



Eisenbahn-Bundesamt

EBA Forschungsbericht
2019-05

Beurteilung der Bemessung von Gleis entwässerungseinrichtungen und Durchlässen von Fließgewässern

Evaluierung der Bemessungsgrundlagen vor dem Hintergrund
veränderter Niederschlagsereignisse aufgrund des Klimawandels

EBA Forschungsbericht 2019-05
Projektnummer 2018-S-19-1210

Beurteilung der Bemessung von Gleis entwässerungseinrichtungen und Durchlässen von Fließgewässern

Evaluierung der Bemessungsgrundlagen vor dem Hintergrund
veränderter Niederschlagsereignisse aufgrund des Klimawandels

von

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Weisemann
GEPRO Ingenieurgesellschaft mbH, Dresden

Dipl.-Ing. (FH) Silvio Klügel, M.Sc.
GEPRO Ingenieurgesellschaft mbH, Dresden

Prof. Dr.-Ing. Thomas Grischek
Hochschule für Technik und Wirtschaft, Dresden

Im Auftrag des Eisenbahn-Bundesamtes

Impressum

Eisenbahn-Bundesamt

Heinemannstraße 6
53175 Bonn

www.eba.bund.de

DURCHFÜHRUNG DER STUDIE
GEPRO Ingenieurgesellschaft mbH
Caspar-David-Friedrich-Straße 8
01219 Dresