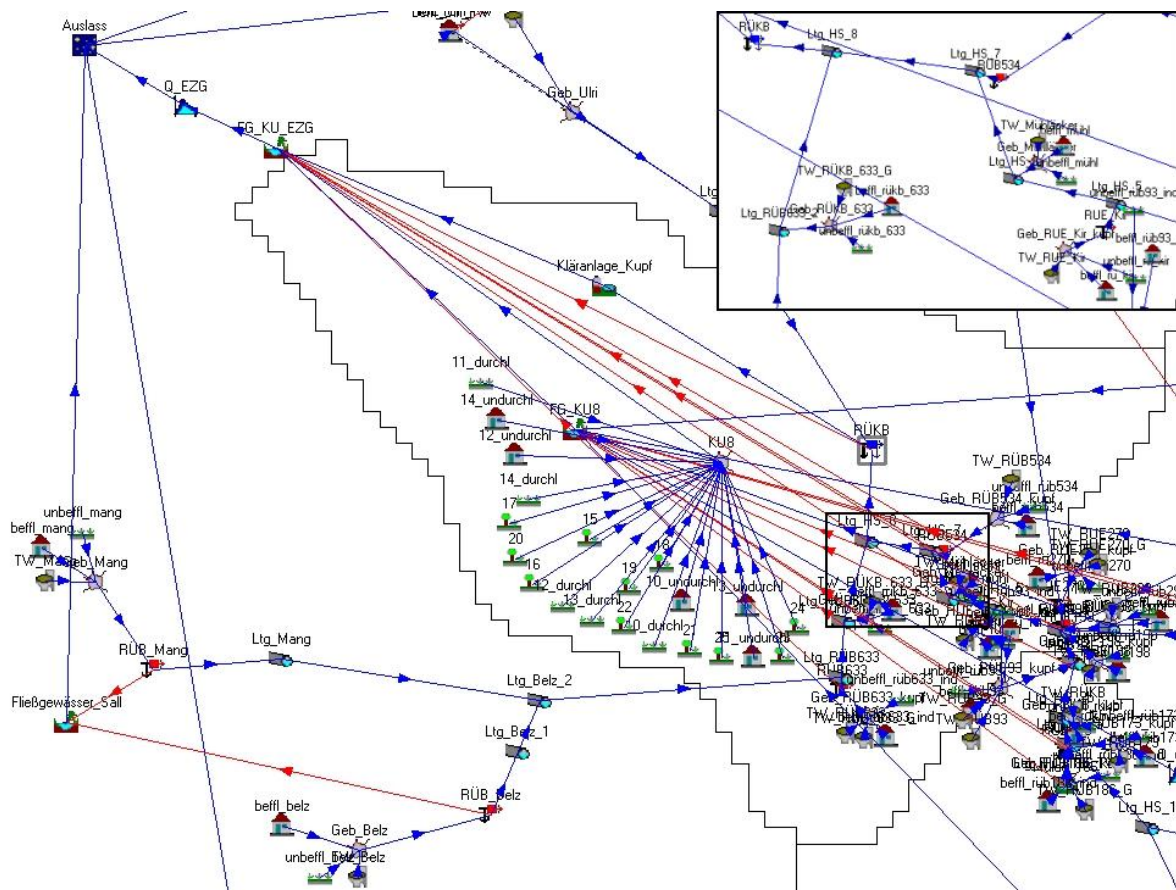


Abb. 15 Detailansicht des Teileinzugsgebietes Kupfer unterhalb Lietenbach (KU8), Umsetzung im Modell

Abb. 15 verdeutlicht exemplarisch die Modellstruktur. Die nach Landnutzung abgegrenzten EF (Elementarflächen) des Flusseinzugsgebietes (schwarzes Polygon) sind über Zahlenattribute strukturiert (z. B. 17, 14_undurchl), ihre Abflusskomponenten laufen über das Gebiet (KU8) zum unterliegenden Gewässer (FG_KU_EZG). Im rechten Teil der Abbildung ist der westliche Teil des Entwässerungssystems der Ortschaft Kupferzell dargestellt. Im schwarzen Rahmen ist eine höhere Auflösung für die Teilgebiete Regenüberlaufbecken 93 (RÜB93), Mühläcker (Geb_Mühläcker) und Kirchhofgärten (Geb_RUE_Kir_kupf) sowie für das Überlaufbecken 534 (RÜB534) dargestellt. Der Regelabfluss, Trockenwetter und Drossel, wird über das Leitungssystem zur Kläranlage transportiert, der Überlauf der Retentionselemente fließt in den unterliegenden Vorfluter (FG_KU_EZG). Die Gebiete Belzhag (Geb_Belz) und

Mangoldsall (Geb_Mang) liegen außerhalb des Flusseinzugsgebietes, auch diese Gebiete entwässern in Regenüberlaufbecken (RÜB_Belz, RÜB_Mang). Der Regelabfluss fließt in das Leitungssystem und der Kläranlage zu, während der Überlauf in den Vorfluter, hier die Sall (Fließgewässer_Sall), fließt.

4.3.2. Kalibrierung

Grundprinzip der Kalibrierung ist die univariante Anpassung von Parametern zur Optimierung einer Zielfunktion. Im Fall dieser Arbeit wurden nur Prozessparameter zur Kalibrierung berücksichtigt und die Gebietsparameter der Eingangsdaten als korrekt angenommen.

Zunächst war vorgesehen die Ganglinien des Pegels Forchtenberg über ein Flow-Routing nach Kalinin-Miljukov-Verfahren auf das betrachtete Einzugsgebiet zu übertragen, allerdings bestanden auf Grund der fehlenden Geodaten unterstrom des betrachteten Gebietes und fehlender Angaben zur Fließzeit der Welle zu viele Freiheitsgrade um eine eindeutige und belastbare Parametrisierung zu erhalten. Zusätzlich wurde bei Analyse der Pegeldaten der Jahre 1994 bis 2006 festgestellt, dass keines der 15 größten Hochwasserereignisse in den Monaten Juni bis Oktober stattfand. Dieser Umstand legt unter Berücksichtigung der Geologie im Gebiet die Vermutung nahe, dass die Abflüsse durch den Karst beeinflusst werden. Da auf dieser Basis eine Übertragung oder Regionalisierung der Abflussganglinie sehr unsicher ist, wurden die für Baden-Württemberg flächendeckend vorhandenen regionalisierten Spitzendurchflüsse und der mittlere Durchfluss [LfUBW, 2004] für drei Beobachtungspunkte an der Kupfer als Zielgrößen der Kalibrierung verwendet.

Es wurde nur das Flusseinzugsgebiet kalibriert, da die Modelle der Kläranlagengebiete als vollständige Modelle zur Verfügung gestellt wurden und Daten zur Kalibrierung fehlten. Hierzu wurde ein Modell verwendet, in dem die Siedlungsflächen der Klärwerk-Einzugsgebiete durch Erweiterung der Landnutzungsarten Siedlung und Industrie im Flusseinzugsgebiet ersetzt wurden. Dieses Vorgehen ist auch dadurch gerechtfertigt, dass im Regionalisierungsmodell der Abflusswerte [LfUBW, 2004] ebenfalls nur die Landnutzung, ohne anthropogene Entwässerungs- oder Retentionsbauwerke berücksichtigt wird.

Die Kalibrierung erfolgte vergleichend mit Langzeitsimulationen der 30-jährigen Regenreihe und den DVWK-Regen (DVWK, 1984) verschiedener Jährlichkeiten. Auf Basis der Auswertung der Isochronen (Abb. A 2) wurde der einstündige DVWK-Regen als maßgeblich identifiziert.

Als Kalibrierungsparameter wurden die Einzellinearspeicherkonstanten des Oberflächenabflusses, des hypodermischen Makroporenflusses und des Interflows sowie die Infiltrationsrate und die hydraulische Leitfähigkeit der Böden verwendet. Die Werte wurden flächen-

spezifisch, zonal oder global variiert (Abb. 16). Die Abbildung zeigt die globale (links) und zonale (Mitte) Variation der Speicherkonstante des Oberflächenabflusses und die flächenspezifische (rechts) Variation der Infiltrationsrate, wobei jeweils die Kalibrierungsparameter von Flächen gleicher Farbe um den gleichen absoluten oder relativen Wert geändert wurden.

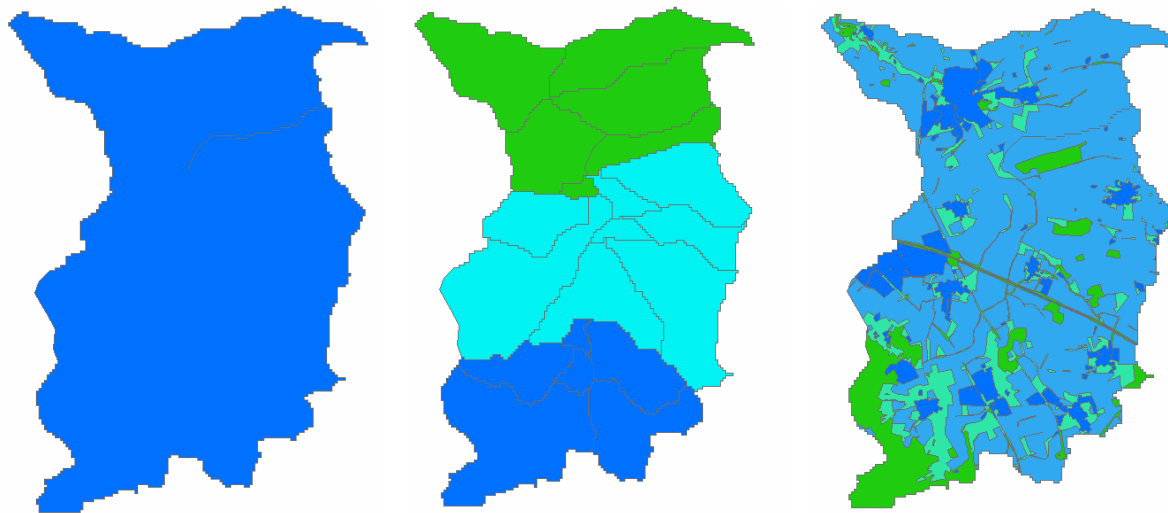


Abb. 16 globale (links), zonale (Mitte) und flächenspezifische (rechts) Variation der Kalibrierungsparameter

Ein zu Anfang durchgeführter Grobtest zur Sensitivität der Parameter zeigte, dass Anfangs- und Dauerverluste der nicht-natürlichen Flächen, Interzeption, Oberflächenrauigkeit (über die externe Zeit-Flächen-Funktion) und Gerinnerauigkeit nur einen geringen Einfluss auf die Zielgrößen hatten. Diese Parameter wurden, um den Kalibrierungsaufwand vertretbar zu halten, nicht weiter betrachtet. Grundsatz der Anpassung war, dass die Parameter im Rahmen physikalisch plausibler Bereiche variiert wurden. Tab. A 3 im Anhang zeigt die Reichweiten der Plausibilität und der Kalibrierung sowie den Endwert der Kalibrierung.

Tab. 16 regionalisierte Spitzendurchflüsse des reduzierten Einzugsgebiets

	MQ	MHQ	HQ ₂	HQ ₅	HQ ₁₀	HQ ₂₀	HQ ₅₀	HQ ₁₀₀
Q(EZG) [m ³ /s]	0.509	15.98	15.03	20.94	24.81	28.53	33.37	37.04
Q(uhRi) [m ³ /s]	0.273	10.74	9.83	14.23	17.24	20.19	24.13	27.18
Q(ohRi) [m ³ /s]	0.337	9.23	8.42	12.25	14.87	17.45	20.89	23.56

Um die Hochwasserdynamik des gesamten Gebietes zu berücksichtigen, wurde die Auswertung der Durchflüsse für drei Pegel (Tab. 16) vorgenommen. Dafür wurden oberhalb und unterhalb des Rinnenbaches und am Auslass des Einzugsgebietes Beobachtungspunkte gesetzt. Beim DVWK-Regen wurden Ganglinien ausgeschrieben und nach dem maximalen Durchfluss ausgewertet. Für die 30-jährigen Ganglinien wird automatisch eine Statistik der Ablaufereignisse angelegt und die Jährlichkeiten nach einer Plotting-Formel berechnet.

Als Zielfunktion wurde die Minimierung der mittleren relativen Abweichung (F. 2) für die zwei bis fünfzigjährigen Spitzendurchflüsse und den Durchfluss bei Mittelwasser gewählt.

$$mr\Delta Q = \frac{1}{i} \sum_i \sqrt{\frac{1}{j} \left(\frac{Q_{stat(i,j)} - Q_{M(i,j)}}{Q_{stat(i,j)}} \right)^2}$$

F. 2 mittlere relative Abweichung

mit $mr\Delta Q$ mittlere relative Abweichung des Durchfluss
 i Laufvariable der Beobachtungspunkte
 j Laufvariable der Jährlichkeiten
 Q_{stat} Durchfluss nach Pegelstatistik
 Q_M Durchfluss nach Modellrechnung

Die Zielfunktion beschreibt den Unterschied zwischen statistischem und modelliertem Abfluss relativ zum statistischen Abfluss. Sie erlaubt den Vergleich von Ereignissen unterschiedlicher Amplituden, da die Abweichung normiert über den statistischen Sollwert betrachtet wird. Durch die Mittelung über die Beobachtungspunkte und Jährlichkeiten ist es möglich das Systemverhalten integral mit einem Parameter zu beschreiben.

Bei der Kalibrierung zeigte sich, dass für die gewählten Kalibrierungsparameter die Ereignisse mittlerer Jährlichkeit (HQ₂₀, HQ₅₀) im Gegensatz zu Ereignissen geringerer Jährlichkeit mit einer deutlich anderen Parameterkonfiguration die beste Anpassung zeigen. Die intensiveren Ereignisse werden durch schnellere Speicherkonstanten und einen geringeren Anteil unterirdischer Abflüsse besser repräsentiert. Abb. 17 verdeutlicht diesen Umstand exemplarisch für zwei Kalibrierungen am Beobachtungspunkt oberhalb des Zuflusses Rinnenbach. Die hellblauen Linien beschreiben das 50-jährige Hochwasser, die dunkelblauen das zwei-jährige Hochwasser jeweils für den korrespondierenden DVWK-Regen. Die kreuzpunkttierten Linien (Kalibrierungskonfiguration 7) bilden das 50-jährige Ereignis gut, mit 10% relativer Abweichung ab, dagegen liegt die Abweichung für das zweijährige bei 38%. Für die kreispunktigten Linien (Kalibrierungskonfiguration 14) ist die Ausrichtung der relativen Abweichungen umgekehrt. Für das 50-jährige Ereignis liegen sie bei 31%, beim zweijährigen bei 11%. Da für die Bemessung von Entwässerungssystemen die Ereignisse von geringer Wiederkehrdauer eine größere Bedeutung haben, wurde unter Berücksichtigung der Zielfunktion der Schwerpunkt der Anpassung auf diese Ereignisse gelegt. Bei gleicher $mr\Delta Q$ der Scheiteldurchflüsse wurde also die Variante gewählt, die die Hochwasserdurchflüsse mit kleinerem Wiederkehrintervall besser abbildet.

Im Laufe von 22 Kalibrierungsläufen wurde die mittlere relative Abweichung für MQ, HQ₂, HQ₅, HQ₁₀, HQ₂₀ und HQ₅₀ auf Basis des DVWK-Regens bis 21,2% minimiert, die Modeller-

gebnisse weichen also im Mittel um diesen Wert von den statistischen Vorgaben ab. Ohne Berücksichtigung des HQ_{50} verbessert sich die Anpassungsgüte auf 16,6%.

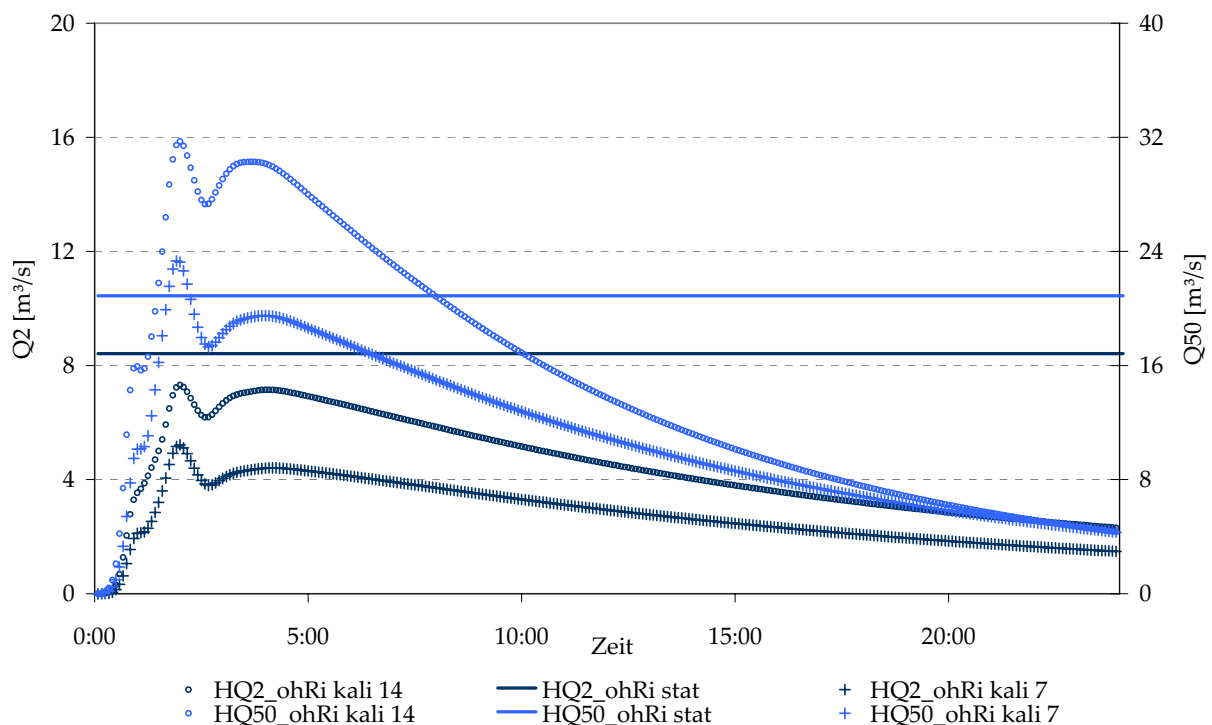


Abb. 17 Ganglinien des zweijährigen und fünfzigjährigen Hochwassers für zwei verschiedene Kalibrierungen.

Die Auswertung der Anpassung für die Abflüsse an die 30-jährige Regenreihe wurde auf Basis der Statistik der Spitzendurchflüsse durchgeführt. Die Kalibrierungskonfigurationen waren die gleichen wie für den DVWK-Regen, allerdings wurden um die Rechenzeit zu begrenzen nur die 7 besten Varianten getestet. Für die Anpassung an die Langzeitreihe ergaben sich leicht abweichende $mr\Delta Q$ für die Szenarien, im Wesentlichen werden aber die Tendenzen aus der Anpassung an den DVWK-Regen wiedergegeben. Die beste Anpassung lag bei 17,8% $mr\Delta Q$, ohne Berücksichtigung des HQ_{50} bei 13,9%.

Die Absolutwerte der Durchflüsse der Jährlichkeiten variieren bei gleicher Kalibrierungskonfiguration für unterschiedliche Bemessungsregen beträchtlich. Während die hohen Jährlichkeiten durch den DVWK-Regen tendenziell überschätzt werden, kommt es für die Langzeitreihe eher zu einer Unterschätzung (Abb. 18). Dass die statistischen Vorgaben der Jährlichkeiten zumeist zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Bemessungsregen liegen, kann als ein Indiz für die gute Anpassung der Kalibrierung interpretiert werden. Im Anhang Abb. A 6 ist ein Punktplot-Diagramm dargestellt, dass diesen Zusammenhang für die Bandbreite der sieben besten Kalibrierungskonfigurationen verdeutlicht.

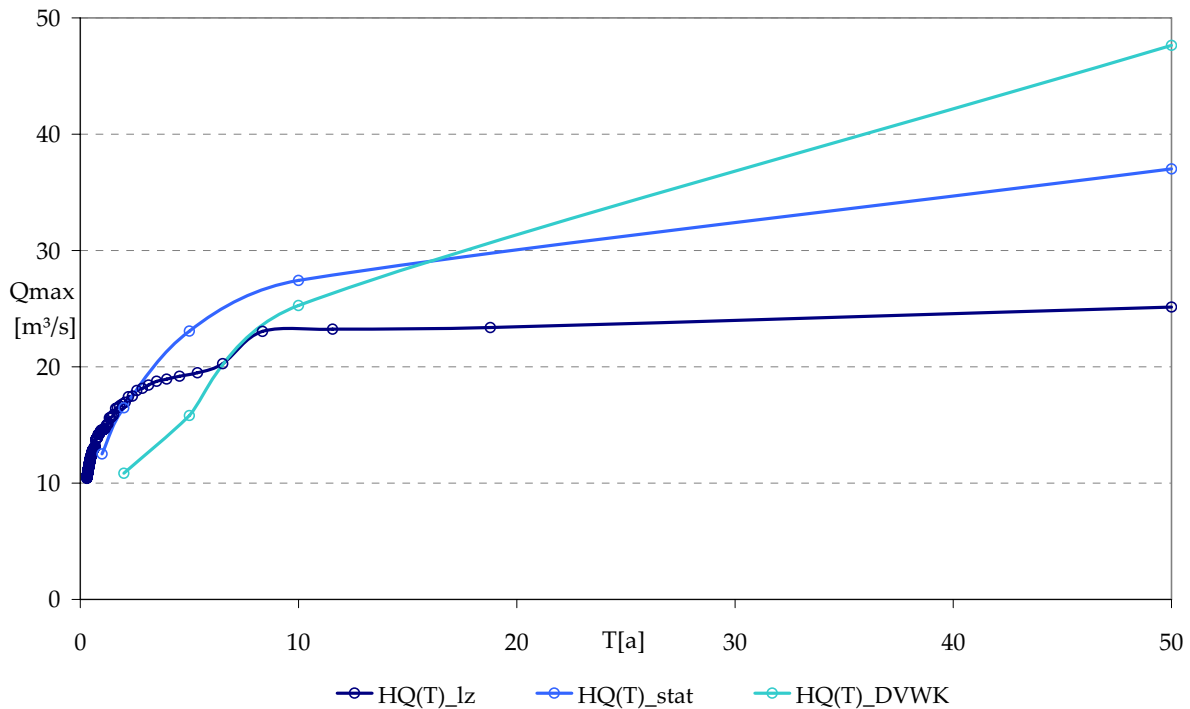


Abb. 18 Spitzendurchflüsse für verschiedene Jährlichkeiten der gleichen Kalibrierungskonfiguration mit unterschiedlichen Bemessungsregen und statistische Jährlichkeiten

4.4. Analysen für den Ist-Zustand

Auf Basis der Kalibrierung wurden Betrachtungen zum Ist-Zustand des Systems durchgeführt. Der Schwerpunkt wurde darauf gelegt:

das **Systemverhalten** besser zu verstehen

die **Beeinflussbarkeit des Systems** zu testen um die Ausrichtung bei der Szenarienentwicklung zu verbessern

Defizite zu ermitteln um bei der Bewertung von Szenarien **relevante Zielgrößen** zu betrachten

Die vorgenommenen Analysen haben exemplarischen Charakter und könnten für ein besseres Systemverständnis noch deutlich ausgeweitet werden.

4.4.1. Sensitivitätsanalyse

Sensitivitätsanalysen bieten eine Möglichkeit den Zusammenhang zwischen Modelleingangsgrößen und Modellergebnissen zu quantifizieren [Liedl, 2006]. Die Eingangsgrößen werden innerhalb sinnvoller Bandbreiten monovariant verändert und in Relation zur Veränderung einer Zielgröße gesetzt.

Zielparameter und Vorgehen

Die Sensitivitätsanalyse wurde auf Basis des im ist-Zustand kalibrierten Modells durchgeführt. Um den Aufwand angemessen zu halten, wurden Eingangsgrößen als Parameter ausgewählt, die global das heißt ohne Rücksicht auf die Systemkonfiguration geändert werden konnten. In Betracht gezogen wurden Niederschlag, Temperatur, Versiegelungsgrad und Infiltration auf natürlichen Flächen. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden die Parameter im selben Spektrum, um -20 bis +30% variiert, als Zielgröße dient jeweils der Spitzenabfluss. Die Beobachtungsreferenz bilden drei Gewässerabschnitte: oberhalb und unterhalb des Zuflusses Rinnenbach und am Auslass des betrachteten Einzugsgebietes. Der einstündige Niederschlag mit fünfjährigem Wiederkehrintervall nach DVWK [DVWK, 1984] wurde beispielhaft für die Untersuchung ausgewählt.

Tab. 17 Übersicht über die ausgewerteten Eingangsparameter und die Bandbreite ihrer Werte

Parameter	Veränderung der Eingangsparameter [%]					
	-20	-10	0	10	20	30
Niederschlag [mm]	21.6	24.3	27	29.7	32.4	35.1
Versiegelung [km ²]	3.11	3.50	3.89	4.28	4.67	5.05
mittlere Infiltration [mm/h]	11.6	13.1	14.5	16.0	17.4	18.9
Jahresmittel Temperatur [°C]	7.3	8.2	9.1	10.0	10.9	11.8
Jahressumme Verdunstung [mm/a]	421	467	514	561	610	659
Bevölkerung [EGW]	6870	7729	8588	9447	10306	11164
Retentionsvolumen [m ³]	3967	4463	4959	5455	5950	6447

Die Variation des Niederschlages erfolgte über eine lineare Skalierung der Ganglinie. Die Veränderung des Versiegelungsgrades erfolgte flächenreferenziert, so dass die Verteilungskonfiguration im Gebiet erhalten blieb. Die anderen Landnutzungsarten wurden, entsprechend ihrem Ausgangsanteil angepasst, um die Größe des EZG konstant zu halten. Die Variation des Infiltrationsgrades erfolgte für alle natürlichen Flächen, obwohl dies, in Abhängigkeit von der Bewirtschaftungsform, nur für die Ackerflächen im angegebenen Spektrum sinnvoll ist. Da im Modell aber die Bodenarten nicht landnutzungsdifferenziert verwaltet werden, wäre ein anderes Vorgehen sehr aufwendig gewesen. In Anbetracht eines Anteils von über 70% (s. Abb. A 5) der Äcker an den natürlichen Flächen, erscheint diese Vereinfachung dennoch vertretbar. Die Temperatur wurde gekoppelt mit der Verdunstung betrachtet, dafür wurde die Verdunstung nach der Hargreaves Gleichung (F. 1) berechnet. Wobei nur die Temperatur skaliert wurde und die extraterrestrische Strahlung als unveränderlich zwischen den Varianten galt. Jahresmittel der Temperatur und Jahressumme der Verdunstung waren Eingangsgrößen für die Modellierung. Da die Temperatur für den DVWK-Regen

keine Sensitivität zeigte, wurde vergleichend für diesen Parameter mit einem fünfjährigen Abschnitt der synthetischen Regenreihe simuliert und der statistisch fünfjährige Regen ausgewertet. Für die Veränderung der Bevölkerungszahlen wurden die Einwohnergleichwerte des Trockenwetterabflusses angepasst. Beim Retentionsvolumen wurden die Volumina von Rückhalte- und Überlaufbecken skaliert, der Retentionsraum des Kanalnetzes wurde nicht berücksichtigt.

Beispiel Niederschlag

Das Vorgehen soll im Folgenden exemplarisch für die Variation der Niederschlagshöhe gezeigt werden.

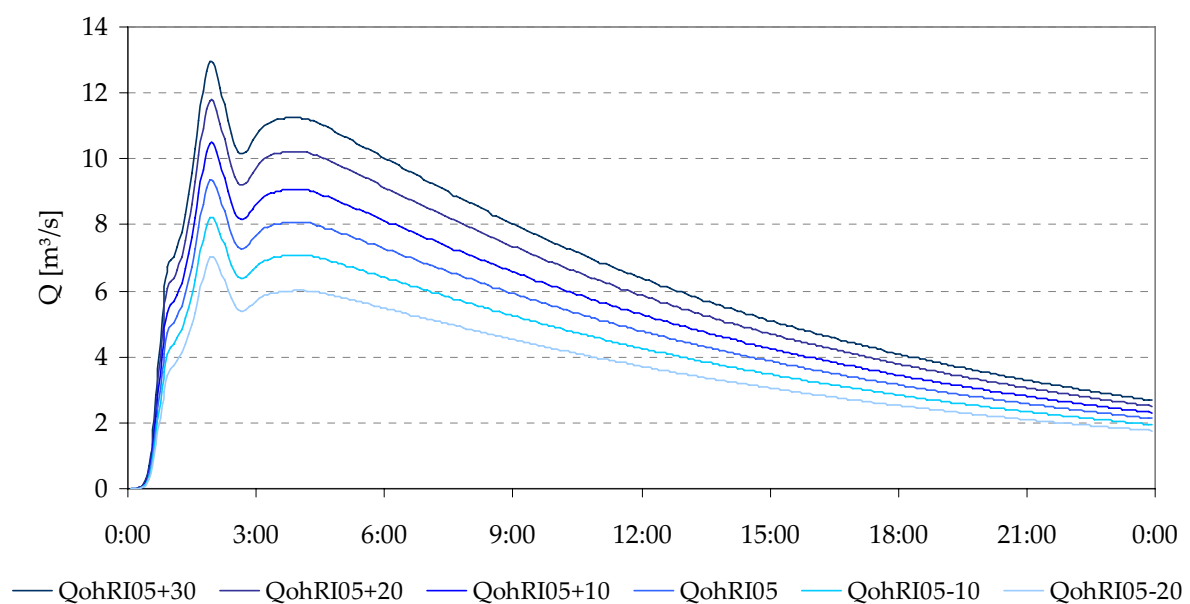


Abb. 19 Abflussganglinien für verschiedene Niederschlagshöhen des fünfjährigen Regens am Gewässerabschnitt oberhalb Zufluss Rinnenbach

Abb. 19 zeigt die Ganglinien an der Kupfer, oberhalb des Zuflusses Rinnenbach. Bei zunehmendem Niederschlag erhöht sich der Spitzendurchfluss, die Ganglinien weisen einen weitgehend proportionalen Verlauf auf. Trägt man die Spitzenabflüsse der Ganglinien gegen die relative Änderung (F. 3) der Niederschlagshöhe auf, erhält man wie in Abb. 20 normierte Verläufe des Spitzenabflusses.

$$\Delta HP = \left(\frac{HP_{\text{sens}}}{HP_{\text{ist}}} - HP_{\text{ist}} \right) * 100\% \quad \text{F. 3 relative Änderung}$$

Abgebildet sind die normierten Verläufe für die drei betrachteten Gewässerabschnitte. Das Beispiel zeigt einen weitgehend linearen Verlauf.

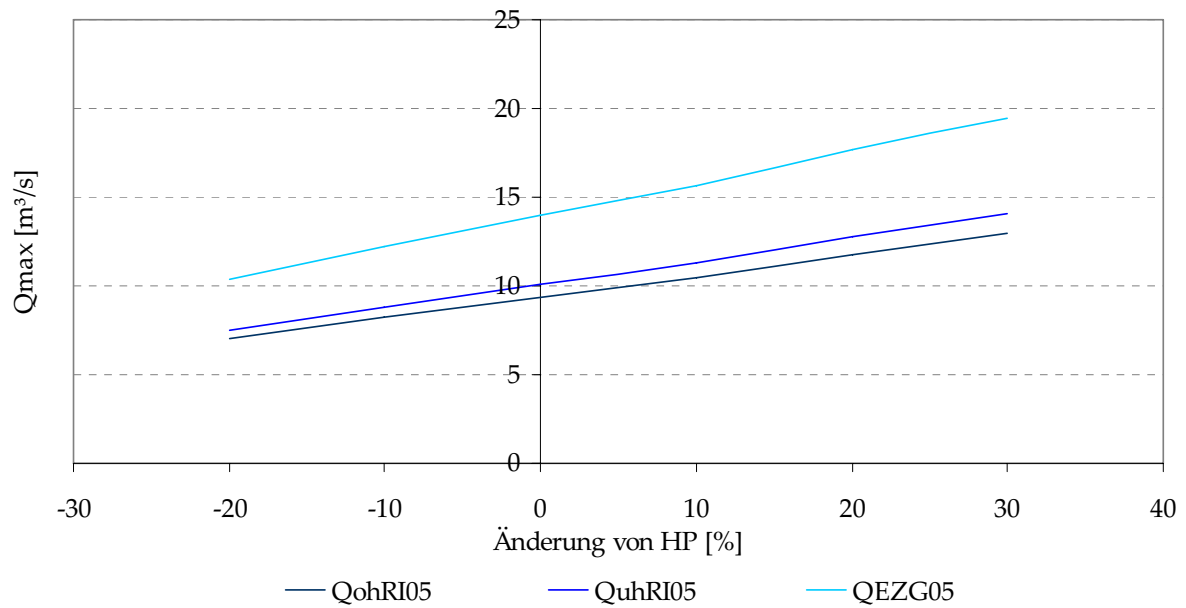


Abb. 20 normierte Verläufe des Spitzendurchflusses an den drei betrachteten Gewässerabschnitten

Bei Normierung der Spitzendurchflüsse gegen den Spitzendurchfluss im ist-Zustand erhält man dessen relative normierte Verläufe an den drei Gewässerabschnitten (Abb. 21).

$$\Delta Q = \left(\frac{Q_{\text{sens}}}{Q_{\text{ist}}} - Q_{\text{ist}} \right) * 100\%$$

F. 4 relative Änderung

Der Verlauf ist für die Abschnitte stark kongruent. Es zeigt sich, dass der Spitzendurchfluss stärker als direkt proportional vom Niederschlag abhängt.

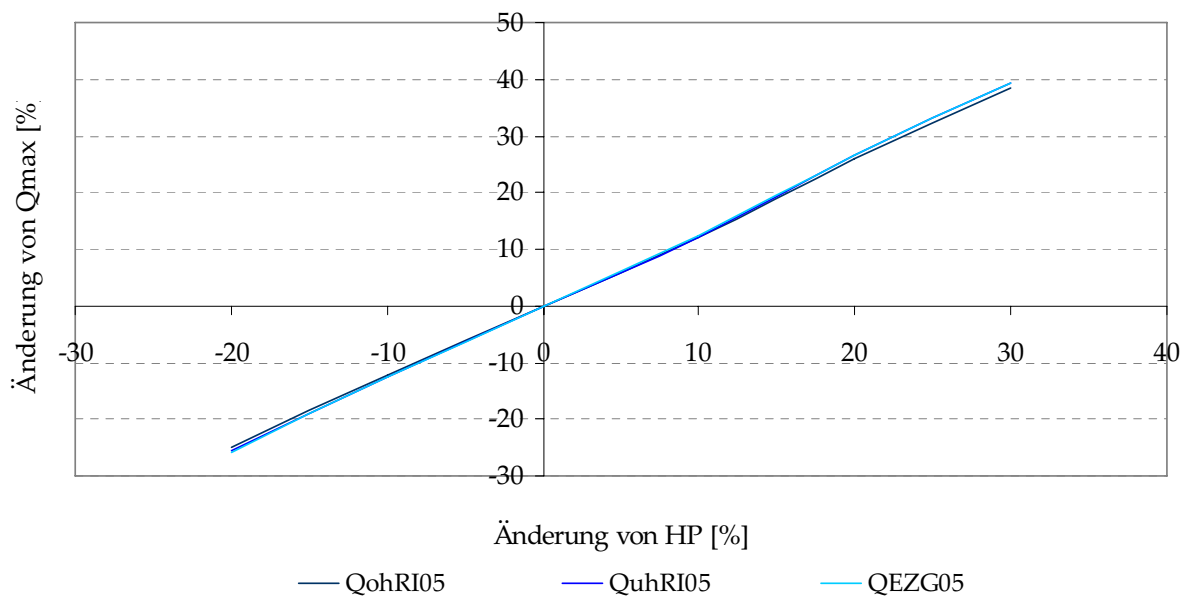


Abb. 21 relative normierte Verläufe des Spitzendurchflusses an den drei betrachteten Gewässerabschnitten

Durch Mittelung über die Gewässerabschnitte erhält man den mittleren relativen normierten Verlauf, dieser kann als Maß für die Sensitivität des Spitzendurchfluss im Gesamtsystem gesehen werden. In Abb. 22 sind die Sensitivitäten für die untersuchten Größen dargestellt. Die Abhängigkeit zeigt sich für alle Parameter als weitgehend linear.

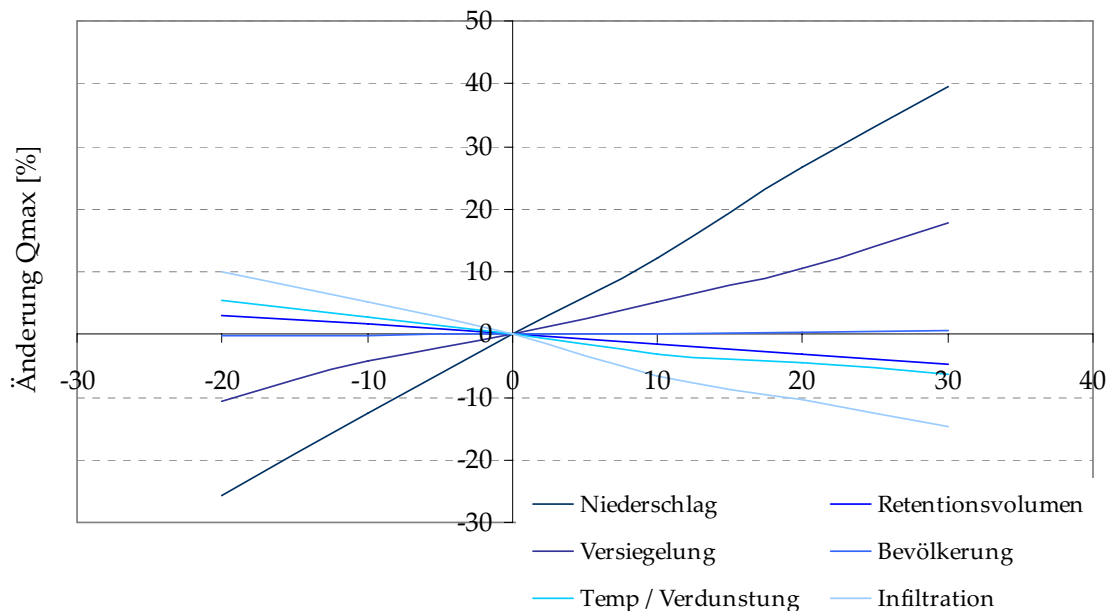


Abb. 22 Sensitivitäten als mittlere relative normierte Verläufe des Spitzendurchflusses.

Für Niederschlag, Versiegelung und Bevölkerungswachstum bestehen positiv korrelierte Abhängigkeiten zwischen Parameter und Spitzendurchfluss; für Temperatur, Retentionsvolumen und Infiltration sind sie negativ. Bei einer Erhöhung z. B. des Niederschlages kommt es also zu erhöhtem Spitzendurchfluss, während dieser bei gesteigerter Infiltration abnimmt. Sensitivitätskoeffizienten bilden ein quantitatives Maß für die Sensitivität. Mathematisch beschreiben sie die partielle Ableitung der Zielgröße nach dem Eingangsparameter. Für den linearen Verlauf kann vereinfachend das Differential der Größen angenommen werden (F. 5).

$$k_{\text{sens}} = \frac{\partial Q}{\partial P_a} \cong \frac{\Delta Q}{\Delta P_a} \quad \text{F. 5 differentieller Sensitivitätskoeffizient}$$

mit k_{Sens} Sensitivitätskoeffizient
 Q Spitzenabfluss (Zielgröße)
 P_a Parameter (Eingangsgröße, z. B. Niederschlag)

Tab. 18 Werte der Sensitivitätskoeffizienten zwischen Spitzendurchfluss und den Untersuchten Parametern

Parameter	P	Vers.	Bev.	V_{Ret}	T / ETR	Inf.
k_{Sens}	1.305	0.570	0.016	-0.157	-0.233	-0.493

Der Spitzendurchfluss weist die stärkste Sensitivität gegenüber dem Niederschlag auf, betragsmäßig gefolgt von Versiegelung, Infiltration, Temperatur / Verdunstung, Retentionsvolumen und Bevölkerungsänderung.

Auswertung

Die Analyse zeigt die starke Abhängigkeit vom Niederschlag. Auf Grund des hohen Anteils landwirtschaftlicher Flächen kann die Wirkung der Infiltration als Potential gedeutet werden um Veränderungen in der Abflussdynamik auszugleichen oder zu verstärken. Durch verschiedene Methoden der Bodenbearbeitung ist ein deutlicher Einfluss auf die Infiltrationsleistung möglich. Die Wirkung der Verdunstung ist, im Rahmen der vom Modell abgedeckten Prozesse, vor allem auf den veränderten Speicherfüllungsgrad des Bodens zu Ereignisbeginn zurückzuführen. Da die Anfangsfüllung des Bodenspeichers konstant war, zeigte sich bei Verwendung des DVWK-Regens keine Sensitivität. Versiegelungsgrad und Retentionsvolumen sind Einflüsse der Siedlungsstrukturen, bei gleichen Vorzeichen ihrer Veränderung wirken ihre Effekte gegenläufig; erhöhter Versiegelungsgrad erhöht den Spitzenabfluss, vergrößertes Retentionsvolumen verringert ihn. Allerdings kann das Retentionsvolumen, wie die geringere Sensitivität zeigt, den Effekt der Versiegelung bei weitem nicht kompensieren. Das Potential des Retentionsvolumens liegt vor allem in der Abdämpfung der vorausseilenden ersten Abflussspitze, da das vorhandene Speichervolumen nur einen Bruchteil des Hochwasservolumens ausmacht. Für den ist-Zustand stehen 732 966 m³ Hochwasserabfluss einem Speichervolumen von 4 595 m³ gegenüber. Den geringsten Einfluss weist die Bevölkerungszahl auf, der Anteil des Trockenwetterabflusses an der Hochwasserwelle ist also gering, die Bevölkerungszahl beeinflusst über das Trockenwetterabflussvolumen vor allem die in das Gewässer geleiteten Stofffrachten bei Überlastung der hydraulischen Anlagen.

4.4.2. Analysen nach BWK-M3

Der Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) hat 2001 das Merkblatt Nr.3 „Ableitung von Anforderungen an Niederschlagswassereinleitungen unter Berücksichtigung örtlicher Verhältnisse“ herausgegeben. Das Merkblatt 3 beschreibt ein Verfahren, mit dem auf relativ einfache Weise eine immissionsorientierte Bewertung von Niederschlagswassereinleitungen vorgenommen werden kann. Das Verfahren beinhaltet Bewertungsmethoden zu Anforderungen an den hydraulischen und stofflichen Zustand des Gewässers, mit der Zielsetzung die Emissionen aus Niederschlagswassereinleitungen so zu begrenzen, dass ein guter ökologischer und chemischer Zustand des Gewässers nicht beeinträchtigt wird [BWK, 2001].

Für kleine Flüsse im Mittelgebirgsraum gibt das Merkblatt eine pauschale Einschätzung des Gefährdungspotenzials durch verschiedene Einflüsse. Das Potenzial der akuten Wirkung von hydraulischem Stress und Geschiebeumlagerung wird als situationsabhängig relevant bis sehr relevant eingestuft, für Sauerstoffdefizit und Ammoniaktoxizität als situationsabhängig relevant. Das Potenzial für morphologische Schädigung, Eutrophierung und Akkumulation von Schwermetallen in Folge langfristiger Regenwassereinleitung gilt als situationsabhängig relevant.

hydraulische Belastung

Als hydraulischer Zielparameter wird nach BWK-M3 der einjährige Hochwasserscheitel gewählt, da dieser die natürliche Eigendynamik des Gewässers gut charakterisiert. Der Einfluss von Regenwasserentlastung trägt unter Umständen zur Erhöhung der Abflussspitzen bei, mit der Folge, dass morphologische Veränderungen durch Erosion und ökologische Veränderungen durch Abdrift von Arten und beeinflusste Lebensräume entstehen können. Daher definiert das Merkblatt die Anforderung, dass die Abflussspitze des einjährigen Hochwassers im ist-Zustand nicht höher sein sollte als die Abflussspitze des zweijährigen Hochwassers im potentiellen natürlichen Zustand (pnZ).

$$HQ_{1, \text{ist}} \leq HQ_{2, \text{pot. nat.}}$$

F. 6 hydraulisches Kriterium nach BWK-M3

Für den ist-Zustand wurde das kalibrierte Modell verwendet. Der pnZ ist dadurch charakterisiert, dass alle Siedlungsflächen proportional in Flächen mit natürlicher Landnutzung umgewidmet werden. Dafür wurde ein Storm-Modell erstellt in dem die Landnutzung der Siedlungsflächen nach den Flächenanteilen in den Teileinzugsgebieten in Acker, Grünland und Wald umgewandelt wurde, der Anteil der Wasserflächen wurde konstant gehalten. Ein Diagramm der geänderten Flächenanteile zeigt Abb. 23.

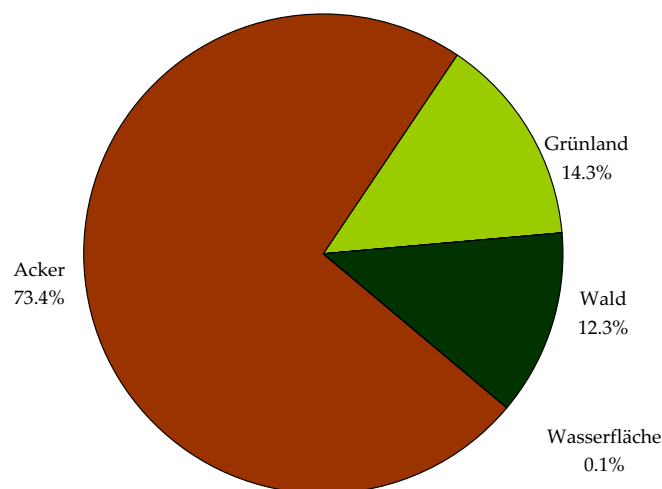


Abb. 23 Flächenanteile der Landnutzung im Einzugsgebiet für den potentiellen natürlichen Zustand

Die Auswertung erfolgte für alle im Modell spezifizierten Fließgewässer. Für beide Zustände wurden Langzeitsimulationen durchgeführt und die Ablaufereignisse automatisiert statistisch nach der Plotting-Formel ausgewertet. Nach dem Prinzip eines Zielerreichungsgrades, wurde die relative Abweichung der Hochwasserscheitels (F. 7) definiert.

$$r\Delta HQ = \frac{HQ_{1,ist} - HQ_{2,potnat}}{HQ_{2,potnat}} * 100\%$$

F. 7 relative Abweichung

Abb. 24 zeigt den Einfluss der Siedlungsflächen auf den Flussabschnitt KU7, im Bereich zwischen Einmündung des Rinnenbachs und der Ortslage von Kupferzell. Die Ganglinien wurden mit dem einjährigen und zweijährigen DVWK-Regen berechnet. Im Vergleich von einjährigem Hochwasser im ist-Zustand (HQ1_KU7_ist) und zweijährigem Hochwasser im potentiell natürlichen Zustand (HQ2_KU7_pot nat) ist zu sehen, dass durch die Siedlungsflächen die Konzentrationszeit um knapp zwei Stunden oder 46% beschleunigt wird und sich die Abflussspitze um 0,8 m³/s oder 8% erhöht.

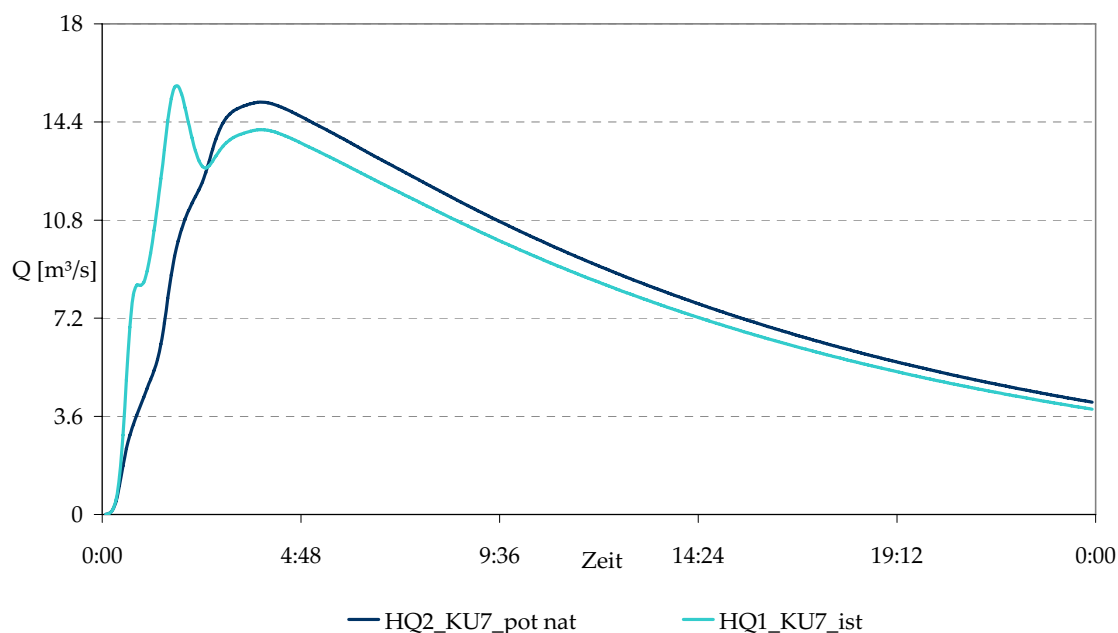


Abb. 24 Vergleich der Hochwasserwellen des einjährigen Ereignis im ist-Zustand und des zweijährigen Ereignis im potentiellen natürlichen Zustand für den Gewässerabschnitt KU7

Für Werte kleiner gleich null der relativen Abweichung gilt die Anforderung des hydraulischen BWK-M3 Kriteriums als erfüllt. Abb. 25 gibt eine Übersicht über die $r\Delta HQ$ Werte für die betrachteten Gewässerabschnitte.

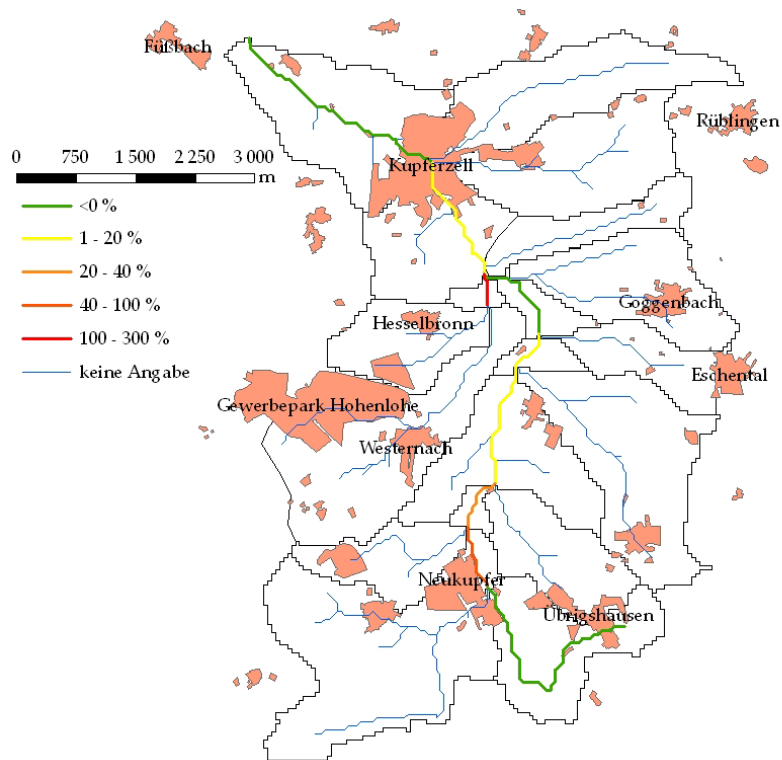


Abb. 25 relative Abweichung der Gewässerabschnitte vom hydraulischen Kriterium nach BWK-M3

Auffällig sind die starken Belastungen des Rinnenbachs und der Kupfer unterhalb der Ortslage Neu-Kupfer. Hier interagieren die Auswirkungen relativ großer Siedlungsflächen (im Fall des Rinnenbachs der Gewerbepark Hohenlohe) mit kleinen Fließgewässern kurzer Konzentrationszeit. Dadurch überlagern sich die Wellen von natürlichem Abfluss und Siedlungsabfluss und es kommt zu einer Erhöhung des maximalen Durchflusses (Abb. 24 oben).

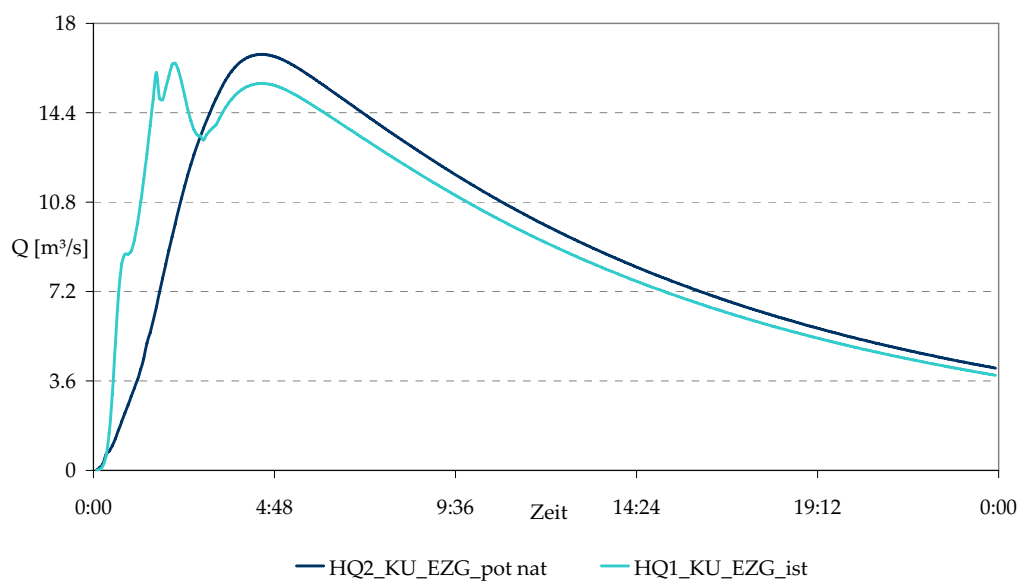


Abb. 26 Vergleich der Hochwasserwellen des einjährigen Ereignis im ist-Zustand und des zweijährigen Ereignis im potentiellen natürlichen Zustand für den Gewässerabschnitt KU_EZG

Weiter im Unterlauf eilt die Welle des Abflusses von Siedlungsflächen der natürlichen Welle stärker voraus. Dadurch kommt die Überlagerung der Wellen weniger stark zum Tragen (Abb. 26). Die Konzentrationszeit ist allerdings in noch stärkerem Maß beschleunigt. In der Abbildung sind die Ganglinien am angenommenen Auslass des Gebiets dargestellt.

chemisch-physikalische Belastung

Die Nachweisführung für die stoffliche Belastung nach dem Merkblatt 3 ist auf die immisionsbezogene Betrachtung kleiner Fließgewässer ausgerichtet. In der angewendeten vereinfachten Nachweisführung werden Sauerstoffkonzentration, Ammoniakbelastung und Eintrag abfiltrierbarer Stoffe als Zielparameter untersucht. Für akute Sauerstoffkonzentrationen geringer als 5 mg/l ist die Schädigung sauerstoffempfindlicher Arten und Entwicklungsstadien von Arten induziert; Ammoniakstickstoffkonzentrationen größer als 0,1 mg/l können beispielsweise akut fischtoxisch wirken. Um die Auswirkungen von Partikeleintrag, wie Kolmation der Gewässersohle, Abrasion bzw. Überlagerung von benthischen Individuen oder Akkumulation sorbierter Substanzen zu begrenzen, wird der Grenzwert für Partikeleintrag bei 150 mg/l definiert. Als Belastungssituation werden Siedlungsabflüsse für Niederschläge verschiedener Intensitäten auf den Vorfluter bei Niedrigwasser appliziert. Die Schadstoffkonzentrationen werden über Mischungsrechnung ermittelt.

Der Nachweis wurde mit einem dem Merkblatt beigelegten Excel-Tool durchgeführt. Als Eingangsdaten werden Informationen über Einzugsgebiet, Kanalisation, Entlastungsmaßnahmen, stofflich Belastung und Fließgewässer verarbeitet. Für die Berechnungen werden die Einzugsgebiets- und Gewässerdaten für den Auslass des gesamten Modellgebietes und die Kanalisationsdaten des kompletten Systems integriert. Für das vereinfachte Verfahren werden die hydrodynamischen Verhältnisse im Gebiet nicht berücksichtigt. Daher wird der Fall der größten Belastung angenommen, dass die Zuflüsse der Mischwasserentlastung vor einer Hochwasserwelle des Einzugsgebietes in das Gewässer einfließen. Vereinfachend wurden die Volumina, Drossel- und Überlaufabflüsse der Rückhalte- und Entlastungsmaßnahmen des Gebietes summiert und als eine virtuelle Einleitung betrachtet. Da im Verfahren die Einleitung direkt oberhalb des betrachteten Gewässerabschnitts unterstellt wird, trägt auch diese Annahme tendenziell zu einer Überschätzung der Gewässerbelastung bei.

Abb. 27 zeigt die Konzentrationen der Zielparameter im Fließgewässer für die verschiedenen Regenspenden. Sauerstoff und Ammoniakstickstoff erfüllen die Anforderungen nach BWK-M3, die Partikelbelastung verletzt die Vorgaben ab einer Regenspende von 8 l/s*ha. Dieser Umstand wird in der Abbildung durch die farblich zu den Grafen korrespondierenden Flächen verdeutlicht, die den Bereich der Grenzwertverletzung hervorheben. Die minimale Sauerstoffkonzentration liegt bei 6,7 mg/l, die maximale Konzentration von abfiltrierbaren

Stoffen beträgt 170 mg/l. Beide Extremwerte werden bei der höchsten untersuchten Regenspende von 128 l/s*ha erreicht. Die maximale Konzentration an Ammoniakstickstoff liegt bei 0,024 mg/l sie entsteht bei 16 l/s*ha Regenspende. Die weitgehend konstanten Konzentrationen für abfiltrierbare Stoffe und Ammoniakstickstoff nach Einsetzen der Entlastung, etwa bei 8 l/s*ha, legen den Schluss nahe, dass die Belastung aus Oberflächenabfluss, die proportional zur Niederschlagsmenge zunimmt, gegenüber der Belastung aus Trockenwetterabfluss, die einen fixen Sockelanteil ausmacht, überwiegt.

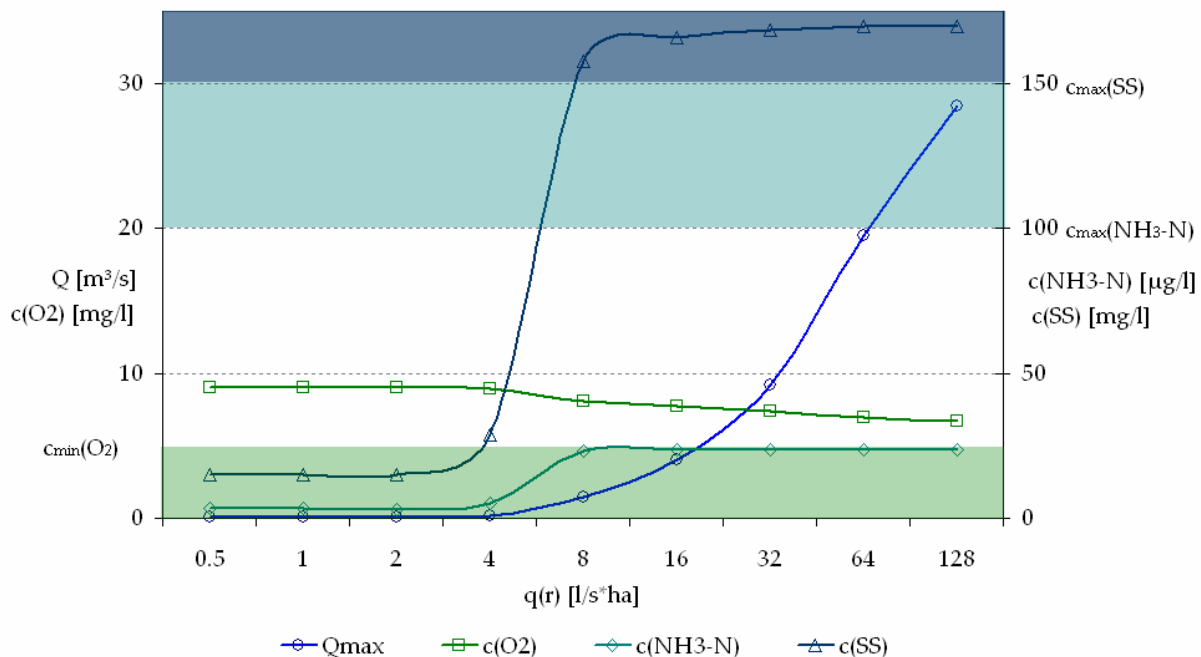


Abb. 27 Konzentrationen für Sauerstoff, Ammoniakstickstoff und abfiltrierbare Stoffe sowie Durchfluss für verschiedene Regenspenden in der Kupfer

Zusammenfassung

Die Untersuchung zeigt, dass für die Kupfer in hydraulischer Hinsicht an einigen Gewässerabschnitten Handlungsbedarf besteht und der Eintrag abfiltrierbarer Stoffe die Grenzwerte nach BWK-M3 überschreitet. Kann die Partikelbelastung um 13% reduziert werden, sind die stofflichen Anforderungen für einen guten Zustand durch die Siedlungseinleitungen nicht gefährdet. Einschränkend muss darauf hingewiesen werden, dass in Anbetracht des großen Anteils von Ackerland im Einzugsgebiet, die anthropogenen Stoffbelastungen durch Auswaschung von diesen Flächen, die Auswirkungen der Siedlungsentwässerung weit überwiegen können. Da die Stoffdynamik natürlicher Flächen sehr komplex ist, werden separate Untersuchungen zu diesem Aspekt empfohlen.

4.4.3. Wasserhaushalt

Der Rolle des Wasserhaushalts bei der Planung von Systemen der Siedlungsentwässerung kommt durch die Grundsätze der EG-WRRl eine gesteigerte Bedeutung zu. So fordert das Wasserhaushaltsgesetz: „...bei Maßnahmen, mit denen Einwirkungen auf ein Gewässer verbunden sein können... die Leistungsfähigkeit des Wasserhaushalts zu erhalten und eine Vergrößerung und Beschleunigung des Wasserabflusses zu vermeiden“ (WHG, §1a (2)). In diesem Zusammenhang fordert beispielsweise [Sieker, 2006] die Jahreswasserbilanz als maßgebendes Kriterium für die Planung von Entwässerungssystemen zu berücksichtigen.

Auf die akuten hydraulischen Auswirkungen der Siedlungstätigkeit wurde bereits im vorherigen Abschnitt hingewiesen. In diesem Abschnitt sollen kurz Zustand und Beeinflussung des Wasserhaushalts umrissen werden. Die Untersuchungen wurden mit den Modellen durchgeführt, die auch in der BWK-M3 Analyse Verwendung fanden. Die Langzeitsimulationen wurden bezüglich der Wasserbilanzen ausgewertet. Betrachtungsebene sind die Elementarflächen, die Komponenten der Flächenbilanzen werden zu einer Gebietsbilanz aufsummiert.

Grundlagen

Die Wasserbilanz beschreibt nach dem Prinzip der Masseerhaltung die Anteile der Komponenten des Wasserkreislaufs für ein Betrachtungsgebiet (F. 8) über einen Zeitabschnitt, z. B. ein Jahr.

$$P = Q + ETR + \Delta S$$

F. 8 Wasserbilanz

mit:	P	Niederschlag [mm/a]	Q	Abfluss [mm/a]
	ETR	reale Verdunstung [mm/a]	ΔS	Speicheränderung [mm/a]

Für längere Zeiträume, wie im vorliegenden Fall bei der Simulation von 30 Jahren, kann die Komponente der Speicheränderung vernachlässigt werden. Um die Abflusssdynamik zu erfassen, wird die Abflusskomponente in direkten Abfluss (QD) und infiltrierte Abflussanteile (Inf) unterschieden. Damit ergibt sich die Wasserbilanz zu:

$$P = ETR + QD + Inf$$

F. 9 angepasste Wasserbilanz

Definiert man die Größen normiert über den Niederschlag, können die relativen Anteile der Bilanz angegeben werden (F. 10)

$$k_{\text{sens}} = \frac{\partial Q}{\partial P_a} \cong \frac{\Delta Q}{\Delta P_a}$$

F. 10 relative angepasste Wasserbilanz

Auswertung

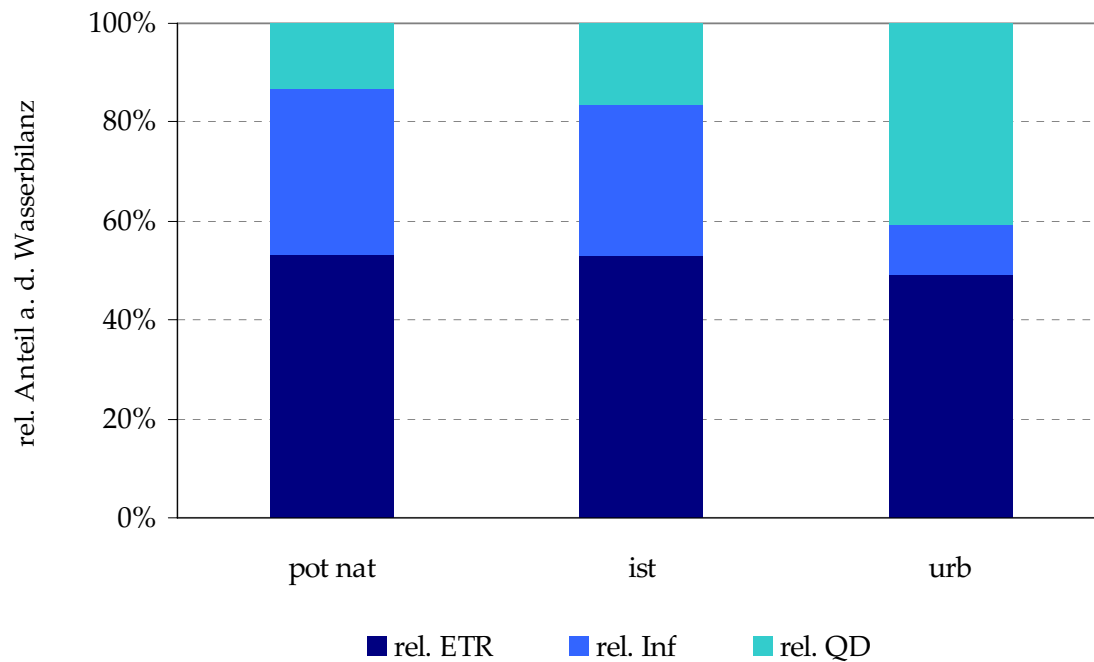


Abb. 28 Komponenten der Wasserbilanz für potentiell natürliches und bestehendes Einzugsgebiet und Siedlungsflächen.

Einen Vergleich der relativen Wasserhaushaltskomponenten für potentiell natürliches Einzugsgebiet (pot nat) und Gebiet im ist-Zustand (ist) sowie die Siedlungsflächen des ist-Zustandes (urb) gibt Abb. 28. Die Unterschiede zwischen potentiell natürlichem und ist-Zustand fallen gering aus, der direkte jährliche Abfluss erhöht sich von 13,1 auf 16,4%, die Infiltration nimmt von 33,5 auf 30,5% ab, die Verdunstung bleibt weitgehend konstant. Ein deutlich anderes Bild ergibt sich, wenn nur die Siedlungsflächen des ist-Zustands betrachtet werden, für diese ist der direkte Abfluss deutlich auf 40,7% erhöht und die Infiltration entsprechend auf 9,9% vermindert, die Verdunstung nimmt leicht um 4,1% auf 49,4% ab. Die relativ geringen Unterschiede zwischen natürlichem und ist-Zustand sind auf den verhältnismäßig kleinen Anteil von 11% Siedlungsflächen zurückzuführen. Die Auswirkungen einer extensiven Erweiterung der Siedlungstätigkeit deuten aber die Veränderten Verhältnisse auf den Siedlungsflächen an.

In diesem Abschnitt wird die Herangehensweise zur Entwicklung, Quantifizierung und Implementierung von Szenarien verdeutlicht. Der erste Teil (5.1) gibt einen Überblick über die Bedeutung von Szenarien, beschreibt Kriterien für die Entwicklung und nennt grundsätzliche und für diese Arbeit relevante Beispiele. Der Abschnitt 5.2 Szenarienentwicklung fasst Datengrundlagen sowie Herangehensweise bei der Lokalisierung von Entwicklungstendenzen zusammen und nennt Ansätze die Tendenzen für ein hydrologisch-wasserwirtschaftliches Modell greifbar umzusetzen. In Abschnitt 5.3 wird die Überführung der Parameter in das Modell beschrieben, konzeptionelle Ansätze werden diskutiert und die veränderten Eigenschaften des Entwässerungssystems dargestellt. Der letzte Abschnitt 5.4 stellt wesentliche Ergebnisse der Modellierungen zusammen. Darüber hinaus wird die Methodik und Anwendung der Kostenvergleichsrechnung für die Varianten vorgestellt.

5.1. Vorbetrachtungen

Der langfristige Planungshorizont von Systemen der Wasserwirtschaft macht es unumgänglich sich mit zukünftigen Zuständen und Randbedingungen des betrachteten Gebietes und der Gesellschaft auseinander zu setzen. Die einfache Extrapolation des ist-Zustands, die in der Vergangenheit häufig die Planungsgrundlage bildete, trifft die Anforderungen der dynamischen Entwicklungsprozesse von Gesellschaft und Umwelt nur ungenügend.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Studien sind von grundlegendem Charakter bzw. für die vorliegende Arbeit besonders relevant. Die Zusammenstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

5.1.1. allgemeines

Szenarien beschreiben die Projektion kohärenter Entwicklungen, sie sind in sich konsistent und geben Ausblick auf den möglichen zukünftigen Zustand eines Systems (zusammengefasst nach [IPCC, 2001a] und [WBGU, 1995]). [UKCIP, 2001] definiert vier Kriterien für die Entwicklung von Szenarien:

Relevanz: Szenarien müssen relevante Sachverhalte für die Zielstellung einer Untersuchung abdecken und genügend flexibel formuliert sein, um untersuchungsspezifische Aspekte integrieren oder ableiten zu können,

Konsistenz: Szenarien müssen eine schlüssige Weltsicht vermitteln und eine veranschaulichende Zusammenstellung von Parametern geben,

Glaubwürdigkeit: Die unterstellten Veränderungen sollten heutige Annahmen zur Entwick-

lung berücksichtigen, eine Bandbreite von Alternativen abdecken und erlauben die Beständigkeit von Langfriststrategien zu prüfen,

Transparenz: die Methodik der Szenarienentwicklung und ihre Annahmen müssen nachvollziehbar sein um die Ergebnisse unterschiedlicher Studien vergleichbar zu machen.

Mit Zunahme des Szenarienzeitraums, bzw. Abstand des –zeitpunktes nimmt auch die Spannweite von Zuständen einzelner Aspekte zu. Wie auch die im Abschnitt Unsicherheiten beschriebene Kumulation von Ungenauigkeiten und Abstraktionen, trägt die Zunahme von prognostisch nicht erfassbaren Einflüssen, zur Aufweitung möglicher Zustände bei. Abb. 29 verdeutlicht diesen Umstand mit dem Bild des Szenarietrichters.

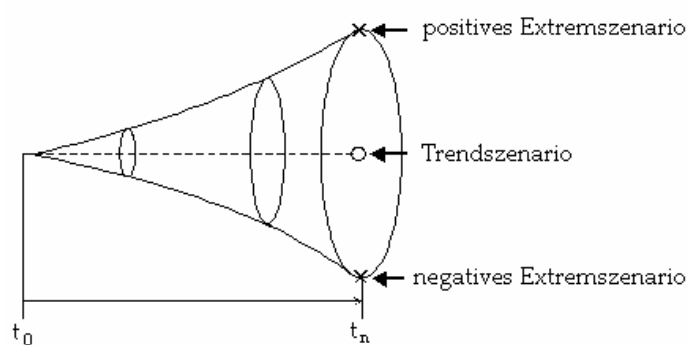


Abb. 29 Szenarietrichter – Veränderung der Spannweite von Parameterzuständen über die Zeit (leicht geändert nach [Weinbrenner, 1999])

Im Zusammenhang mit dem globalen Wandel kann zwischen sozioökonomischen, Landnutzungs-, umweltbezogenen und Klimaszenarien unterschieden werden [IPCC, 2001a]. Für den Bereich der integralen Bewirtschaftung von Flusseinzugsgebieten, konkretisiert [Mauser, 2002] die sozioökonomischen Szenarien und fordert politische, ökonomische, demographische und technologische Alternativen zu berücksichtigen. Auf Grund der Unsicherheiten und der großen Bandbreite möglicher Veränderungen kann, in Abhängigkeit von der gesellschaftlichen Perspektive, verschiedenen Arten von Zukunft entgegengeblickt werden. [Middelkoop, 2002] weist darauf hin, dass die Kernfrage in der Wasserbewirtschaftung darin besteht, wie eine Gesellschaft strategisch vorgeht um eine Adaption an den globalen Wandel zu ermöglichen.

Für die Planung von Systemen der Wasserbewirtschaftung auf lokaler Ebene muss zwischen Szenarien der zukünftigen Entwicklung und Varianten des Entwässerungssystems unterschieden werden. Die Zukunftsszenarien umfassen die Aspekte des globalen Wandels in ihrer Ausprägung auf lokaler Ebene. Die Entwicklung des Entwässerungssystems kann nicht losgelöst von der gesellschaftlichen Perspektive betrachtet werden und stellt den technischen Aspekt einer Entwicklung dar. Für die Beschreibung der Varianten fällt es schwer zukünfti-

ge Neuerungen abzuschätzen. In der Regel werden für die Umsetzung aktuelle Technologien und Tendenzen untersucht.

Beispiele für Szenarien des globalen Wandels

Das erste für die breite Öffentlichkeit publizierte Modell zum globalen Wandel ist das durch den Club of Rome initialisierte World1 Modell. Es arbeitet mit systemanalytischen Ansätzen auf der Basis von Trendextrapolation. In der korrespondierenden Veröffentlichung, „Die Grenzen des Wachstums“ [Meadows, 1972], werden Szenarien zur Entwicklung der Welt vorgestellt und die Auswirkungen pauschaler Änderungen, z. B. Reduktion des Verbrauchs fossiler Brennstoffe um 2% p. a., diskutiert. Die Veröffentlichung fand große Beachtung. Allerdings wurde die Methodik kritisiert, da das Modell nicht die ursächlichen Prozesse beschreibt, sondern nur angenommene Wirkungen und deren Interaktion mit statischen Ressourcen abbildet. Die Szenarien des Club of Rome haben nicht vorrangig den Anspruch tatsächliche Entwicklungen abzubilden, sondern versuchen die globalen Auswirkungen veränderten sozioökonomischer Handelns zu quantifizieren.

Die IPCC trägt die Ergebnisse wissenschaftlicher Arbeit zusammen und gibt kohärente Darstellungen, die IPCC Assessment Reports (IPCCAR). Im Rahmen des dritten IPCCAR wurden die Special Reports on Emission Scenarios (SRES) entwickelt, um gesellschaftliche Entwicklungsvorgaben für Klimamodelle zu schaffen. Die SRES Szenarien treffen konkrete Vorgaben für die globale Skala und sind vor allem auf die Abschätzung klimarelevanter Faktoren, wie Emission von Treibhausgasen ausgerichtet. Es werden vier Grundtypen der globalen Entwicklung unterschieden, deren Eintreten als gleichwertig betrachtet wird:

A1: schnelles ökonomisches Wachstum (3% p.a.), geringes Bevölkerungswachstum (2050: 9 Mrd; 2100: 7 Mrd) und schneller Einführung neuer, effektiverer Technologien; Motorisierung und Flächenverbrauch steigen stark an. Bestimmende Themen sind interregionale ökonomische und kulturelle Konvergenz. Die Bewohner dieser Welt bewerten persönlichen Reichtum höher als Qualität der Umwelt.

A2: heterogene Welt, Stärkung regionaler kultureller Identitäten, Betonung von Familienwerten und lokalen Traditionen, hohes Bevölkerungswachstum (15 Mrd. bis 2100) und geringeres Gewicht auf schneller ökonomischer Entwicklung. Ausbildung getrennter wirtschaftlicher Regionen. Entwicklung und Austausch von neuen Technologien und Anstieg des pro Kopf Einkommens verlaufen langsam.

B1: konvergente Welt mit schneller Veränderung der ökonomischen Strukturen, Einführung sauberer Technologien, Entwicklung des Dienstleistungs- und Informationsbereichs. Wirtschaftswachstum und Bevölkerungswachstum verlaufen wie bei A1. Der Schwerpunkt liegt aber bei globalen Lösungen zur Einführung ökologischer und sozialer Nachhaltigkeit, ein-

schließlich gemeinschaftlichen Anstrengungen für schnelle technologische Entwicklung, wirtschaftlichen Wandel und Verbesserung der Chancengleichheit.

B2: Welt lokaler Lösungen für wirtschaftliche, soziale und ökologische Nachhaltigkeit. Die Wirtschaft (2% p. a.) und Bevölkerung wachsen mäßig (10 Mrd. Menschen bis 2100). Die Welt ist heterogen mit langsamerem, stärker differenziertem technologischem Fortschritt und mehr Gewicht bei Gemeinschaftsinitiativen und sozialem Wandel um lokale, eher als globale Lösungen zu finden.

Für alle vier Grundszenarien gibt es Unterszenarien, die bestimmte Aspekte der Entwicklung variieren. Bspw. die Art der Energieträger, auf die der Entwicklungsschwerpunkt gelegt wird [WBGU, 2003].

Das UK-Foresight Projekt fokussiert bei der Szenarienentwicklung die ökonomisch-politische Ebene. Es werden zwei bestimmende Vektoren der gesellschaftlichen Entwicklung identifiziert. Die persönliche Ebene, auf der sich individualistische Sicht und Gemeinschaftsinn gegenüberstehen und die staatlich-politische Ausrichtung, bei der nationale Autonomie und internationale Interdependenz opponieren. Die aus der Kombination dieser Vektoren entstehenden Varianten sind in Abb. 30 dargestellt. Die Varianten ähneln in ihrer Ausrichtung denen SRES und zählen zu deren Vorläufern. Ein grundlegender Unterschied besteht in der Sichtweise auf die Motivation für umweltgerechtes Verhalten. Während es in den SRES Szenarien ein autonomer Faktor ist, wird es bei UK-Foresight als Aspekt sozialen Handelns interpretiert.

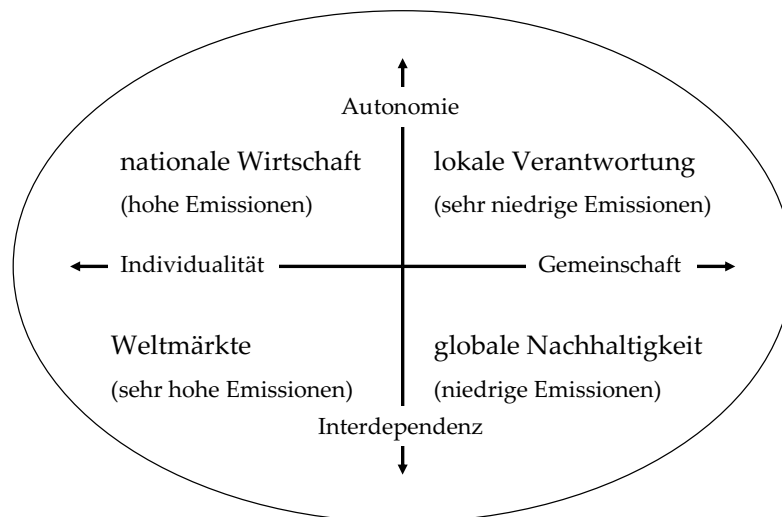


Abb. 30 Szenarien nach dem UK-Foresight Projekt (Abb. leicht geändert nach [UKCIP, 2001])

Für jedes der Szenarien wird eine qualitative Übersicht über Entwicklungen Großbritanniens in den Bereichen Werte und Politik, wirtschaftliche Entwicklung, Siedlung und Raumplanung, Landwirtschaft, Wasser, Biodiversität, Küstenschutz und Wohn- und Transport Infrastruktur gegeben. Darüber hinaus werden als Schlüsselindikatoren quantitative Aussagen zu

Wachstum des Bruttosozialproduktes, Jahreseinkommen pro Kopf, Anteil staatlicher Ausgaben am Bruttosozialprodukt, Anteil der Wirtschaftssektoren am Bruttosozialprodukt, Zahl der Haushalte, Anteile der Landnutzung und Flächenversiegelung in Großbritannien gegeben.

Im Rahmen des RIVERTWIN Projektes wurden für das Neckar-EZG zwei sozioökonomische Szenarien erarbeitet. In Anlehnung an die A und B Familien der SRES Gruppe wird zwischen wirtschaftlich-technologischer Entwicklung und ökologisch-sozial orientierter Entwicklung Unterschieden. Der Unterschied zu den vorgenannten Szenarien besteht im stärker regionalen Bezug und der Perspektive auf die Wasserbewirtschaftung. Die Szenarien wurden mit vier regionalen Projektionen des Klimawandels gekoppelt, da kein autarkes Klimamodell betrieben wurde.

Tab. 19 gibt einen Überblick über die qualitativ formulierten Grundsätze (die storyline) der Entwicklung für beide Szenarien, sie vermitteln vor allem eine wirtschaftlich-gesellschaftliche Perspektive.

Tab. 19 Übersicht über die qualitativen Aspekte der RIVERTWIN-Neckar Szenarien nach [RIVERTWIN, 2006]

wirtschaftlich-technologisch	ökologisch-sozial
starkes wirtschaftliches Wachstum	mäßiges wirtschaftliches Wachstum
mäßiges Bevölkerungswachstum	stabile Bevölkerungszahlen
Einführung effizienter Technologien	Einführung umweltfreundlicher Technologien
globale Mobilität von Mensch, Ware, Kapital und Ideen	starker Regionalbezug von Mensch, Kapital und Technologie
Gewinne werden reinvestiert	Gewinne fließen z. T. in Umweltschutz und soziale Projekte
Umwelt- und Ressourcenschutz hat geringe Priorität	Umwelt und Ressourcenschutz ist Teil der Lebensqualität
Nutzung von Atomkraftwerken (AKW) bis mind. 2030	Restlaufzeiten der AKW und wachsende Nutzung regenerativer Energie
Flächenverbrauch steigt proportional zum Wirtschaftswachstum	Flächenrecycling und Steuerung reduzieren den Flächenverbrauch

Quantitative Aussagen treffen die RIVERTWIN Szenarien zu Bevölkerungswachstum im urbanen und ländlichen Raum; Veränderung des Bruttoinlandsproduktes; Wasserverbrauch bei Landwirtschaft, Energieerzeugern, Industrie und Haushalten; Veränderung der Landnutzung nach Zunahme versiegelter Flächen und Abnahme und Strukturänderung von landwirtschaftlichen Flächen. Der Klimawandel wird über die relative Veränderung der

Sommer- und Winterhalbjahresmittel von Niederschlag (Tab. 5) und Temperatur quantifiziert.

Einen pragmatischen Ansatz für die Entwicklung von Szenarien schlägt [Andersson, 2006] vor. In seiner Untersuchung zum Fließregime des Okavango wurden für die Abschätzung von sozioökonomischen und landesplanerischen Aspekten Stakeholder befragt. Auf Basis der Aussagen werden mögliche Entwicklungen abgeleitet. Dieser Ansatz bietet sich besonders für die Abschätzung von Einzelmaßnahmen wie Wasserkraftanlagen und Bewässerungsprojekte an.

Szenarien und Alternativvarianten in der Siedlungsentwässerung

Die Untersuchung von Systemalternativen entwickelt sich derzeit zu einem Planungsstandard in der Wasserwirtschaft. Betrachtet werden meist alternative technische Lösungen und ihre technischen, ökonomischen und zum Teil ökologischen Implikationen, Beispiele geben [Ruiz-Rodriguez, 1993], [Bostingl, 2001], [Albrecht, 2002] und [Peters, 2007]. Für die Kombination zukünftiger Perspektiven und Auswirkungen auf die Siedlungswasserwirtschaft gibt es dagegen nur wenige, auf Forschungsprojekte beschränkte Beispiele, z. B. [KLIWA, 2003].

[Schilling, 2003] skizziert Szenarien deren Rahmenbedingungen sich an der Entwicklung nach den SRES Szenarien orientieren, sie tragen jedoch auch eine institutionell-planerische Komponente und sind stärker auf die Sicht der Wasserbewirtschaftung in den entwickelten Ländern akzentuiert. Die gesellschaftliche Perspektive wird eher suggestiv ausgedrückt:

grünes Szenario: nachhaltige Entwässerung (Regenwassernutzung; Versickerung), dezentrale Systeme; grundlegende Anstrengungen zur Instandhaltung; langfristige Risiken (z. B. Akkumulation von Schadstoffen),

technokratisches Szenario: Ingenieure der Behörden sind Entscheidungsträger; Planung robuster Systeme (minimale Gesundheitsrisiken); Entwicklung von Grundlagenwissen an Universitäten; politisches Gewicht bei Kosteneffektivität,

Privatisierungsszenario: hohe Investitionen in kleine Risiken (Trinkwasser); Endverbraucher hat keinen Einfluss auf Produkte; Forschungsvorrang bei der Wirtschaft; Kostenminimierung für Instandhaltung,

business as usual: zentrale Abwasserentsorgung; einfache Adaption neuer Umweltstandards; große Bandbreite von Systemtypen; Schwerpunkt bei geringem Versagensrisiko,

zukünftiger Traum: dezentrale Wasserbewirtschaftung; größere individuelle und gesellschaftliche Verantwortung; Kombination von Ursachenminderung und technologischer Entwicklung; Rückgewinnung von Ressourcen.

Da bei diesen Szenarien der Schwerpunkt auf der lokalen Entwicklung von sozialem Umfeld und in Abhängigkeit davon des Entwässerungssystems liegt, werden größerskalige Einflüsse

zum Beispiel der Klimawandel ausgeblendet. Sie können aber als impliziert unterstellt werden, wenn man davon ausgeht, dass die Entwicklung in parallelen Systemen einer Skale und über verschiedene Skalen homogen verläuft.

Ein Beispiel für die Modellierung von verschiedenen Varianten des Entwässerungssystems im Umgang mit zwei Klimaszenarien gibt [Semadani-Davies, 2005] für die Stadt Helsingborg in Südschweden. Im Vergleich zum ist-Zustand als Referenz umfassen die Szenarien:

Projektion des ist-Zustands: Die Stadt wächst im suburbanen Raum, das Kanalnetz wird nach dem derzeitigen Vorgehen erweitert,

derzeitige Trends in der Trockenwetterentwässerung: Bevölkerungs- und Gebietswachstum wie oben, 75% der neu angeschlossenen versiegelten Flächen werden vom Mischsystem entkoppelt,

derzeitige Trends der Trockenwetter- und Regenentwässerung: wie zuvor, Verringerung der Emissionen durch Kontrolle des innerstädtischen Fahrzeugverkehrs, BMP (best management practices) zur Minderung von Verschmutzungsquellen; Entkopplung von 85% der neu angeschlossenen Flächen,

nachhaltige urbane Wasserbewirtschaftung: wie zuvor, Urinseparation, Verringerung des Anteils von Metalldächern; Verringerung der straßenbürtigen Verschmutzung.

[Semadani-Davies, 2005] bezeichnet das dritte Szenario als das wahrscheinlichste.

5.2. Szenarienentwicklung

Wie die oben gegebene Übersicht verdeutlicht, sind integrale Szenarien des globalen Wandels auf lokaler Ebene kaum verfügbar. Die dargestellten Ansätze erheben den Anspruch durch die allgemeine Formulierung auf spezifische Anforderungen und Problemstellungen adaptierbar zu sein, in der Regel sind die Daten für solche Adaptionen aber nicht ohne weiteres verfügbar. Die Varianten der Entwässerungssysteme benötigen einen deutlich geringeren Datenaufwand in Hinblick auf die Randbedingungen. Die technische Machbarkeit und Möglichkeiten zur Integration in das bestehende System sollten vor einer Betrachtung geprüft werden.

5.2.1. lokale Szenarien des globalen Wandels

Für die Untersuchung sollen vier verschiedene Szenarien verwendet werden, die für drei unterschiedliche Herangehensweisen an die Szenarienentwicklung stehen. Das lineare Szenario (lin) stellt eine Extrapolation der derzeitigen Verhältnisse auf der Basis statistischer Informationen dar. Die Werte stammen zum Großteil aus der Datenbank des Landesamtes für Statistik (LSABW, 2007). Das Lastfallszenario (lf) versucht in Kombination der Erkennt-

nisse aus der Sensitivitätsanalyse des ist-Zustandes (Abschnitt 4.4.1) und plausiblen Extrema der Randbedingungen einen Fall größtmöglicher Belastung für das Entwässerungssystem herzuleiten. Der Ansatz die Szenarien des globalen Wandels zu lokalisieren, wird mit dem konservierenden (ko) und dem wachstumsorientierten (wo) Szenario verfolgt. Sie orientieren sich an den Szenarien des RIVERTWIN Projektes und den Vorgaben der UK-Foresight Perspektiven. Die Projektion der Szenarien erfolgt für einen Zustand im Jahr 2050.

Tab. 20 Übersicht über die im Modell betrachteten Parameter und ihre Umsetzung

	Parameter	Umsetzung im Modell
Klima	Niederschlagshöhe im Sommer- und Winterhalbjahr	Anpassung der Regenreihe
	Niederschlagshöhe an Tagen mit Starkniederschlag	Anpassung der Regenreihe
	Jahresmittel der Temperatur	direkte Eingabe
	Jahressumme der Verdunstung	direkte Eingabe
Landnutzung	Siedlungsfläche	Anteile befestigte / durchlässige Flächen (Wohnfläche / Industrie)
	natürliche Landnutzung	Anteile von Acker, Weideland und Wald
	Infiltration auf Ackerflächen	maximale Infiltration der Bodenarten
Wirtschaft und Technologie	jährliches Wachstum des Bruttoinlandsproduktes	Einwohnergleichwerte der Gewerbe, Flächenverbrauch des Gewerbes
	Wasserverbrauch Gewerbe / Privat	spezifischer Wasserverbrauch Gewerbe, Haushalte
	Fahrzeugnutzung	Partikel, Blei, Kupfer, CSB Belastung für Stoffparameter Straße
	umweltorientierte Produktion	Stoffparameter Industrie
Demographie	Einwohnerzahl	Einwohnergleichwerte Haushalte

Es wurde versucht Parameter aus den Bereichen Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft abzudecken. Allerdings konnten auf Grund der unterschiedlichen Relevanz für die Siedlungsentwässerung und der beschränkten Möglichkeiten der Umsetzung im Modell, nicht alle recherchierten Größen berücksichtigt werden. Eine Übersicht gibt Tab. 20

generelles Vorgehen

Es soll hier in Übersichtsform erläutert werden, wie Szenarienparameter in Eingangsgrößen des Modells umgesetzt wurden. Die zitierten Formeln befinden sich im Anhang in Tab. A 4.

Die Niederschlagsdaten wurden mit einer im Programm MATLAB erstellten Routine transformiert. Dabei wurden jeweils Werte der Monate November bis Mai (hydrologisches Winterhalbjahr), Werte der Monate Juni bis Oktober (hydrologisches Sommerhalbjahr) und Werte an Tagen mit einer Niederschlagssumme über 20 mm mit einem Faktor versehen (F. 21). Die Anpassung der Temperatur erfolgte über Skalierung des Jahresmittelwertes, die korrespondierende Verdunstung wurde mit der Hargreaves Formel (F. 1) berechnet.

Die Veränderung von Siedlungsflächen wurde als nicht an die Bevölkerungsentwicklung gekoppelt betrachtet, da diese Annahme den Prozessen der Entwicklung veränderter Wohnstrukturen nicht Rechnung trägt. Die Werte für die Veränderung von Acker- und Siedlungsflächen wurden über fixe Faktoren skaliert, die Weide und Waldfläche iterativ so angepasst, dass der Flächenerhalt auf der Skale des Einzugsgebiets gewährleistet ist. Für die Ausrichtung der Veränderung von Wald und Weide wurde der Szenariencharakter berücksichtigt. Eine Übersicht über den Berechnungsalgorithmus gibt F. 28. Der Anteil der Wasserflächen wurde als konstant betrachtet. Die Variation der Infiltration auf Ackerflächen wurde unter der bereits im Abschnitt 4.3.1 Modell-Setup beschriebenen Vereinfachung durchgeführt. Für die Anpassung wurde die maximale Infiltrationsleistung bodenartunabhängig nach (F. 29) geändert.

Das Wirtschaftswachstum wird über die Einwohnergleichwerte des Industrie-Trockenwetterabfluss (F. 22) und den Flächenverbrauch dieser Landnutzungsart (F. 23) ausgedrückt, beide Werte wurden über einen szenarienabhängigen Faktor angepasst. Für den Wasserverbrauch wurden die Werte des spezifischen Wasserverbrauchs der Trockenwetterelemente angepasst (F. 24). Die Verschmutzungskonzentrationen des Trockenwetters wurden dabei so angepasst, dass die Frachtvorgaben für chemischen und biologischen Sauerstoffbedarf, Stickstoff und Phosphor nach [ATV – A131] erfüllt bleiben. Um Veränderungen im Verkehr einzubeziehen, wurde relative Veränderung Jahreskilometerleistung berechnet und über einen Schadstoffausstoßfaktor skaliert, mit diesem Wert wurden die Konzentrationen für Partikel, chemischen Sauerstoffbedarf, Kupfer und Blei der Stoffparameter Straße angepasst (F. 25). Um die Effekte einer umweltgerechten Produktion zu erfassen, wurde die Stoffparameter der gewerblichen Trockenwetterbelastung für die verschiedenen Szenarien mit einem Faktor umgerechnet (F. 26).

Für Bevölkerungsentwicklung werden konstante Veränderungsraten angenommen, im Modell wird sie über die Anpassung der Einwohnergleichwerte von als privat eingestuftem Trockenwetterelementen abgebildet.

Die Veränderung der Flächen und Trockenwetterelemente im Gebiet wurde proportional zu den ist-Verhältnissen verwirklicht, die relative Veränderung ist also für alle Teilgebiete

gleich. Ein Vorgehen, dass raumplanerische Aspekte, etwa bei der Erweiterung von Siedlungsgebieten oder der Stilllegung von Landwirtschaftsflächen, berücksichtigt, wäre sehr aufwendig gewesen, da die Adaption nur manuell möglich gewesen wäre. Nur die Siedlungsgebiete Döttinger Straße in der Ortlage Kupferzell und Seeäcker im Ort Westernach wurden nach den derzeitigen Planungsvorgaben [IPS, 2007], [Kupferzell, 2007] bevorzugt erweitert.

Tab. 21 Übersicht über die statistische Datengrundlage und Modellannahmen für die Kriterien des linearen Szenarios, die Daten stammen aus [LSABW, 2007]

Parameter	Zeitraum	Gesamtänderung	Änderung p. a.	Modellannahme p.a.	Änderung bis 2050
BIP / EGW _{Ind}	1991-2004	57%	4.4%	4.4%	202%
Flächenverbrauch	1988-2004	1050%	65%	10%	460%
Gewerbe					
Wasserverbrauch privat	2001-2007	-26.5%	-4.3%	-1.4%	-60%
Wasserverbrauch Wirtschaft	2001-2004	4.8%	1.6%	1.6%	69%
Fahrzeugbelastung	1990-2004	27.8%	2%	2%	91%
Einwohner	1964-2006	47.9%	1.2%	1.2%	51%
Siedlungsfläche	1988-2004	61.5%	3.8%	3.8%	176%
Ackerfläche	1988-2004	-6.5%	-0.41%	-0.41%	-18.9%
Waldfläche	1988-2004	4.9%	0.31%	0.31%	14.6%

Lineares Szenario

Grundsatz für das lineare Szenario war, dass für Aussagen für die keine statistische Grundlage vorhanden war, als nicht veränderlich angenommen wurden. Die Welt wird als statisch aufgefasst, technologischer Fortschritt und Klimawandel werden nicht berücksichtigt. Die in den Formeln F. 21 bis F. 29 eingeführten k-Faktoren werden zu eins angenommen. Die Ausgangsdaten und Referenzzeiträume und ihre Umsetzung für das Modell sind in Tab. 21 dargestellt. Eine detaillierte Übersicht über die absoluten Werte der Änderung gibt Tab. A 5.

Es wird deutlich, dass einige der Annahmen, z. B. bezüglich der Bevölkerungsentwicklung unrealistisch sind, für andere wie den gewerblichen Flächenverbrauch mussten die statistischen Werte deutlich korrigiert werden um plausible Annahmen zu treffen.

Lastfallszenario

Das Lastfallszenario wurde in einer Kombination aus den Erkenntnissen aus der Sensitivitätsanalyse im ist-Zustand und Rechercheergebnissen der Literatur zusammengestellt. Die Parameter wurden unter der Maßgabe mit der Ausrichtung entwickelt eine Konfiguration zu erhalten, die für den Vorfluter und das Entwässerungssystem die größte wahrscheinliche Belastung darstellt. Tab. 22 gibt eine quantitative Übersicht über die relative Änderung der Parameter, in Tab. A 5 sind die Absolutwerte im Vergleich aufgeführt.

Tab. 22 Übersicht über die Quellen und Modellannahmen für die Kriterien des Lastfallszenarios

Parameter	Quelle	jährliche Änderung	Änderung bis 2050
ΔP Sommer / Winter	[KLIWA, 2003a], [Kunze, 2004]		-19 / +43%
ΔP Starkregen	[Bartels, 2005], [KLIWA, 2006a]		+35%
ΔT	[KLIWA, 2003a]		+3.5°C
BIP / EGW _{ind}	[UNDESA, 2007]	2.9%	240%
Flächenverbrauch Gewerbe	-	-	288%
WV privat	-	-	20%
WV Wirtschaft	-	-	20%
Fahrzeugbelastung	[LSABW, 2007]	-	109%
Verschmutzung Verkehr		-	20%
Belastung der Ind.abwässer		-	20%
Einwohner (EGW _{priv})	[ISC, 2002]	-	42%
Siedlungsfläche	[Gross, 2007]	2.7%	223%
Ackerfläche	[LfFLBW, 1999]	-0.35%	-22.1%
Waldfläche	-	-	0%
max. Inf. Acker	-	-	-25%

Die Annahmen zu den Änderungen von Niederschlag und Temperatur stammen aus Literaturwerten, sie repräsentieren jeweils die extremen für Baden-Württemberg getroffenen Angaben. Die wirtschaftliche Entwicklung orientiert sich am oberen Vorhersagespektrum für Westdeutschland nach [UNDESA, 2007]. Der Versiegelungsgrad steigt stärker an als das Bruttoinlandsprodukt. Der häusliche und gewerbliche Wasserverbrauch nehmen zu. Die Zunahme der Jahresfahrleistung orientiert sich an der statistischen Entwicklung (siehe lineares Szenario), zusätzlich erhöht sich aber die fahrzeugspezifische Belastung da bspw. Autos mit mehr Komfort oder höherem Verbrauch gefahren werden. Auch die Produktionsstan-

dards sind so orientiert, dass es zu einer Verschlechterung gegenüber dem ist-Zustand kommt. Das Bevölkerungswachstum entspricht den Entwicklungszielen der Gemeinde und lehnt sich an den Planzustand der Regentlastungskonzeption [ISC, 2002] für 2025 an, wobei die weitere Entwicklung bis 2050 extrapoliert wurde. Die Ausweitung von Wohnflächen wurde an die derzeitige Entwicklung des Wohnungsbestandes und der Belegungsdichte für Kupferzell und den Landkreis Hohenlohe angepasst [Gross, 2007]. Für die Veränderung Ackerflächen wurde die höchste Abnahme nach [LfL BW, 1999] angenommen. Für die Waldfläche wurden keine Zunahmen unterstellt. Die Infiltrationsleistung auf Ackerflächen wird reduziert. Die Infiltration kann durch veränderte Bewirtschaftungsmethoden oder schwere Landwirtschaftsmaschinen der Großproduktion vermindert werden.

konservierendes Szenario

Das konservierende Szenario folgt einer storyline, vermittelt also die Weltsicht der Gesellschaft deren Umfeld sie beschreibt. Das konservierende Szenario lehnt sich an die B Entwürfe des IPCC bzw. die gemeinschaftsbetonten Entwürfe des UK-Forecast Programme und dem ökologisch-sozialen Szenario des RIVERTWIN Projekts an.

Unter dem Szenario bestehen Wille und Möglichkeit die Umwelt vor den Einflüssen des Klimawandels zu schützen. Die wirtschaftliche Entwicklung verläuft kontrolliert, so dass die ökologische Vielfalt erhalten bleibt. Die Landwirtschaft ist verstärkt auf ökologische Produktionsweise ausgerichtet. Die Wasserressourcen werden auf Grund geringerer Nachfrage weniger beansprucht. Technologie erlaubt die Anpassung an veränderte Umweltbedingungen. Der Flächenverbrauch wird durch Umnutzung und Umstrukturierung von wirtschaftlichen und sozialen Entwicklungen entkoppelt. Die sozialen Strukturen sind gemeinschaftsorientiert und fördern Eigenverantwortung. Soziale Gleichheit und demokratische Werte werden höher gewichtet als wirtschaftliches Wachstum.

Als Ergebnis der ergriffenen Gegenmaßnahmen fällt der Klimawandel moderater aus, die Änderungen orientieren sich am unteren Spektrum der Angaben aus den zitierten Publikationen. Für die wirtschaftliche Entwicklung wurde die Perspektive des RIVERTWIN Szenarios übernommen, der gewerbliche Flächenverbrauch ist, über einen Faktor der Industrieflächenentwicklung von 0,4 (F. 23) weitgehend von der wirtschaftlichen Entwicklung entkoppelt. Der gewerbliche und private Wasserverbrauch und die industrielle Schmutzwasserbelastung verringern sich. Die Jahresfahrleistung nimmt entsprechend der niedrigen Trendvariante nach [Büringer, 2005] zu und wurde über den Vorhersagezeitraum hinaus extrapoliert die daraus resultierende Belastung wird durch saubere Technologie zusätzlich verringert. Der Bevölkerungsentwicklung liegt die Vorausschätzung des [RVHF, 2006] zugrunde, sie sieht eine leichte Zunahme vor. Durch Tendenzen absinkender Belegungsdichte [Gross, 2007]

steigt die Wohnfläche leicht überproportional. Eine extensive landwirtschaftliche Nutzung bewirkt, dass die Ackerfläche weniger stark abnimmt als nach den RIVERTWIN Angaben. Die Infiltrationsleistung des Bodens nimmt zu. 30% der umgewidmeten Ackerfläche werden aufgeforstet. Die relativen Veränderungen der Parameter sind in Tab. 23 zusammengefasst.

wachstumsorientiertes Szenario

Wie auch das konservierende, ist das wachstumsorientierte Szenario eine storyline-Projektion. Sie ist an den A Entwürfen des IPCC, den individualistischen Ansätzen von UK-Forecast bzw. dem wirtschaftlich-technologischem nach RIVERTWIN angelehnt.

Tab. 23 Übersicht über die Quellen und Vergleich Modellannahmen für konservierendes und wachstumsorientiertes Szenario

Parameter	Quelle	ko bis 2050	wo bis 2050
ΔP Sommer / Winter	[KLIWA, 2003a] [RIVERTWIN, 2006]	+8 / +17%	-9 / +27%
ΔP Starkregen	[Bartels, 2005] [KLIWA, 2006a]	+14%	+33%
ΔT	[KLIWA, 2003a]	+1°C	+2.5°C
BIP / EGW _{ind}	[RIVERTWIN, 2006]	64%	134%
Flächenverbrauch Gewerbe	-	26%	134%
WV Wirtschaft	-	-20%	20%
Fahrzeugbelastung	[Büringer, 2005]	16%	38%
Verschmutzung Verkehr		-35%	0%
Belastung der Ind.abw.		-20%	0%
Einwohner (EGW _{priv})	[RVHF, 2006]	3,5%	17%
Wohnfläche	[Gross, 2007] [RIVERTWIN, 2006]	8.9%	43%
Ackerfläche	[LfFLBW, 1999] [RIVERTWIN, 2006]	-6.8%	-14.8%
Waldfläche	-	24%	0%
max. Inf. Acker	-	20%	-10%

In diesem Szenario liegt der Schwerpunkt der Ausrichtung bei wirtschaftlicher und technologischer Entwicklung. Die politische Motivation Standards des Umweltschutzes zu etablieren ist gering, Maßnahmen werden nur dort ergriffen wo ein Freizeitwert für Menschen gesehen wird. Die Landschaft wird durch Wohnraumbereitstellung, intensivierte Landwirtschaft und Freizeitnutzung beansprucht. Die Investitionen in die Weiterentwicklung der

Landwirtschaft sind beschränkt, so dass eine Anpassung an veränderte Rahmenbedingungen kaum stattfindet. Die Wasserwirtschaft findet wenig Aufmerksamkeit, so dass es zu einer Verschlechterung von Infrastrukturen und Qualität kommt. Der Flächenverbrauch wird kaum geplant und ist stark an sozioökonomische Entwicklungstendenzen gekoppelt. Die sozialen und politischen Werte sind so ausgerichtet, dass der Einzelne sich darauf ausrichtet seine Bedürfnisse konsumorientiert zu befriedigen. Soziale Gerechtigkeit ist ein untergeordnetes Anliegen und der Regierungsstil ist durch starke Verantwortlichkeit von Behörden geprägt.

Durch die global wie regional erhöhten Durchsätze der Wirtschaft, fällt der Klimawandel stark aus die Änderungen orientieren sich am oberen Spektrum der Literaturangaben. Die wirtschaftliche Entwicklung verläuft wie im korrespondierenden RIVERTWIN Szenario, der gewerbliche Flächenverbrauch ist stark daran gekoppelt. Der Wasserverbrauch im gewerblichen Bereich steigt und bleibt bei privaten Nutzern konstant. Die spezifischen Emissionen nehmen bei gewerblichen Einleitern und im Straßenverkehr nicht ab. Die Jahresfahrleistung entwickelt sich nach der hohen Vorausrechnung von [Büringer, 2005]. Die Bevölkerungszunahme und Flächenverbrauch für Siedlungen steigen, entsprechend den Annahmen des RIVERTWIN Szenarios, an. Die intensivierte Landwirtschaft und der Flächenbedarf in anderen Bereichen führen zu einer Abnahme der Agrarfläche. Die Infiltrationsleistung des Bodens nimmt durch intensivere Bewirtschaftung leicht ab. Einen Überblick über die relativen Änderungen gibt Tab. 23.

5.2.2. Alternativen des Entwässerungssystems für Kupferzell

Für die Konfiguration des Entwässerungssystems wurden 4 Varianten entwickelt. Für die erste Variante (mw) werden die Neuanschlüsse im Mischsystem ausgeführt, in der zweiten Variante (tw) entstehen Neuanschlüsse im Trennsystem. Bei der dritten (dw) wird das Regenwasser dezentralen Maßnahmen zugeführt, bei der vierten Variante (dwa) werden die Neuanschlüsse und 20% der bestehenden Anschlüsse dezentral bewirtschaftet, 20% der gesamten Dachflächen als Gründächer ausgeführt und 20% des Wasserverbrauchs aus der Speicherung von Regenwasser in Zisternen gedeckt. Auch für die beiden dezentralen Varianten erfolgt die Ableitung des Schmutzwassers in das Kanalsystem.

Es wurde ein weitgehend konservatives Konzept der Alternativenentwicklung verwendet – für drei der Alternativen wurden nur Maßnahmen für die Neuanschlüsse untersucht. Die Variantenplanung geht von relativ pauschalen Annahmen aus, da eine detailliertere Betrachtung in Anbetracht des Modellkonzeptes schwer umsetzbar- und für die unterschiedlichen Szenarien des globalen Wandels mit beträchtlichem Aufwand verbunden wäre. Die Varianten sollen eher die prinzipiellen Ansätze der Regenwasserbewirtschaftung vergleichen und

deren Vor- und Nachteile unter den gegebenen Bedingungen herausarbeiten. Es ist kein vorrangiges Ziel eine optimale Variante für den Ort ermitteln.

5.3. Umsetzung im Modell

Für das Vorgehen bei der Modellierung gelten prinzipiell die im Abschnitt 4.3.1 Modell-Setup getroffenen Aussagen. Die Anpassung an die Einflüsse des globalen Wandels kann durch Änderung der vorgestellten Elemente vorgenommen werden und soll hier nicht nochmals beschrieben werden. Für die Entwässerungsvarianten wurden zum Teil neue Elemente verwendet, diese werden in den entsprechenden Abschnitten kurz erläutert.

5.3.1. Allgemeine Struktur

Um eine bessere Bearbeitung der Varianten des Entwässerungssystems zu gewährleisten, wurden die urbanen Erweiterungsflächen als neue Flächen eingefügt und die natürlichen Flächen entsprechend reduziert. An Gewässernetz und Oberflächeneigenschaften wurden über die im Abschnitt Szenarienentwicklung getroffenen Aussagen hinaus keine Adaptionen vorgenommen. Für die Veränderung der Einwohnergleichwerte wurden die Werte in den vorhandenen Trockenwetterelemente skaliert.

5.3.2. Abbildung der Entwässerungsvarianten im Modell

Mischsystem

Wie bereits erwähnt, ist das bestehende System zum überwiegenden Teil im Mischsystem ausgeführt. Das Schema der Abflussbildung und -konzentration wurde mit Abb. 14 bereits erläutert. Die neu angeschlossenen Flächen wurden den Anschlüssen der korrespondierenden Anschlüsse im Bestand zugeordnet.

Das Volumen der Retentionselemente wurde an die veränderten Anschlussflächen und Starkregenverhältnisse angepasst. Vereinfachend wurde es linear über das Verhältnis der Flächen im ist- und Szenarienzustand und den Faktor für Starkniederschläge skaliert (F. 11). Der Retentionsraum im Kanalnetz wurde vernachlässigt.

$$V_{\text{Ret, sz}} = \frac{A_{\text{sz}} * k_{\text{SR}}}{A_{\text{ist}}} * V_{\text{Ret, ist}} \quad \text{F. 11 Volumen der Retentionselemente}$$

mit	$V_{\text{Ret, sz / ist}}$	Retentionsvolumen im Szenarien / ist-Zustand [m³]
	$A_{\text{sz / ist}}$	angeschlossene Fläche im Szenarien / ist-Zustand [m²]
	k_{SR}	Anpassungsfaktor der Starkniederschläge

Trennsystem

Für die Varianten des Trennsystems wurden die erweiterten Siedlungsflächen direkt an die geographisch nächstgelegenen Fließgewässer angeschlossen. Abb. 31. zeigt schematisch die Abflussbildung (durchgezogene Pfeile) und –konzentration (gestrichelte Pfeile) Auf Grund der hohen Gewässerdichte im Einzugsgebiet liegt keine der Flächen weiter als 700 m von einem Vorfluter entfernt, so dass die nicht-Berücksichtigung der Translationszeit eine zulässige Vereinfachung darstellt. Unter den getroffenen Annahmen kann eine Überlastung des Trennsystems im Modell nicht abgebildet werden, das Wasser wird in jedem Fall direkt in den Vorfluter abgeführt.

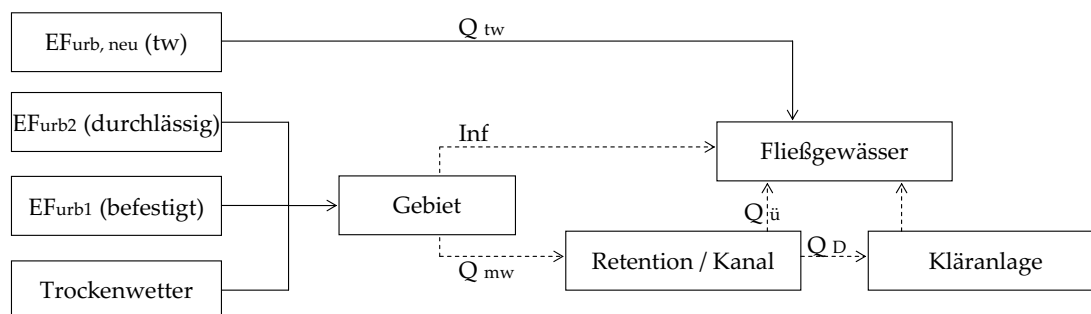


Abb. 31 Abflussbildung und –konzentration im Trennsystem

dezentrale Entwässerung

Für diese Varianten wird das Regenwasser der Neuanschlüsse über Rigolen versickert. Die Rigolen weisen eine hydraulische Leitfähigkeit von 3,6 mm/h und einen Speicherkoeffizienten von 35% auf. Sie wurden einheitlich auf eine Tiefe von 1,5 m versehen. Die Fläche der Rigolen wurde mit einem programminternen Modul auf fünfjährige Überlaufhäufigkeit dimensioniert.

Die Prozesse von Abflussbildung und –konzentration in den dezentralen Entwässerungssystemen sind in Abb. 32 dargestellt. Das Wasser der an die Rigolen angeschlossenen Oberflächen, infiltriert. Übersteigt der Zufluss die Infiltrationsleistung, läuft die Rigole in das Gebiet über, der Pfad des überlaufenden Wassers entspricht dann dem von Oberflächenabfluss im Mischsystem.

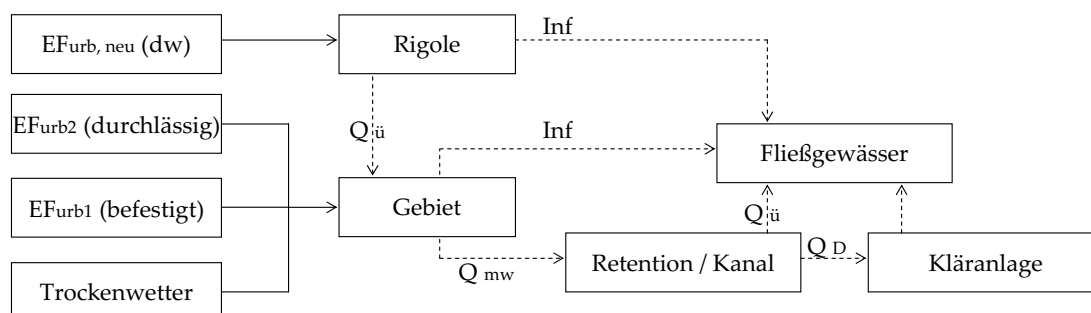


Abb. 32 Abflussbildung und –konzentration des dezentralen Entwässerungssystems

erweitert dezentrale Entwässerung

Bei den erweiterten dezentralen Varianten werden neue Flächen ebenfalls an Rigolen angeschlossen. Zusätzlich werden 20% aller Dächer als Gründächer ausgeführt und 20% der Wasserversorgung über Zisternen gedeckt und 20% der Bestandsflächen über Rigolen entwässert. Abb. 33 verdeutlicht die Wasserströme in den erweiterten dezentralen Varianten. Das in den Gründächern gespeicherte Wasser verdunstet. Der Verbrauch aus den Zisternen ist ein Senkenterm, da die Wasserversorgung nicht im Modell berücksichtigt wird. Konzeptionell kann er dem Trockenwetterabfluss zugerechnet werden. Die Überläufe von Zisternen und Gründächern fließen je nach Elementarfläche dem Gebiet oder der Rigole zu.

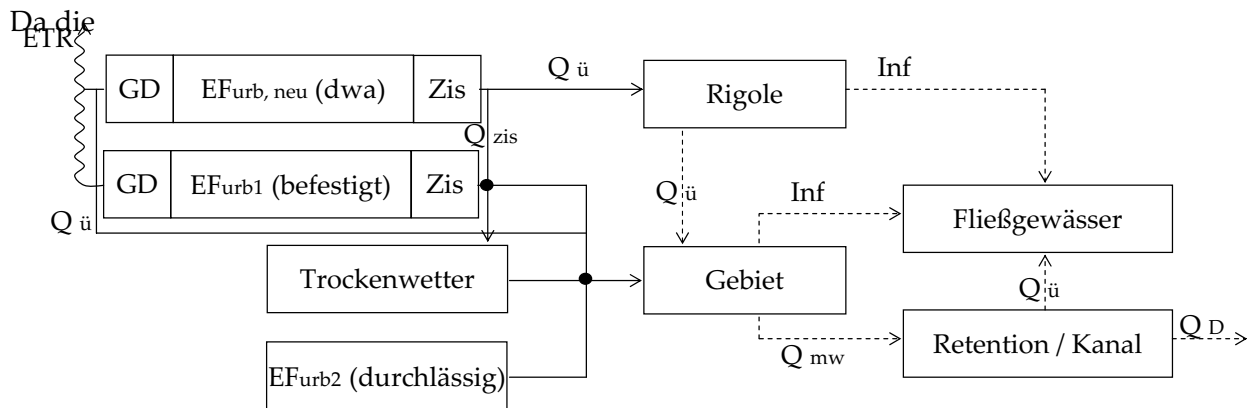


Abb. 33 Wasserströme der erweiterten dezentralen Varianten

In der Modellstruktur werden den Gründächern eigene Elementarflächen zugeordnet, die Zisternen sind zwischen Flächen und Gebiete geschaltet. Für das Modell wurde angenommen, dass 50% der befestigten Flächen Dachflächen darstellen (die Straßen werden durch den Oberflächenabflussanteil der durchlässigen Flächen repräsentiert). Diese wurden von den Ausgangsflächen separiert und an flächengleiche Gründachelemente angeschlossen. Die Zisternen werden von Elementarflächen gespeist, denen auch Trockenwetterelemente zugeordnet sind. Ihre Dimensionierung erfolgte unter Berücksichtigung von Wasserbedarf und angeschlossener Oberfläche über eine programminterne Routine.

Im Gegensatz zu den Kanalnetzlängen der Gebiete sind die Abmessungen der dezentralen Maßnahmen direkte Eingangsparameter des Modells. Eine Übersicht über die Flächen und Volumina der Bewirtschaftungselemente gibt Abb. 34.

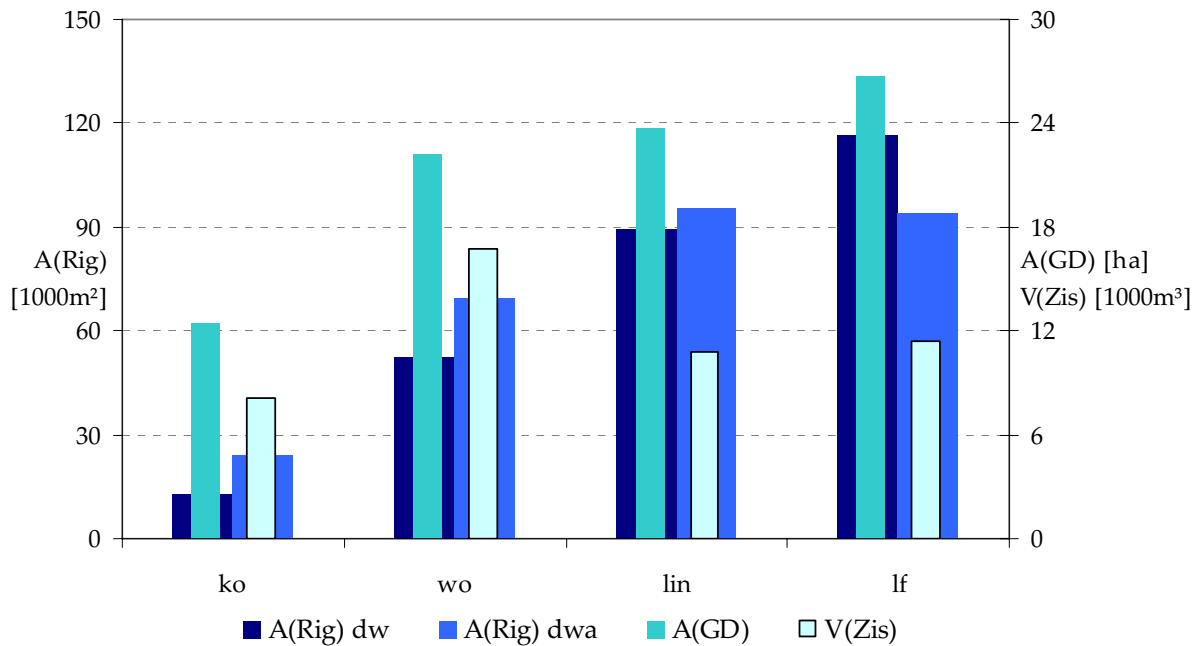


Abb. 34 Vergleich der Dimensionen für die dezentralen Elemente der Regenwasserbewirtschaftung

Die Fläche der Gründächer ($A(GD)$) steigt linear mit der Zunahme der Siedlungsfläche an. Für die Zisternen besteht der größte Volumenbedarf ($V(Zis)$) für das wachstumsorientierte Szenario (wo), da hier relativ der größte Wasserbedarf je zur Verfügung stehender Einspeisungsfläche besteht. Der auf den ersten Blick überraschende, nicht proportionale Verlauf der Rigolenfläche ($A(Rig)$) in der dezentralen und erweitert dezentralen Varianten lässt sich dadurch erklären, dass der Anteil der Gründächer auch die Fläche der Neuanschlüsse bezieht und damit deren Fläche reduziert. Für die Lastfall-Szenarien, mit über 240% mehr Siedlungsfläche, reicht die Verminderung soweit, dass die dezentrale Variante mehr Rigolenfläche benötigt als die erweitert dezentrale. Eine Übersicht über die Maße findet sich auch in Tab. A 7 im Anhang.

5.3.3. Erweiterung der Strukturen des Entwässerungssystems

Teile der im Folgenden vorgestellten Werte sind nicht direkte Eingangsparameter der Modellierung. Bspw. wird die Länge des Kanalnetzes in den Gebieten nicht explizit eingegeben, die Fließzeit in den Kanälen wird über einen Einzellinearspeicher berücksichtigt. Für solche Fälle wurden die Angaben aus den Informationen zum bestehenden System abgeleitet.

Schmutzwasserkanäle

Die dezentralen Bewirtschaftungsansätze wie auch das Trennsystem machen die Planung eines Schmutzwassersystems erforderlich. Die Kanalnetzdicke wurde wie die des bestehenden Mischsystems (495 m Kanal / ha befestigte Fläche) angenommen und vollständig als DN 300 ausgelegt. Die Längen der Kanäle für die verschiedenen Szenarien sind in Tab. 24 darge-

stellt. Die angenommene Verlegetiefe von 2m entspricht der mittleren Verlegetiefe des bestehenden Netzes (1.93 m) [IPS, 2007].

Szenario	Länge der Schmutzwasserkanäle [m]
konservierend	4875
wachstumsorientiert	25358
linear	43660
Lastfall	56062

Tab. 24 notwendige Längen der Schmutzwasserkanäle auf den neu angeschlossenen Flächen

Kanäle im Misch- und Trennsystem

Die Analyse der Auslastung des bestehenden Mischwassersystems erfolgte auf Basis der Ergebnisse einer hydrodynamischen Simulation [IPS, 2007]. Die Projektion auf die Auslastung durch die Zukunftsszenarien wurde über eine Abschätzung des veränderten Abflusses realisiert. Der spezifische Abfluss im ist-Zustand wurde für jedes Teilgebiet mit dem Verhältnis der angeschlossenen Flächen im ist- und Szenarienzustand und dem Faktor für Starkregenniederschläge multipliziert um einen virtuellen szenarienspezifischen Abfluss zu erhalten. Dieser wurde ins Verhältnis mit dem ist-spezifischen Abfluss gesetzt und die so erhaltenen spezifischen Abflussverhältnisse (F. 12). für alle Teilgebiete gemittelt.

$$k_{sQ} = \frac{Q_{sz}}{Q_{ist}} = \frac{A_{sz} * k_{SR}}{A_{ist}} \quad \text{F. 12 spezifisches Abflussverhältnis}$$

mit: k_{sQ} spezifisches Abflussverhältnis
 $Q_{sz / ist}$ Abfluss im ist / Szenariozustand [m^3/s]
 $A_{sz / ist}$ Fläche im ist / Szenariozustand [m^2]
 k_{SR} Starkregenfaktor

Der Auslastungsgrad als Verhältnis aus Szenariendurchfluss zu Durchfluss bei Vollfüllung im ist-Zustand wurde mit dem mittleren spezifischen Abflussverhältnis skaliert (F. 13).

$$k_{AQ_{sz}} = k_{sQ} * k_{AQ_{ist}} = k_{sQ} \frac{Q_{voll}}{Q_{ist}} \quad \text{F. 13 Auslastungsgrad}$$

mit: $k_{AQ_{sz / ist}}$ Auslastungsgrad im ist- / Szenarienzustand
 $Q_{voll / ist}$ Durchfluss im ist-Zustand / bei Vollfüllung

Kanalabschnitte mit einem Auslastungsgrad von über eins, also einem Durchfluss größer als Vollfüllungsdurchfluss wurden als auszutauschen kategorisiert. gibt eine Übersicht über die erforderlichen Austauschlängen gibt Abb. 35.

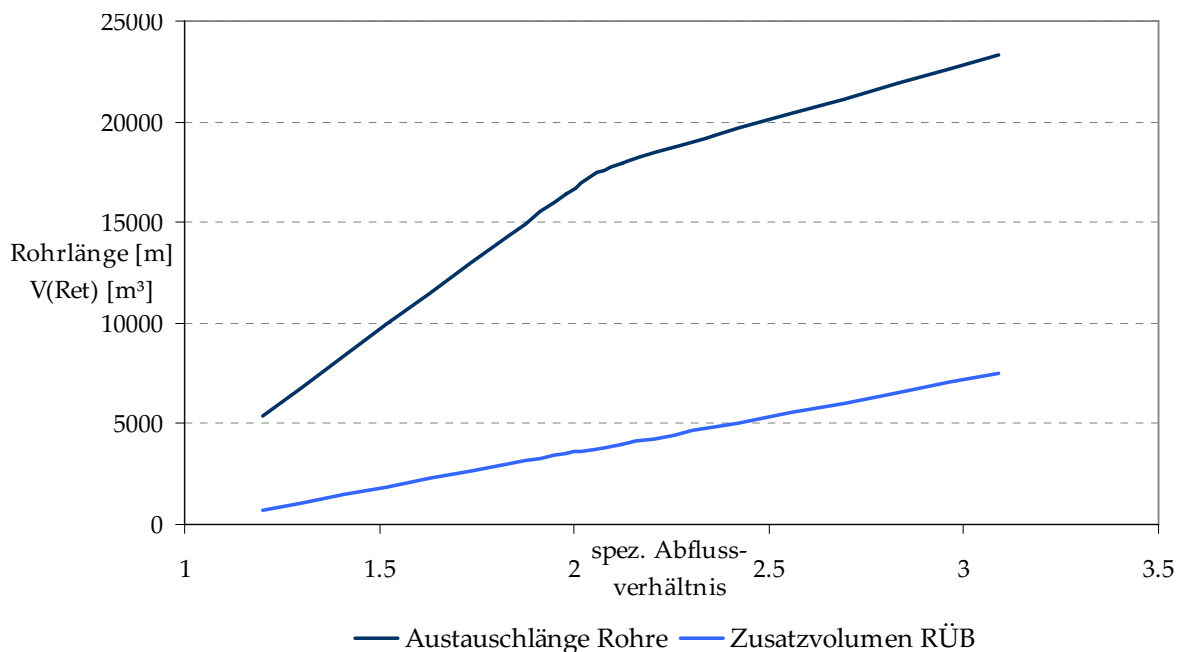


Abb. 35 auszutauschende Kanallängen und zusätzlich Benötigtes Retentionsvolumen in Abhängigkeit vom spezifischen Abflussverhältnis

Im Gegensatz zum Volumen der Retentionselemente (siehe F. 11) ist der Verlauf für die Austauschlängen nicht proportional zum spezifischen Abflussverhältnis. Die Zahlenwerte können in Tab. A 6 im Anhang nachvollzogen werden.

Für die Neuanschlüsse und Austauschstrecken im Misch- und Regenwassersystem wurden die gleichen Längen als notwendig angenommen wie für das Schmutzwassersystem. Die Verteilung der Rohrdurchmesser wurde dabei von den Verhältnissen im bestehenden System übernommen [IPS, 2007a]. Dem Umstand, dass die ausgetauschten Rohre tendenziell größere Durchmesser aufweisen müssten, wurde dadurch Rechnung getragen, dass jeweils die oberen Grenzen der Rohrklassen als maßgeblich angenommen wurden. Nur für die Klasse DN 800-2000 wurde das DN 1000 angenommen. Eine Übersicht über die Anteile der Rohrlängen in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser ist Tab. 25 abgebildet.

Zusätzlich wurden für das Trennsystem Sammelleitungen zu den Fließgewässern einbezogen, diese wurden in einer georeferenzierten Auswertung als kürzester Weg zwischen Fläche und Vorfluter ermittelt und mit einem Faktor von 1.2 beaufschlagt.

Tab. 25 Übersicht über prozentuale Anteile nach Durchmesser und Rohrlängen für die Szenarien

DN [mm]	<300	300-400	400-500	600-800	800-2000 (mw)	800-2000 (tw)
Verteilung ist-Zustand [%]	69.5	19.2	6.3	3.6	1.4	
Verteilung Szenarien [%]	69	19	6	4	2	
Rohrlängen Szenarien [m]						
konservierend	3 413	975	293	195	98	7354
wachstumsorientiert	17 750	5 071	1521	1 013	506	7558
linear	30 562	8 732	2620	1 747	863	7742
Lastfall	39 234	11 212	3 364	2 243	1 122	7866

5.3.4. potentieller natürlicher Zustand

Die Definition für den potentiellen natürlichen Zustand wurde bereits im Abschnitt 4.4.2, im Rahmen der BWK-M3 Analysen gegeben. Entsprechend dem erläuterten Vorgehen wurden die Siedlungsflächen in natürliche Flächen überführt. Die klimatischen Randbedingungen, Proportionen der natürlichen Landnutzung und Infiltrationsleistung wurden entsprechend den Szenarien des globalen Wandels angelegt.

5.3.5. Simulationen

Wie bereits die Anpassung der Regenreihen andeutet, wurden die Berechnungen als 30-jährige Langzeitsimulationen durchgeführt. Dennoch stellen die Ergebnisse einen statischen Zustand der Projektionen dar, da die Randbedingungen während Simulation nicht adaptiert werden konnten. Abgebildet wird der Zustand unter den angenommenen Bedingungen für das Jahr 2050.

Aus der Kombination der vier Zukunftsszenarien und Varianten der Entwässerungssysteme ergeben sich 16 Alternativen. Die Bezeichnungen der Alternativen kombinieren die eingeführten Kurzbezeichnungen die Namen. So bedeutet bspw. die Alternative wo_dwa die Kombination aus wachstumsorientiertem Zukunftsszenario und erweitert dezentralem Entwässerungssystem.

5.4. Darstellung und Diskussion einiger Ergebnisse

Auf Grund des Umfangs der Modellierung und der hohen Zahl an möglichen Zielparametern, kann die Darstellung nicht alle Ergebnisse abdecken. Es wurde versucht besonders relevante und aussagekräftige Aspekte auszuwählen. Alle Ergebnisse werden integrierend für

das Gesamtgebiet betrachtet. Für das Gewässereinzugsgebiet wird dies durch den Gebietsauslass repräsentiert.

5.4.1. Hydraulik

Die Einflüsse der Entwässerungssysteme auf die Hydraulik der Fließgewässer wurden am Beispiel von drei Parametern untersucht. Die Varianten des Entwässerungssystems wurden mit dem potentiellen natürlichen Zustand verglichen.

20-jähriges Hochwasser

In Abb. 36 sind die Spitzendurchflüsse des 20-jährigen Hochwassers für die Entwässerungsalternativen und den potentiellen natürlichen Zustand dargestellt. Wie ersichtlich wird, haben die veränderten Randbedingungen des Klimas und der Landnutzung auf den potentiellen natürlichen Abfluss deutliche Auswirkungen. Der Durchfluss des Lastfallszenarios ist gegenüber dem des linearen Szenarios um 43% erhöht.

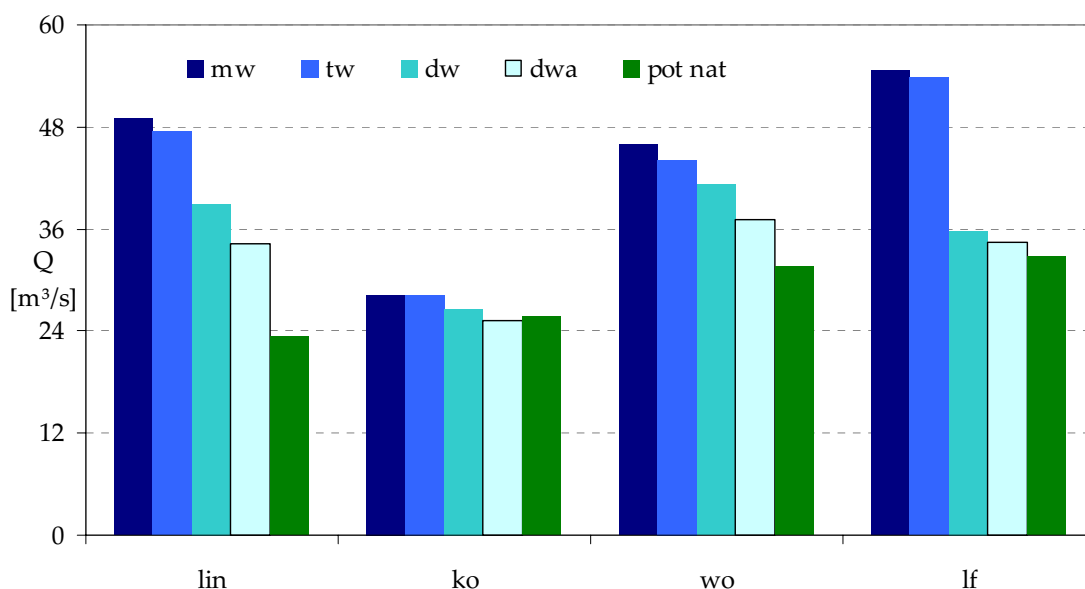


Abb. 36 Spitzendurchflüsse des 20-jährigen Hochwasser für die Alternativen und den potentiell natürlichen Zustand

Szenarienintern fällt die Reihenfolge der Spitzenabflüsse eindeutig für die unterschiedlichen Varianten aus. Das Mischsystem und das Trennsystem verursachen deutlich die höchsten Abflussspitzen gefolgt von dezentralem und erweitert dezentralem System. Die relativen Differenzen zwischen höchstem und niedrigstem szenarieninternem Abfluss variieren dabei stark, für das konservierende Szenario liegen sie bei 12%, für den Lastfall bei knapp 60%. Der überraschende Umstand, dass das Mischsystem einen höheren Abfluss erzeugt als das Trennsystem, kann eventuell durch verschieden ausgeprägte Überlagerung von Wellen erklärt werden (s. Abschnitt 4.4.2). Eine eingehendere Untersuchung wurde nicht durchgeführt.

Auffällig ist der Unterschied in der Reihenfolge der Spitzendurchflüsse zwischen dem potentiellen natürlichen Zustand und den Entwässerungssystemen. Der Umstand kann als die Überlagerung der Effekte von Siedlungsflächen und Klimawandel interpretiert werden. Der für die Hochwassergenese maßgebliche Starkregenfaktor k_{SR} (siehe. F. 21) ist für den linearen Fall am geringsten und für den Lastfall am höchsten. Die Siedlungsfläche nimmt im konservierenden Szenario am schwächsten zu, im Lastfall am stärksten. Aus der Kombination der Auswirkungen dieser und anderer hydraulisch relevanter Veränderungen resultieren die unterschiedlichen Proportionen in der Reihenfolge der Entwässerungsvarianten.

mittleres Hochwasser

Abb. 37 zeigt die Spitzendurchflüsse des mittleren Hochwassers der Entwässerungssysteme und die zweijährigen Hochwässer im potentiellen natürlichen Zustand. Die Auswahl der Ereignisse orientiert sich am hydraulischen BWK-M3 Kriterium (s. Abschnitt 4.4.2).

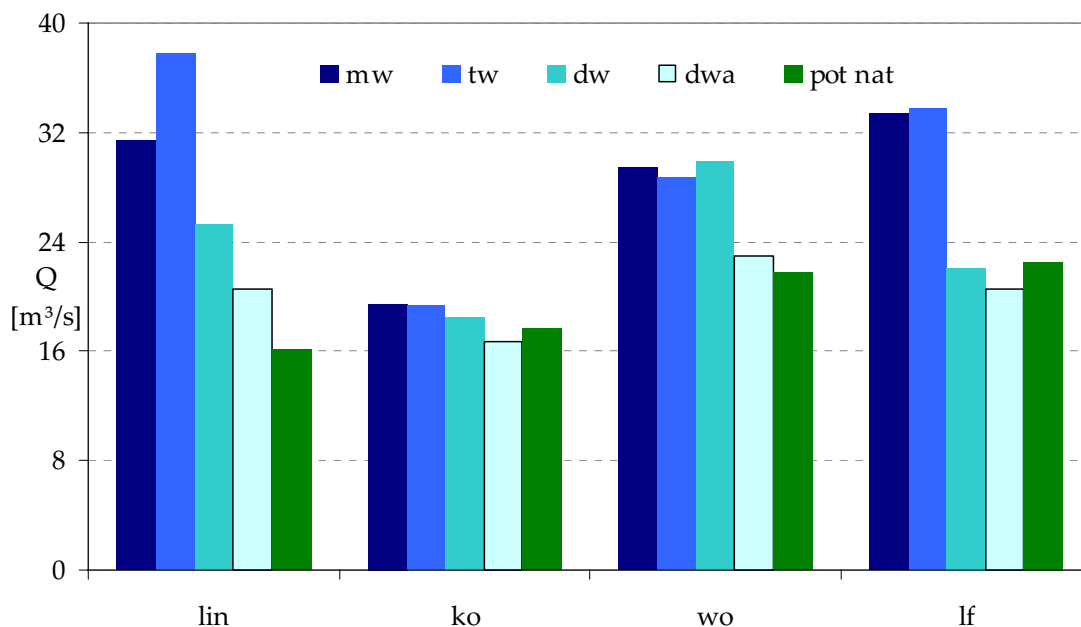


Abb. 37 Spitzendurchflüsse des einjährigen Hochwassers für die Alternativen und das zweijährige Hochwasser für den potentiell natürlichen Zustand

Für den pnZ können im Wesentlichen die Aussagen zum 20-jährigen Hochwasser übernommen werden. Die Abflüsse der Entwässerungssysteme zeichnen ein leicht anderes Bild. Für die Szenarien mit den höchsten Versiegelungsgraden- das Lastfall und lineare Szenario erzeugt das Trennsystem die größten Abflussspitzen. Sie sind im linearen Fall um 240% gegenüber dem potentiell natürlichen Abfluss erhöht. Die szenarieninterne Varianz der Spitzenabflüsse fällt für die mittleren Hochwässer höher aus bei den 20-jährigen. Selbst wenn man die Abflussspitze des Trennsystems im linearen Szenario als Ausreißer betrachtet, liegen die drei folgenden kleineren relativen Abweichungen bei über 60%. Die Variante des

Entwässerungssystems hat also auf Hochwasserereignisse kleinerer Wiederkehrintervalle einen größeren Einfluss.

Das hydraulische BWK-M3 Kriterium wird am betrachteten Abschnitt des Gebietsauslasses für die dezentrale und erweitert dezentrale Variante des konservierenden und Lastfall Szenarios erfüllt.

mittleres Niedrigwasser

Die Anzahl der Tage für die das regionalisierte mittlere Niedrigwasser des ist-Zustandes [LfUBW, 2004] unterschritten wird wurde mit einer MATLAB Routine ausgewertet. Dafür wurden die Intervalle gezählt in denen der MNQ nicht überschritten wird und die länger als 24 Stunden sind.

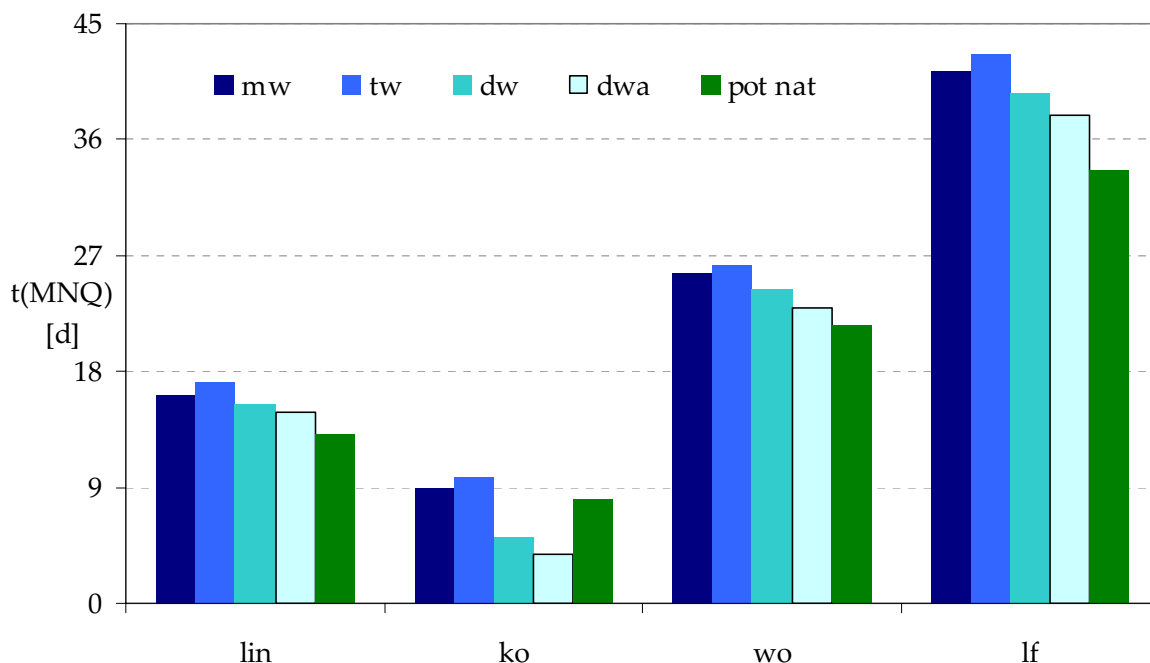


Abb. 38 Anzahl der Tage an denen das statistische MNQ für die Alternativen und den potentiell natürlichen Zustand unterschritten wird

Für die Auswertung wird ein starker Zusammenhang zu den Sommerniederschlägen deutlich. Die Alternativen weisen für alle Entwässerungsvarianten und den pnZ die umgekehrte Reihenfolge auf wie die Größe des Faktors für Sommerniederschläge (s. F. 21 und Tab. 21 bis Tab. 23). Je stärker also der Sommerniederschlag desto geringer die Anzahl der Niedrigwasserperioden. Die Entwässerungssysteme haben relativ wenig Einfluss auf das Niedrigwasser. Die maximale szenarieninterne Abweichung liegt für das konservierende Szenario bei 43%, für die anderen Szenarien bei unter 20%. Generell erzeugt das Trennsystem die längsten Trockenperioden, das erweitert dezentrale System die kürzesten.

5.4.2. stoffliche Belastung

Die Bedeutung der stofflichen Belastung und der Einfluss auf die Fließgewässer soll zunächst exemplarisch für drei Stoffe gezeigt werden. Anschließend werden kurze Anführungen zum Einfluss von Trockenwetter und Oberflächenabfluss auf die Belastung im Vorfluter gegeben.

Als Parameter wurden abfiltrierbare Stoffe, Phosphor und Kupfer gewählt, da sie exemplarisch für unterschiedliche Aspekte der Gewässerbelastung stehen. Sie gelangen zu unterschiedlichen Anteilen durch Trockenwetter und Oberflächenabfluss in das Entwässerungssystem. Die physisch-chemischen Auswirkungen der abfiltrierbaren Stoffe wurden bereits in Abschnitt 4.4.2 diskutiert. Phosphor ist ein Nährstoff für autotrophe Organismen und trägt zu Eutrophierung und damit zur biologischen Verarmung im Gewässer bei. Kupfer ist ein Spurenstoff der kumulativ toxisch wirkt. Es lagert sich in Sediment und Organismen ein.

abfiltrierbare Stoffe

Abb. 39 zeigt die Gegenüberstellung der jährlichen Frachten abfiltrierbarer Stoffe im Fließgewässer und in Folge der Siedlungstätigkeit, als Summe aus Trockenwetterfracht und Oberflächenabfluss von Siedlungsflächen.

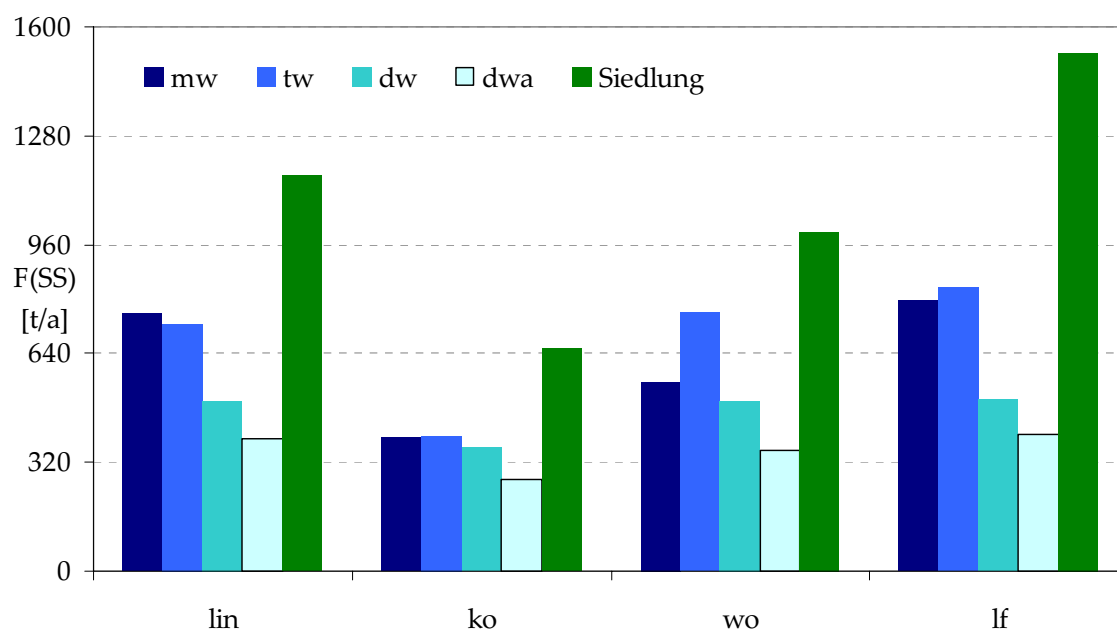


Abb. 39 Jährliche Frachten abfiltrierbarer Stoffe als Eintrag in das Fließgewässer durch die Entwässerungsvarianten und anthropogener Anfall

Der stärkste Anfall abfiltrierbarer Stoffe entsteht im Lastfall Szenario, es folgen lineares, wachstumsorientiertes und konservierendes Szenario. Der Unterschied zwischen größter und kleinster Gesamtfracht liegt bei 156%. Die Entwässerungssysteme können zwischen 35 und 74% oder durchschnittlich 51% der anfallenden Partikel zurückhalten. Wobei die beiden

dezentralen Systeme die für alle Szenarien die höheren Rückhaltegrade erreichen. Für Szenarien mit hohen Starkregenspitzen (wo und lf) verursacht das Trennsystem die stärksten Belastungen abfiltrierbarer Stoffe im Gewässer. Für konservatives und lineares Szenario sind Mischsystem und Trennsystem in etwa gleich effizient. Die szenarieninternen Unterschiede der Entwässerungssysteme liegen zwischen 54%, das Entwässerungssystem hat also einen vergleichsweise großen Einfluss auf die Partikelbelastung des Vorfluters.

Phosphor

Für die Phosphorbelastung (Abb. 40) bestehen ähnliche Zusammenhänge wie für die abfiltrierbaren Stoffe. Der Unterschied zwischen stärkstem und schwächstem Anfall beträgt 161% bei gleicher Reihenfolge der Szenarien. Die Rückhaltewirkung der Entwässerungssysteme ist tendenziell größer als für die Partikel, sie liegt zwischen 48 und 81%, im Mittel bei 67%.

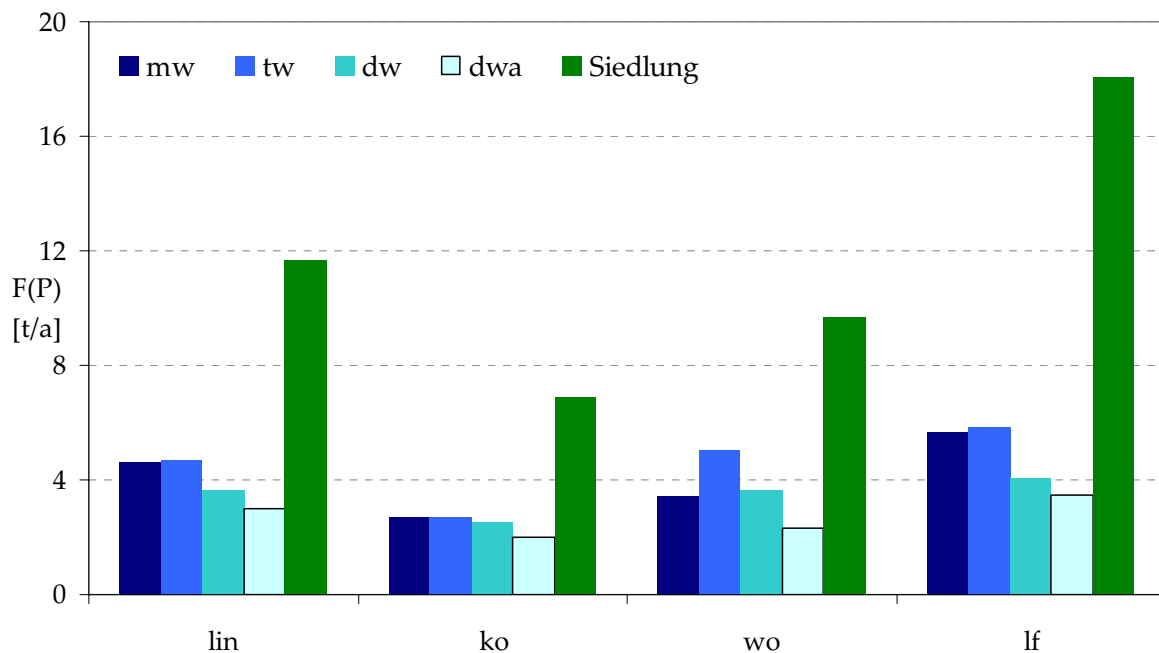


Abb. 40 Jährliche Frachten Phosphor als Eintrag in das Fließgewässer durch die Entwässerungsvarianten und anthropogener Anfall

Beim Phosphorrückhalt stellt das Trennsystem generell die am wenigsten effiziente Variante dar, es folgen Mischsystem, dezentrales und erweitert dezentrales System. Die szenarieninterne Variabilität ist geringer als für die Partikelbelastung sie beträgt im Mittel 34%, damit hat die Wahl des Entwässerungssystems einen kleineren Einfluss auf die Phosphorbelastung im Vorfluter.

Kupfer

Die jährliche Kupferfracht im Siedlungsgebiet und Belastung des Vorfluter ist in Abb. 41 dargestellt. Auch hier manifestiert sich die Szenarienreihenfolge für die Gesamtfracht, die Unterschiede fallen aber mit 86% deutlich geringer aus als für die beiden anderen untersuchten Stoffe. Die Reinigungsleistung ist mit 9 bis 60% oder durchschnittlich 28% deutlich geringer als für Phosphor und Partikel.

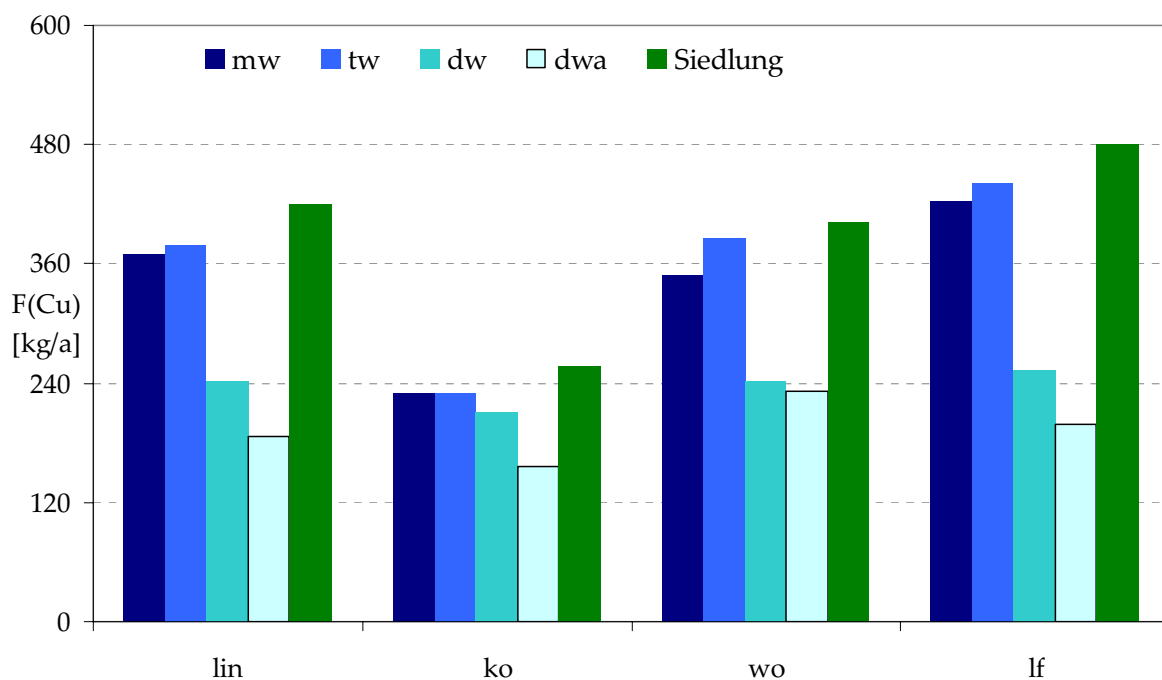


Abb. 41 Jährliche Frachten Kupfer als Eintrag in das Fließgewässer durch die Entwässerungsvarianten und anthropogener Anfall

Die Reihenfolge der Varianten innerhalb eines Szenarios ist stabil. Das Trennsystem verursacht den größten Abschlag von Kupfer, gefolgt von Mischsystem, dezentralem und erweitert dezentralem System. Die relative Abweichung zwischen den Entwässerungsvarianten beträgt szenarienintern im Mittel 44%, sie liegt damit zwischen den Werten für filtrierbare Stoffe und Phosphor.

5.4.3. Einfluss von Trockenwetter und Oberflächenabfluss

Es sollen nun die Einflüsse der verschiedenen Schadstoffquellen auf die Belastung im Fließgewässer untersucht werden. Für die im vorigen Abschnitt vorgestellten Parameter werden ihre Verteilung in Trockenwetter- und Oberflächenabfluss dargestellt und der Anteil in den Kläranlagen zurückgehaltener und im Fließgewässer entlasteter Frachten gegenübergestellt. Der Einfluss wird für das Lastfall und konservierende Szenario verglichen, da diese die größten Unterschiede bezüglich Stoffaufkommen und Eintrag ins Fließgewässer aufwiesen.

Der Vergleich der Frachten von Oberflächenabflüssen aus Siedlung (Siedlung) und Trockenwetter (Trockenw.) zeigt, dass sich die Zusammensetzung der Quellen stoffspezifisch unterscheidet. Wie Abb. 42 und Abb. 43 zeigen, ist der Oberflächenabfluss Ursache für 100% der Gesamtkupferfracht. Für des konservierende und Lastfall Szenario stammen szenarienspezifisch 82% bzw. 79% der abfiltrierbaren Stoffe und 63% bzw. 60% der Phosphorbelastung aus der Belastung der Siedlungsflächen. Der gegenüber realen Systemen deutlich erhöhte Einfluss des Oberflächenabflusses kann dadurch erklärt werden, dass nur Teile des Kanalsystems und der Trockenwetterbelastung abgebildet werden. Wie bereits in Abschnitt 4.3.1 erläutert wurde fehlen die Angaben für einzelne Weiler und Ortschaften die im Einzugsgebiet aber nicht auf dem Gemeindegebiet liegen. Für die Szenarien entwässern in der Mischsystemvariante zwischen 56 und 64% der versiegelten Flächen in das Kanalnetz. Geht man von einem konstanten Trockenwetteranfall pro Siedlungsfläche aus müsste sich also die gesamte Trockenwetterfracht im Gebiet knapp doppelt so hoch liegen.

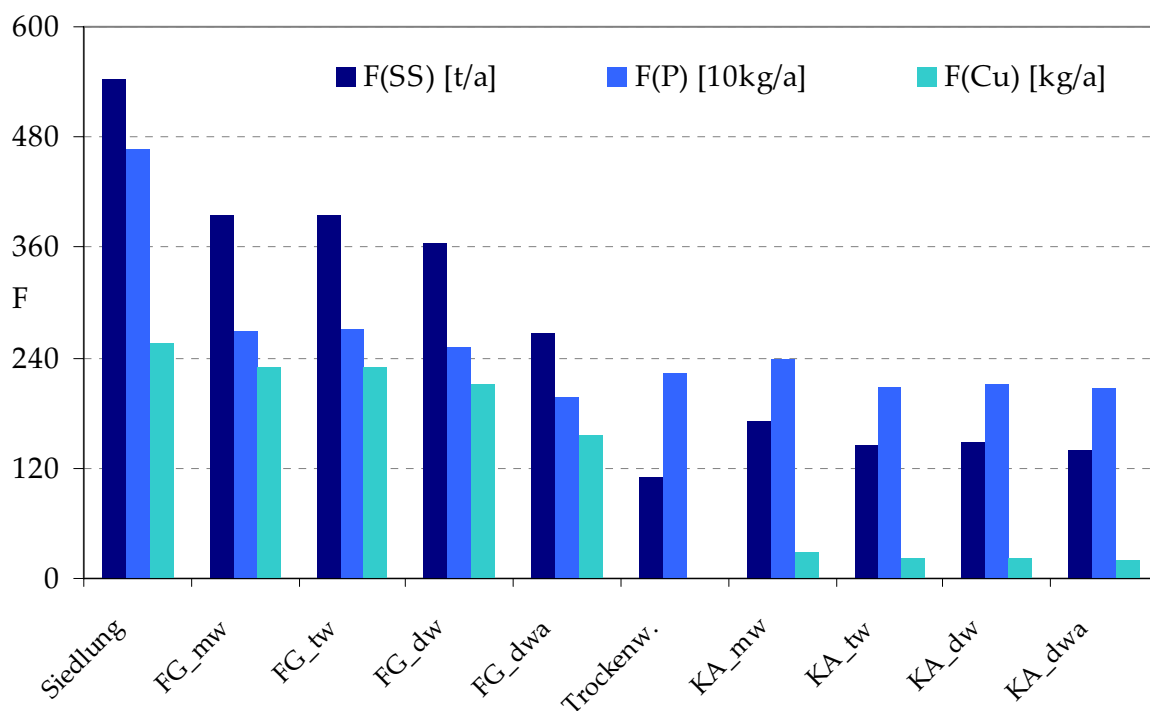


Abb. 42 Frachten von Siedlungsflächen, im Fließgewässer, aus Trockenwetterabfluss und an den Kläranlagen für das konservierende Szenario

Vergleicht man für das konservierende Szenario (Abb. 43) zunächst die Jahresfrachten von Trockenwetter und Kläranlagenzulauf der verschiedenen Varianten wird deutlich, dass den Kläranlagen für abfiltrierbare Stoffe und Kupfer in der Jahresbilanz mehr Fracht zugeführt wird als im Trockenwetterabfluss entsteht. Es werden 54 bis 23% mehr abfiltrierbare Stoffe und zwischen 7 und 11% der gesamten Kupferfracht zugeleitet. Für Phosphor kommt es in der Bilanz nur bei Erweiterung im Mischsystem zu einer Frachterhöhung gegenüber der Tro-

Trockenwetterfracht, für die anderen Varianten zu einer Verringerung, also Frachtentlastung durch das Entwässerungssystem. In Anbetracht des hohen Anteils direkter Siedlungsabflüsse leisten die Kläranlagen vor allem für den Anfall von Kupfer und Partikeln einen relativ kleinen Anteil an Rückhalt gegenüber dem Eintrag ins Fließgewässer. Die Frachtzufuhr zur Kläranlage ist im szenarieninternen Vergleich nur für das Mischsystem leicht erhöht und für die anderen Varianten weitgehend konstant. Die Wahl des Entwässerungssystems hat also unter den gegebenen Randbedingungen relativ geringe Auswirkungen auf die stoffliche Auslastung der Kläranlagen.

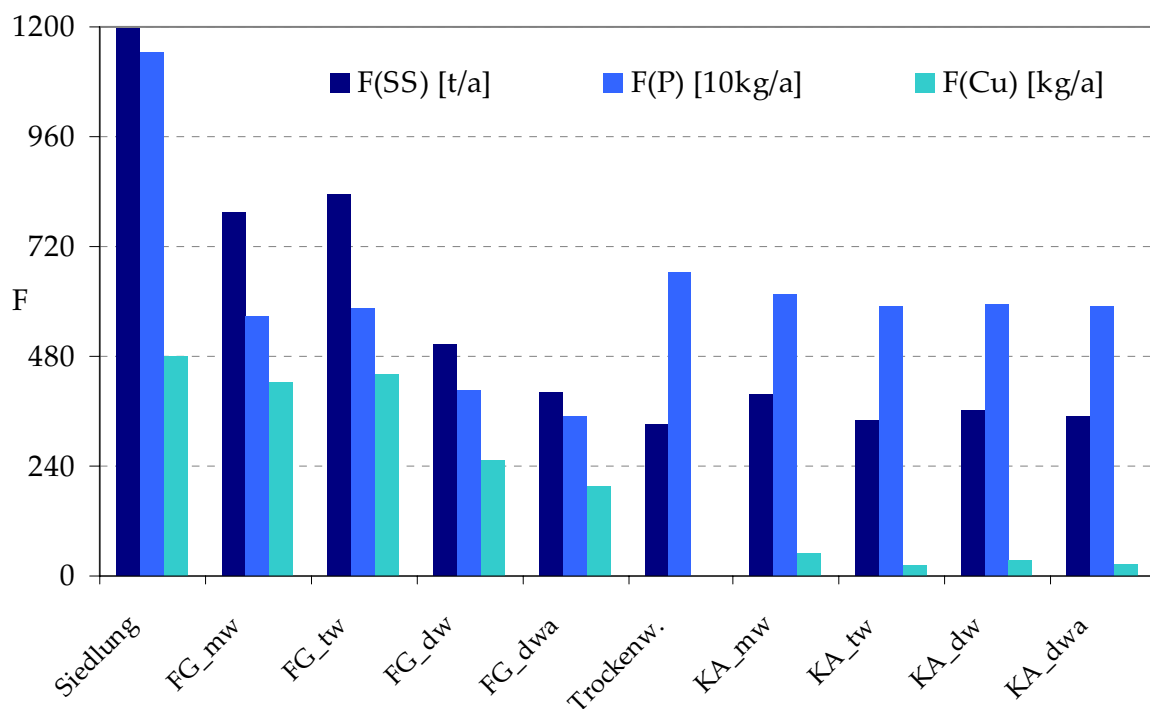


Abb. 43 Frachten von Siedlungsflächen, im Fließgewässer, aus Trockenwetterabfluss und an den Kläranlagen für das Lastfall Szenario

Ein weitgehend ähnliches Bild ergibt sich für das Lastfall Szenario. Die relative Frachterhöhung gegenüber dem Trockenwetteranfall an den Kläranlagen fällt geringer aus als für das konservierende Szenario, was auf eine erhöhte Auslastung der Anlagen hinweist. Für den Lastfall kommt es bei allen Varianten in der Bilanz zu einer Entlastung der Phosphorfracht, sie fällt jedoch für das Mischsystem am geringsten aus. Insgesamt hat jedoch auch für dieses Szenario die Auswahl des Entwässerungssystems eine untergeordnete Auswirkung auf die stoffliche Zufuhr zur der Kläranlage.

Trotz der weitgehend gleichförmigen Auslastung der Kläranlagen durch die verschiedenen Varianten, fällt die stoffliche Belastung des Vorfluters deutlich unterschiedlich aus, die Aspekte wurden bereits diskutiert. Den einzigen weiteren Senkenterm für stoffliche Belastung im Vorfluter stellt die Versickerung in das Grundwasser dar. Aus der Kombination der bei-

den Senken wird ersichtlich wie die Reihenfolge der stofflichen Belastung durch die Varianten entsteht. Für die dezentralen Varianten wird durch die Versickerung ein größerer Anteil der Stoffbelastung zurückgehalten, für das Mischsystem ist die Zufuhr (und damit der Rückhalt) in den Kläranlagen erhöht. Das Trennsystem vereint die Nachteile eines geringen Anteils an Versickerung und einer verminderten Zufuhr zur Kläranlage, dadurch sind die Gewässerbelastungen aus diesem System am höchsten.

5.4.4. Wasserhaushalt

Analog zu den Ausführungen im Abschnitt 4.4.3 soll auch für die Szenarienzustände der Wasserhaushalt betrachtet werden. Der Schwerpunkt wird dabei auf die Unterschiede in den Bilanzgrößen zwischen potentiell natürlichem Zustand und den Siedlungsflächen für die Alternativen gelegt werden. Betrachtet wird wiederum die relative angepasste Wasserbilanz nach F. 10.

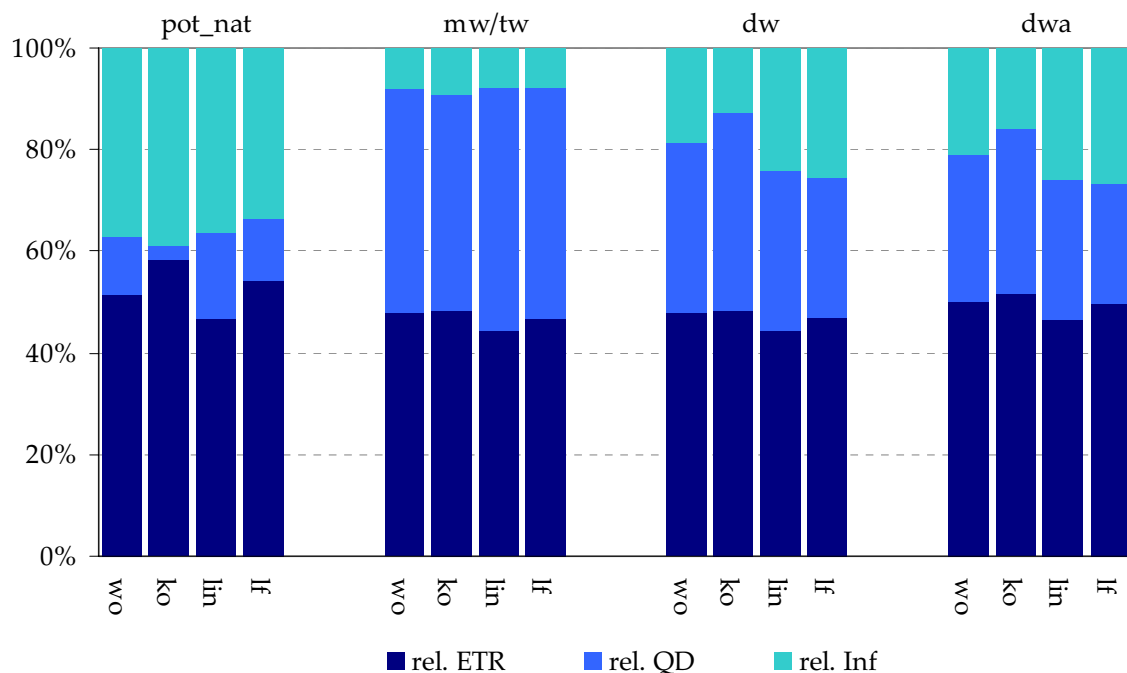


Abb. 44 relative Anteile der Wasserhaushaltskomponenten für die den potentiellen natürlichen Zustand und die Alternativen

Zunächst wird bei Betrachtung des pnZ der Szenarien (Abb. 44, pot_nat) deutlich, dass die klimatischen Randbedingungen und veränderten Proportionen der natürlichen Landnutzung einen deutlichen Einfluss auf den Wasserhaushalt haben. Die Infiltration zeigt bei den Anteilen am Wasserhaushalt die gleiche Reihenfolge wie der Infiltrationsfaktor nach F. 29. Wobei der Einfluss geringer als direkt proportional ist, die Infiltrationen liegen alle im Bereich von 5% Abweichung von der Infiltration im ist-Zustand (Abb. 28). Die Verdunstung ist sowohl vom angepassten Wert der potentiellen Verdunstung als auch vom Sommernieder-

schlag abhängig. So weist das konservierende Szenario, bei dem die Sommerniederschläge erhöht sind, eine größere relative Verdunstung auf als der Lastfall, bei dem die potentielle Verdunstung am stärksten zunimmt. Die geringste Verdunstung entsteht beim linearen Szenario. Gegenüber dem ist-Zustand kommt es für alle außer dem konservierenden Szenario zu einer Verringerung der Verdunstung gegenüber dem ist-Zustand. Der direkte Abfluss des pnZ ist für die verschiedenen Szenarien hoch variabel, er ist für das konservierende Szenario deutlich am geringsten, gefolgt von wachstumsorientiertem, Lastfall und linearem Szenario. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Entstehung von direktem Abfluss aus der Kombination der Randbedingungen von Klima und Landnutzung abhängt und ein großes Beeinflussungspotential enthält. Die in Abb. 44 ebenfalls dargestellten relativen Wasserbilanzen für die Alternativen bestätigen die Tendenzen die auch schon für den ist-Zustand festgestellt wurden. Es kommt zu einer leichten Abnahme der Verdunstung, einer deutlichen Abnahme der Infiltration und einer deutlichen Zunahme des direkten Abflusses. Misch- und Trennsystem wurden für die Betrachtung zusammengefasst, weil die Unterschiede der Wasserhaushaltskomponenten für beide System bei maximal 2% lagen.

Abb. 45¹ verdeutlicht die Zusammenhänge, indem es die Differenzen der relativen Wasserhaushaltskomponenten zwischen potentiell natürlichem Zustand und Entwässerungssystem darstellt.

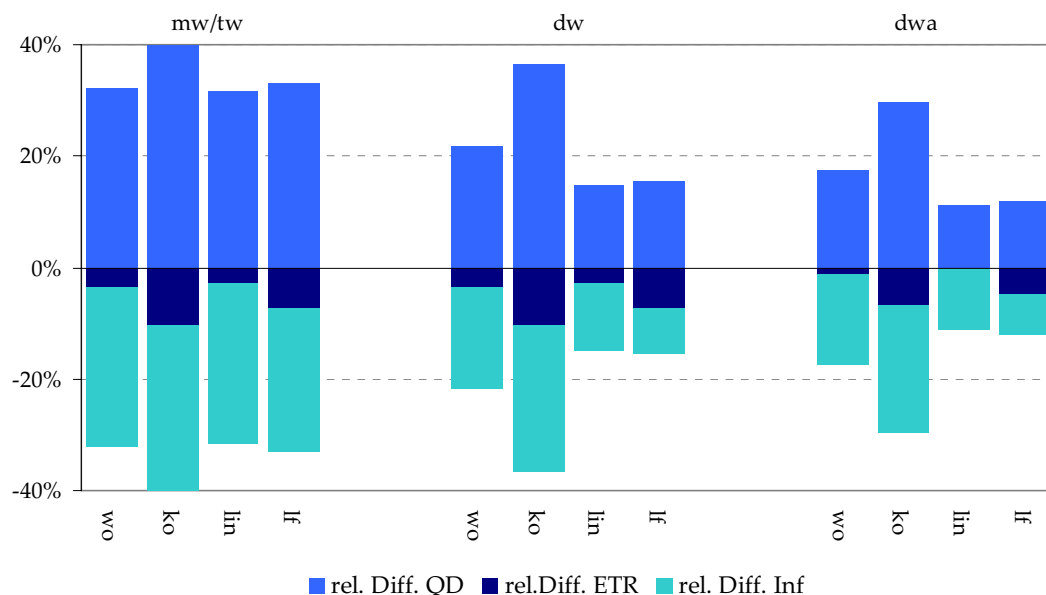


Abb. 45 Absolutwerte der relativen Unterschiede der Wasserhaushaltskomponenten zwischen den Alternativen und dem potentiellen natürlichen Zustand

¹ Die in der Grafik dargestellten Angaben entsprechen den absoluten Differenzen der relativen Wasserhaushaltsgrößen. Um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Varianten zu erreichen, werden im Text werden die relativen Unterschiede (Verhältniswerte) diskutiert

Die größten Veränderungen des Wasserhaushaltes entstehen durch Misch- und Trennsystem. Die direkte Abflussmenge wird für alle Szenarien zumindest verdoppelt und steigt für das konservierende Szenario auf das 14 fache des potentiell natürlichen Zustandes an. Die Verdunstung nimmt um 7 bis 18% ab, die Infiltration um durchschnittlich 78% gegenüber dem natürlichen Einzugsgebiet reduziert. Durch die dezentrale Regenentwässerung kann die verminderte Infiltration zum Teil ausgeglichen werden, die mittlere Abnahme liegt bei 48%, die Verdunstung wird etwa um die gleichen Beträge verringert wie für Misch- und Trennsystem. Für das erweitert dezentrale System wird die Verdunstung weniger reduziert, im linearen Fall kann das Defizit zum pnZ sogar ausgeglichen werden. Die Infiltration wird ebenfalls erhöht, so dass der Unterschied zum natürlichen Gebiet bei maximal 40% der Gesamtinfiltration liegt.

Im konservierenden Szenario bedeuten die Siedlungseingriffe die größte Veränderung im Wasserhaushalt. Die Eigenschaften der Landnutzung (größter Waldanteil der Szenarien) und des Bodens (größte Infiltrationsrate) weisen die stärksten Unterschiede zu den Eigenschaften von Siedlungsflächen auf. Auch ist die Verminderung des Siedlungseinflusses durch dezentrale und erweitert dezentrale Variante hier am geringsten, da der relative Anteil des im Mischsystem ausgeführten Bestandes am größten ist. Die geringsten Veränderungen gegenüber dem natürlichen Zustand und die stärksten Beeinflussungen durch das Entwässerungssystem erfahren lineares und Lastfallszenario, aus den gleichen Gründen wie beim konservierenden Szenario aber mit umgekehrten Vorzeichen.

5.4.5. Kostenrechnung

Die Investitions- und Betriebskosten der Szenarien wurden über eine Kostenvergleichsrechnung für einen Bezugszeitraum von 50 Jahren ausgewertet. Für Varianten in denen Elementen eine kürzere Lebensdauer als den Bezugszeitraum haben, wurden Reinvestitionen mit in die Betrachtung einbezogen. Die Berechnungen orientieren sich an den Vorgaben zur dynamischen Kostenrechnung nach [LAWA, 1998]

Grundlagen

Als finanzmathematische Grundlage wurde für alle Szenarien ein Zinssatz von 2,5% und eine Preissteigerung von 1,5% angenommen. Für das wachstumsorientierte und konservierende Szenario wären, entsprechend der storyline, auch Abweichungen von diesen Werten als Ausdruck von Investitionsanreiz bzw. Einlageanreiz denkbar gewesen. Dadurch wären aber innerhalb des Szenarios die Kosten lediglich um einen Faktor skaliert worden. Aus diesem Grund und um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen Szenarien zu ermöglichen, wurden Zinssatz und Preissteigerung homogen gewählt. In Tab. 26 ist eine Übersicht über die im

Kostenvergleich berücksichtigten Maßnahmen dargestellt. Die Kosten beziehen sich jeweils auf Investition und Betrieb.

Tab. 26 In der Kostenvergleichsrechnung berücksichtigte Aspekte

Szenario	Kosten für
dezentral	Rigolen der Neuanschlussflächen
erweitert dezentral	Schmutzwasserkanäle der Neuanschlussflächen
	Rigolen der Neuanschlussflächen und 20% der Bestandsflächen
	Gründächer auf 20% der Gesamtdachflächen
	Zisternen zur Deckung von 20% des Wasserbedarfs
Mischsystem	Schmutzwasserkanäle auf Neuanschlussflächen
	Mischwasserkanäle auf Neuanschlussflächen
	Austausch überlasteter Kanäle im bestehenden System
Trennsystem	Regenwasserkanäle auf Neuanschlussflächen
	Schmutzwasserkanäle auf Neuanschlussflächen
	Zubringerleitungen von den Neuanschlussflächen zu den Vorflutern

Tab. 27 spezifische Investitions- und Betriebskosten, Betriebsdauer von Entwässerungsanlagen

Maßnahme	spezifische Investitionskosten	spezifische Betriebskosten	Betriebsdauer
Zisterne	500 € / m ³	10 € / m ³ *a	25
Gründach, extensiv	25 € / m ²	0.80 € / m ² *a	25
Rigole	30 € / m ²	0.10 € / m ² *a	30
Leitung DN 300 (TW-RW-MW)	303 € / m	0,50-2,00-2,50 € / m*a	80
Leitung DN 400 (TW-MW)	319 € / m	0,50-2,50 € / m*a	80
Leitung DN 500 (TW-MW)	352 € / m	0,50-2,50 € / m*a	80
Leitung DN 800 (TW-MW)	495 € / m	0,50-2,50 € / m*a	80
Leitung DN 1000 (TW-MW)	652 € / m	0,50-2,50 € / m*a	80
Regenüberlaufbecken	1500 € / m ³	10 € / m*a	50

Die Daten zu den Kosten für die Maßnahmen entstammen einer Datenbank, die in dem verwendeten Excel-Tool zur Kostenvergleichsrechnung [Emscher Genossenschaft, 2005] implementiert war. Tab. 27 gibt eine Auflistung zu den Investitions- und Betriebskosten der einzelnen Maßnahmen.

Grundlagen der Berechnung

Als Investitionskosten (IK) werden im Folgenden die Kosten für einmalige Ausgaben zusammengefasst. Sie umfassen Mittel für Erstellung und Erneuerung von Anlagen. Die Inves-

titionskosten ergeben sich aus der Multiplikation von spezifischen Kosten (s. Tab. 27) und den Dimensionen der Maßnahmen

$$IK = k_s * d_s$$

F. 14 Kosten

mit IK Investitionskosten [€]
 k_s spez. Kosten [€/Einh.]
 d_s Anzahl der Einheiten [Einh. z. B. m, m², m³]

Die Betriebskosten (BK) beschreiben laufende Ausgaben, die wiederholt anfallen z. B. für Personal, Betrieb und Instandhaltung. Sie ergeben sich analog zur Berechnung der Kosten aus der Multiplikation der spezifischen Betriebskosten entsprechend Tab. 27 mit den Ausmaßen der Maßnahmen.

$$PKBW = IK_0 + \sum_{j=0}^n \left((1+r)^j * \frac{(1+i)^j - (1+r)^j}{(1+i)^j * (1-r)} * BK_0 \right)$$

F. 15 Projektkostenbarwert

Mit IK_0 Investitionskosten zum Investitionszeitpunkt [€]
 r Preissteigerungsrate [-]
 i Zinsrate [-]
 BK_0 Betriebskosten zum Investitionszeitpunkt

Der Projektkostenbarwert (PKBW) umfasst die kumulierten Kosten für Betrieb und Investition über die Dauer des Betrachtungszeitraums, er bezieht die Diskontierung der Kosten bis zu einem Bezugszeitpunkt mit ein. Für die Untersuchung wurden progressive Steigerungen der Kosten entsprechend der Preissteigerungsrate einbezogen.

Auswertung

Die Berechnungen wurden auf Grundlage der in Abschnitt 5.3 (Umsetzung im Modell) bestimmten Abmessungen durchgeführt.

Am Beispiel des Lastfall Szenarios soll die Entwicklung der kumulierten Kosten erläutert werden. Zum Investitionszeitpunkt liegen die Kosten für das dezentrale System am geringsten. Es folgen das erweitert dezentrale, das Misch- und Trennsystem. Die Anstiege der Geraden repräsentieren die jährlich anfallenden Betriebskosten, sie sind für dezentrales und Trennsystem geringer als für Misch- und erweitert dezentrales. Sprünge im Verlauf der Kosten bedeuten Reinvestitionen. Im erweitert dezentralen System werden nach 25 Jahren die Gründächer und Zisternen erneuert, nach 30 Jahren müssen die Rigolen ersetzt werden. Schneiden sich zwei Kostenverläufe, stellt der Abszissenwert des Schnittpunktes den Zeitpunkt der Rentabilitätsschwelle einer Alternative dar. Für das gegebene Beispiel ist diese

Auswertung wenig relevant, da die dezentrale Variante über den gesamten Betrachtungszeitraum die geringsten kumulierten Kosten aufweist, also am rentabelsten ist. Am Endzeitpunkt des Betrachtungsintervalls kann der Projektkostenbarwert abgelesen werden. In Abb. A 7 werden die kumulierten Verläufe für die Kosten der anderen Alternativen dargestellt.

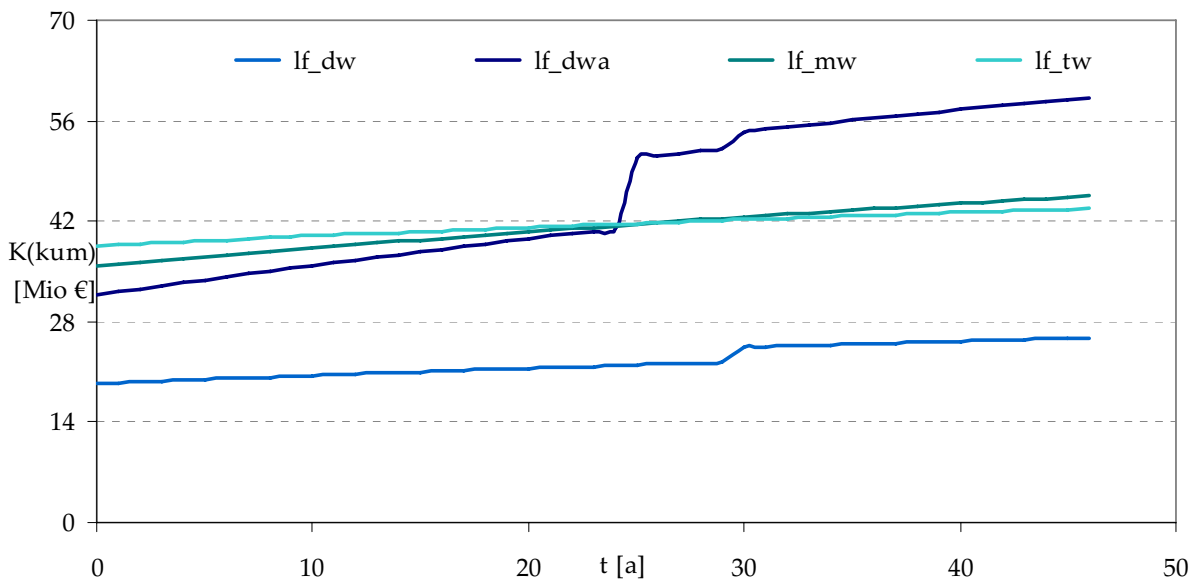


Abb. 46 Verlauf der kumulierten Kosten für die Entwässerungsvarianten im Lastfall Szenario

Abb. 47 gibt eine Übersicht über die Kosten der einzelnen Szenarien. Es zeigt sich, dass die Kosten für die Szenarien nicht proportional sind und je nach Bewertungsgröße eine unterschiedliche Reihenfolge aufweisen. Die einfache dezentrale Variante stellt jedoch für alle Bewertungsgrößen und alle Szenarien die günstigste Variante dar. Der PKBW ist für alle Szenarien bei der erweiterten dezentralen Variante am höchsten. Bei den Betriebskosten rangiert jeweils die einfache dezentrale Variante vor Trennsystem, Mischsystem und erweiterter dezentraler Variante. Bei den Investitionskosten besteht bei konservierendem und wachstumsorientiertem Szenario die Reihenfolge einfach dezentral, Mischsystem, Trennsystem, erweitert dezentral. Für das lineare Szenario ist die erweitert dezentrale Variante günstiger als das Trennsystem, für den Lastfall günstiger als Misch- und Trennsystem.

Wie in Abb. 47 zu sehen ist, steigen die Kosten für die erweitert dezentrale Variante langsamer als für die anderen Maßnahmen, dies liegt vor allem am Einfluss der Zisternen, deren Volumen nicht nur an die Landnutzungsänderung geknüpft ist, sondern auch an den Wasserverbrauch. Die Zisternen machen auch, obwohl sie für die Zielstellungen der Regenentwässerung von untergeordneter Bedeutung sind, einen wesentlichen Anteil der Kosten aus.

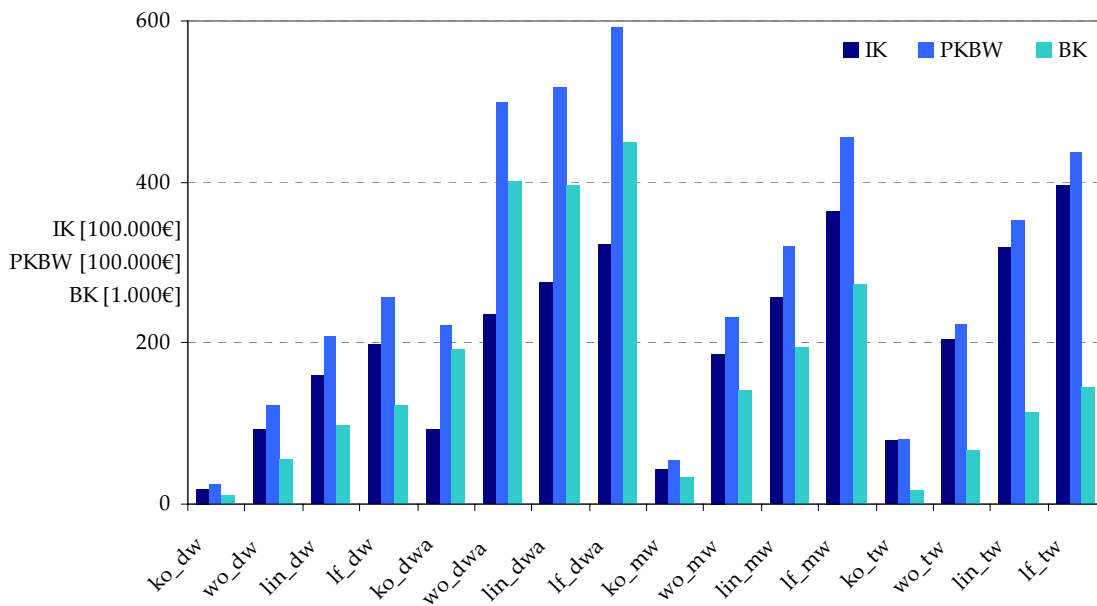


Abb. 47 Übersicht über Investitions- und Betriebskosten und Projektkostenbarwerte der Szenarien

Abb. 48 zeigt den Verlauf der kumulierten Kosten für die verschiedenen Szenarien der erweitert dezentralen Variante mit (blaue Grafen), und ohne (grüne Grafen) Berücksichtigung der Zisternen. Für die Kosten des erweitert dezentralen Systems ist des weiteren zu bedenken, dass sich die Maßnahmen nicht nur auf die Neuanschlüsse beziehen sondern gewissermaßen einen Grundstock von Maßnahmen in 20% des Bestandes enthalten Beim Trennsystem bilden die Sammelleitungen, die das Wasser zum Vorfluter transportieren eine für alle Szenarien konstante Investitionsbasis. Auch für die Entwässerung im Mischsystem ergibt sich ein nicht-linearer Zusammenhang, da die Länge der Austauschstrecken nicht proportional zur Fläche der Neuanschlüsse verläuft.

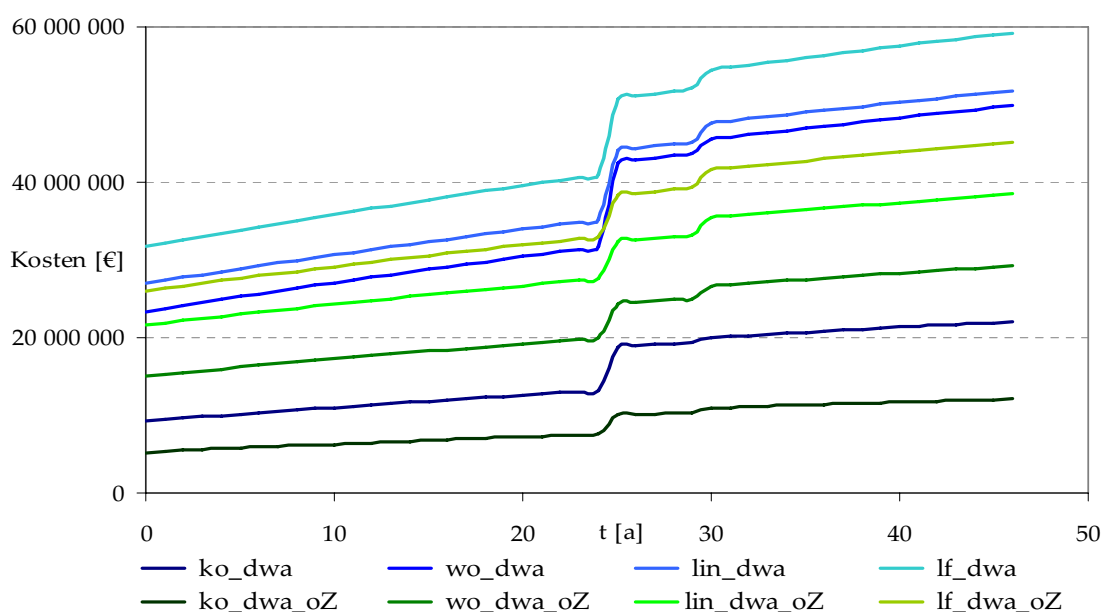


Abb. 48 kumulierte Kosten der erweitert dezentralen Varianten mit und ohne Zisternen

5.4.6. Überlauf aus Retention

Abb. 49 zeigt das durchschnittliche jährliche Überlaufvolumen aus Retentionsräumen. Einbezogen wurden die Regenüberlaufbecken und Stauraumkanäle, Rigolen und Gründächer. Die Zisternen wurden nicht als Retentionselemente angesehen da ihr Über- bzw. Durchlaufen vorgesehener Planungsaspekt ist.

Für Trennsystem, dezentrale und erweitert dezentrale Variante sind die Zusammenhänge des Entlastungsvolumens uneindeutig. Es kann kein klar besseres System ausgemacht werden, allerdings neigen die dezentralen Systeme für die Szenarien mit den höheren Starkregenniederschlägen (wo, lf) zu höheren Entlastungsvolumen als das Trennsystem.

Das Mischsystem weist mehr oder weniger deutlich für alle Szenarien das größte Entlastungsvolumen auf, eine Ursache kann darin gesehen werden, dass die pauschale Annahme der linearen Vergrößerung (s. F. 11) eine unzureichende Vereinfachung darstellt. Für zukünftige Umsetzung sollte von diesem Vorgehen abgesehen werden.

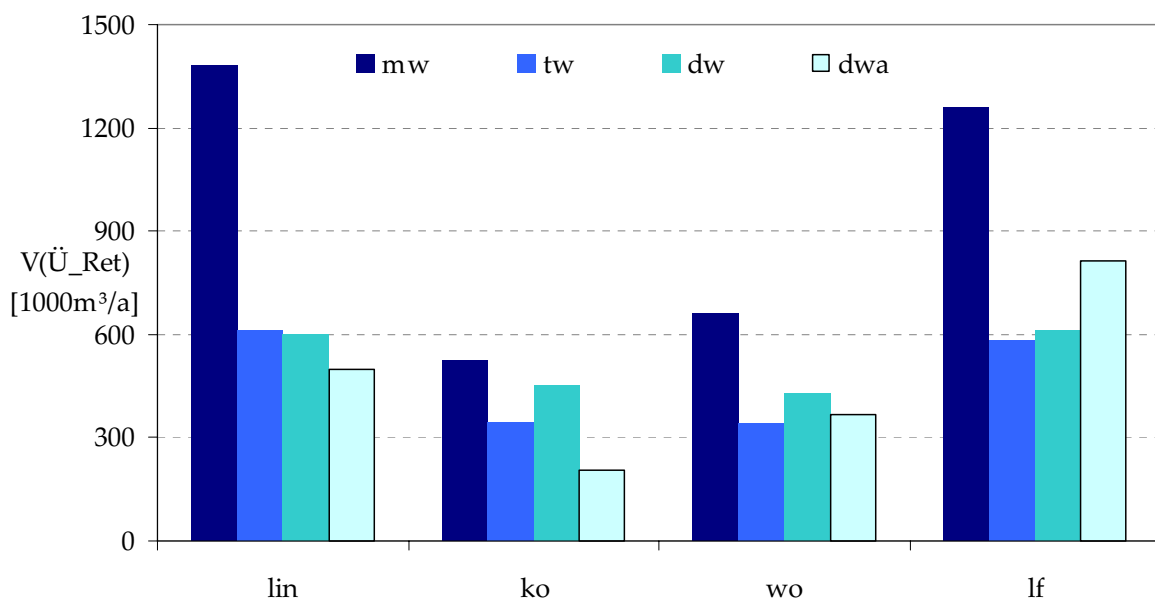


Abb. 49 jährliches Überlaufvolumen aus den Retentionsmaßnahmen

Im ersten Abschnitt wird auf Möglichkeiten und Vorgehensweise beim multikriteriellen Vergleich von Systemalternativen eingegangen. Die Nutzwertanalyse wird ausführlicher eingeführt und ein dreidimensionales Kreissektorendiagramm zur verbesserten Darstellung erläutert. Es werden statistisch begründete Parameter vorgestellt, die eine erweiterte Evaluation des Systemwertes erlauben. Im zweiten Abschnitt wird die Nutzwertanalyse für den Anwendungsfall umgesetzt, dabei wird auf die Besonderheiten bei der Abbildung des globalen Wandels eingegangen. Der dritte Abschnitt zeigt Ergebnisse der Nutzwertanalyse und die Anwendung der Systemwertparameter für das bestehende System.

6.1. Methodik des multidimensionalen Alternativenvergleichs

Die Bewertung von Alternativen nach unterschiedlichen Kriterien ist ein in der Wasserwirtschaft seit langem anerkannter Grundsatz. Mit dem Entwurf der 4-Konten der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser [LAWA, 1981] wurde ein konzeptioneller Rahmen definiert, nach dem die Verbesserung der Lebensqualität durch:

Verbesserung der **gesamtwirtschaftlichen Effizienz**,

Verbesserung der **Umweltqualität**,

Förderung der **Regionalentwicklung** und

Verbesserung des **sozialen Wohlbefindens**

bei der Planung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen optimiert werden soll.

6.1.1. Möglichkeiten beim Vergleich von Alternativen

Kosten-Wirksamkeits-Analyse

Die monetär erfassbaren Kosten einer Maßnahme werden, z. B. im Rahmen einer Kostenvergleichsrechnung erhoben und mit monetär nicht bewertbaren Wirkungen der Maßnahme ins Verhältnis gesetzt [DVWK, 1993].

Interessenausgleich – trade-offs

Bestehen bei der Planung von Maßnahmen konkurrierende Zielvorgaben verschiedener Entscheidungsträger, ist ein Vergleich von Alternativen im Sinne eines Interessenausgleichs möglich. [Keeney, 1993] gibt zahlreiche Beispiele aus unterschiedlichen gesellschaftlichen Bereichen zur Umsetzung dieses Vorgehens. So wird z. B. im Zusammenhang mit der Luftverschmutzung gezeigt, wie u. a. gesundheitliche, psychologische, umweltbezogene, soziale

und ökonomische Interessen über quantitative und qualitative Parameter gegeneinander abgewogen werden.

analytic hierarchy process

Das Vorgehen ist eine Weiterentwicklung der Nutzwertanalyse. Es basiert auf dem paarweisen Vergleich von Alternativen, wobei vergleichsintern der Wert der Zielparameter aller Kriterien permutiert wird. Im Gegensatz zum additiven Ansatz der Nutzwertanalyse werden Zielwertmatrizen multipliziert, wodurch es zu einem schärferen Ausschluss schlechter und inhomogener Alternativen kommt. Das Verfahren ist sehr rechenintensiv und wird in der Regel mit speziellen Programmen ausgeführt. Informationen zu Verfahren und Anwendung gibt [Saaty, 1990].

6.1.2. Vorgehen bei der Nutzwertanalyse

Für die vorliegende Arbeit wurde die Nutzwertanalyse (NWA) ausgewählt. Sie vereinigt die Vorzüge einer etablierten Methodik, Transparenz und Nachvollziehbarkeit in der Anwendung mit flexiblen und adaptiven Bewertungskriterien. Theoretische Grundlagen werden bspw. in [Eisenführ, 1993] diskutiert. Die im Folgenden getroffenen Aussagen orientieren sich an diesem Buch, [DVWK, 1993] und [Peters, 2007].

Das Grundprinzip der NWA besteht darin, dass für verschiedene Kriterien (Zielparameter) der Auswirkungen von n Alternativen (a_i) einer Maßnahme Funktionen definiert werden, die den Zustand des Kriteriums in den Bewertungsrahmen eines Zieles einordnen. Die daraus abgeleiteten Zielerreichungsgrade (ZEG) verschiedener Kriterien werden über Wichtungsfaktoren skaliert und additiv zu einem Nutzwert integriert.

Definition von Zielparametern

Vorraussetzung für die NWA ist die Definition von Zielparametern (k_i). Diese sollten relevant für die Problemstellung und unabhängig von einander sein sowie möglichst verschiedene Bereiche der Einflussnahme durch die Maßnahme abdecken. Die erfassten Werte der Parameter müssen quantitativ oder quantifizierbar sein. Qualitativ beschreibbare Parameter müssen konvertiert werden. Für die Zielparameter werden plausible Wertebereiche entwickelt. Um die Bewertungsschärfe zu erhöhen, können diese gleichzeitig als Ausschlusswerte verwendet werden, so dass eine Alternative die den Wertebereich einer Zielgröße verletzt ausgeschlossen wird.

Definition von Zielfunktionen

Den Zielparametern wird über eine Zielfunktion ein Wert zwischen null und eins zugeordnet. Die Funktion kann sich an plausiblen, normativen und regulativen Fixpunkten orientie-

ren. Der Zielerreichungsgrad beschreibt die Lage des Parameters auf der korrespondierenden Zielfunktion. Für einen im Sinne der Alternative positiven Wert wird ein hoher Zielerreichungsgrad ermittelt. Über- oder unterschreiten die Zielparameter den Wertebereich der Zielfunktion wird der Zielerreichungsgrad null oder eins gesetzt. Für die verschiedenen Alternativen entsteht eine Matrix von Zielerreichungsgraden ($z_{i,j}$).

Verteilung der Gewichtung

Die Verteilung der Wichtung für die unterschiedlichen Zielparameter hängt von den Präferenzen der Entscheidungsträger ab, sie sollte abgestimmt werden und Ansprüche aller Interessengruppen berücksichtigen. Den verschiedenen Zielparametern werden m Wichtungsfaktoren (g_i) zugeordnet, die deren Bedeutung für die Bewertung der Maßnahme widerspiegeln.

Ermittlung der Nutzwerte

Die Matrix der Zielerreichungsgrade wird mit den Wichtungsfaktoren multipliziert, dadurch entstehen die Teilnutzwerte ($nw_{i,j}$). Die Summe der Teilnutzwerte in den Alternativenspalten wird auf einen Wert zwischen null und eins normiert der den Nutzwert der Alternative (NW_i) darstellt. F. 16 fasst die Berechnung zusammen

$$\begin{bmatrix} z_{1,1} & \cdots & z_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{m,1} & \cdots & z_{m,n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} g_1 \\ \vdots \\ g_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} nw_{1,1} & \cdots & nw_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ nw_{m,1} & \cdots & nw_{m,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} NW_1 \\ \vdots \\ NW_n \end{bmatrix}$$

F. 16 Nutzwert

mit $NW_j = (0 \leq \sum_i nw_j \leq 1)$

Anmerkungen

Probleme und Fehler entstehen bei der NWA häufig aus dem unvollständigen Systemverständnis über die Auswirkungen einer Maßnahme und der nicht-Berücksichtigung des Gebotes der Unabhängigkeit der Zielparameter. Im Rahmen der NWA sollten tatsächliche Auswirkungen der Maßnahme auf das System beurteilt werden, nicht Parameter die eine Auswirkung induzieren.

Die Definition von Nutzwerten und Gewichtungen sollte die Interessen und Bedürfnisse von Beteiligten und Betroffenen einer Maßnahme widerspiegeln, im besten Fall werden sie in einem gemeinschaftlichen Prozess der Entscheidungsfindung festgelegt. Sowohl die Gewichte als auch die Nutzwerte transportieren die subjektive Komponente der Sicht der Entscheidungsträger.

6.1.3. Darstellung der Ergebnisse

Es werden zwei Möglichkeiten für die Darstellung der Alternativen vorgestellt. Das Balkendiagramm wird häufig verwendet um die Nutzwerte verschiedener Varianten gegenüber zu stellen. Das dreidimensionale Kreissektorendiagramm verdeutlicht die Zusammenhänge alternativenintern und erlaubt Erkenntnisse über den bloßen Nutzwert hinaus.

Darstellung im Balkendiagramm

Das Balkendiagramm dient der vergleichenden Darstellung von Alternativen. Jeder Balken repräsentiert eine Alternative, seine Gesamthöhe deren Nutzwert. Die Balkensegmente stellen die Teilnutzwerte dar. In Abb. 50 ist der Vergleich der Nutzwerte der Entwässerungsalternativen für das lineare Szenario dargestellt. Als Referenz für die Wichtung der einzelnen Kriterien ist zusätzlich ein virtuelles optimales System abgebildet, in dem alle Teilnutzwerte von einem maximalen Zielerreichungsgrad geprägt sind. Neben der integralen Aussage zum Nutzwert der Alternativen werden auch Aspekte der Teilwerte deutlich, etwa dass die hydraulischen Anforderungen durch das Mischsystem nur in geringem Maße erfüllt werden.

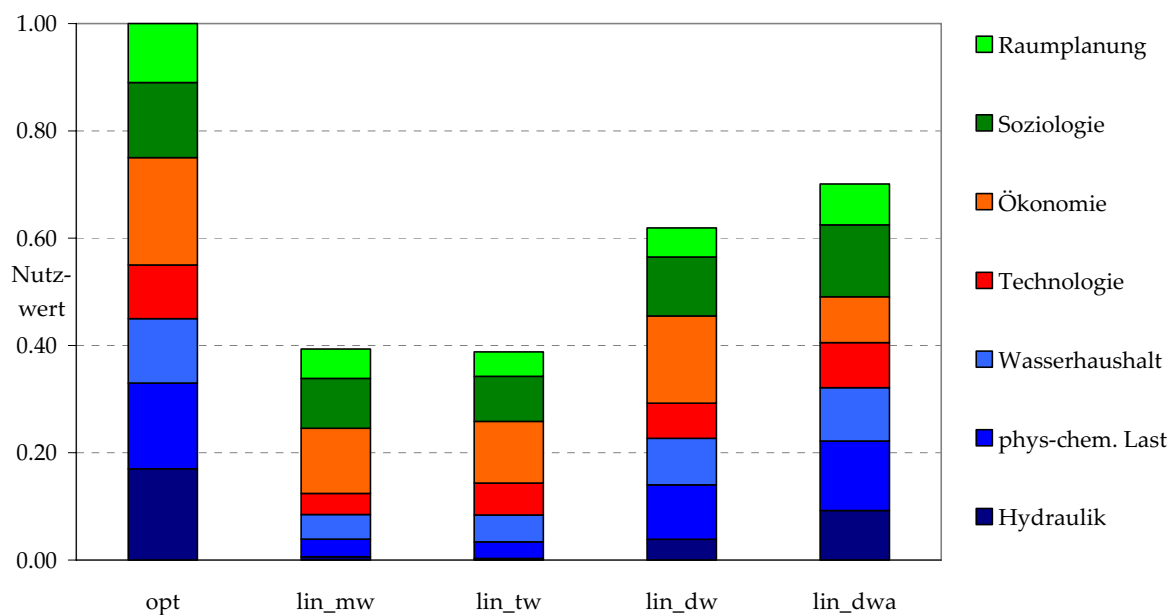


Abb. 50 Balkendiagramm der Nutzwerte für das lineare Szenario und ein virtuelles optimales System

Darstellung im dreidimensionalen Kreissektorendiagramm

Für die Auswertung der Nutzwerte wird neben den klassischen Balkendiagrammen das dreidimensionale Kreissektordiagramm verwendet. [Schlottmann, 2006] hat das Diagramm angewendet um einen Variantenvergleich für monetär nicht bewertbare Kriterien von Entwässerungssystemen zu illustrieren. Es soll am unten dargestellten Beispiel (Abb. 51) kurz erläutert werden. Die unterschiedlichen Sektoren repräsentieren die Zielparameter der

NWA. Der Winkel der einzelnen Sektoren korrespondiert mit der Wichtung und der Radius mit dem Zielerreichungsgrad des Parameters. Die Diagramme wurden mit einem Darstellungstool [IPS, 2007c] erstellt.

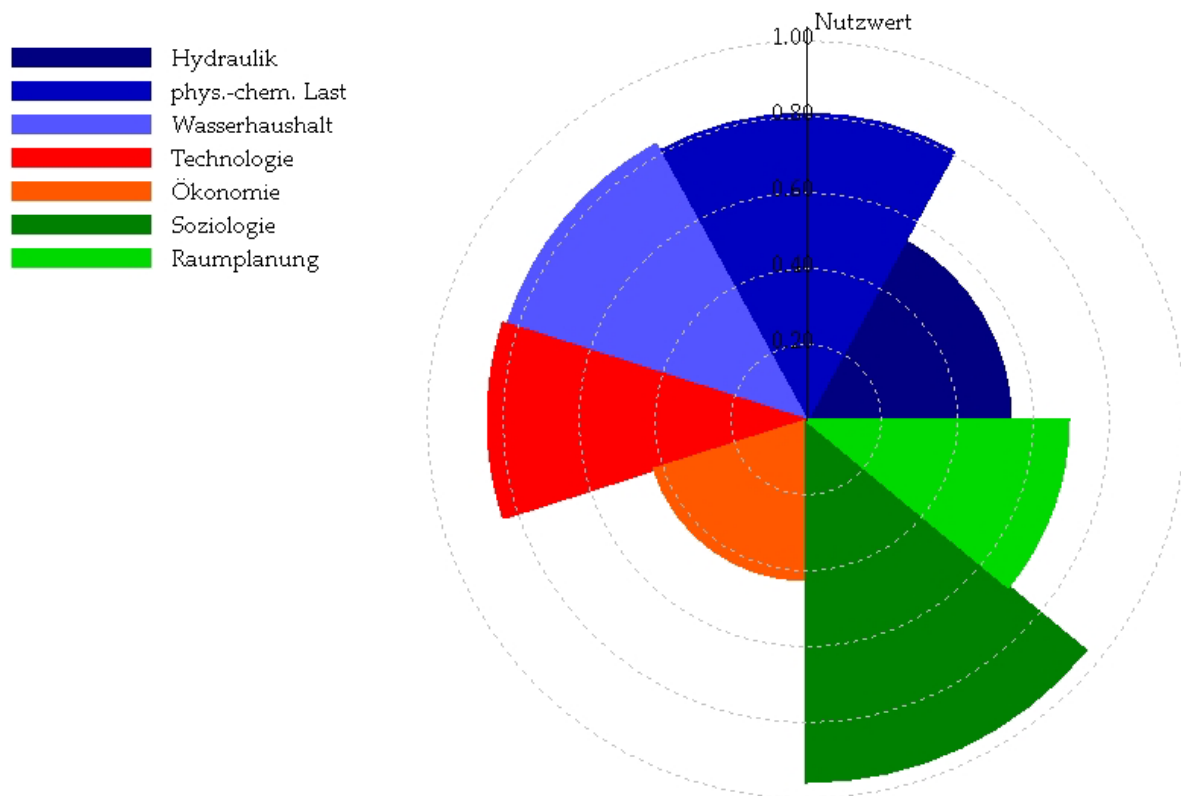


Abb. 51 Kreissektorendiagramm für die erweitert dezentrale Variante im linearen Szenario.

Aus dem Diagramm kann der Nutzwert einer Alternative nicht direkt abgelesen werden, dafür erlaubt es aber die Homogenität der Alternative qualitativ zu beurteilen. Unterschiedliche Radien weisen eine wenig homogene Alternative aus, da sich die Zielerreichungsgrade für unterschiedliche Aspekte der Maßnahme stark unterscheiden.

6.1.4. Parameter zur integralen Beschreibung des Systemwertes

Im Standardverfahren der Nutzwertanalyse ist der Nutzwert des Gesamtsystems das maßgebliche Entscheidungskriterium für die Bewertung der Alternativen. Durch den additiven Charakter des Nutzwertes wird die Unausgewogenheit einer Variante nicht berücksichtigt, hohe Teilnutzwerte eines Bereichs gleichen niedrige Werte in einem anderen Bereich aus.

Der Wert eines Systems ist durch mehr als nur seinen direkten und integralen Nutzen gekennzeichnet. [Schlottmann, 2006] adaptiert ein Verfahren zur Bewertung komplexer Arbeitssysteme für die Wasserwirtschaft und definiert Alternativensystemwert und Homogenität als Bewertungskriterien. Der Alternativensystemwert entspricht dem Charakter des Nutzwertes (F. 16) und wird in der vorliegenden Arbeit durch diesen ersetzt. Für den Nutz-

wert wird die prozentuale Beschreibung eingeführt. Die Homogenität, im Folgenden als interne Homogenität (inHom) bezeichnet, beschreibt die Unterschiedlichkeit der Zielerreichung für die einzelnen Kriterien. In Abweichung zur zitierten Arbeit wird die interne Homogenität, wie auch die im Weiteren betrachteten, neu eingeführten Bewertungsparameter, statistisch definiert. Grundüberlegung dafür ist, dass die Zielerreichungsgrade und Nutzwerte zwischen null und eins liegen und normalverteilt sind. Der Vorteil statistisch basierter Parameter besteht vor allem in den erweiterten Möglichkeiten zur Beurteilung von Unsicherheit und Konfidenzintervallen für die gefundenen Ergebnisse.

interne Homogenität

Die Standardabweichung ist Maß der Streuung innerhalb einer Stichprobe. Sie beschreibt die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichungen der Stichprobenwerte vom Mittelwert. Für lange Reihen von null-eins verteilten Zahlen konvergiert die maximale Standardabweichung gegen den arithmetischen Mittelwert. Die relative Standardabweichung erhält man über die Division des Absolutwertes durch den Mittelwert, sie beschreibt die mittlere relative Abweichung der Stichprobenwerte vom Mittelwert und kann als Maß der Inhomogenität herangezogen werden. Unter Berücksichtigung der Konvergenzannahme, liegt die Inhomogenität zwischen null und eins. Die Homogenität kann logisch als komplementäre Menge zur Inhomogenität gesehen werden. Sie wird damit durch die Abweichung der relativen Standardabweichung vom Wert eins ausgedrückt.

F. 17 beschreibt den Zusammenhang formal. Die relative Standardabweichung wird als Abweichung der einzelnen Zielerreichungsgrade vom Nutzwert dargestellt, sie wird unter Berücksichtigung der Wichtungsfaktoren der einzelnen Zielparameter gebildet.

$$\text{inHom} = \left(1 - \frac{\sqrt{\frac{m \cdot \sum_i g_i (z_i - \text{NW})^2}{(m-1)}}}{\text{NW}} \right) * 100\%$$

F. 17 interne Homogenität

multidimensionaler Zielerreichungsgrad

Der multidimensionale Zielerreichungsgrad (dZEG) integriert die Werte von interner Homogenität und Nutzwert einer Alternative. Berechnungsgrundlage ist das geometrische Mittel der beiden Parameter (F. 18). Es hat gegenüber dem arithmetischen Mittel den Vorteil, dass große Unterschiede zwischen den Werten den Mittelwert senken. Ein System das z. b. einen hohen Nutzwert aber eine geringe Homogenität aufweist wird also schlechter bewertet als

ein System, das für die Parameter das gleiche arithmetische Mittel aufweist aber bei dem beide Werte in der gleichen Größenordnung liegen.

$$dZEG = \sqrt{NW * inHom}$$

F. 18 multidimensionaler Zielerreichungsgrad

Dieses Vorgehen unterstellt eine gleiche Wichtung von Nutzwert und Homogenität einer Entwässerungsalternative. Um einem der beiden Faktoren eine höhere Bedeutung beizumessen könnten bspw. Verfahren der gewichteten Mittelung verwendet werden, wobei die Gewichte nach Bedeutung der Anteile vergeben werden.

externe Homogenität

Die externe Homogenität (exHom) quantifiziert wie gut eine Variante die Anforderungen aus verschiedenen Szenarien bewältigt. Sie wird analog zur internen Homogenität definiert, vereinfacht sich aber für die Annahme das alle Zukunftsszenarien gleich wahrscheinlich sind dahingehend, dass die Wichtungsfaktoren unberücksichtigt bleiben. Im Folgenden werden zwei Möglichkeiten diskutiert, indem Homogenität für die Nutzwerte und die multidimensionalen Zielerreichungsgrade angewendet wird. Für die Ermittlung müssen für die verschiedenen Szenarien einer Variante die Mittelwerte (mNW / mdZEG) der Parameter gebildet werden. Die in F. 19 gegebene Formel beschreibt die externe Homogenität in der Nutzwertform, für die Anwendung auf die externe Homogenität können die Variablen global ausgetauscht werden.

$$exHom = \left(1 - \frac{\sqrt{\frac{\sum_i (NW_i - (mNW))^2}{(n-1)}}}{mNW} \right) * 100\%$$

F. 19 externe Homogenität

Werden nur die Nutzwerte berücksichtigt, lehnt sich die externe Homogenität an den Prozess der Entscheidungsfindung bei der NWA an; es wird nur die Variation des Gesamtnutzens für die verschiedenen Entwicklungsszenarien untersucht. Wird die externe Homogenität auf Basis der dZEG berechnet, fließt auch die Veränderlichkeit der Ausgeglichenheit einer Variante ein.

multidimensionaler multivarianter Zielerreichungsgrad¹

Einen weiteren Schritt der Integration stellt der multidimensionale multivariante Zielerreichungsgrad (dvZEG) dar. Er ist entsprechend dem dZEG als geometrisches Mittel aus mittlerem Nutzwert, mittlerer interner und externer Homogenität definiert. Die Vorteile dieses Vorgehens wurden bereits ausgeführt.

$$\text{dvZEG} = \sqrt[3]{\text{mNW} * \text{minHom} * \text{exHom}}$$

F. 20 multidimensionaler multivarianter
Zielerreichungsgrad

Der dvZEG ermöglicht die integrale Betrachtung der drei Dimensionen von Systemverhalten. Er berücksichtigt wie hoch im Mittel der Nutzen eines Systems ist, wie stark der Nutzen für unterschiedliche Aspekte variiert und wie stark sich der Nutzen für verschiedene Entwicklungen der Rahmenbedingungen verändert.

6.2. Umsetzung der Wertanalyse

Für die im Abschnitt 5 vorgestellten Alternativen wird die Nutzwertanalyse angewendet.

6.2.1. Zielkriterien

Der Vergleich der Alternativen erfolgt nach den Grunddimensionen der nachhaltigen Entwicklung für die Bereiche Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Neben den direkten Berechnungsergebnissen wird die Betrachtung um nicht-quantitative Aspekte erweitert. Einige der Parameter wurden von [Sieker, 2006b] übernommen oder an dort aufgeführte Aspekte angelehnt. Die Arbeit fasst 27 Vergleichskriterien in drei hierarchischen Ebenen zusammen. Die übergeordneten Bereiche integrieren dabei jeweils additiv die untergeordneten Ebenen.

Übersicht über die Zielkriterien

Entsprechend den genannten Grunddimensionen erfolgt eine weitere Untergliederung in Parametergruppen, diese drücken für das Entwässerungssystem besonders relevante bzw. vom System stark beeinflusste Aspekte aus. Der Bereich Umwelt umfasst die Gruppen Hydraulik, stoffliche Belastung und Wasserhaushalt. Die ersten beiden Gruppen haben die Blickrichtung auf die direkten Auswirkungen der Interaktion von Entwässerungssystem und Fließgewässer. Der Wasserhaushalt fasst den Betrachtungsrahmen weiter und beschreibt die Auswirkungen in den Siedlungsgebieten und dem Einzugsgebiet. Der Bereich Wirtschaft wird durch die Gruppen Technologie und Ökonomie repräsentiert. Die technologischen Zielgrößen erfassen die Funktionalität des Entwässerungssystems und seine Einordnung in

¹ Der Autor ist für Anregungen für einen kürzeren, treffenden Namen des Parameters offen

den Wirtschaftskreislauf. Die Ökonomie bezieht Kosten, monetäre und nichtmonetäre Aspekte der Systemeffektivität mit ein. Der Bereich Gesellschaft wird durch die Gruppen Soziologie und Raumplanung vertreten. Die Soziologie beschreibt die Bedeutung und den Wert des Entwässerungssystems für die Gesellschaft. Durch die Raumplanung soll der Einfluss auf Möglichkeiten und Einschränkungen der Stadtentwicklung durch das Entwässerungssystem wiedergegeben werden.

Tab. 28 Übersicht über die Vergleichskriterien nach hierarchischer Gliederung

Bereich	Gruppe	Kriterium
Umwelt	Hydraulik	20-jähriges Hochwasser (HQ20)
		mittleres Hochwasser (MHQ)
		mittleres Niedrigwasser (MNQ)
	stoffliche Last	chemischer Sauerstoffbedarf(CSB)
		abfiltrierbare Stoffe (SS)
		Stickstoff (N)
		Phosphor (P)
		Kupfer (Cu)
		Blei (Pb)
	Wasserhaushalt	Feuchtgebiete (FG)
		Kleinklima (KK)
		Grundwasserneubildung (GWN)
		reale Verdunstung (ETR)
Wirtschaft	Technologie	Nutzbarkeit von Ressourcen (Nu_Res)
		Verfahrensvielfalt (Ver_viel)
		Überlaufvolumen aus Retention $V(\ddot{U})_{Ret}$
	Ökonomie	Investitionskosten (IK)
		Betriebskosten (BK)
		Einsatz von Ressourcen und Energie (R/E)
		Personaleinsatz (Pers)
Gesellschaft	Soziologie	Nutzwert (NW)
		Funktionswert (FW)
		Präsenz (Präs)
		Bürgerbeteiligung (BB)
	Raumplanung	Flächeninanspruchnahme (A_nutz)
		Kleinräumigkeit (KR)
		Planungshorizont (t_Plan)

Durch die hierarchische Entwicklung der Zielparameter soll gewährleistet werden, dass die Auswirkungen der Entwässerungsvarianten in der Bandbreite ihrer Bedeutung erfassbar sind. Tab. A 9 im Anhang beschreibt detaillierter die Bedeutung der einzelnen Zielkriterien. Auf Grund des großen Umfangs an Kriterien erfolgt im Rahmen der Arbeit nur eine kurze Charakterisierung. Einige der Parameter werden bereits an früheren Stellen im Text ausführlicher beschrieben.

relative Definition von Zielparametern

Im Verlauf der Bearbeitung wurde deutlich, dass nur zum Teil eine globale Definition für Wertebereiche der Zielparameter möglich war, um die Vergleichbarkeit zwischen den Szenarien zu gewährleisten. Für absolut definierte Zielparameter entstehen „bessere“ und „schlechtere“ Zukunftsszenarien. Wenn bspw. im Lastfall Szenario die Jahresfracht abfiltrierbarer Stoffe bei 1520 t liegt und für das konservierende Szenario bei 650 t, ist die Vergleichbarkeit des Austrags in den Vorfluter auf der Basis absoluter Zahlen nur bedingt gegeben. Für die Stofffrachten wurden die Eintragsmengen der Entwässerungsvarianten in den Fluss jeweils über die szenarienspezifische Gesamtfracht normiert. Nach diesem Vorgehen kann für alle Alternativen ein Anteil der Entlastung an der Gesamtfracht verglichen werden. Das Beispiel könnte z. B auch für die Kosten argumentiert werden, im Lastfall wird das Gebiet um 440% mehr Siedlungsfläche erweitert, als im konservierenden Szenario, würden die Kosten absolut für alle Szenarien verglichen, würden die Szenarien mit größeren Erweiterungen generell schlechter votieren.

quantitative Erfassung qualitativer Parameter

Einige der definierten Untersuchungsparameter werden nicht durch quantitative Berechnungsergebnisse des Modells oder die weiterführenden Analysen abgedeckt. Um diese Größen in die Nutzwertanalyse mit einzubeziehen und eine weitgehend objektive Bewertung zu gewährleisten, wurden Zielerreichungsgrade über eine Bewertungsmatrix definiert. Der Zielerreichungsgrad wird als Funktion von gesellschaftlicher Einstellung gegenüber der Zielgröße und Unterstützung des Zieles durch die Entwässerungsvariante gebildet.

Tab. 29 Parameterwert als Funktion von gesellschaftlicher Bedeutung der Zielgröße und deren Unterstützung durch das Entwässerungskonzept

gesellschaftliche Bedeutung	Unterstützung des Ziels durch Entwässerungskonzept				
	sehr gut	gut	mäßig	gering	konträr
hoch	1	0.8	0.5	0.3	0
mittel	1	0.9	0.8	0.6	0.4
niedrig	1	0.95	0.9	0.8	0.6

Tab. 29 gibt eine Übersicht über die Werte; ihre Bedeutung soll kurz durch zwei Beispiele erklärt werden. Die Entstehung und der Erhalt von Feuchtgebieten werden durch die Versickerung und Speicherung von Regenwasser unterstützt, das Konzept der schnellstmöglichen Ableitung trägt dagegen nichts zum Erhalt dieser Biotope bei, an den Einleitungsstellen wird ihre Existenz sogar durch hohe Energieeinträge und Erosion gefährdet. Für die wachstumsorientierte Gesellschaft ist der Erhalt der Feuchtgebiete aber von untergeordneter Bedeutung, während er der konservierenden Gesellschaft wichtig ist. Entsprechend erhält ein System, das den Erhalt von Feuchtgebieten unterstützt, bspw. das dezentrale System in beiden Szenarien einen hohen Parameterwert (1). Das Mischsystem, das nur in geringem Maße zum Fortbestand der Biotope beiträgt, votiert in der konservierenden Gesellschaft mit einem niedrigen Parameterwert (0,3), in der wachstumsorientierten aber immer noch relativ hoch (0,8). Der Personaleinsatz umfasst die Dimensionen Flexibilität, Qualifikationsbedarf und Systemanfälligkeit gegen Ausfall. Das erweiterte dezentrale System erfordert einen hohen Unterhaltungsaufwand. Insbesondere für die Betreuung der Zisternen (Pumpen, Armaturen) ist relativ viel Personal notwendig. Die Unterschiedlichkeit der Systemelemente (Kanalsystem, Zisternen, Gründächer, Rigolen) stellt auch einen erhöhten Anspruch an die Qualifikation. Durch die Kleinteiligkeit und Autarkie der Strukturen ist das die Variante aber wenig anfällig gegen (teilweisen) Personalausfall, es kommt kaum zu Unterliegerproblemen. Das erweiterte dezentrale System ermöglicht einen mäßig flexiblen Personaleinsatz. Das Trennsystem hat einen geringen Wartungsaufwand und durch die Beschränkung auf Kanalsysteme für die Siedlungsentwässerung ist auch der notwendige Qualifikationsgrad geringer. Allerdings ist das System anfälliger gegen Personalausfälle, da das Funktionieren des Gesamtsystems stärker von funktionierenden Teilstrukturen abhängt. Das Trennsystem erfüllt die Anforderungen an den Personaleinsatz gut. Die wachstumsorientierte Gesellschaft beurteilt Flexibilität im Personaleinsatz als wichtig, während ihre Bedeutung für die konservierende Gesellschaft geringer ist.

Nachteile des Vorgehens

Durch den Ansatz, dass die schlechte Unterstützung eines Ziels für einen relativ hohen Parameterwert erreicht wird, wenn das Ziel in seiner Bedeutung untergeordnet ist, werden tendenziell hohe Parameterwerte favorisiert. Fasst man diesen Umstand aber nach Konzept der Nutzwertanalyse so auf, dass sie schlechteren Varianten, wenn auch in geringerem Maße, dennoch schlechter votieren, wird sich in der Gesamtbetrachtung dennoch die bessere Variante durchsetzen, lediglich die Differenzen fallen kleiner aus.

Zum Teil ist die Anwendung der Tabelle für das lineare und das Lastfall Szenario erschwert, weil diese Szenarien keine storyline, also keine gesellschaftliche Perspektive vermitteln. In

der Regel wurde in diesen Fällen eine mittlere gesellschaftliche Bedeutung zugeordnet um die Ergebnisse der Analyse nicht in eine Richtung zu polarisieren.

Nicht immer sind die verbalen Beschreibungen der Unterstützung des Ziels durch das Entwässerungskonzept semantisch sinnvoll. Um aber eine möglichst allgemeine Kategorisierung treffen zu können, wurde dieser Kompromiss eingegangen. Ein sehr guter Einsatz von Ressourcen und Energie entspricht z. B. einem geringen Einsatz. Die Intention der qualitativen Parameter ist bei der Bedeutung in Tab. A 9 angegeben.

6.2.2. Zielfunktionen

Eine Absprache von Parameterwerten, war im Rahmen der Arbeit nicht möglich bzw. nötig. Die Definition der Zielbereiche versucht sich soweit wie möglich an physikalische plausiblen Bereichen zu orientieren. Um diesen Ansatz zu erläutern, soll noch einmal das Beispiel der Jahresfracht abfiltrierbarer Stoffe aufgegriffen werden. Wie bereits oben erläutert, wurde der Zielparameter relativ, als Verhältnis aus Fracht im Fließgewässer zu Gesamtfracht im System definiert. Für eine Entwässerungsvariante in der keine Partikel zurückgehalten werden, also die komplette Jahresfracht in das Fließgewässer gelangt, beträgt das Verhältnis eins, diesem Parameterwert wird der Zielerreichungsgrad null zugeordnet. Das Entwässerungssystem leistet keinen Beitrag zur Verminderung der Last im Gewässer. Für eine Variante, die den kompletten Anfall an Partikeln zurückhält, hat der Zielparameter den Wert null, in diesem Fall wird der Zielerreichungsgrad eins erreicht. Um der Streuung der Parameter im Funktionsbereich des ZEG Rechnung zu tragen, wurden für jeden Parameter aus dem Kollektiv der 16 Alternativen das 20- und das 80-Perzentil der Parameterwerte ermittelt und den Zielerreichungsgraden 0,2 und 0,8 zugeordnet. Die schlechtesten 20% der Alternativen verteilen sich nach diesem Ansatz auf die Zielerreichungsgrade 0 bis 0,2 die besten 20% auf 0,8 bis 1. In den meisten Fällen bewirkt dieses Vorgehen eine Aufstellung des mittleren Teils der Zielfunktion. Der Bereich in dem die meisten Werte liegen ist also sensibler für Änderungen des Parameterwertes. Das Vorgehen wurde gewählt um eine nach objektiven Gesichtspunkten erzeugte, große Bandbreite der Zielerreichungsgrade zu erhalten. Tab. A 9 gibt die Verläufe der Zielfunktionen über die Angabe der Bruchpunkte wieder.

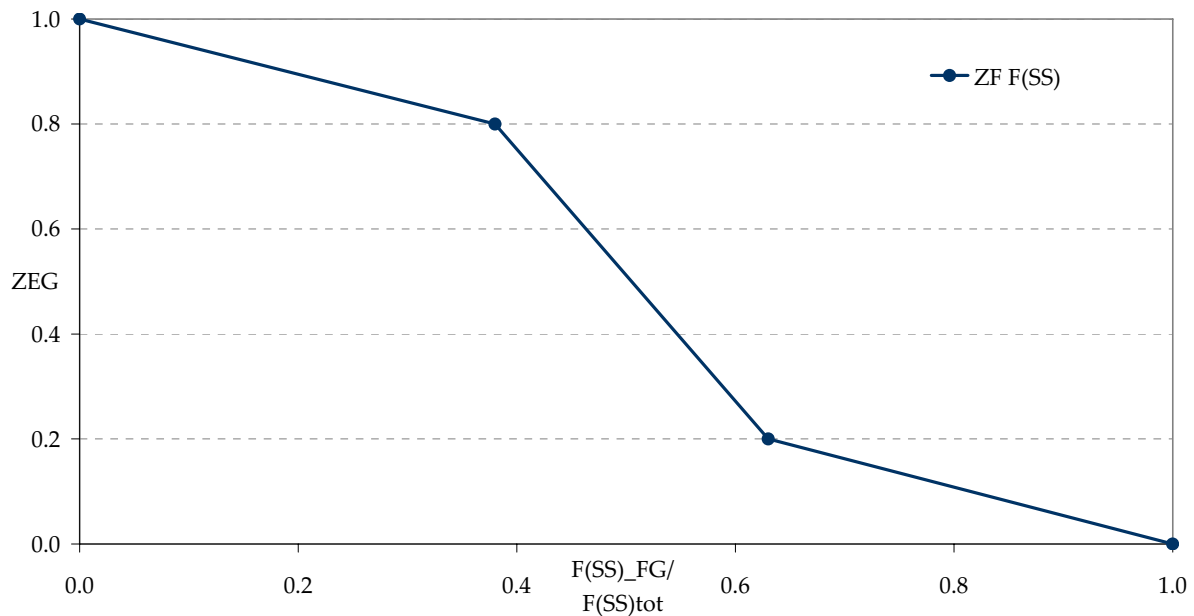


Abb. 52 Zielfunktion der abfiltrierbaren Stoffe

Abb. 52 illustriert den Zusammenhang am Beispiel der Jahresfracht abfiltrierbarer Stoffe. Das obere Perzentil deckt die Parameterwerte 0 bis 0,37 ab, ein Fünftel der Entwässerungssysteme entlasten also weniger als 38% der Jahresfracht in den Vorfluter. Für das untere Perzentil reichen die Parameterwerte von 0,63 bis 1, entsprechend entlastet ein Fünftel der Systeme mehr als 62%.

Es soll an dieser Stelle noch einmal kurz das oben eingeführte Beispiel der Stofffrachten aufgegriffen werden. Hätte man die Zielparameter absolut definiert, wäre dies auch für die Zielfunktion notwendig gewesen. Wäre nun bspw. für einen Zielerreichungsgrad von 0,8 der Partikelaustrag von 150 t/a zugeordnet, hätte das Entwässerungssystem für den konservierenden Fall eine Austragsrate von 23% zugelassen, für den Lastfall wäre der Wert mit 9,8% nicht einmal halb so hoch gewesen.

Für die qualitativ beschriebenen Parameter wurden die Werte direkt in den Zielerreichungsgrad umgesetzt. Ein Ansatz die Perzentil-Methode auch hier anzuwenden wurde verworfen, weil es auf Grund der diskreten Parameterwerte zum Teil zu sehr großen Sprüngen für kleine Unterschiede kam und so deutlich unterschiedliche Zielerreichungsgrade zugeordnet wurden.

Für einige Parameter können keine sinnvollen Grenzwerte festgelegt werden, bspw. können die Kosten immer noch höher liegen, auch das Jahresvolumen der Regenentlastung aus Retentionsräumen ist nach oben kaum begrenzt. Für diese Parameter wurde szenarienintern dem schlechtesten Wert der Zielerreichungsgrad 0,2 und analog zum oben vorgestellten Vorgehen dem besten 20-Perzentil der ZEG 0,8 zugeordnet.

Der Ansatz der Zielerreichungsgrade nach Perzentilen und plausiblen Grenzen ist zwar ein objektives Vorgehen, trifft aber nur bedingt die Anforderungen des beeinflussten Systems. Beispielsweise ist der Rückhalt der kompletten abfiltrierbaren Stoffe sicher ein lobenswertes Ziel der Siedlungsentwässerung. Wenn aber durch geringe Einträge das Fließgewässer der gute ökologische Zustand nach [EG-WRRL, 2000] nicht gefährdet wird, sind weitergehende Maßnahmen nicht zielführend. Im Gegenzug wenn ein empfindliches Fließgewässer bereits durch Austrag von 20% der gesamten Jahresfracht grundlegend gestört wird, sollte sich der Zielerreichungsgrad auch daran orientieren. Für diesen immisionsorientierten Ansatz stand für die durchgeführte Untersuchung keine Datengrundlage zur Verfügung.

6.2.3. Festlegung der Gewichtung

Die Gewichtung der Parameter erfolgte nach für hierarchischen Ebenen nach einem top-down Ansatz, dafür wurde nach einer subjektiv festgelegten Relevanz des Entwässerungssystems für die Teilbereiche eine Einteilung festgelegt und in die untergeordneten Ebenen übertragen. Da das Entwässerungssystem die größten Einflüsse auf die Umwelt ausübt wurde diesem Bereich ein Gewicht von 45% zugeordnet. Für das Wirtschaftliche Gesamtsystem spielen die Einflüsse und Rahmenbedingungen wasserwirtschaftlicher Systeme nur in Ausnahmefällen eine größere Rolle. Dennoch ist die Wasserentsorgung dem Prinzip der Wirtschaftlichkeit verpflichtet und Kostenaspekte stellen in der heutigen Planungspraxis meist die wichtigsten Entscheidungskriterien dar, der Bereich wird mit 30% bewertet. In der gesellschaftlichen Wahrnehmung sind Strukturen der Siedlungsentwässerung wenig präsent. Das Bewusstsein erhöht sich meist mit zunehmender Verknappung von durch die Wasserwirtschaft beeinflussten Ressourcen oder durch die Gefährdung von Schutzgütern, die gesellschaftliche Komponente wird mit 25% gewichtet.

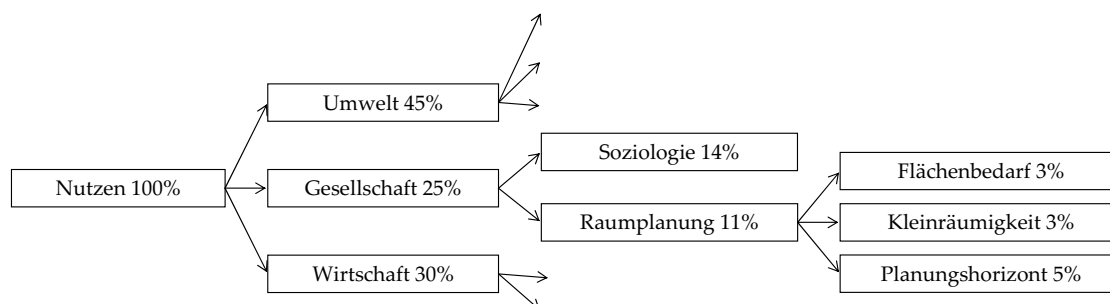


Abb. 53 Entwicklung der Wichtungsfaktoren für den Raumplanungspfad

Nach einem ähnlichen Vorgehen wurde versucht auf den hierarchisch untergeordneten Ebenen eine Wertung festzulegen, so dass die Vorgaben der übergeordneten Ebene eingehalten werden. Abb. 53 dokumentiert die Vergabe der Wichtungsfaktoren für den Pfad der Raumplanung. Für die Gesellschaftlichen Strukturen haben die Soziologischen Aspekte eine größere Bedeutung als die der Raumplanung. Andererseits wird die Raumplanung in stärkerem

Maß durch wasserwirtschaftliche Strukturen determiniert. Da die Soziologie zusätzlich eine größere Bandbreite an Themen abdeckt wurde ihr die höhere Gewichtung beigemessen, 14% gegenüber 11% der Raumplanung. Der Flächenbedarf von Entwässerungsstrukturen am Gesamtgebiet eines Ortes ist relativ gering, zusätzlich können die beanspruchten Flächen häufig noch einer weiteren Nutzung zugeführt werden, etwa durch Straßenüberbau bei Kanälen oder Grünflächen bei Rigolen, der Flächenbedarf wird mit 3% bewertet. Die Kleinräumigkeit von Strukturen erleichtert die Aufgaben der Raumplanung da der Einfluss eines Planungselements auf das Gesamtsystem kleiner ist. Meist hat die Verfügbarkeit von Infrastrukturen einen Einfluss auf Planungsentscheidungen, der Parameter wird mit 3% gewichtet. Wie die untersuchten Szenarien zeigen, ist das Entwicklungsspektrum von Siedlungsgebieten groß. Meist weisen wasserwirtschaftliche Systeme einen langen Planungshorizont auf und verlangen daher sehr sicheren Planungsansatz, Fehlplanungen erzeugen erhebliche negative Konsequenzen. Ein kürzerer Planungshorizont erleichtert die Abschätzung der Veränderung und erhöht die Szenariensicherheit (s. Abb. 29). Kurzlebige Anlagen erleichtern die strukturelle Veränderung da ihre häufigere Erneuerung auch zur Adaption genutzt werden kann. Dem Aspekt wird ein Gewicht von 5% beigemessen. Eine Übersicht über die Gewichtungen der Parameter gibt Tab. A 9 im Anhang.

6.3. Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

6.3.1. Vergleich der Nutzwerte

In dem Abschnitt sind drei Grafiken für den Vergleich der Nutzwerte dargestellt. Es wurde versucht über die Farbgebung einen intuitiven Zugang zur hierarchischen Struktur zu geben. Die blau-grünen Zielgrößen stellen die Parameter des Bereichs Natur dar, orange-braune repräsentiert die Wirtschaft, lila und grau den gesellschaftlichen Bereich. Innerhalb der Unterbereiche verlaufen die Farben jeweils von dunkel nach hell und wechseln für einen anderen Unterbereich die Nuance. Eine separate Darstellung für die unterschiedlichen hierarchischen Ebenen bringt wenig informativen Mehrwert, da die Nutzwerte auf Grund der additiven Ermittlung vom Aggregationsgrad nicht beeinflusst werden.

In Abb. 54 befindet sich die Übersicht für den Vergleich der Nutzwerte. Augenfällig erreichen die Nutzwerte der dezentralen Varianten für alle Szenarien höhere Nutzwerte. Die Reihenfolge ist weitgehend stabil, das Trennsystem erreicht die geringsten Nutzwerte, gefolgt von Mischsystem und dezentralem System. Nur für das Lastfall Szenario liegt der Nutzwert des Trennsystems minimal über dem des Mischsystems. Die erweitert dezentrale Variante erzielt für alle Szenarien die höchsten Nutzwerte.

Die detaillierten Aspekte der Einzelnen Zielparameter sollen an dieser Stelle nicht noch einmal aufgegriffen werden. Sie wurden zum Teil schon in den voranstehenden Ausführungen diskutiert. Die Zahlenwerte der einzelnen Teilnutzwerte und des Gesamtnutzwertes für die Alternativen können in Tab. A 10 nachvollzogen werden.

Ergebnis des Alternativenvergleichs

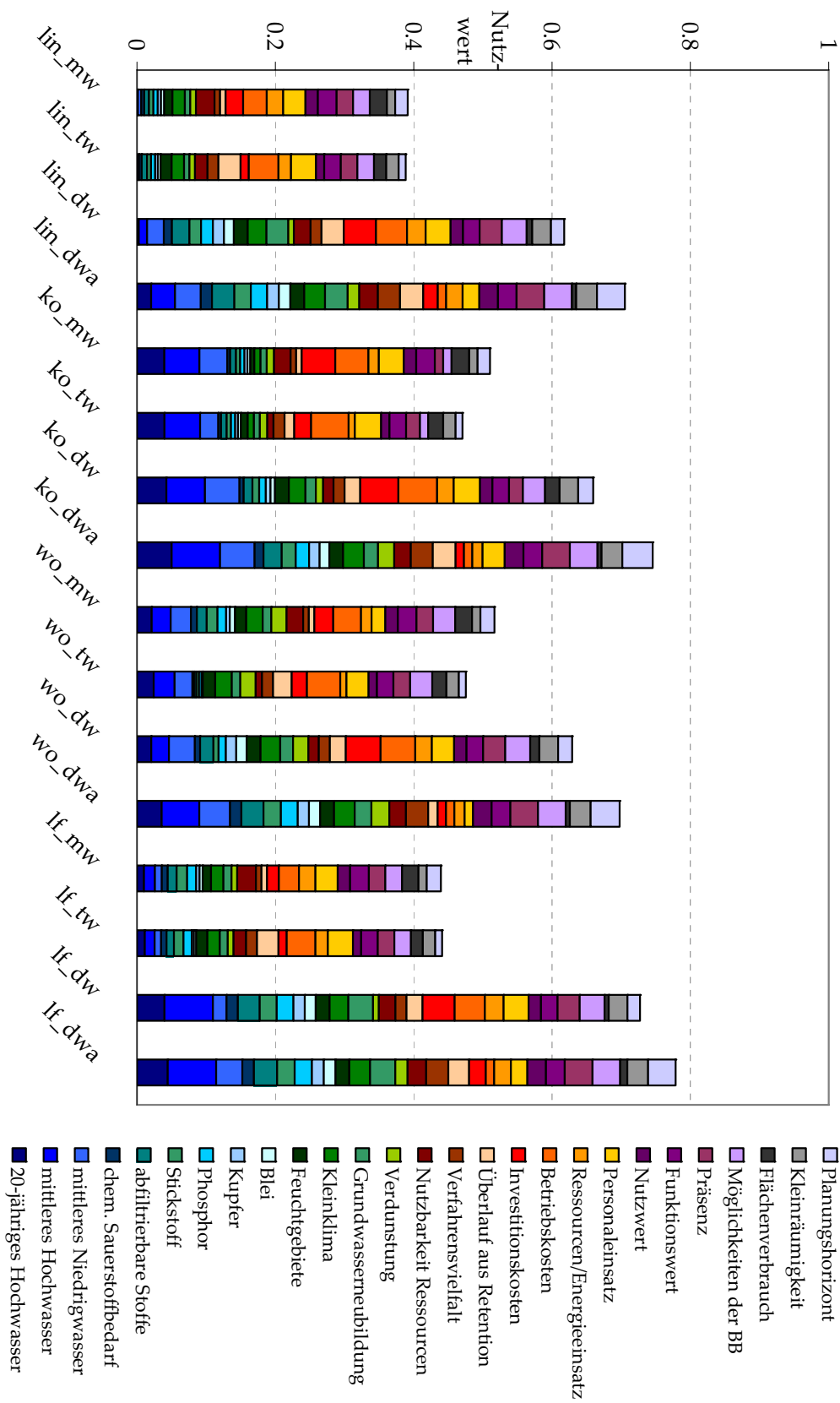


Abb. 54 Nutzwerte der Alternativen im Überblick

Ergebnis für die Aggregation zu Unterbereichen

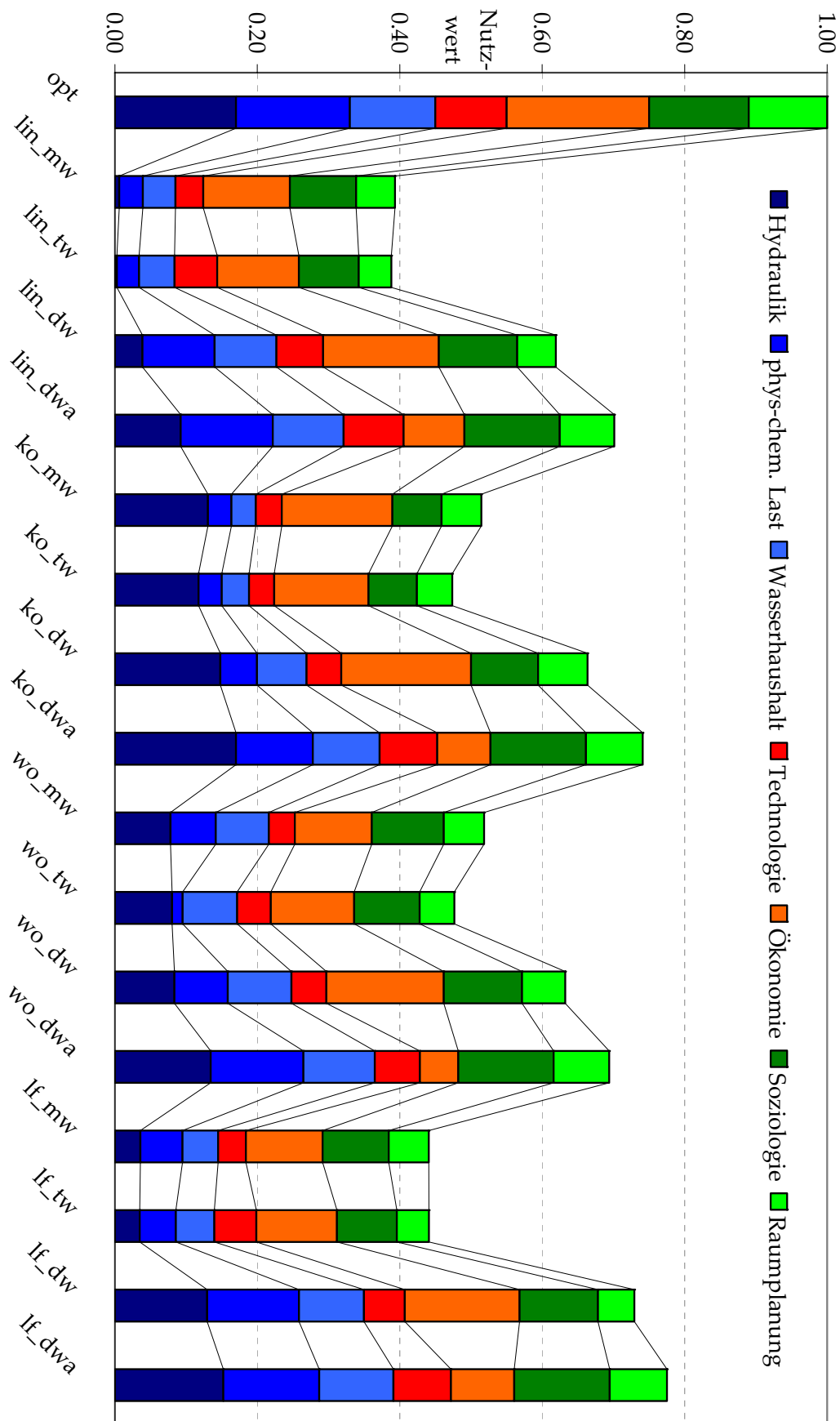


Abb. 55 Nutzwerte der Alternativen für die Aggregation der Zielparameter in den Unterbereichen im Überblick

Betrachtet man das Ergebnis der Nutzwertanalyse auf einer Ebene geringerer Auflösung, lassen sich visuell weitere Aspekte für Unterschiede in den Anteile der Teilnutzwerte erfassen. Als Hilfsmittel wurden Verbindungslinien hinzugefügt um die Veränderung eines Unterbereichs zwischen zwei Alternativen hervorzuheben. Verlaufen die Linien zwischen zwei Alternativen parallel ändert sich der Teilnutzwert nicht, bei einer Aufweitung erhöht er sich, bei Verengung wird er kleiner.

Für die Unterbereiche fällt die Reihenfolge der Varianten weniger eindeutig aus als für den integralen Nutzwert. Die hydraulischen Aspekte sind für Misch und Trennsystem weitgehend gleich. Sie erzielen in diesem Bereich die geringsten Teilnutzen. Auffällig ist, dass beide Varianten für das lineare Szenario praktisch keinen Teilnutzen einbringen. Die dezentralen Varianten erzielen bessere Nutzwerte als Misch- und Trennsystem. Die Unterschiede fallen aber sehr variabel aus für das wachstumsorientierte Szenario erzielt die dezentrale Variante um nur 0,5% mehr Teilnutzen, dies entspricht einem relativen Unterschied von 4%. Für das Lastfallszenario liegt der Teilnutzen des dezentralen Systems dagegen um 10% höher, was einem 2,6-fachen relativen Mehrnutzen entspricht. Das erweitert dezentrale System bringt für alle Szenarien den höchsten Teilnutzen, er liegt relativ zwischen 18 und 130% über der dezentralen Variante. Der maximal mögliche hydraulische Teilnutzen wird für die erweitert dezentrale Variante im konservierenden Szenario erreicht. Beim Vergleich der Szenarien wird deutlich, dass Lastfall und lineares Szenario die größten Unterschiede in den hydraulischen Teilnutzwerten besitzen. Die Szenarien mit der größten Siedlungsausweitung zeigen also die größte Sensitivität der Hydraulik gegenüber dem Entwässerungssystem.

Ähnliche Zusammenhänge gelten auch für Stoffbelastung und Wasserhaushalt. Die Reihenfolgen sind analog zum hydraulischen Aspekt, die Unterschiede fallen aber weniger deutlich aus. Szenarienintern liegt der maximale relative Unterschied zwischen den Teilnutzwerten bei Wasserhaushalt bei 74%. Die größten szenarieninternen Unterschiede treten bei der stofflichen Belastung für wachstumsorientiertes und Lastfall Szenario auf, die Wahl des Entwässerungssystems hat also großen Einfluss auf stoffliche Belastung. In diesen Szenarien ist auch die Emission relativ am größten. Auf den Wasserhaushalt hat die Wahl des Entwässerungssystems für alle Szenarien etwa den gleichen Einfluss.

Bei Betrachtung der technologischen Aspekte schneidet das Mischsystem für alle Szenarien am schlechtesten ab; der Teilnutzwert ist bis zu 4,5% absolut oder 53% relativ geringer als bei den jeweils besten Varianten. Trennsystem und dezentrales System erfüllen die technologischen Anforderungen weitgehend gleichgut, für das konservierende Szenario ist der Teilnutzen des dezentralen Systems um 12% besser. Das erweitert dezentrale System erreicht 2 bis 4% mehr Teilnutzen als die anderen Systeme und ist damit für den technologischen Aspekt um 28 bis 42% im Vorteil. Die szenarieninternen Unterschiede zwischen den Entwäs-

serungssystemen sind relativ stabil. Die Entwicklungsrichtung der Randbedingungen des Entwässerungssystems beeinflusst die Unterschiede zwischen den Varianten also nur gering. Unter ökonomischen Gesichtspunkten erweisen sich die erweitert dezentralen Varianten als die ungünstigsten. Es erreicht bis zu 11% weniger Teilnutzen als die besten Varianten, die damit 2,3-mal höhere Werte erreichen. Mischsystem und Trennsystem sind in wechselnder Reihenfolge die nächst besseren Varianten. Für lineares und konservierendes Szenario erreicht das Mischsystem höhere Teilnutzwerte, für das wachstumsorientierte Szenario und den Lastfall das Trennsystem. Die Unterschiede zwischen beiden Varianten fallen aber gering aus, sie liegen bei maximal 19%. Die dezentralen Alternativen haben generell den höchsten ökonomischen Nutzen, er liegt um 15 bis 30% über der zweitbesten Alternative. Für konservierendes und wachstumsorientiertes Szenario sind die Unterschiede der Teilnutzwerte zwischen den Varianten am größten. In diesen Szenarien wird das Entwässerungssystem in geringerem Umfang erweitert. Der Vergleich der Alternativen legt also nahe, dass für die Fälle, in denen das System große Veränderungen erfährt, der Unterschied in der Wirtschaftlichkeit geringer wird.

Im Teilbereich Soziologie bleiben wiederum Misch- und Trennsystem hinter den beiden dezentralen Varianten zurück, für diese sind Teilnutzwerte um 17 bis 48% höher. Das erweitert dezentrale System erzielt im Vergleich zum dezentralen relativ stabil 5 bis 13% höhere Teilnutzwerte. Die Unterschiede zwischen den Varianten fallen für das konservierende und lineare Szenario stärker, für wachstumsorientiertes und Lastfall Szenario schwächer aus.

Nach raumplanerischen Gesichtspunkten erzielt das Mischsystem den geringsten Teilnutzen, gefolgt von Mischsystem oder dezentralem System. Der Unterschied zwischen den drei Varianten ist aber gering, er liegt bei maximal einem Prozent Teilnutzen oder 28%. Das erweitert dezentrale System erreicht für alle Szenarien die größten Teilnutzwerte sie liegen bis zu 60% über denen der anderen Varianten. Im Mittel ist das erweitert dezentrale System um 34% für den Nutzen der Raumplanung besser als die zweitbeste Variante. Insgesamt sind die Unterschiede in der für die Teilnutzwerte der Raumplanung für verschiedene Szenarien gering. Die Wahl des Entwässerungssystems wird also aus raumplanerischer Sicht, nur in geringem Maß von der zukünftigen Entwicklung beeinflusst.

Ergebnis für die Anwendung global definierter Zielparameter

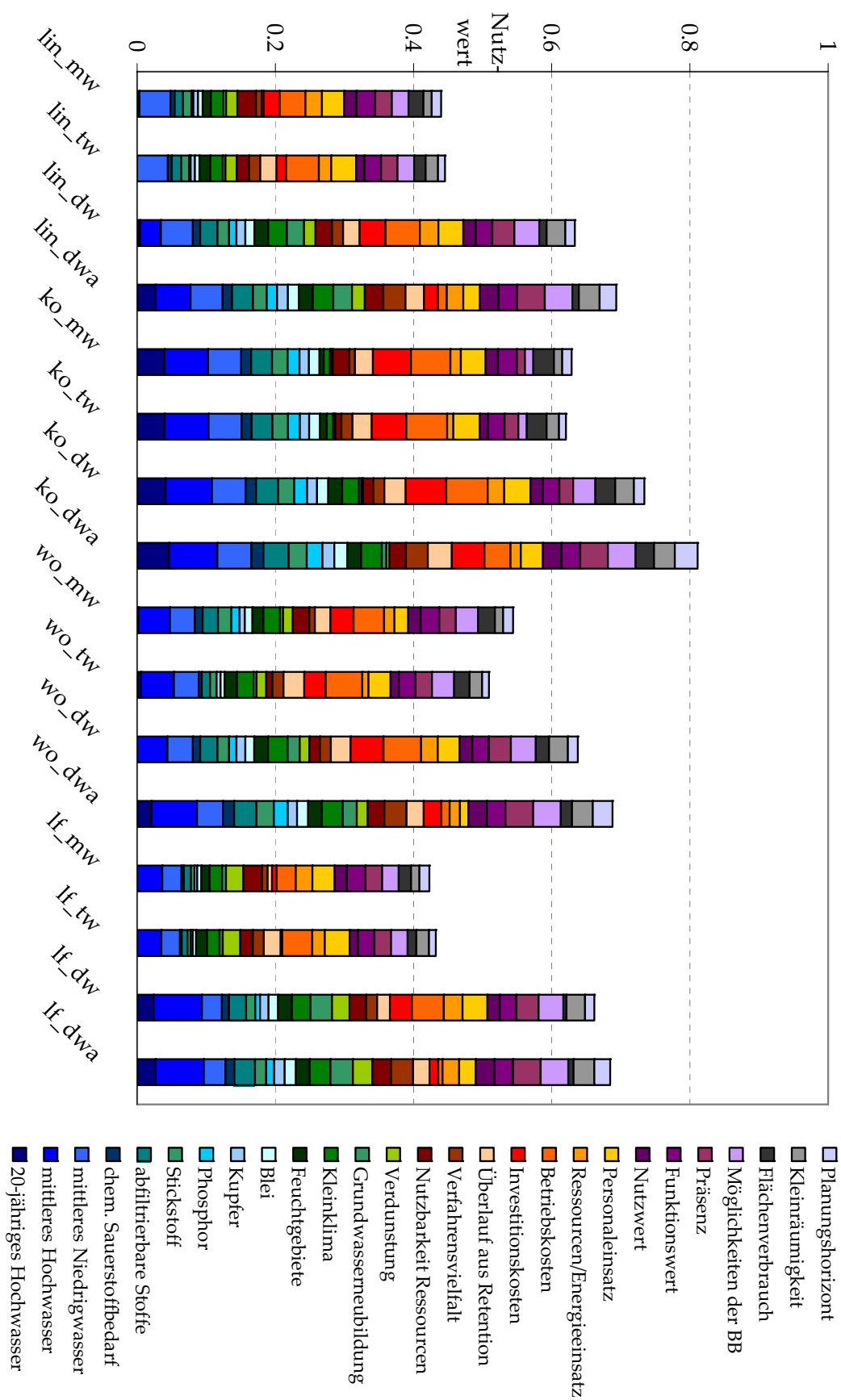


Abb. 56 Nutzwerte der Alternativen für absolut definierte Zielparameter

Wie bereits im Abschnitt zur relativen Definition der Zielparameter ausgeführt, vermitteln global definierte, absolute Vorgaben den Eindruck von schlechten und guten Zukunftsszenarien. Die These soll kurz am Beispiel der Nutzwerte illustriert werden.

Abb. 56 dokumentiert diesen Zusammenhang für das untersuchte Beispiel. An Stelle der beschriebenen relativ definierten Parameter wurden, wo vorhanden, die Absolutwerte verwendet und die Zielfunktionen am jeweils größten und kleinsten Wert des Kollektivs orientiert. Betrachtet man die mittleren Nutzwerte für die verschiedenen Szenarien, entsteht der Eindruck, das konservierende Szenario sei eine „gute“ zukünftige Entwicklungsrichtung, da hier der höchste mittlere Szenariennutzwert erreicht wird. Auch wenn der Umstand formal richtig ist, die Rahmenbedingungen des Szenarios verursachen die geringste Belastung für Fließgewässer und Entwässerungssystem, kann auf dieser Basis der Nutzwert für verschiedene Szenarien nicht verglichen werden.

Im Umkehrschluss wäre die Beurteilung nach dieser Definition von Zielwerten aber geeignet, um aus Sicht des Entwässerungssystems zu evaluieren welche zukünftige Entwicklung den größten Nutzwert bringt. In der Regel wird technischen Infrastrukturen nicht genügend Bedeutung beigemessen, um – soweit möglich – z. B. die „Planung“ von Wirtschaftswachstum oder Bevölkerungsentwicklung auf einen optimierten Nutzen für die Struktur abzustimmen. Meist richtet sich das System nach den Rahmenbedingungen und nicht die Rahmenbedingungen nach dem System.

6.3.2. Vergleich der Homogenität der Alternativen

Aus der Zusammenstellung von vier Szenarien, vier Varianten des Entwässerungssystems und drei Aggregationsebenen entstehen kombinatorisch 48 Möglichkeiten des Vergleichs entlang eines der Vektoren, 288 Möglichkeiten des paarweisen Vergleichs, wenn jeweils nur einer der Vektoren variiert wird und 1728 Kombinationen wenn beim paarweisen Vergleich zwei Freiheitsgrade variiert werden. Die Zahlen sollen verdeutlichen das es wenig effizient ist alle Möglichkeiten des Vergleichs auszuschöpfen. Im Rahmen einer Projektplanung kann durch den Vergleich die Entscheidungsfindung durch die Visualisierung ausgewählter Alternativen erleichtert werden. Durch die Berechnung nach den vorgestellten Parametern kann die Entscheidung auf der Basis quantitativer Kriterien erfolgen.

Für die vorliegende Arbeit sollen ausgewählte Sachverhalte beispielhaft diskutiert werden. Bei der Farbgebung der Kressektorendiagramme wurde versucht sich an den Farben zu orientieren die auch in der Nutzwertanalyse verwendet wurden.

interne Homogenität und multidimensionaler Zielerreichungsgrad der Alternativen

Die oben eingeführte interne Homogenität (F. 17) beschreibt für den konkreten Anwendungsfall wie stark die Zielparameter einer Alternative in ihrem Zielerreichungsgrad variieren.

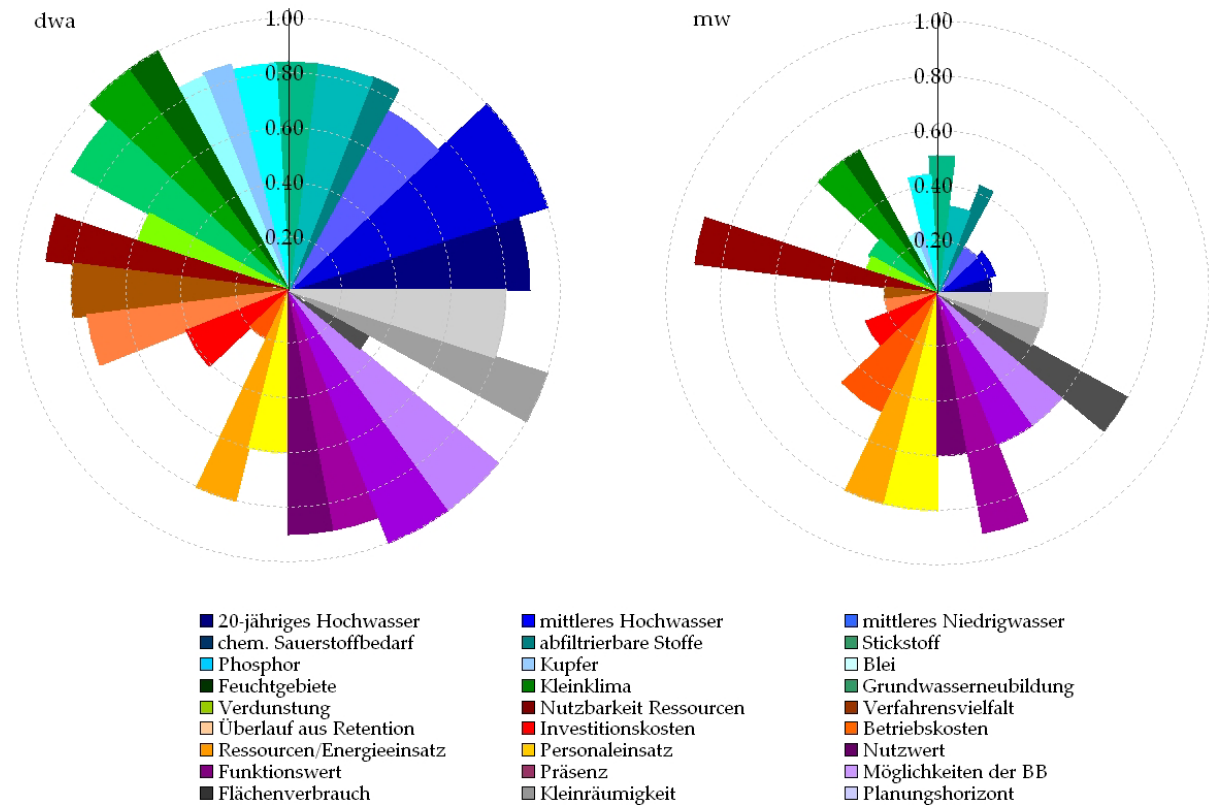


Abb. 57 Kreissektordiagramm für erweitert dezentrales (links) und Mischsystem (rechts) im Lastfall Szenario

Wie im Abschnitt zur Nutzwertanalyse ausgeführt wurde, weist das Mischsystem für den Lastfall den geringsten Nutzwert von 43,9%, das erweitert dezentrale System mit 77,9% den höchsten. In Abb. 57 kann ein Vergleich für die interne Homogenität der beiden Varianten nachvollzogen werden. Das erweitert dezentrale System (links) zeigt für einen großen Anteil der Kreissektoren einen weitgehend einheitlichen Radius der um den Wert des Zielerreichungsgrades von 0,8 liegt. Stärkere Abweichungen, größer als 20%, treten nur für die Bereiche Investitionskosten, Betriebskosten und Flächenverbrauch auf, die interne Homogenität erreicht einen Wert von 74,1%. Das Mischsystem gibt ein deutlich anderes Bild. Die Radien (Zielerreichungsgrade) der Kreissektoren schwanken in einem breiten Bereich und es kann kein dominanter Radius ausgemacht werden. Die interne Homogenität liegt bei 50,6%.

Auf dieser Basis kann der multidimensionale Zielerreichungsgrad für die Alternativen bestimmt werden. Er liegt für das Mischsystem im Lastfallszenario bei 47,1% für das erweitert dezentrale System bei 74,9%. Die Werte der internen Homogenitäten und dZEG sind in der Übersicht einige Seiten weiter hinten, in Tab. 30 zusammengefasst. Um der Vollständigkeit

des Vergleichs Rechnung zu tragen, sind die Kreissektorendiagramme der beiden anderen Entwässerungsvarianten des Lastfallszenarios im Anhang, in Abb. A 8 dargestellt, so dass die Unterschiede der internen Homogenität auch visuell für das Szenario nachvollzogen werden kann.

externe Homogenität für verschieden Szenarien

Die Bedeutung der externen Heterogenität für den Anwendungsfall kann als Flexibilität interpretiert werden, mit der ein Entwässerungssystem auf unterschiedliche Zukunftsszenarien reagiert. Eine hohe Homogenität drückt aus, dass Nutzwert bzw. multidimensionaler Zielerreichungsgrad für verschiedene Szenarien nur einer geringen Veränderung unterliegen.

Um die Veränderung der internen Homogenität und des Nutzwertes für verschiedene Szenarien zu demonstrieren sind in Abb. 58 die Kreissektorendiagramme der oben beschriebenen Varianten für das konservierende Szenario dargestellt.

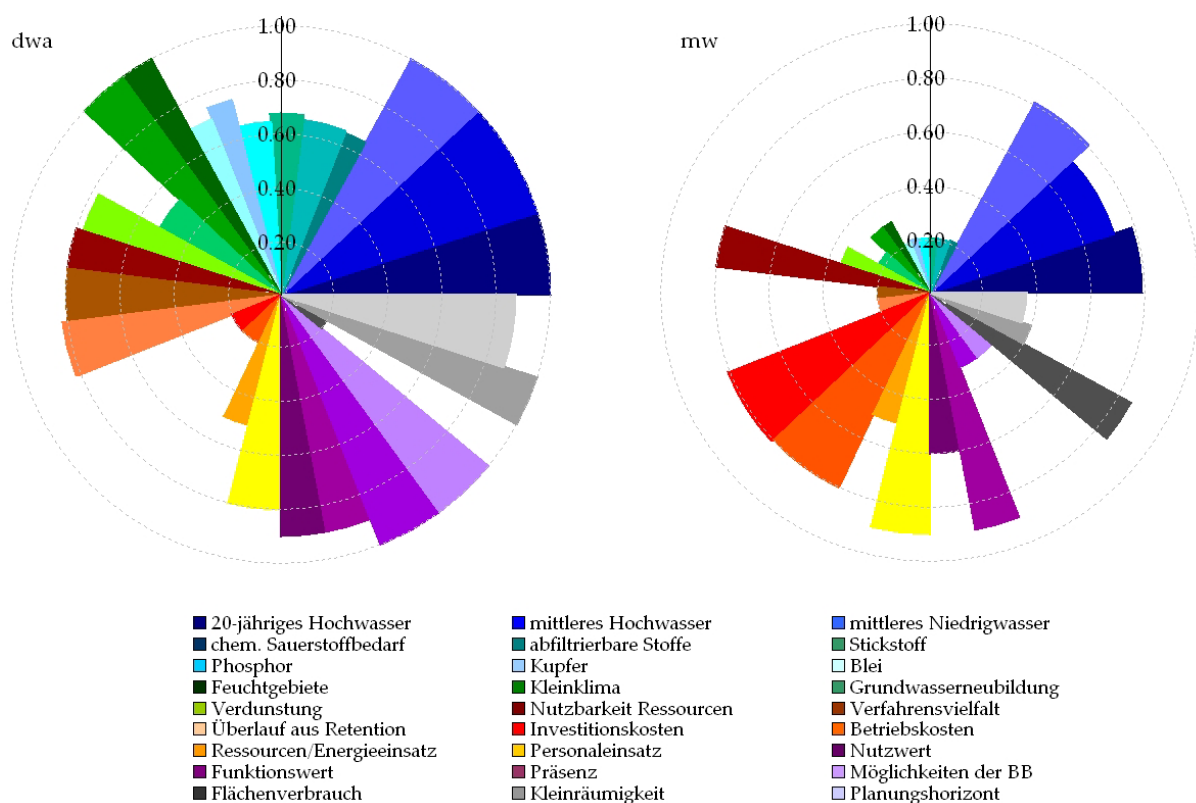


Abb. 58 Kreissektordiagramm für erweitert dezentrales (links) und Mischsystem (rechts) im konservierenden Szenario

Auch für das konservierende Szenario manifestieren sich die Aussagen, die für den Lastfall zur internen Homogenität und zum Nutzwert getroffen worden sind. Die Werte liegen für den Nutzwert bei 51,0 bzw. 77,3%, für die interne Homogenität bei 45,3 bzw. 66,7%. Der dZEG ergibt sich also zu 46,3 bzw. 70,5%.

Als visuelles Indiz der externen Homogenität, kann man die Anzahl der Parameter vergleichen bei denen sich der Zielerreichungsgrad zwischen beiden Szenaren stark, also um mehr als 20%, geändert hat. Beim erweitert dezentralen System sind fünf Zielerreichungsgrade stark verändert, beim Mischsystem liegt die Zahl bei 14.

Die externen Homogenitäten¹ für das erweitert dezentrale System betragen 94,9% auf Basis des Nutzwertes und 94,6% auf Basis des dZEG. Für das Mischsystem liegen die Werte bei 87,1% für die nutzwertbasierte exHom und 82,3% auf Basis des dZEG. Neben dem Vorteil die interne Homogenität implizit zu berücksichtigen, erweist sich die exHom auf Basis des dZEG also auch als schärferes Distinktionskriterium. Aus diesen Gründen wird sie auch für die Berechnung des multidimensionalen multivarianten Zielerreichungsgrades empfohlen.

Eine Übersicht über die Zahlenwerte der exHom nach beiden Berechnungsansätzen gibt Tab. 30. Im Anhang Abb. A 9 befindet sich exemplarisch eine Darstellung der Kreissektorendiagramme für die Mischsysteme im linearen und wachstumsorientierten Szenario, so dass für dieses System die Eingangsdaten für die Bildung des exHom visualisiert sind.

6.3.3. Synthese zum multidimensionalen multivarianten Zielerreichungsgrad

Die vorausgegangenen Ausführungen ermöglichen die Berechnung des multidimensionalen multivarianten Zielerreichungsgrades (F. 20). Für das Anwendungsbeispiel integriert er den globalen Nutzen eines Entwässerungssystems, die Gleichförmigkeit mit der alle beteiligten Zielparameter zum Nutzen beitragen und die Flexibilität die das System in Anbetracht unsicherer Entwicklung der Rahmenbedingungen aufweist.

Tab. 30 gibt eine Übersicht über die Parameter und monovarianten Größen zusätzlich statistische Kennzahlen. Auf Basis dieser Werte kann eine Beurteilung über die Vor- und Nachteile der Entwässerungssysteme getroffen werden.

Wie schon im Rahmen der Nutzwertanalyse ausgeführt, erreicht das erweitert dezentrale System im Mittel den höchsten Nutzen, gefolgt von dezentralem, Misch- und Trennsystem. Es besitzt gleichzeitig die geringste relative Standardabweichung, was für die integrale Betrachtung des Nutzens bereits ein Indiz für die höhere Flexibilität liefert. Mischsystem und Trennsystem tauschen in Bezug auf die relative Standardabweichung die Rangfolge. Auch für die interne Homogenität bestätigen sich im Mittel die Tendenzen der Nutzwertanalyse, das Trennsystem erreicht eine Homogenität von 42,4%, das Mischsystem votiert 4,5% besser. Eine deutlich bessere interne Homogenität weisen die dezentralen Systeme auf, sie erreichen

¹ die Zahlenwerte beziehen sich auf die exHom aus allen vier Zukunftsszenarien

66,1 und 72,8% für einfache und erweiterte Varianten. In umgekehrter Reihenfolge liegt die Veränderlichkeit der internen Homogenität über die Szenarien vor, sie ist mit 25,4% für das Mischsystem am größten und mit 6,2% für das erweitert dezentrale System am kleinsten. Die Reihenfolge der Teilparameter setzt sich für die Werte des multidimensionalen Zielerreichungsgrades durch. Für einzelne Szenarien variiert die Rangfolge der monovarianten Parameter, bspw. besitzt das Trennsystem für das Lastfall Szenario einen höheren dZEG als das Mischsystem oder die interne Homogenität ist im konservierenden Fall für die dezentrale Variante höher als für die Erweitert dezentrale. Diese Abweichungen stellen aber klar Ausnahmen von der sonst stabilen Grundtendenz dar

Tab. 30 Übersicht über die Parameter zur Beschreibung der Systemgüte

alle Angaben in [%]	Mischsystem	Trennsystem	dezentral	e. dezentral
Nutzwerte				
konservierend	51.4	47.4	66.4	74.1
wachstumsorientiert	51.9	47.7	63.2	69.4
linear	39.3	38.8	61.9	70.1
Lastfall	44.1	44.1	72.9	77.5
Mittelwert	46.7	44.5	66.1	72.8
rel. Standardabweichung	13.0	9.2	7.4	5.2
interne Homogenität				
konservierend	42.1	45.4	59.6	66.7
wachstumsorientiert	61.6	40.0	65.6	64.2
linear	33.7	33.7	61.1	68.6
Lastfall	50.4	50.7	69.9	74.1
Mittelwert	46.9	42.4	64.1	68.4
rel. Standardabweichung	25.4	17.2	7.3	6.2
multidimensionaler Zielerreichungsgrad				
konservierend	46.3	46.2	62.7	70.5
wachstumsorientiert	56.4	43.6	64.2	66.9
linear	36.3	36.2	61.4	69.6
Lastfall	47.1	47.3	71.3	76.0
Mittelwert	46.5	43.3	64.9	70.7
rel. Standardabweichung	17.7	11.6	6.8	5.4
externe Homogenität				
nach Nutzwert	87.0	90.8	92.6	94.8
n. multid. Zielerreichungsg.	83.8	88.0	92.3	95.0
multidimensionaler multivarianter Zielerreichungsgrad				
	56.4	55.0	73.3	78.0

Die externe Homogenität weist nach beiden Ansätzen der Berechnung die gleiche Reihenfolge auf. Das erweiterte dezentrale System ist auch im Kollektiv der vier Varianten als das flexibelste im Umgang mit verschiedenen Zukunftsszenarien, es folgen dezentrales System, Trenn- und Mischsystem.

Die drei beim multidimensionalen multivarianten Zielerreichungsgrad berücksichtigten Eingangsparameter unterscheiden sich in ihrer Reihenfolge und den Verhältnissen ihrer Größenordnung nur in geringem Maß. Entsprechend manifestiert auch der integrierende Parameter die Reihenfolge. Das Trennsystem erzielt unter Berücksichtigung aller Gegebenheiten die geringsten Vorzüge für sein Umfeld, das Mischsystem ist geringfügig besser. Dezentrales und erweitertes dezentrales System erzeugen einen deutlich höheren Nutzen.

Auswirkung der Aggregation

Wie beschrieben, wurden die Parameter und ihre Wichtungsfaktoren nach einem hierarchischen Konzept entwickelt. Da die Nutzwerte additiv gebildet werden, hat das Aggregationsniveau auf ihren Betrag keinen Einfluss. Es entsteht lediglich ein Informationsverlust dahingehend, dass nicht mehr aufgelöst werden kann, welche Parameter in welchem Maß zu den Teilnutzwerten beigetragen haben.

Es soll im Folgenden gezeigt werden, wie sich die Aggregation auf die statistischen Bewertungsparameter auswirkt. Zur Verdeutlichung werden die oben in Bezug auf die interne Homogenität vorgestellten Varianten verwendet.

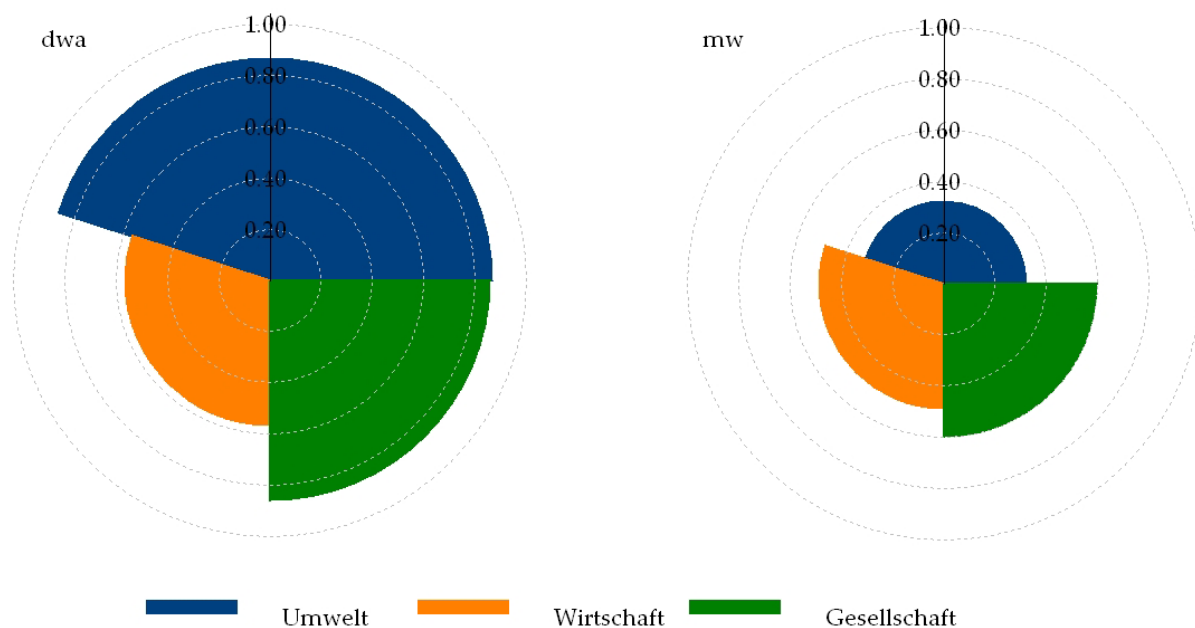


Abb. 59 Kreissektordiagramm für erweitert dezentrales (links) und Mischsystem (rechts) im Lastfall Szenario, aggregiert zu den Hauptbereichen

Die Abbildung verdeutlicht, dass die Heterogenität und Variabilität der Eingangsparameter durch die Zusammenfassung in hohem Maße herausgefiltert wird. In Bezug auf die Homogenität können für diese Aggregationsebene kaum noch Aussagen getroffen werden. Dem statistischen Filter, der Integration von Eigenheiten der Grundgesamtheit zu einem charakteristischen Wert, wird noch eine Ebene der Mittelung vorgeschaltet. Dadurch gehen die Streuungseigenschaften der gemittelten Elemente verloren. Die Folge ist ein Angleich der Parameter, die die Streuung berücksichtigen. Tab. 31 dokumentiert diesen Umstand für die verwendeten Parameter des Anwendungsfalls. Für beide Homogenitäten und Zielerreichungsgrade werden die Unterschiede zwischen den Szenarien mit zunehmender Aggregation geringer.

Tab. 31 Parameter zur Beschreibung des Systemwertes für die verschiedenen Aggregationsebenen

	Mischsystem	Trennsystem	dezentral	e. dezentral
Parameter				
m NW	46.7	44.5	66.1	72.8
m inHom	46.9	42.4	64.1	68.4
m dZEG	46.5	43.3	64.9	70.7
exHom	83.8	88.0	92.3	95.0
dvZEG	56.4	55.0	73.3	78.0
Unterbereiche				
m NW	46.7	44.5	66.1	72.8
m inHom	60.5	58.0	72.8	73.7
m dZEG	53.0	50.7	69.3	73.2
exHom	83.8	88.0	92.3	95.0
dvZEG	62.6	61.6	76.4	79.8
Hauptbereiche				
m NW	46.7	44.5	66.1	72.8
m inHom	71.3	71.4	86.1	73.8
m dZEG	57.6	56.3	75.4	73.2
exHom	82.9	84.6	93.9	93.2
dvZEG	66.2	66.1	80.8	79.9

6.4. Fazit

Auf Basis der gemachten Berechnungen und unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen kann also für den Ort Kupferzell für den Ort Kupferzell eine Entscheidung für die Entwicklung des Entwässerungssystems in Richtung der erweitert dezentralen Variante

empfohlen werden. Sie stellt sowohl in Bezug auf den Nutzwert als auch auf Ausgeglichenheit in der Berücksichtigung der Teilaspekte und Flexibilität gegenüber zukünftigen Änderungen die Vorzugsvariante dar.

Es ist dabei wichtig sich zu vergegenwärtigen, dass das Ergebnis so nur durch die Auswahl dieser Zielgrößen, für diese Zielfunktionen und Wichtungen der Parameter entsteht.

7.1. Einschränkungen

7.1.1. Datengrundlage

Es ist eine Plattitüde, dass auf Basis einer besseren Datenlage genauere Ergebnisse erzielt werden können. Als besondere Mängel werden jedoch vier Aspekte herausgestellt.

Die Kalibrierung des Modells nur auf Basis der Spitzendurchflüsse erlaubt es nicht die Dynamik des Wellenverlaufs und damit grundlegende hydrologische Eigenschaften des Gebietes zu erfassen. Die Extrapolation der Rahmenbedingungen wie des Versiegelungsgrades kann damit nur sehr unsicher erfolgen.

Die Klimadaten zur Abbildung des Wasserhaushalts wurden zwar im Rahmen der Arbeit bestellt, kamen aber erst mit erheblicher Verzögerung an. Das Fehlen adäquat aufgelöster Klimadaten hat zur Folge, dass die klimatischen Randbedingungen nur konzeptionell erfasst werden können. Die Berechnungen liefern zwar plausible Ergebnisse. Eine Validierung mit Messdaten wäre aber zwingend nötig, um die Ergebnisse quantitativ belastbar zu machen.

Die Abbildung der Schmutzkonzentrationen mit Werten aus der Literaturrecherche wird der Situation im Einzugsgebiet nur sehr bedingt gerecht. Wie auch für die Klimagrößen wäre eine Validierung durch Messwerte wünschenswert.

Die fehlenden Daten zu Entwässerungssystemen von Siedlungsflächen außerhalb der Gemeinde Kupferzell muss als große Einschränkung für die Belastbarkeit der Angaben zu den Stofffrachten beurteilt werden.

7.1.2. Modellierung

Die Modellgleichungen zur Abbildung der hydrologischen Prozesse haben größtenteils konzeptionellen Charakter. Die daraus resultierenden Einschränkungen für die Extrapolation von Systemzuständen sollen an dieser Stelle erwähnt werden.

Die Ungenauigkeiten, die aus getroffenen Vereinfachungen entstehen, können beträchtlich sein. Beispielhaft sei hier die linearisierte Vergrößerung der Speicher genannt, die den Anforderungen an die Überlaufsicherheit bzw. das jährliche Überlaufvolumen nicht gerecht wird.

Des weiteren sollen noch die Unsicherheiten erwähnt werden, die aus der nicht-Modellierung bzw. nicht-Abbildung entstehen. Beim Ausschreiben der Konzentrationsgang-

linien kam es zu programminternen Fehlern. Daher musste sich die Auswertung des Stoffhaushaltes auf die Jahresfrachten beschränken. Diese repräsentieren aber nicht immer die Probleme im Gewässer, insbesondere dort wo akute Konzentrationen eine Schadwirkung verursachen. Da die Entwässerungssysteme von Siedlungsflächen außerhalb der Gemeinde Kupferzell nicht abgebildet werden konnten, kommt es von diesen Flächen nur zu Oberflächenabfluss, welcher nicht durch Retentionsmaßnahmen beeinflusst wird.

7.1.3. Szenarienentwicklung

Die Szenarien orientieren sich an den Vorgaben aus anderen Studien, der regionalen und lokalen Statistik und an Szenarien des globalen Wandels. Es ist dem Mangel an Erfahrung des Bearbeiters aber auch dem Fehlen einer etablierten Methodik geschuldet, dass die Szenarienannahmen zum Teil recht pauschal ausfallen. Es wäre wünschenswert, wenn ein größerer wissenschaftlicher Fokus auf die lokale Verortung von Szenarien des globalen Wandels gelegt würde, da hier die Vorgaben für die Planung struktureller Entwicklung getroffen werden.

Die Szenarien tragen alle einen in einigen Grundzügen ähnlichen Charakter: für alle kommt es zu einer Bevölkerungszunahme, Ausweitung der Siedlungsfläche usw. Es wäre sicher auch relevant gewesen, z. B. die Auswirkungen eines möglichen Rückgangs der Bevölkerung zu untersuchen. Die dadurch entstehenden Veränderungen und Notwendigkeiten können aber auf der Basis des N-A und Stoffstrommodells nur sehr bedingt abgebildet werden.

7.1.4. Methodik des Alternativenvergleichs

Es werden zwei Grundprinzipien der Nutzwertanalyse teilweise verletzt. Die Unabhängigkeit der Parameter ist für das gewählte Vorgehen nur bedingt gegeben, da bspw. die verschiedenen Stoffströme, wenn auch zu unterschiedlichen Proportionen, alle an die Volumenströme des Oberflächenabfluss und des Trockenwetters gekoppelt sind. Es konnte auch nicht für alle Parameter die tatsächlichen Systemkonsequenzen abgebildet werden, da dazu zum Teil aufwändige Untermodelle notwendig gewesen wären. Für eine adäquate Abbildung der Auswirkungen auf das Fließgewässer hätten z. B. Habitatmodelle betrieben werden müssen, für die die Stoff- und Abflussdynamik nur die Eingangsparameter darstellt.

Die Grundgesamtheit von vier Vergleichsgrößen für die Anwendung statistisch basierter Verfahren stellt eher die Untergrenze dar. Eine größere Zahl von Alternativen erhöht aber den Bearbeitungsaufwand beträchtlich.

7.2. Ergebnisse und Erkenntnisse

7.2.1. Abbildung des Ist-Zustands

Die Sensitivitätsanalyse für den Ist-Zustand zeigt, dass das Einzugsgebiet eine hohe Empfindlichkeit der Abflussspitze des fünfjährigen Hochwassers gegenüber Versiegelungsgrad, und Infiltrationsrate der Ackerflächen aufweist. Für den Niederschlag ist der Zusammenhang sogar stärker als direkt proportional.

Für die Anwendung des BWK-M3 Verfahrens im Einzugsgebiet wird deutlich, dass in Bezug auf die hydraulische Belastung Handlungsbedarf an einigen Gewässerabschnitten besteht, an denen geringe natürliche Abflüsse und größere Siedlungsflächen interagieren. In stofflicher Hinsicht entsteht nur durch die abfiltrierbaren Stoffe eine leichte Überschreitung der Vorgaben des Merkblattes.

Der Wasserhaushalt wird bei Betrachtung des Gesamtsystems nur leicht durch die Anteile Siedlungsflächen beeinflusst. Im direkten Vergleich sind die Siedlungsflächen aber durch eine Erhöhung des Abflusses um 210% (von 13 auf 41% Anteil an der Gesamtwasserbilanz) eine starke Verminderung der Infiltration und eine leichte Abnahme der Verdunstung geprägt.

7.2.2. Ergebnisse der Alternativenuntersuchung

Basis der Untersuchung war die Definition von Szenarien des globalen Wandels und Varianten des Entwässerungssystems. Für die Bildung der Szenarien wurden drei verschiedene Ansätze verfolgt, die lokales und regionales statistisches Datenmaterial, Ergebnisse der Literaturrecherche und Szenarien des globalen Wandels einbeziehen. Bei der Bearbeitung wurde deutlich das belastbare Aussagen und Methoden zur Ermittlung von Änderungstendenzen auf lokaler Ebene noch weitgehend fehlen. Der Fokus liegt zurzeit eher auf der globalen und regionalen Ebene.

Für MHQ und HQ₂₀ kommt es in den Szenarien zu Erhöhungen des Spitzendurchflusses um bis zu 135%, wobei ein sich für die Szenarien die Reihenfolge nach Erhöhung des Versiegelungsgrades einstellt. Die Entwässerungssysteme haben einen erheblichen Einfluss auf die Hochwassergenerese, szenarienintern liegen die Unterschiede bei bis zu 70%. Für beide Größen dämpft das erweitert dezentrale Entwässerungssystem die Hochwässer am stärksten. Auf das MNQ haben die Entwässerungssysteme einen geringen Einfluss. Eine Abhängigkeit besteht vor allem zu den Niederschlägen im Sommerhalbjahr.

Die stoffliche Belastung im Fließgewässer als Anteil von der Gesamtfracht zeigen für die untersuchten Stoffe deutlich unterschiedliche Rückhalteraten. Die Nährstoffe Stickstoff und

Phosphor werden im Schnitt zu 55% zurückgehalten, während der Anteil für Kupfer und Blei im Mittel bei nur 21% liegt. Werden die Kläranlagenfrachten und die Quelle der Laststoffe mit in die Betrachtung einbezogen, wird deutlich, dass alle Entwässerungssysteme einen hohen Anteil der Trockenwetterbelastung zurückhalten. Der Rückhalt der Belastung aus Oberflächenabflüssen wird dagegen fast nur durch die Versickerung bestimmt. Auf Grund der Siedlungskonfiguration im Gebiet und durch die notwendigen Vereinfachungen für Flächen zu denen keine Daten zum Entwässerungssystem vorlagen, hat die Belastung aus Oberflächenabfluss für alle Stoffe eine hohe Bedeutung.

Klimawandel und veränderte Anteile der natürlichen Landnutzung haben Einfluss auf den natürlichen Wasserkreislauf. Die reale Verdunstung zeigt sich wesentlich stärker von den Sommerniederschlägen abhängig als von der temperaturinduzierten Erhöhung der potentiellen Verdunstung. Vor allem erhöhte Winterniederschläge tragen zu einem gesteigerten Anteil des Direktabflusses bei. Die maximale Infiltration auf Landwirtschaftsflächen beeinflusst den Jahresanteil des Direktabflusses stark. Diese Erkenntnis weist auf ein Potential hin den Auswirkungen des globalen Wandels auf die Abflussdynamik entgegenzusteuern, in dem verstärkt bodenkonservierende Anbaumethoden zum Einsatz kommen. Wie für den Ist-Zustand kommt es in den Szenarien zu einer deutlichen Veränderung des Wasserhaushaltes auf den Siedlungsflächen. Der direkte Abfluss wird stark erhöht, die Verdunstung schwach und die Infiltration deutlich vermindert. Im Mittel erhöht sich der Anteil des direkten Abflusses an der Wasserbilanz für Misch- und Trennsystem um 36%, für das dezentrale System um 22% und für das erweiterte dezentrale um 17%.

Die Kosten wurden über eine Kostenvergleichsrechnung ermittelt. Es soll an dieser Stelle nur Referenz auf die PKBW genommen werden, da sie die Einflüsse von Investition und Betrieb integrieren. Die dezentrale Variante ist in allen Fällen die kostengünstigste, Mischsystem und Trennsystem belegen in wechselnder Reihenfolge die mittleren Ränge. Das erweiterte dezentrale System ist jeweils am kostenintensivsten. Die Unterschiede zwischen den drei letztgenannten verringern sich mit zunehmender Erweiterung des Entwässerungssystems, da für das Mischsystem zunehmend Adaptionen im Bestand notwendig werden und die für Trennsystem und erweiterte dezentrales System notwendigen Basisinvestitionen relativ an Bedeutung verlieren.

7.2.3. Variantenvergleich

Für den Variantenvergleich wurde die Methodik der Nutzwertanalyse angewendet. Die Kriterien der Nutzwertanalyse wurden in einem hierarchischen Prozess herausgearbeitet, der die Säulen der Nachhaltigkeit – Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft berücksichtigt. Zur Definition von Kriterien wurden die Ergebnisse aus Modellierung und Kostenvergleichs-

rechnung für alle drei Bereiche um qualitative Parameter erweitert. Für diese wurde ein Bewertungsschema entwickelt, dass gesellschaftliche Relevanz des Parameters und seine Unterstützung durch das Entwässerungssystem evaluiert. Die storyline-Szenarien haben sich als relevanter für die Ableitung der qualitativen Parameter erwiesen.

Im Rahmen der Arbeit wurde deutlich, dass für den Vergleich verschiedener Zukunftsszenarien, die Zielparameter relativ definiert werden müssen, um im Sinne der Aussagenlogik nicht den Nutzen einer Zukunft für das Entwässerungssystem sondern den Nutzen des Systems im Vergleich verschiedener Zukünfte zu ermitteln. Die Nutzwertanalyse ergab, dass für Kupferzell die erweitert dezentrale Variante im Mittel über die Szenarien mit 72,8% den größten Nutzen erbringt. Die dezentrale Variante erreicht 66,1%, Misch- und Trennsystem 46,7 bzw. 44,5%.

7.2.4. Parameter zur integralen Beschreibung des Variantenwertes

Für die Ermittlung des Systemwertes wurde die Nutzwertanalyse um statistisch basierte Parameter erweitert. Für die interne Homogenität, als Maß für die Ausgewogenheit mit der eine Entwässerungsvariante allen untersuchten Teilnutzen gerecht wird, wurde eine statistisch basierte Definition eingeführt. Die externe Homogenität, als Maß für die Flexibilität des Entwässerungssystems im Umgang mit der Bandbreite möglicher Änderungen seiner Rahmenbedingungen, wurde herausgearbeitet. Sie ist charakterisiert als die relative Standardabweichung von Nutzwert und interner Homogenität über das Kollektiv der Zukunftsszenarien. Der multidimensionale multivariante Zielerreichungsgrad als Parameter zur integralen Beschreibung von Nutzwert, interner und externer Homogenität bietet Möglichkeiten den Systemwert über seinen unmittelbaren Nutzwert hinaus zu erfassen.

Im Test der Parameter für die Anwendung auf Kupferzell wurde deutlich, dass sich die Tendenzen der Nutzwerte weitgehend bestätigen. Die interne Homogenität gibt die gleiche Rangfolge wie die Nutzwertanalyse aus, ihre Werte liegen zwischen 46,5 und 70,7%. In einzelnen Szenarien weicht die Rangfolge von der des Mittels leicht ab. Die Alternativen mit dem geringsten Nutzwert weisen also zusätzlich auch die am wenigsten ausgewogene Verteilung auf die Teilaspekte auf. Bei den externen Homogenitäten tauschen Trennsystem und Mischsystem die Rangfolge. Die Werte liegen mit 83,8 bis 95,0% dichter zusammen als für die beiden anderen Parameter. Die Ursache dafür kann sein, dass sich die Szenarien in der Tendenz für einige Dimensionen gleichen. Es kommt z. B. in allen zu Bevölkerungszunahme, erhöhtem Anteil der Siedlungsfläche und Abnahme der Ackerfläche. Der multidimensionale multivariante Zielerreichungsgrad bestätigt die Aussage der Nutzwertanalyse: das erweitert dezentrale System erreicht mit 78,0% den höchsten Wert. Es folgen dezentrale Variante mit 73,3%, Mischsystem mit 56,4% und Trennsystem mit 55,0%.

Die Aggregation der Parameter zu Unterbereichen und Bereichen unterstützt die schnelle Erfassung wesentlicher Aussagen zu den einzelnen Teilnutzen. Die Ergebnisse des Nutzwertes werden durch die Aggregation nicht beeinflusst, die Parameter die die Standardabweichung der einzelnen Teilaspekte berücksichtigen werden dagegen angeglichen, da die Mittelung über einen Teilbereich wie ein Filter wirkt. Für die Berechnung der erweiterten Parameter des Systemwertes wird daher empfohlen auf eine Aggregation zu verzichten.

7.3. Ausblick

Vom Stand der Bearbeitung aus ergeben sich zahlreiche Ansätze die Untersuchung auszubauen. Es sollen hier nur exemplarisch Ideen und Einsichten in Mängel aufgegriffen werden, die während der Bearbeitung deutlich wurden

7.3.1. Modellierung

Bei entsprechender Datenlage wäre es relevant die Abflussganglinien des Pegels Forchtenberg zu regionalisieren, dafür sind aber auch erweiterte Untersuchungen zum Einfluss des Karsts auf das Abflussgeschehen im Unterlauf notwendig.

Auf der Basis koordinierter Klimadaten wäre zu validieren wie gut das Modell Wasserhaushalt und Niedrigwasser abbildet, um die in den Szenarien herausgearbeiteten Tendenzen einordnen zu können.

Das Gebiet erfolgt bereits jetzt zu 60% mit außerhalb des Gebietes gewonnenem Trinkwasser versorgt. Eine Modellierung der Grundwasserressourcen und ihrer Beeinflussung durch Entnahme könnte wertvolle Hinweise auf weitere Vorteile einer dezentralen Regenwasserbewirtschaftung bringen.

Die Parameter des Systemvergleichs erfassen nicht immer die Konsequenzen für das System, sondern nur deren Einflussgrößen. Die Ergebnisse könnten verwendet werden, um Untermodelle z. B. ein Wassergütemodell für das Fließgewässer oder Modelle für den Agrarsektor für die Flächenanteile der Landnutzung zu erfassen.

Auf Grund des großen Anteils Ackerflächen im Gebiet sollten Modelle zur Austragsdynamik von Nährstoffen und Partikeln aus Anbauflächen koordiniert zu den Austrägen aus dem aus der Siedlungsentwässerung betrieben werden. Erst durch die Integration beider Belastungsquellen sind realistische Aussagen zur Belastung des Fließgewässers möglich.

7.3.2. Szenarienentwicklung

Für die Entwicklung der Szenarien wäre eine Befragung von Stakeholdern im Gebiet und die Entscheidungsfindung zu relevanten Tendenzen durch eine breitere Kompetenzbasis verschiedener Wissenschaftler wünschenswert.

Es könnten auch Szenarien entwickelt werden die deutlich andere Tendenzen berücksichtigen, bspw. einen Bevölkerungsrückgang oder die Alterung der Gesellschaft. Diese müssten aber vermutlich mit anderen Modellansätzen in der Bewertung des Systems einbezogen werden

7.3.3. Bewertung des Variantenwertes

Der Vorteil der statistischen Parameter, stochastische Aussagen zu ihrer Unsicherheit zuzulassen, konnte im Rahmen der Arbeit nicht ausgeschöpft werden. Voraussetzung wäre die etablierten Methoden zur Bewertung von Schätzverfahren auf die Charakteristika der Parameter zu adaptieren.

Wie erwähnt gibt es Gründe, die vermuten lassen, dass die relativ ähnlichen externen Homogenitäten auf Tendenzen der Szenarien zurückzuführen sind. Sie sollten für eine breitere Szenarienbasis getestet werden oder für Untersuchungsgebiete, in denen die Extrema der Entwicklungsbandbreite stärker polarisieren.

Im Rahmen der visuellen Beurteilung der Abbildung im Abschnitt zur Anwendung der externen Homogenität wurde die Unterschiedlichkeit über die Abzählung stark veränderter Parameter abgeschätzt. Das Vorgehen entspricht dem Prinzip des Alternativen Vergleichs beim analytic hierarchy process (s. Abschnitt 6.1.1), es schafft schärfere Distinktionsvorgaben, da der integrierende Charakter der statistischen Parameter umgangen wird. Eine Anwendung des AHP für Problemstellungen der Wasserwirtschaft hat nach Kenntnisstand des Autors bisher nicht stattgefunden.

- Achleitner S. et al.: The European Water Framework Directive: Water Quality Classification and Implications to Engineering Planning; Environmental Management; Vol. 35 (4); S. 517-525
- Albrecht R. D. et al.: Optimierung des Mitteleinsatzes bei der Sanierung von Fließgewässern unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten; KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 49 (2002) Nr. 2; S. 364-371
- Andersson L. et al.: Impact of climate change and development scenarios on flow patterns in the Okavango River; Journal of Hydrology 331 (2006), S. 43-57
- Assmann, A.: Die Planung dezentraler, integrierter Hochwasserschutzmaßnahmen; Schriftenreihe des Landesamts für Flurneuordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg; Heft 11 (1999); Kornwestheim
- ATV – A118 (Abwassertechnische Vereinigung – Arbeitsblatt) Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen; 1998; Regelwerk ATV-DVWK; Bad Hönnef
- ATV – A128 (Abwassertechnische Vereinigung – Arbeitsblatt): Richtlinien zur Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwassereinleitungen; 1993; Regelwerk ATV-DVWK; Bad Hönnef
- ATV – A131 (Abwassertechnische Vereinigung – Arbeitsblatt): Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen; 2002; Regelwerk ATV-DVWK; Bad Hönnef
- Bardossy A.: Zukunftsperspektiven für ein integriertes Wasserressourcen-Management im Einzugsgebiet des Neckar; Beitrag zum rivertwin Workshop; 2006; Stuttgart
- Bartels H. et al.: KOSTRA-DWD-2000 Stagnationshöhen für Deutschland, Fortschreibungsbericht; DWD (Deutscher Wetterdienst) Abt. Hydrometeorologie; 2005; Eigenverlag, Offenbach a. M.
- Bernhofer C., Schwiebus A.: Beleg zur Lehrveranstaltung „Allgemeine Meteorologie“: Ableitung von Verdunstungsbeiwerten aus meteorologischen Standardwerten und der mikrometeorologisch bestimmten aktuellen Verdunstung; 2005; internes Arbeitsmaterial der TU-Dresden
- Boller M.: Tracking heavy metals reveals sustainability deficits of urban drainage systems; Water Science and Technology 35 (1997) Heft 9; S. 77-88

- Bronstert A. et al.: Climate change impacts on river flooding: A modelling study of three meso-scale catchments; in Beniston M. (Hrsg.) Climatic Change Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management; 2002; Kluwer Academic Publishers; Dordrecht
- Bronstert A.: Hochwasser in Deutschland unter Aspekten globaler Veränderungen; Bericht über das DFG-Rundgespräch am 09.10.1995 in Potsdam; PIK Report 17 (1996) S. 59ff
- Brown R.: Impediments to Integrated Urban Stormwater Management: The Need for Institutional Reform; Environmental Management; Vol. 36 (2005) Nr. 3; S. 455-468
- Brunner H., Simon T.: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Baden-Württemberg 1:25 000 Blatt 6724 Künzelsau; 1998; Landesvermessungsamt Baden-Württemberg; Stuttgart
- Burian S. J. et al.: Modeling the effects of air quality in urban areas; Environmental Modeling and Assessment; Vol. 7 (2002); S. 179-190; Kluwer Academic Publishers
- Büringer H., Stenius W. : Emissionen im Straßenverkehr: Entwicklung bis 2020; Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg; 5/2005; S. 48-52; Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (Eigenverlag); Stuttgart
- BWK (Der Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau): Ableitung von immissionsorientierten Anforderungen an Misch- und Niederschlagswassereingleitungen unter Berücksichtigungen örtlicher Verhältnisse; 2001; BWK e.V.; Düsseldorf
- Cornelius I.: Bevölkerungsentwicklung in Baden-Württemberg bis 2050, Ergebnisse einer neuen Vorrausrechnung; Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg; 2/2007; S. 14-22; Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (Eigenverlag); Stuttgart
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau): Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlags-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil II Synthese; 1984; Köln
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau): Fallbeispiel zur Nutzwertanalyse – Wasserwirtschaftliche Planung Emstal; Mittelungen 23 (1993);Köln
- EG-WRRl – Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Gemeinschaft; 23.10.2000; Richtlinie 2000/EG/60
- Eisenführ F, Weber M.: Rationales Entscheiden; Springer; 1993; Berlin, Heidelberg
- Emscher Genossenschaft: Eco.RWB – Kostenvergleichsrechnungs-Tool für Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung; 2005
- Früh B. et al.: Korrelation der Bodenfeuchte mit dem Nachfolgenden Niederschlag; Poster zum GLOWA-Symposium; 2003

- Funke R.: Berücksichtigung der Auswirkungen von Klimaveränderungen bei der Planung von Entwässerungssystemen; Seminarunterlagen „Klimaveränderungen – Neue Bemessungsanforderungen an Wasserbau und Stadtentwässerung“; 09.11.2004; Köln
- Gaiser T. et al.: Das EU-Projekt RIVERTWIN-Neckar: Ein Beitrag zum integrierten Flussgebietsmanagement; Beitrag zum 3. KLIWA-Symposium Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft; 2006
- Gardelin M. et al.: Climate change and water resources in Sweden – analysis of uncertainties; in Beniston M. (Hrsg.) Climatic Change Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management; 2002; Kluwer Academic Publishers; Dordrecht
- Gerlinger K.: Simulation des Wasserhaushalts im Neckareinzugsgebiet unter Verwendung regionaler Klimaszenarien; Beitrag zum 2. KLIWA-Symposium Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft; 2004
- Gerstengarbe F.-W. et al.: Bericht zum Werkvertrag Erstellung regionaler Klimaszenarien für Nordrhein-Westfalen; 2004; Potsdam
- GLABW (Geologisches Landesamt Baden-Württemberg): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25 000 Blatt 6724 Künzelsau; 1998; Landesvermessungsamt Baden-Württemberg; Stuttgart
- Goldberg V.: Vorlesungsskript Boden – Pflanze – Atmosphäre; 2006a; internes Abreitsmaterial der TU Dresden
- Goldberg V.: Vorlesungsskript Hydrometeorologie; 2006b; internes Arbeitsmaterial der TU Dresden
- Gross E.: Gemeindeentwicklungskonzept der Gemeinde Kupferzell, Teil 1 Bestandsaufnahme und Bedarfsanalyse; 2007 XXX
- Günther T.: Hydrometeorologische Untersuchungen zum Problem der Klimaveränderungen; Seminarunterlagen „Klimaveränderungen – Neue Bemessungsanforderungen an Wasserbau und Stadtentwässerung“; 09.11.2004; Köln
- Hasler N.: Local climate and water availability changes due to landscape modifications; in Beniston M. (Hrsg.) Climatic Change Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management; 2002; Kluwer Academic Publishers; Dordrecht
- Horlacher A.: Gewässerentwicklungskonzept Kupfer; Diplomarbeit an der FH Nürtingen; 2002; Nürtingen
- Hydrotec: NASIM Programm zur Niederschlags-Abflusssimulation und digitale Programmdokumentation; Version 3.2.2.; 2005

- IGN (Ingenieurgesellschaft Nussbaum): Abwasserbeseitigung Süd: Antrag auf wasserrechtliche Einleitungserlaubnis; 2005; Bitzfeld
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.): Synthesis Report: Developing and Applying Scenarios; 2001a; Cambridge University Press; Cambridge (UK)
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.): Synthesis Report: Human Settlements, Energy and Industry; 2001b; Cambridge University Press; Cambridge (UK)
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.): Special Report of the IPCC; 2000; Cambridge University Press; Cambridge (UK)
- IPS (Ingenieurgesellschaft Professor Sieker mbH): Generalentwässerungsplan der Gemeinde Kupferzell; 2007a; unveröffentlicht
- IPS (Ingenieurgesellschaft Professor Sieker mbH): Programm zur Niederschlags-Abfluss und Schmutzfrachtmodellierung Storm und digitale Programmdokumentation; Version 2.1.0.1; 2007b
- IPS (Ingenieurgesellschaft Professor Sieker GmbH): Entscheidungsmatrix¹ - Programm zur Berechnung und Visualisierung von Nutzwertanalysen; unveröffentlicht, 2007c
- ISC (Ingenieurbüro Schöll Consult): Regenentlastungskonzeption der Gemeinde Kupferzell; 2002; Aalen
- Kalman O. et al: Benefit-Cost Analysis of Stormwater Quality Improvements; Environmental Management Vol. 26 (2000), Nr. 6 S. 615-628
- Kaltschmitt M. et al: Energiegewinnung aus Biomasse; 2002; Gutachten für den WBGU; WBGU; Berlin
- Kasanko M. et al.: Are European cities becoming dispersed? A comparative analysis of 15 European urban areas; Landscape and Urban Planning; Vol. 77 (2006); S. 111-130; Elsevier
- Krebs P.: Siedlungsentwässerung II; Vorlesungsscript; 2006; internes Arbeitsmaterial der TU Dresden
- KLIWA (Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft) (Hrsg.): Der Klimawandel in Baden-Württemberg; 2003a; Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg; Eigenverlag; Mannheim

• ¹ vorläufiger Name

- KLIWA (Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft) (Hrsg.): Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern; 2003b; Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg; Eigenverlag; Mannheim
- KLIWA (Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft) (Hrsg.): Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern; 2005; Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg; Eigenverlag; Mannheim
- KLIWA (Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft) (Hrsg.): Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern; 2006a; Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg; Eigenverlag; Mannheim
- KLIWA (Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft) (Hrsg.): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland; 2006b; Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg; Eigenverlag; Mannheim
- Krauss H.: Die Atmosphäre der Erde; 3. Auflage; 2004; Springer; Berlin, Heidelberg, New York
- Kröhnert S. et al.: Demografische Lage der Nation – Wie zukunftsfähig sind Deutschlands Regionen; Berlin-Institut für Bevölkerung und Entwicklung (Hrsg.); 2006; Berlin
- Kundzewicz Z. W.: Floods in the Context of climate change and variability; in Beniston M. (Hrsg.) Climatic Change Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management; 2002; Kluwer Academic Publishers; Dordrecht
- Kupferzell: Angaben zu Bevölkerung und geplanten Baugebieten von www.kupferzell.de; besucht am 12.03.2007
- Lauer W., Bendix B.: Klimatologie; 2. Aufl.; 2006; Westermann; Braunschweig
- LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen; 1998; Kulturbuchverlag Berlin; Berlin
- LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser): Übersicht über Verfahren zur Kosten-Wirksamkeits Bewertung; 1981; Kulturbuchverlag Berlin; Berlin
- Liu C., Zheng H.: Hydrological cycle changes in Chinas large river basin: The Yellow River drained dry; in Beniston M. (Hrsg.) Climatic Change Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management; 2002; Kluwer Academic Publishers; Dordrecht
- LfFLBW (Landesamt für Flurneuordnung und Landentwicklung): Fachtagung 1999 der Flurneuordnungsverwaltung in Lahr – Ausgewählte Beiträge; Schriftenreihe des LfFLBW Heft 12; 1999; Eigenverlag; Stuttgart

- LfUBW (Landesamt für Umwelt Baden-Württemberg): Oberirdische Gewässer, Gewässergütekarte Baden-Württemberg; Landesanstalt für Umweltschutz; 1998; Stuttgart
- LfUBW (Landesamt für Umwelt Baden-Württemberg): Informationssystem Abflusskennwerte in Baden-Württemberg; Stand 06/2004
- LSABW (Landesamt für Statistik Baden-Württemberg): Struktur- und Regionaldatenbank; <http://statistik-bw.de/SRDB>; besucht am 12.03.2007
- Luijten J.C. et al.: A tool for community-based assessment of the implications of development on water security in hillside watersheds; *Agricultural Systems*; Vol. 70 (2001) S. 603-622; Elsevier
- Mares C. et al.: Testing of NAO and ENSO signals in the precipitation field in Europe; in Beniston M. (Hrsg.) *Climatic Change Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management*; 2002; Kluwer Academic Publishers; Dordrecht
- Martens P., Rotmans J.: Transitions in a globalizing world; *Futures* 37 (2005) S. 1133-1144 ; Elsevier
- Mauser W., Ludwig R.: GLOWA Danube: A research concept to develop integrative techniques, scenarios and strategies regarding global changes of the water cycle; in Beniston M. (Hrsg.) *Climatic Change Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management*; 2002; Kluwer Academic Publishers; Dordrecht
- May W. et al.: Potential future changes in heavy rainfall events in Europe simulated by the HIRHAM regional climate model; Beitrag zur 10. International Conference on Urban Drainage; 2005; Kopenhagen
- Menzel L.: Aktuelle Modellprognosen der weltweiten Klimaentwicklung; Seminarunterlagen „Klimaveränderungen – Neue Bemessungsanforderungen an Wasserbau und Stadtentwässerung“; 09.11.2004; Köln
- MfUVBW (Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg): Wasser und Boden Atlas Baden-Württemberg; 2001; Eigenverlag; Stuttgart
- Middelkoop H. et al.: Scenario analysis in global change assessment for water management in the lower Rhine delta; in Beniston M. (Hrsg.) *Climatic Change Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management*; 2002; Kluwer Academic Publishers; Dordrecht
- Mitchell G.V.: Applying Urban Water Management Concepts: A Review of Australian Experience; *Environmental Management*; Vol. 37 (2006) S. 589-605
- Oke T. R.: *Boundary Layer Climates*; 2. Aufl.; 1987; Methuen & Co.; London

- Payraastre O. et al.: Use of historical data to assess the occurrence of floods in small watersheds in the French Mediterranean area; *Advances in Geosciences*; Nr. 2 2005; S. 313-320; European Geosciences Union
- Peters C.: Potenziale von Speicherung, Echtzeitsteuerung zur Mischwasseraufbereitung, dezentraler Regenwasserbewirtschaftung und Urinseparation zur Minimierung der Gewässerbeeinträchtigung; Dissertation;
- Pottgiesser T., Sommerhäuser M.: Vorläufige Steckbriefe der deutschen Fließgewässertypen; LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser); 2004
- Rahmstorf S.: Klimawandel – Rote Karte für die Leugner; *Bild der Wissenschaft*; Nr. 1/2003
- Rauch W. et al.: Integrated Approaches in Urban Stormwater Drainage: Where Do We Stand?; *Environmental Management*; Vol. 35 (2005a) Nr. 4; S. 396-409
- Rauch W., De Toffol S.: On the issue of trend and noise in the estimation of extreme rainfall properties; Beitrag zur 10. International Conference on Urban Drainage; 2005b; Kopenhagen
- Ravetz J.: City-region 2020. Integrated planning for a sustainable environment; 2000; Earthscan, London
- Rehfuess K. E.: Waldböden: Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung; 2. Aufl.; 1990; Parey; Hamburg, Berlin
- RPS (Regierungspräsidium Stuttgart): Pegeldaten des Pegels Forchtenberg; Bearbeitungsstand: 17.01.2007
- Ruiz Rodriguez E. et al.: Fallbeispiel zur Nutzwertanalyse -Wasserwirtschaftliche Planung Emstal; *Mitteilungen des DVWK*; 1993 Nr. 23; Bonn
- RVHF (Regionalverband Heilbronn-Franken): Regionalplan Franken-Heilbronn 2020; 2006; Eigenverlag RVHF; Heilbronn
- Saaty T. L.: Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process; 2. Aufl.; RWS Publishers; 1990; Artarmon
- Sahm H. (Regierungspräsidium Stuttgart, Abteilung Umwelt) telefonische Mitteilung vom 23.11.2006
- Schilling W.: Urban Drainage, Quo Vadis? Beitrag zum XXX. IAHR Kongress; 2003; Thessaloniki
- Schmitt T.G.: Klimaveränderungen – Konsequenzen für die Siedlungsentwässerung?; *Wasser – Abwasser* Vol. 147 (2006) Nr. 3; S. 209-214

- Sieker F. et al.: Ökologische und ökonomische Vergleichsbetrachtung zwischen dem Konzept der konventionellen Regenwasserentsorgung und dem Konzept der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung, Endbericht zum Forschungsprojekt des Umweltbundesamtes; 2006; Hannover
- Sieker F. et al.: Zielgrößen und Anforderungen an die künftige Regenwasserbewirtschaftung in Neubau-, Erweiterungs- und Sanierungsgebieten, Teil I: Die Jahreswasserbilanz als maßgebendes Planungskriterium; Wasser – Abwasser Vol. 147 (2006b)
- Semadeni-Davies A. et al.: Development of climate and urban drainage scenarios for impact assessment for Helsingborg, southern Sweden
- Sommer H.: Behandlung von Straßenabflüssen: Anlagen zur Behandlung und Filtration von Straßenabflüssen in Gebieten mit Trennsystemen; Dissertation; 2006; Leibnitz Universität Hannover; unveröffentlicht
- Sundberg C. et al.: Re-framing the assessment of sustainable stormwater systems; Cleaning Technology and Environmental Policy 6 (2004); S. 120-127
- Tetzlaff D., Grottker M., Leibundgut C., 2005: Hydrological criteria to assess changes of flow dynamic in urban impacted catchments; Physics and Chemistry of the Earth 30, S. 426–431
- UKCIP (United Kingdom Climate Impacts Programme): Socio-economic scenarios for climate change impact assessment; UKCIP; 2001; Oxford
- UNDESA (Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat): World Population Prospects: The 2004 Revision; 2004; United Nations Publication; New York
- UNDESA (Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat): World Population Prospects: The 2006 Revision; 2006a; <http://esa.un.org/unpp>; besucht am 01.04.2007
- UNDESA (Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat): World Economic Situation and Prospects Update as of mid-2007; 2007; <http://esa.un.org/unpp>; besucht am 01.04.2007
- UNDESA (Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat): International Migration 2006; 2006b; Eigenverlag; New York
- UNSD United Nations Statistics Division: Demographic Yearbook 2003, Database Update for 2006; 2006; United Nations Publication; New York update von <http://unstats.un.org>; Stand: 01.08.2006

- UNSD (Division for Sustainable Development of the United Nations Secretariat): Expert Group Meeting on Indicators of Sustainable Development;
- USSL (United States Salinity Laboratory): ROSETTA Predicting soil hydraulic parameters from basic soil data Programm und digitale Programmdokumentation; 1999
- van de Giesen N. et al.: The GLOWA Volta project: Integrated assessment of feedback mechanisms between climate, landuse and hydrology; in Beniston M. (Hrsg.) Climatic Change Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management; 2002; Kluwer Academic Publishers; Dordrecht
- van Luijtelea H. et al.: Climate change and urban drainage: Beitrag zur 10. International Conference on Urban Drainage; 2005; Kopenhagen
- Varis O. et al.: From Climate Models to Water Resources Management and Vice Versa; Climatic Change; 66 (2004); S 321-344; Kluwer Academic Publishers; Dordrecht
- Viner D.: A qualitative assessment of the sources of uncertainty in climate change impacts assessment studies; 2002; Kluwer Academic Publishers; Dordrecht
- von Storch H., Flöser G. (Hrsg.): Anthropogenic Climate Change; 1999; Springer; Berlin, Heidelberg, New York
- Vörösmarty C.J. et al.: Global Water Resources: Vulnerability from Climate change and Population Growth; Science 289 (2000);S.284-288
- Weinbrenner P.: Szenario-Technik; in Wolfgang Mickel (Hrsg.) Handbuch zur politischen Bildung; 1999 Bundeszentrale für politische Bildung; S. 373-378; Bonn
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen)(Hrsg.): Welt im Wandel: Grundstruktur globaler Mensch-Umwelt-Beziehungen; 1993; Economica; Bonn
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen)(Hrsg.): Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit; 2003; Springer; Berlin - Heidelberg - New York
- Werner J.: Flächeninanspruchnahme in den Bundesländern; Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg; 7/2006; S. 14-22; Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (Eigenverlag); Stuttgart
- WHG – Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts; 19.08.2002, Stand 25.06.2005; BGBl. IS 1756
- Zimmerman U.: Eine einzugsgebietsweite Betrachtung der Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten im Hinblick auf eine nachhaltige optimierte Sanierungsstrategie; Dissertation; 2006; Leibnitz Universität Hannover; Frankfurt a. M.

ANHANG

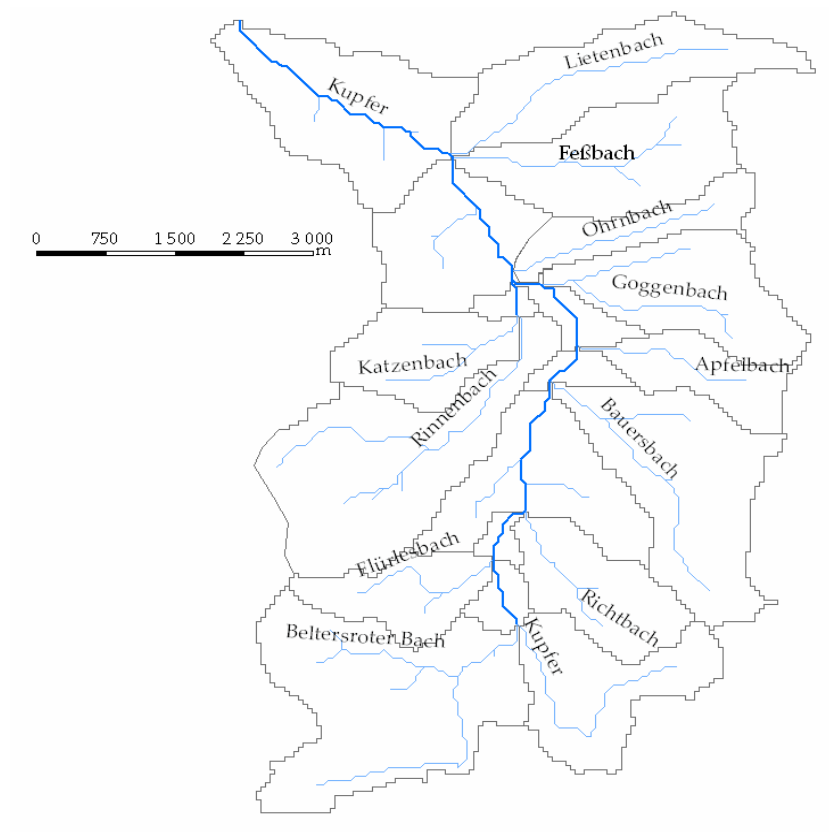


Abb. A 1 Übersicht über Nebengewässer der Kupfer

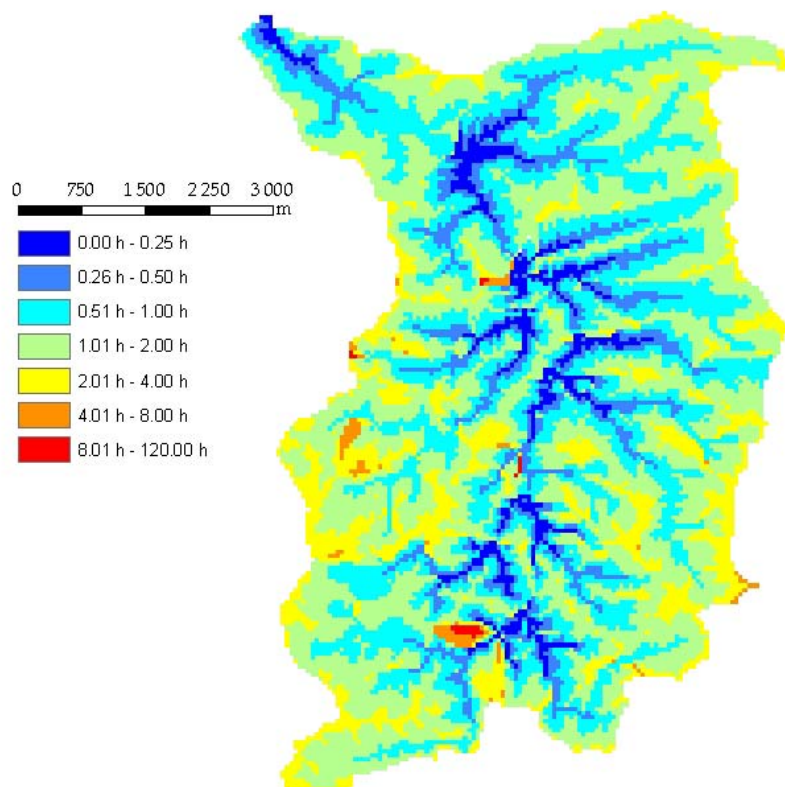


Abb. A 2 Isochronen des Oberflächenabflusses für das Einzugsgebiet, ermittelt aus Landnutzung und DGM50

Tab. A 1-1 Strukturaufnahme der Kupfer und ihrer Zuflüsse als Ergebnis einer Gewässerbegehung

Gewässer	Sohlstruktur	Sohlbreite	Uferstruktur	Uferprofil
Kupfer – EZG-auslass	Pool-Riffle Sequenzen Blöcke bis 20cm	5m	gestreckt; Gras, Buschgruppen, Bäume auf HW-Linie	Trapez ~ 1:2
Kupfer – Bereich KA	Betongittersteine / Feinsediment	5m	gestreckt; Gras / Einzelbüsche; Baumreihe auf HW-Linie	Trapez ~ 1:2
Kupfer – Stadt Kupferzell	Sohle Blöcke 5 – 30cm	5m	gestreckt; Gras	Kasten bis Trapez ~ 1:1
Lietenbach	Betonsteine, Graseinstand	0,5-1m	begradigt; Gras, Einzelbäume	Trapez ~ 1:1
Feßbach	Betonsteine, Graseinstand	1m	begradigt; Gras, Einzelbäume	Trapez 1:2
Ohmbach	Feinsediment bis Blockwerk (60cm) starke Gliederung Pool-Riffle Sequenzen	2m	gestreckt bis stark gewunden; Blockwerk, Büsche & Bäume dicht	Trapez 1:3 bis 1:5
Goggenbach OL	Betonsteine, Graseinstand	0,5-1m	begradigt; Gras, Einzelbäume	Trapez ~ 1:1
Kupfer Mdg.bereich Goggenbach	Blockwerk bis 30 cm	3m	gewunden; Baumreihe, Blockwerk, Vegetation	Trapez ~ 1:2

Tab. A 1-2

Gewässer	Sohlstruktur	Sohlbreite	Uferstruktur	Uferprofil
Katzenbach OL	Betonsteine, Graseinstand	0,5-1m	begradigt; Gras, Schilf	Trapez ~ 1:2
Rinnenbach Mdg.bereich	Grobkies bis 5cm / Feinsediment	3m	Gras; Baumreihe auf HW-Linie	Trapez 1:2
Rinnenbach UL	Grobkies-Block 3-10cm	1-2m	gewunden; Baumreihe / Gras	Trapez 1:3
Rinnenbach OL	Blöcke bis 20cm	1m	gestreckt; Gras, Einzelbäume	Trapez 1:1
Kupfer – Bereich KA Süd	Feinsediment bis Blockwerk (40cm) Pool-Riffle Sequenzen	1-2m	gewunden; Gras, Baumreihe	Trapez 1:1
Flürlesbach UL	Betonsteine, Graseinstand	0,5-1m	Baum / Busch / dichte Vegetation	Trapez 1:1
Flürlesbach OL (Bereich Depo- nie)	Betonsteine	1m	begradigt Betonsteine	Trapez 1:2
Beltersroter Bach UL	Betonsteine	0,5m	begradigt; Gras	Trapez 1:1
Beltersroter Bach OL	Grobkies- Blockwerk (50cm) stark gegliedert	0,5-2m	gewunden; Auskolkungen Blockwerk, Buschgruppen	Trapez 1:5
Bauersbach	Grobkies- Blockwerk (50cm)	1-2m	Blockwerk, Buschgruppen, Baum- reihe	Trapez 1:5

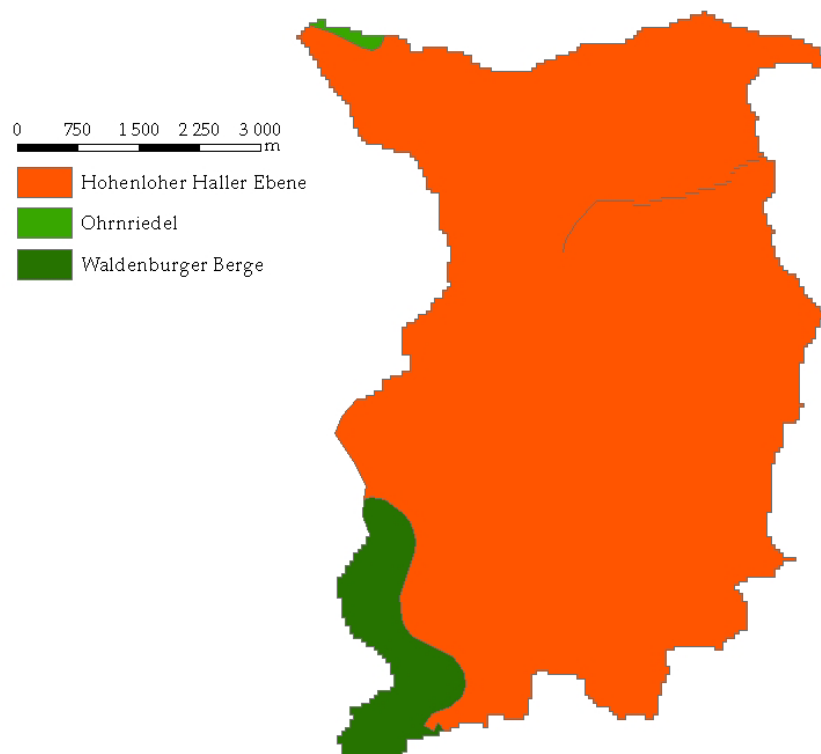


Abb. A 3 Naturräume im Bereich des Einzugsgebietes,
erstellt aus Daten des Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg [MfUVBW, 2001]

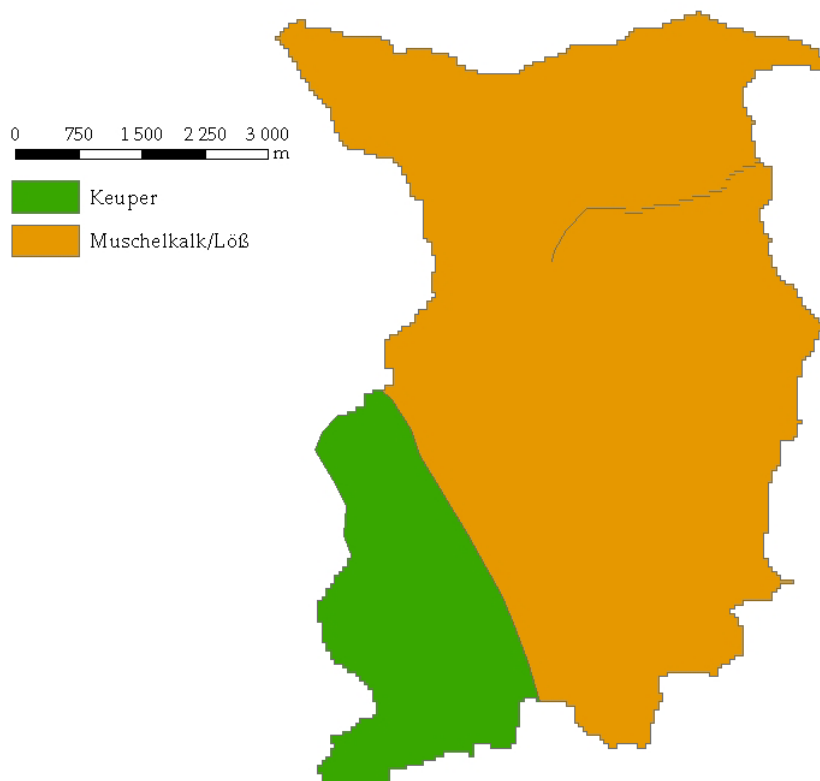


Abb. A 4 Verteilung der Bodenarten im Einzugsgebiet nach Bodengesellschaften der Bodenübersichtskarte von
Baden-Württemberg 1:200 000

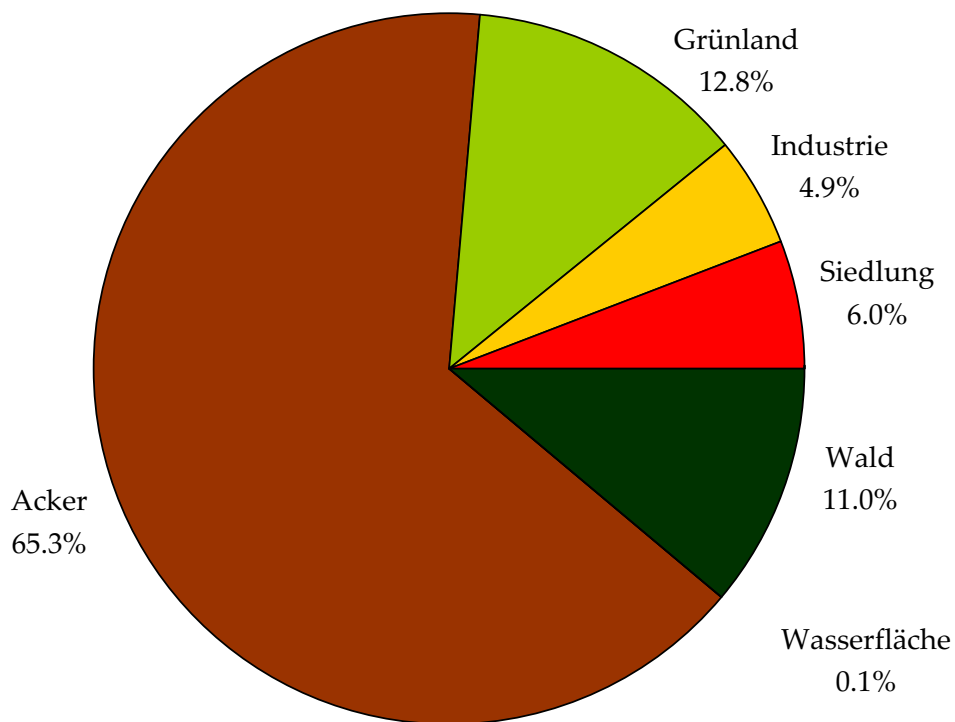


Abb. A 5 Anteile der Landnutzungsarten an der Gesamtfläche des Einzugsgebietes, abgeleitet aus ATKIS-Daten

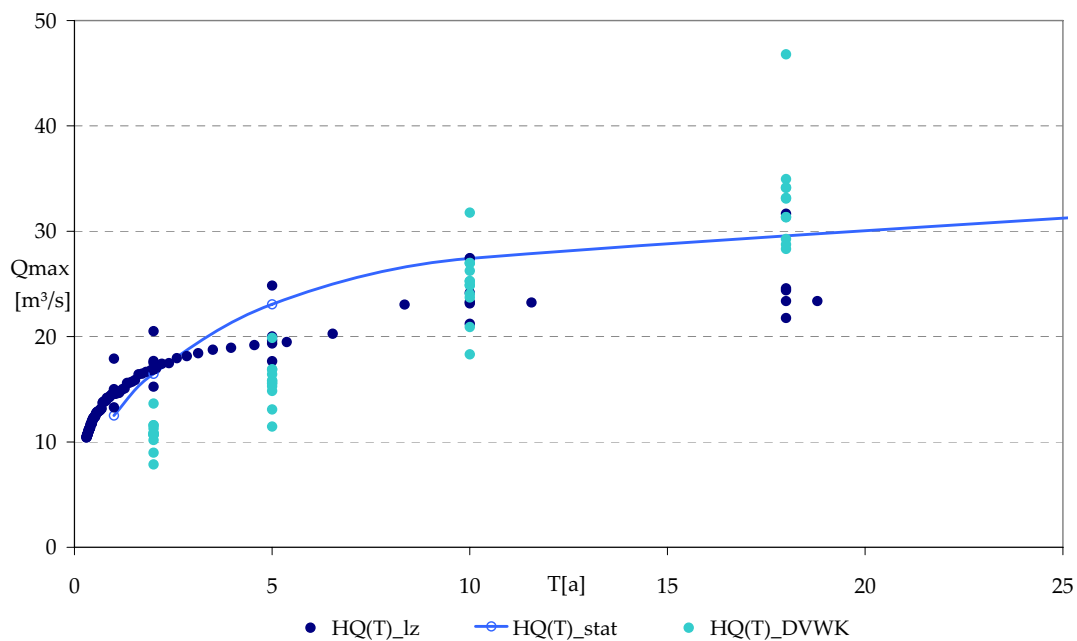


Abb. A 6 Spitzendurchflüsse für verschiedene Jährlichkeiten der sieben besten Kalibrierungskonfigurationen mit unterschiedlichen Bemessungsregen und statistische Jährlichkeiten

Tab. A 2 Werte der monatlichen und jährlichen Temperatur und Verdunstung

Monat	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Jahr
T [°C]	0.1	1.4	4.7	8.6	13.1	16.2	18.0	17.4	14.1	9.5	4.5	1.3	9.1
T _{max} [°C]	3.6	5.1	8.3	13.0	17.8	20.3	22.0	22.2	18.4	13.2	6.9	4.2	12.9
ET _P [mm/M]	11.1	16.6	31.7	53.8	81.1	86.9	90.2	84.4	58.1	29.0	12.4	9.1	513

Tab. A 3 Reichweiten von Plausibilität und Kalibrierung und Endwerte der Kalibrierung

Parameter	untere Plau- sib.grenze	minimaler Kali.wert	End- Kali.wert	maximaler Kali.wert	obere Plau- sib.grenze
K _O [h]		2	10	12	
K _O (I _G >5%) [h]		1	7	12	
K _H [h]		18	36	36	
K _H (I _G >5%) [h]		12	32	36	
K _I [h]		30	50	80	
k _f (gS) [m/s]	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	3x10 ⁻⁵	4x10 ⁻⁴	10 ⁻³
k _f (S) [m/s]	5x10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	3x10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴
k _f (U) [m/s]	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	3x10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵
k _f (L) [m/s]	10 ⁻⁷	5x10 ⁻⁷	8x10 ⁻⁶	3x10 ⁻⁵	10 ⁻⁴
k _f (T) [m/s]	5x10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	3x10 ⁻⁷	8x10 ⁻⁷	10 ⁻⁶
Inf (gS) [mm/h]	36	50	90	150	360
Inf (S) [mm/h]	9	20	45	60	90
Inf (U) [mm/h]	4.5	15	25	30	50
Inf (L) [mm/h]	4.5	9	25	40	320
Inf (T) [mm/h]	0.8	2	5	10	40

Tab. A 4-1 Übersicht über die Formeln zur Anpassung der Parameter an die Szenarien des globalen Wandels

F. 21 Skalierung des Niederschlags	
$\text{wenn } \left\{ \begin{array}{l} 5 \leq \text{Monat} < 11 \\ 5 > \text{Monat} \geq 11 \\ P_{\text{Tag}} > 20\text{mm} \end{array} \right\} \text{ dann } \left\{ \begin{array}{l} P_n = P_0 * k_{\text{So}} \\ P_n = P_0 * k_{\text{Wu}} \\ P_n = P_0 * \frac{k_{\text{SR}}}{k_{\text{So}} / k_{\text{Wi}}} \end{array} \right\}$	
P_0 / ist	Niederschlag im ist- / Szenarienzustand
$k_{\text{So}} / \text{Wi} / \text{SR}$	Faktoren für das Sommer- / Winterhalbjahr / Starkregentage
F. 22 Anpassung Einwohnergleichwerte der Industrie	
$\text{EGW}_{\text{ind}, \text{Sz}} = (1 + p_{\text{BIP}})^{\Delta t} * \text{EGW}_{\text{ind}, \text{ist}}$	
$\text{EGW}_{\text{ind}, \text{Sz}} / \text{ist}$	EGW der Industrie-TW-elemente im ist / Szenarienzustand
p_{BIP}	Wachstum des Bruttoinlandsproduktes p. a.
Δt	Zeitunterschied zwischen Referenz (Ende der stat. Aufzeichnung) und Szenarienzeitpunkt 2050
F. 23 Anpassung Industrieflächen	
$A_{\text{ind}, \text{Sz}} = k_{\text{A}, \text{ind}} * (1 + p_{\text{BIP}})^{\Delta t} * A_{\text{ist}}$	
$A_{\text{ind}, \text{Sz}} / \text{ist}$	Fläche der Industrie-EF im ist / Szenarienzustand
$k_{\text{EGW}, \text{ind}}$	szenarienabhängiger Faktor der Industrie-EF
Tab. A4-2	
F. 24 Anpassung des Wasserverbrauchs	
$\text{WV}_{\text{ind} / \text{priv}, \text{Sz}} = k_{\text{WV}, \text{ind} / \text{priv}} * \text{WV}_{\text{ind} / \text{priv}, \text{ist}}$	
$\text{WV}_{\text{ind} / \text{priv}, \text{Sz}} / \text{ist}$	häuslicher / gewerblicher Wasserverbrauch im ist / Szenarienzustand
$k_{\text{WV}, \text{ind} / \text{priv}}$	szenarienabhängiger Faktor der EGW Industrie-TW-elemente
F. 25 Anpassung der Fahrzeugbelastung	
$c_{\text{str}, \text{Sz}} = k_{\text{Str}} * \frac{\text{FL}_{\text{a}, \text{Sz}}}{\text{FL}_{\text{a}, \text{ist}}} * c_{\text{str}, \text{ist}}$	
$c_{\text{str}, \text{Sz}} / \text{ist}$	Stoffkonzentration des Stoffparameter Straße im ist / Szenarienzustand
k_{Str}	szenarienabhängiger Faktor für die Veränderung des Schadstoffausstoßes
$\text{FL}_{\text{a}, \text{Sz}} / \text{ist}$	Jahresfahrleistung der PKW im Gebiet für den ist / Szenarienzustand
F. 26 Anpassung der umweltgerechten Produktion	
$c_{\text{TW ind}, \text{Sz}} = k_{\text{TW ind}} * c_{\text{TW ind}, \text{ist}}$	
$c_{\text{TW ind}, \text{Sz}} / \text{ist}$	gewerbliche TW-belastung im ist / Szenarienzustand
$k_{\text{WV}, \text{ind} / \text{priv}}$	szenarienabhängiger Faktor der gewerblichen TW-belastung

F. 27 Anpassung Einwohnergleichwerte der Haushalte

$$EGW_{priv,Sz} = (1 + p_{EW})^{\Delta t} * EGW_{priv,ist}$$

$EGW_{priv, Sz / ist}$ EGW der Haushalts-TW-elemente im ist / Szenarienzustand

p_{EW} Änderungsrate der Bevölkerung p. a.

Δt Zeitunterschied zwischen Referenz (Ende der stat. Aufzeichnung) und Szenarienzzeitpunkt 2050

F. 28 Berechnungsalgorithmus zur Anpassung der Landnutzungsflächen

$$A_{Ack / Sdl / Wei / Wal, Sz} = k_{A Ack / Sdl / Wei / Wal} * A_{Ack / Sdl / Wei / Wal, ist}$$

$$A_{Ack / Sdl, Sz} = k_{A Ack / Sdl} * A_{Ack / Sdl, ist}$$

$$\text{while } A_{EZG} \neq A_{Ack, Sz} + A_{Sdl, Sz} + A_{Wei, Sz} + A_{Wal, Sz} + A_{Was, ist}$$

$$\text{do } k_{A Wei / Wal} = k_{A Wei / Wal} \pm \Delta k$$

$$A_{Wei / Wal, Sz} = k_{A Wei / Wal} * A_{Wei / Wal, ist}$$

$CTW_{ind, Sz / ist}$ gewerbliche TW-belastung im ist / Szenarienzustand

$k_{WV, ind/priv}$ szenarienabhängiger Faktor der gewerblichen TW-belastung

F. 29 Anpassung der Infiltrationsleistung von Ackerflächen

$$Inf_{Sz} = k_{Inf} * Inf_{ist}$$

$Inf_{Sz / ist}$ maximale Infiltration auf Ackerflächen ist / Szenarienzustand

$k_{WV, ind/priv}$ szenarienabhängiger Faktor der Infiltration

Tab. A 5-1 detaillierte Übersicht über die Absolutwerte der Modellparameter

Parameter	ist	lin	lf	ko	wo
Stoffkonzentration Siedlung [mg /l]					
CSB	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0
BSB	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3
NH ₄ -N	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
SS	141.0	141.0	141.0	141.0	141.0
N	6.70	6.70	6.70	6.70	6.70
P	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Cu	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
Pb	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Stoffkonzentration Industrie [mg/l]					
CSB	53.3	53.3	64.0	42.6	53.3
BSB	13.7	13.7	16.4	11.0	13.7
NH ₄ -N	2.2	2.2	2.64	1.76	2.2
SS	153.0	153.0	183.6	122.4	153.0
N	5.00	5.00	6.00	4.00	5.00
P	0.75	0.75	0.90	0.60	0.75
Cu	0.24	0.24	0.29	0.19	0.24
Pb	0.10	0.10	0.12	0.08	0.10
Stoffkonzentration Straße [mg/l]					
CSB	88.1	168.3	168.3	74.4	134.6
BSB	15.0	28.7	28.7	12.7	22.9
NH ₄ -N	1	1.91	1.91	0.845	1.528
SS	210.0	401.1	401.1	177.5	320.9
N	2.80	5.35	5.35	2.37	4.28
P	0.90	1.72	1.72	0.76	1.38
Cu	0.08	0.15	0.15	0.07	0.12
Pb	0.18	0.34	0.34	0.15	0.28
Stoffkonzentration Trockenwetter Gewerbe [mg/l]					
CSB	1159	686	966	1449	1159
BSB	579.0	342.6	482.5	723.8	579.0
NH ₄ -N	20.4	12.1	17.0	25.5	20.4
SS	249.0	147.3	207.5	311.3	249.0
N	106.0	62.7	88.3	132.5	106.0
P	17.4	10.3	14.5	21.8	17.4

Tab. A 5-2

Parameter	ist	lin	lf	ko	wo
Stoffkonzentration Trockenwetter Haushalt [mg/l]					
CSB	1159	2898	966	1449	1159
BSB	579.0	1447.5	482.5	723.8	579.0
NH ₄ -N	20.4	51	17	25.5	20.4
SS	249.0	622.5	207.5	311.3	249.0
N	106.0	265.0	88.3	132.5	106.0
P	17.4	43.5	14.5	21.75	17.4
Klimadaten					
Jahressumme P[mm/a]	913	913	1023	1027	1041
Jahresmittel T [°C]	9.1	9.1	11.8	9.9	11.2
Jahressumme ETP [mm/a]	632	632	812	683	769
Bodendaten					
max. Inf. [mm/h]					
Sl4 oben	21.0	21.0	15.8	27.3	18.9
St2 unten	21.0	21.0	15.8	27.3	18.9
Ul3 oben	8.50	8.50	6.38	11.05	7.65
Slu unten	21.0	21.0	15.8	27.3	18.9
Tl2 oben	4.00	4.00	3.00	5.20	3.60
Sl2 oben	21.0	21.0	15.8	27.3	18.9
gS unten	75.0	75.0	56.3	97.5	67.5
Flächen [ha]					
ACKE	2639	2190	2137	2481	2296
GRUE	615.2	339.0	691.3	615.4	749.6
INDU	146.0	541.7	305.1	179.5	261.3
SIED	216.9	470.7	483.7	234.3	310.2
WALD	445.5	521.2	445.5	552.4	445.5
WASS	2.43	2.43	2.43	2.43	2.43
Trockenwetter					
EGW _{Ind}	2657	8028	9042	3487	5948
EGW _{priv}	6201	9673	8805	6389	7255
WV _{Ind}	103.5	174.9	124.2	82.8	103.5
WV _{priv}	103.5	41.4	124.2	82.8	103.5

Tab. A 6 auszutauschende Kanallängen im Mischwassersystem für die verschiedenen Zukunftsszenarien

Szenario	spezifisches Ab- flussverhältnis	Austauschlänge Rohre [m]	Zusatzvolumen RÜB [m³]
konservierend	1.20	5421	699
wachstumsorientiert	1.98	16437	3524
linear	2.12	17921	4019
Lastfall	3.09	23358	7483

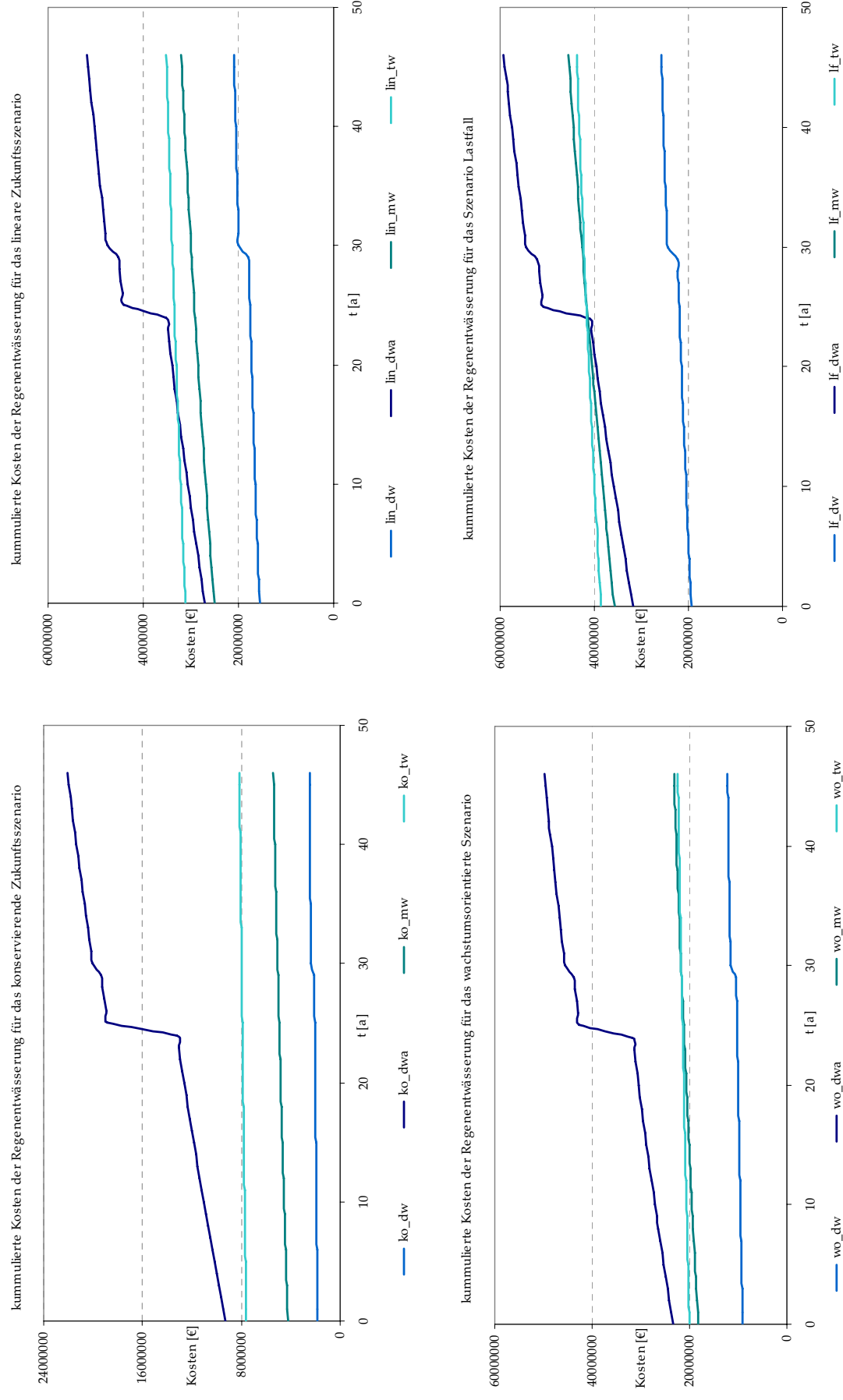
Tab. A 7 Übersicht über die Dimensionen der dezentralen Entwässerungselemente für die verschiedenen Szenarien

Szenario	Fläche Rigolen (dw) [m²]	Fläche Rigolen (dwa) [m²]	Fläche Grün- dächer [m²]	Volumen Zis- ternen [m³]
konservierend	12 682	23 955	124 273	8 068
wachstumsorientiert	52 336	69 493	221 416	16 738
linear	89 257	95 365	237 113	10 809
Lastfall	116 452	93 841	267 621	11 417

Tab. A 8 Investitions- und Betriebskosten sowie Projektkostenbarwerte der Alternativen

Alternative	Kosten [€]	Betriebskosten [€/a]	PKBW [€]
ko_dw	1 857 706	11 019	2 484 081
ko_dwa	9 336 600	192 244	22 077 105
ko_mw	4 326 992	32 733	5 404 418
ko_tw	7 792 624	15 841	8 148 894
wo_dw	9 253 554	55 950	12 177 454
wo_dwa	23 672 361	402 176	49 840 306
wo_mw	18 593 171	139 728	23 188 912
wo_tw	20 518 781	67 046	22 387 846
lin_dwa	27 421 952	394 635	51 811 090
lin_mw	25 634 959	194 140	32 026 128
lin_tw	31 892 945	112 801	35 113 728
lf_dw	19 802 016	121 508	25 730 272
lf_dwa	32 200 816	449 768	59 254 817
lf_mw	36 511 031	273 380	45 498 846
lf_tw	39 599 393	143 808	43 736 227

Abb. A 7 Übersicht über die Verläufe der kumulierten Kosten für die Alternativen und Varianten des Entwässerungssystems



Tab. A 9-1 Übersicht über die Parameter des Variantenvergleichs

Parameter:	20-jähriges Hochwasser 5%				
Bedeutung:	Hochwasserschutz: der Spitzendurchfluss bestimmt über den maximalen Wasserstand die Überflutungsräume im Auenbereich, die Gefährdung von Schutzgütern ist Funktion des Wasserstandes				
Ermittlung:	statistische Auswertung der Langzeitsimulation				
Zielgröße:	szenarienintern: $z_{\text{HQ20}} = \frac{\text{HQ}_{20_alt}}{\text{HQ}_{20_nat}}$ mit $\text{HQ}_{20_alt} / \text{nat}$: 20-jähriger Durchfluss im Alternativen / pot. nat. Zustand				
Nutzwert:	NW	0	0.2	0.8	1
	ZHQ20	2	1.67	1.09	1
Parameter:	mittleres Hochwasser 7%				
Bedeutung:	natürliche Abflussdynamik: besonders hoher Einfluss der Siedlungstätigkeit, erhöhte Abflüsse bewirken hydraulischen Stress für die Ökosysteme, Erosions-Sedimentations-Dynamik				
Ermittlung:	statistische Auswertung der Langzeitsimulation				
Zielgröße:	szenarienintern: $z_{\text{MHQ}} = \frac{\text{HQ}_{1_alt}}{\text{HQ}_{2_nat}}$ mit $\text{HQ}_{1_alt} / 2_nat$: einjähriger Durchfluss im Alternativen- / zweijähriger Durchfluss im pot. nat. Zustand				
Nutzwert:	NW	0	0.2	0.8	1
	ZMHQ	2	1.50	1.04	1
Parameter:	mittleres Niedrigwasser 5%				
Bedeutung:	Gefährdung von Lebensräumen, eine vom natürlichen Maß stark erhöhte Niedrigwasserdauer senkt die biologische Durchgängigkeit von Gewässern, ist Ausdruck von stark beeinflusstem Wasserhaushalt / Grundwasser				
Ermittlung:	Auswertung der Durchflussganglinie mit MATLAB-Routine nach Tagen mit MNQ potentiell natürliches MNQ				
Zielgröße:	szenarienintern: $z_{\text{MNQ}} = \frac{d(\text{MNQ}_{alt})}{d(\text{MNQ}_{nat})}$ mit $\text{MNQ}_{alt} / \text{nat}$: mittleres Niedrigwasser im Alternativen / pot. nat. Zustand				
Nutzwert:	NW	0	0.2	0.8	1
	ZMNQ	2	1.33	1.11	1

Tab. A 9-2

Parameter:	Jahresfracht chemischer Sauerstoffbedarf					2%
Bedeutung:	Eintrag organischer Substanz in das Fließgewässer, durch Sauerstoffzehrung kommt es zu anaeroben Zuständen in Gewässer und Interstitial, Gefährdung von sauerstoffbedürftigen Arten, ästhetische Beeinträchtigung					
Ermittlung:	Auswertung der mittleren Jahresfrachten des Fließgewässers: Anteil des zurückgehaltenen CSB					
Zielgröße:	$z_{\text{CSB}} = \frac{F(\text{CSB})_{\text{FG}}}{F(\text{CSB})_{\text{ges}}}$ szenarienintern: mit $F(\text{CSB})_{\text{FG}}$ / ges: mittlere CSB-Jahresfracht im Fließgewässer / Gesamtsystem					
Nutzwert:	NW	0	0.2	0.8	1	
	zCSB	1	0.63	0.38	0	
Parameter:	Jahresfracht abfiltrierbare Stoffe					4%
Bedeutung:	physikalische und chemische Belastung der Gewässer, die eingetragenen Partikel wirken abrasiv auf benthische Organismen, Kolmation des Interstitials, Träger von Schadstoffen und Toxika					
Ermittlung:	Auswertung der mittleren Jahresfrachten des Fließgewässers: Anteil des zurückgehaltenen SS					
Zielgröße:	$z_{\text{SS}} = \frac{F(\text{SS})_{\text{FG}}}{F(\text{SS})_{\text{ges}}}$ szenarienintern: mit $F(\text{SS})_{\text{FG}}$ / ges: mittlere SS-Jahresfracht im Fließgewässer / Gesamtsystem					
Nutzwert:	NW	0	0.2	0.8	1	
	zSS	1	0.73	0.42	0	
Parameter:	Jahresfracht Stickstoff					3%
Bedeutung:	Nährstoffbelastung der Gewässer, unterstützt Wachstum von autotrophen Organismen, Eutrophierung, ästhetische Beeinträchtigung					
Ermittlung:	Auswertung der mittleren Jahresfrachten des Fließgewässers: Anteil des zurückgehaltenen N					
Zielgröße:	$z_{\text{N}} = \frac{F(\text{N})_{\text{FG}}}{F(\text{N})_{\text{ges}}}$ szenarienintern: mit $F(\text{N})_{\text{FG}}$ / ges: mittlere N-Jahresfracht im Fließgewässer / Gesamtsystem					
Nutzwert:	NW	0	0.2	0.8	1	
	zN	1	0.74	0.42	0	

Tab. A 9-3

Parameter:	Jahresfracht Phosphor 3%				
Bedeutung:	Nährstoffbelastung der Gewässer, unterstützt Wachstum von autotrophen Organismen, Eutrophierung, ästhetische Beeinträchtigung				
Ermittlung:	Auswertung der mittleren Jahresfrachten des Fließgewässers: Anteil des zurückgehaltenen N				
Zielgröße:	szenarienintern: $z_P = \frac{F(P)_{FG}}{F(P)_{ges}}$ mit $F(P)_{FG} / ges$: mittlere P-Jahresfracht im Fließgewässer / Gesamtsystem				
Nutzwert:	NW	0	0.2	0.8	1
	zCu	1	0.58	0.37	0
Parameter:	Jahresfracht Kupfer 2%				
Bedeutung:	Schwermetall, Anreicherung im Sediment und in Organismen, kumulative toxische Wirkung				
Ermittlung:	Auswertung der mittleren Jahresfrachten des Fließgewässers: Anteil des zurückgehaltenen Cu				
Zielgröße:	szenarienintern: $z_{Cu} = \frac{F(Cu)_{FG}}{F(Cu)_{ges}}$ mit $F(Cu)_{FG} / ges$: mittlere P-Jahresfracht im Fließgewässer / Gesamtsystem				
Nutzwert:	NW	0	0.2	0.8	1
	zCu	1	0.90	0.58	0
Parameter:	Jahresfracht Blei 2%				
Bedeutung:	Schwermetall, Anreicherung im Sediment und in Organismen, kumulative toxische Wirkung				
Ermittlung:	Auswertung der mittleren Jahresfrachten des Fließgewässers: Anteil des zurückgehaltenen Pb				
Zielgröße:	szenarienintern: $z_{Pb} = \frac{F(Pb)_{FG}}{F(Pb)_{ges}}$ mit $F(Pb)_{FG} / ges$: mittlere P-Jahresfracht im Fließgewässer / Gesamtsystem				
Nutzwert:	NW	0	0.2	0.8	1
	zPb	1	0.83	0.48	0

Tab. A 9-4

Parameter:	Erhalt von Feuchtgebieten				2%
Bedeutung:	Unterstützen eine vielfältige Abwechslungsreiche Landschaft, Lebensraum seltener Organismen, Dämpfungsfunktion für Hochwässer, Bestehen wird positiv bewertet				
Ermittlung:	qualitativ				
Zielgröße:	Szenario	ges. Bedeutung	Entw.alternative	ZFG	
	lin	mittel	mw	behindert	
	lf	mittel	tw	kein Einfluss	
	ko	hoch	dw	fördert	
	wo	niedrig	dwa	fördert	
Nutzwert:	NW	0	1		
	ZFG	0	1		
Parameter:	Verbesserung des Kleinklimas				3%
Bedeutung:	Erhöhung der Temperatur und Absenkung von Luftfeuchtigkeit und z. T. Niederschlag in urbanen Räumen, Abdämpfung dieser Effekte durch Grün- und Wasserflächen wird positiv bewertet				
Ermittlung:	qualitativ				
Zielgröße:	Szenario	ges. Bedeutung	Entw.alternative	ZFG	
	lin	mittel	mw	behindert	
	lf	mittel	tw	behindert	
	ko	hoch	dw	ermöglicht	
	wo	niedrig	dwa	fördert	
Nutzwert:	NW	0	1		
	ZP	0	1		
Parameter:	Förderung der Grundwasserneubildung				4%
Bedeutung:	Wasserbilanz, Einfluss auf Grundwasserspiegel, Voraussetzung für Erhalt von Feuchtgebieten, Boden als Filterelement, Ausgleich von Entnahmen für Trinkwassergewinnung				
Ermittlung:	Auswertung der mittleren Jahresbilanzen für natürliche- und Siedlungsflächen				
Zielgröße:	szenarienintern: $z_{\text{GWN}} = \frac{V(\text{GWN})_{\text{urb}}}{V(\text{GWN})_{\text{nat}}}$ mit $V(\text{GWN})_{\text{urb}} / \text{nat}$: Jahresvolumen der Grundwasserneubildung auf Siedlungs- / natürlichen Flächen				
Nutzwert:	ZGWN	0	0.2	0.8	1

Tab. A 9-5

Parameter:	Förderung der realen Verdunstung				4%
Bedeutung:	Wasserbilanz, im Stadtklima gegenüber natürlichen Flächen reduziert, hohe Verdunstung verbessert lokal das Klima, regional Voraussetzung für Niederschlagsentwicklung, Schließungsglied im Wasserkreislauf				
Ermittlung:	Auswertung der mittleren Jahresbilanzen für natürliche- und Siedlungsflächen				
Zielgröße:	szenarienintern: $z_{ETR} = \frac{V(ETR)_{urb}}{V(ETR)_{urb}}$ mit $V(ETR)_{urb} / nat$: Jahresvolumen der Grundwasserneubildung auf Siedlungs- / natürlichen Flächen				
Nutzwert:	z_{ETR}	0	0.2	0.8	1
	NW	0	0.86	0.91	1
Parameter:	Nutzbarkeit von Ressourcen				3%
Bedeutung:	Grad zu dem das Entwässerungssystem ermöglicht Ressourcen wie Spurenelemente, Nährstoffe oder Wasser zu konzentrieren bzw. zu nutzen, eine hohe Nutzungsoption wird positiv bewertet				
Ermittlung:	qualitativ				
Zielgröße:	Szenario	ges. Bedeutung	Entw.alternative	zRN	
	lin	mittel	mw	hoch	
	lf	mittel	tw	gering	
	ko	hoch	dw	mäßig	
	wo	hoch	dwa	hoch	
Nutzwert:	NW	0	1		
	zRN	0	1		
Parameter:	Erhöhung der Verfahrensvielfalt				4%
Bedeutung:	Nutzung verschiedener Verfahren hilft die Nachteile einzelner Verfahren auszugleichen, geringere Anfälligkeit bei Ausfall eines Teilsystems, eine hohe Verfahrensvielfalt wird technologisch positiv bewertet				
Ermittlung:	Anzahl der Verfahren im Verhältnis zu maximaler Anzahl				
Zielgröße:	$z_{VV} = \frac{n(Verf.)_{var}}{n(Verf.)_{max}}$ mit $n(Verf.)_{var} / max$: Anzahl der Entwässerungsverfahren der Variante / Variante mit maximaler Anzahl				
Nutzwert:	NW	0	1		
	zVV	0	1		

Tab. A 9-6

Parameter:	Überlauf aus Retentionsräumen				4%
Bedeutung:	im Mischsystem eine der Hauptursachen für stoffliche Belastung des Vorfluters, ästhetische Beeinträchtigung durch Austrag von Grobschmutz				
Ermittlung:	szenarieninterner Vergleich der Jahresentlastungsvolumen aus Retention				
Zielgröße:	$z_{V_{Ret}} = \frac{V(Re t)}{V(Re t)_{max}}$ szenarienintern:				
	mit $V(Re t) (max)$: (maximal) entlastetes Volumen aus Retentionsräumen				
Nutzwert:	NW	0.2	0.8	1	
	zRet	1	0.44	0	
Parameter:	Investitionskosten				6%
Bedeutung:	Ausgaben für die Implementierung des Entwässerungssystems				
Ermittlung:	Kostenvergleichsrechnung				
Zielgröße:	szenarienintern: $z_{IK} = \frac{IK}{IK_{max}}$				
	mit $IK_{(max)}$: (maximale) Investitionskosten				
Nutzwert:	NW	0.2	0.8	1	
	zIK	1	0.48	0	
Parameter:	Betriebskosten				6%
Bedeutung:	jährliche Ausgaben für die Unterhaltung des Entwässerungssystems				
Ermittlung:	Kostenvergleichsrechnung				
Zielgröße:	szenarienintern: $z_{BK} = \frac{BK}{BK_{max}}$				
	mit $BK_{(max)}$: (maximale) Investitionskosten				
Nutzwert:	NW	0.2	0.8	1	
	ZBK	1	0.17	0	
Parameter:	Potential zur Einsparung von Ressourcen und Energie				3%
Bedeutung:	ökonomisch und ökologisch relevanter Parameter, führt z. B. Verknappung von Ressourcen und Luftverschmutzung				
Ermittlung:	qualitativ				
Zielgröße:	Szenario	ges. Bedeutung	Entw.alternative	ZRE	
	lin	mittel	mw	mäßig	
	lf	mittel	tw	gering	
	ko	hoch	dw	hoch	
	wo	niedrig	dwa	mäßig	
Nutzwert:	NW	0	1		

Tab. A 9-7

Parameter:	Anforderungen an den Personaleinsatz				4%
Bedeutung:	Personalkosten, Flexibilität im Einsatz, Anfälligkeit des Systems bei Personalausfall, Anforderungen an Qualifikation, geringe Anforderungen werden positiv bewertet				
Ermittlung:	qualitativ				
Zielgröße:	Szenario	ges. Bedeutung	Entw.alternative	Z _{Pers}	
	lin	mittel	mw	mäßig	
	lf	mittel	tw	hoch	
	ko	niedrig	dw	hoch	
	wo	hoch	dwa	gering	
Nutzwert:	NW	0	1		
	Z _{NW}	0	1		
Parameter:	Nutzwert				3%
Bedeutung:	Beitrag zu Produktions- und Konsumzwecken der Gesellschaft z. B. Nahrung, Gesundheit und Erholung, hoher NW wird positiv bewertet				
Ermittlung:	qualitativ				
Zielgröße:	Szenario	ges. Bedeutung	Entw.alternative	Z _{NW}	
	lin	mittel	mw	mäßig	
	lf	mittel	tw	gering	
	ko	hoch	dw	mäßig	
	wo	hoch	dwa	hoch	
Nutzwert:	NW	0	1		
	Z _{NW}	0	1		
Parameter:	Funktionswert				3%
Bedeutung:	Beitrag zu Funktionalität des gesellschaftlichen Umfeldes z. B. Landschaftsbild, Nutzungssicherheit, Nutzungsmehrwert, hoher FW wird positiv bewertet				
Ermittlung:	qualitativ				
Zielgröße:	Szenario	ges. Bedeutung	Entw.alternative	Z _{FW}	
	lin	mittel	mw	mäßig	
	lf	mittel	tw	mäßig	
	ko	mittel	dw	mäßig	
	wo	mittel	dwa	sehr hoch	
Nutzwert:	NW	0	1		
	Z _{FW}	0	1		

Tab. A 9-8

Parameter:	Präsenz der Entwässerung in der öffentlichen Wahrnehmung 4%				
Bedeutung:	Beitrag der Alternative zu Bewusstseinsbildung für die Problematik der Regenwasserbewirtschaftung in der Bevölkerung über visuelle Gegenwart und Nutzbarkeit, hohe Präsenz wird positiv bewertet				
Ermittlung:	qualitativ				
Zielgröße:	Szenario	ges. Bedeutung		Entw.alternative	ZPräs
	lin	mittel		mw	mäßig
	lf	mittel		tw	mäßig
	ko	hoch		dw	hoch
	wo	mittel		dwa	sehr hoch
Nutzwert:	NW	0	1		
	ZPräs	0	1		
Parameter:	Möglichkeiten zur Bürgerbeteiligung 4%				
Bedeutung:	Möglichkeiten zu Beteiligung und Initiative der Bevölkerung durch das Entwässerungssystem, eine hohe Beteiligungsmöglichkeit fördert Kooperation und Gemeinschaftlichkeit und wird positiv bewertet				
Ermittlung:	qualitativ				
Zielgröße:	Szenario	ges. Bedeutung		Entw.alternative	ZBB
	lin	mittel		mw	gering
	lf	mittel		tw	gering
	ko	hoch		dw	hoch
	wo	gering		dwa	sehr hoch
Nutzwert:	NW	0	1		
	ZBB	0	1		
Parameter:	Flächenverbrauch 3%				
Bedeutung:	Einschränkung der Nutzung von Oberflächen durch darauf und darunter befindliche Strukturen				
Ermittlung:	Auswertung der Ausmaße von Maßnahmen (ohne Gründächer)				
Zielgröße:	szenarienintern: $z_{FV} = \frac{\sum A_{alt}}{\sum A_{alt_max}}$ mit $A_{alt(max)}$: (maxiale) Flächeninanspruchnahme der Variante				
Nutzwert:	NW	0	0.2	0.8	1
	ZFV	1	0.63	0.38	0

Tab. A 9-9

Parameter:	Dauer des Planungshorizontes				5%
Bedeutung:	geringe Planungshorizonte ermöglichen es Strukturen flexibel an veränderte Randbedingungen anzupassen				
Ermittlung:	Auswertung der kostengewichteten mittleren Lebensdauer der Entwässerungsvarianten $t_{Plan} = \frac{\sum K_i * ND_i}{\sum K_i}$				
Zielgröße:	szenarienintern: $z_{tPlan} = \frac{t_{Plan}}{t_{Plan_max}}$ mit $t_{Plan(max)}$: (maximaler) mittlerer Planungshorizont der Variante				
Nutzwert:	NW	0	0.2	0.8	1
	ZtPlan	1	0.63	0.38	0
Parameter:	Kleinräumigkeit				3%
Bedeutung:	die kleinräumige Unabhängigkeit von Strukturen erhöht die raumplanerische Flexibilität und Unabhängigkeit; kleinräumige dezentrale Strukturen sind für die Veränderung besser adaptierbar, ein hohes Maß an Kleinräumigkeit wird positiv bewertet				
Ermittlung:	qualitativ				
Zielgröße:	Szenario	ges. Bedeutung		Entw.alternative	ZBB
	lin	mittel		mw	sehr gering
	lf	mittel		tw	gering
	ko	mittel		dw	hoch
	wo	mittel		dwa	sehr hoch
Nutzwert:	NW	0	1		
	ZBB	0	1		

Tab. A 10-1 Übersicht über die quantitativen Teilnutzwerte des Variantenvergleichs

	W.faktor	lin_mw	lin_tw	lin_dw	lin_dwa	ko_mw	ko_tw	ko_dw	ko_dwa
HQ20	5.00	0.00	0.00	0.25	2.06	3.95	3.97	4.24	5.00
MHQ	7.00	0.14	0.00	1.21	3.43	5.06	5.15	5.57	7.00
MNQ	5.00	0.48	0.29	2.42	3.74	4.04	2.63	5.00	5.00
CSB	2.00	0.42	0.40	1.17	1.60	0.42	0.41	0.62	1.30
SS	4.00	0.68	0.77	2.53	3.24	0.83	0.81	1.26	2.63
N	3.00	0.65	0.59	1.68	2.39	0.62	0.62	0.97	2.03
P	3.00	0.63	0.59	1.72	2.36	0.62	0.60	0.95	1.94
Cu	2.00	0.47	0.38	1.60	1.69	0.42	0.41	0.70	1.50
Pb	2.00	0.45	0.38	1.42	1.66	0.41	0.40	0.64	1.40
FG	2.00	1.20	1.60	2.00	2.00	0.60	1.00	2.00	2.00
KK	3.00	1.80	1.80	2.70	3.00	0.90	0.90	2.40	3.00
GWN	4.00	0.77	0.77	3.16	3.29	0.88	0.88	1.51	2.06
ETR	3.00	0.81	0.81	0.81	1.67	1.05	1.05	1.05	2.32
Nu_Res	3.00	2.70	1.80	2.40	2.70	2.40	0.90	1.50	2.40
Ver_viel	4.00	0.80	1.60	1.60	3.20	0.80	1.60	1.60	3.20
V(Ü)_Ret	4.00	0.80	3.18	3.21	3.35	0.80	1.40	2.27	3.29
PKB	6.00	2.54	1.20	4.66	2.11	4.86	2.45	5.51	1.20
BK	6.00	3.40	4.30	4.48	1.20	4.80	5.42	5.60	1.20
R/E	3.00	2.40	1.80	2.70	2.40	1.50	0.90	2.40	1.50
Pers	4.00	3.20	3.60	3.60	2.40	3.60	3.80	3.80	3.20
NW	3.00	1.80	1.20	1.80	2.70	1.80	1.20	1.80	2.70
FW	3.00	2.70	2.40	2.40	2.70	2.70	2.40	2.40	2.70
Präs	4.00	2.40	2.40	3.20	4.00	1.20	2.00	2.00	4.00
BB	4.00	2.40	2.40	3.60	4.00	1.20	1.20	3.20	4.00
A_nutz	3.00	2.48	1.78	0.80	0.60	2.57	2.17	2.11	0.60
KR	3.00	1.20	1.80	2.70	3.00	1.20	1.80	2.70	3.00
t_Plan	5.00	1.81	1.00	1.92	4.04	1.81	1.00	2.15	4.37

Tab. A 10-2

	W.faktor	wo_mw	wo_tw	wo_dw	wo_dwa	lf_mw	lf_tw	lf_dw	lf_dwa
HQ20	5.00	2.12	2.40	2.07	3.56	1.02	1.14	3.99	4.44
MHQ	7.00	2.75	3.04	2.54	5.43	1.57	1.41	7.00	7.00
MNQ	5.00	2.94	2.59	3.75	4.46	1.00	0.94	1.97	3.77
CSB	2.00	0.86	0.22	0.76	1.64	0.86	0.78	1.62	1.69
SS	4.00	1.42	0.33	1.94	3.21	1.29	1.05	3.17	3.36
N	3.00	1.55	0.40	0.75	2.50	1.51	1.39	2.45	2.52
P	3.00	1.25	0.37	1.04	2.45	1.31	1.19	2.42	2.51
Cu	2.00	0.52	0.15	1.51	1.60	0.47	0.32	1.64	1.72
Pb	2.00	0.77	0.02	1.50	1.62	0.47	0.34	1.59	1.70
FG	2.00	1.60	1.80	2.00	2.00	1.20	1.60	2.00	2.00
KK	3.00	2.40	2.40	2.85	3.00	1.80	1.80	2.70	3.00
GWN	4.00	1.23	1.23	1.86	2.41	1.16	1.16	3.58	3.64
ETR	3.00	2.22	2.22	2.22	2.60	0.84	0.84	0.84	1.76
Nu_Res	3.00	2.40	0.90	1.50	2.40	2.70	1.80	2.40	2.70
Ver_viel	4.00	0.80	1.60	1.60	3.20	0.80	1.60	1.60	3.20
V(Ü)_Ret	4.00	0.80	2.69	2.30	1.38	0.80	3.10	2.32	3.00
PKB	6.00	2.74	2.20	5.03	1.20	1.71	1.20	4.65	2.44
BK	6.00	4.03	4.82	5.02	1.20	2.90	4.15	4.37	1.20
R/E	3.00	1.50	0.90	2.40	1.50	2.40	1.80	2.70	2.40
Pers	4.00	2.00	3.20	3.20	1.20	3.20	3.60	3.60	2.40
NW	3.00	1.80	1.20	1.80	2.70	1.80	1.20	1.80	2.70
FW	3.00	2.70	2.40	2.40	2.70	2.70	2.40	2.40	2.70
Präs	4.00	2.40	2.40	3.20	4.00	2.40	2.40	3.20	4.00
BB	4.00	3.20	3.20	3.60	4.00	2.40	2.40	3.60	4.00
A_nutz	3.00	2.44	2.06	1.34	0.60	2.39	1.71	0.60	1.03
KR	3.00	1.20	1.80	2.70	3.00	1.20	1.80	2.70	3.00
t_Plan	5.00	2.04	1.00	2.04	4.20	2.04	1.00	1.81	4.00

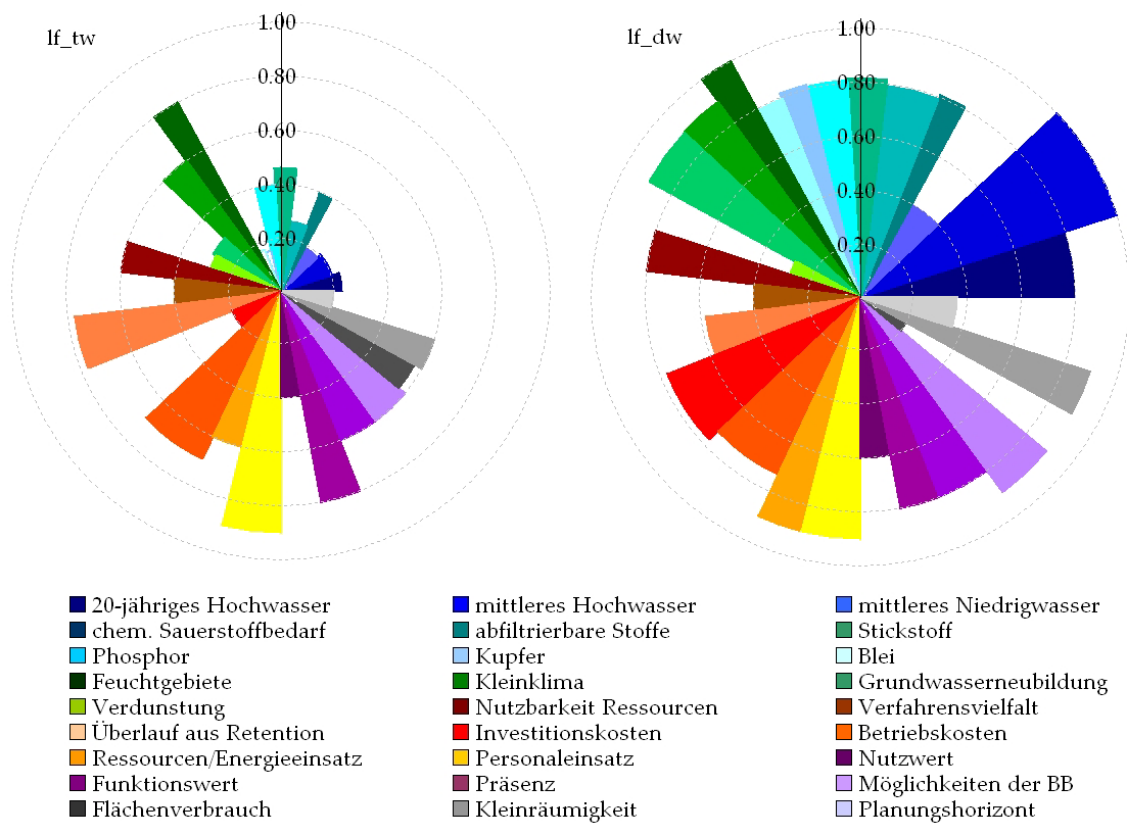


Abb. A 8 Kreissektordiagramm für Trennsystem (links) und dezentrales System (rechts) im Lastfall Szenario

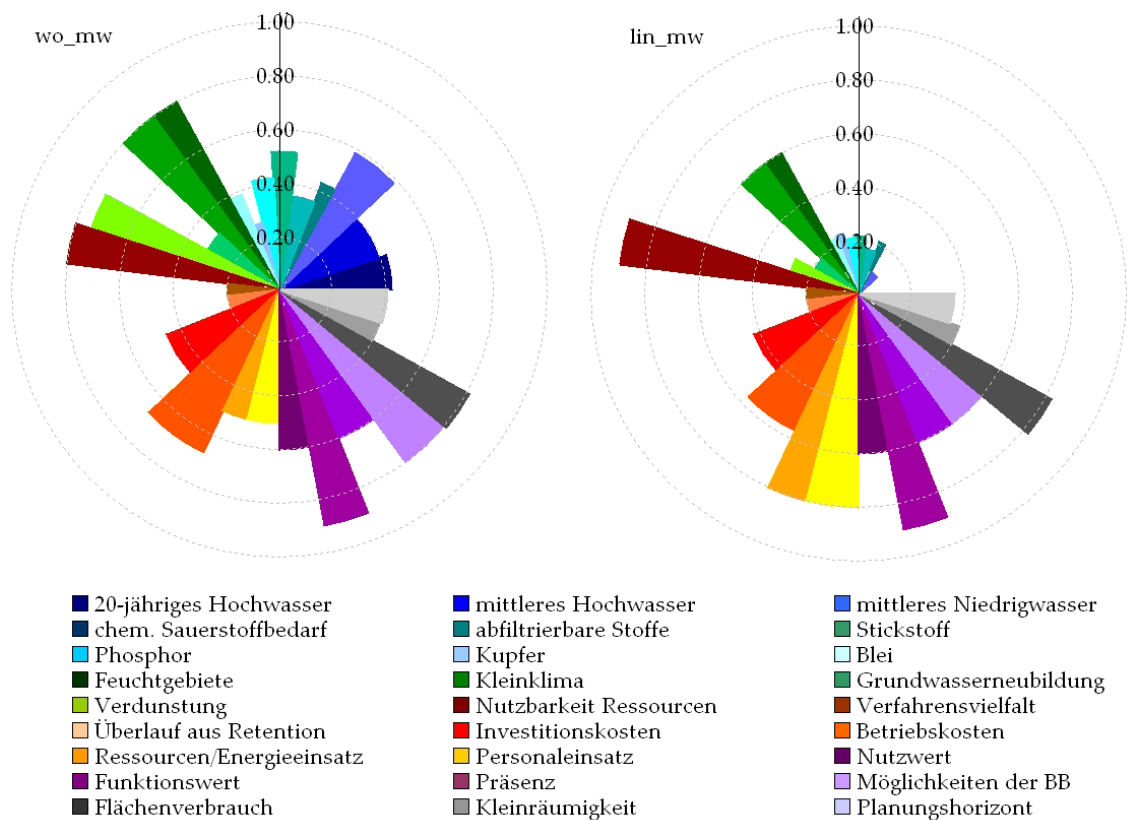


Abb. A 9 Kreissektordiagramm der Mischsysteme für wachstumsorientiertes (links) und lineares (rechts) Szenario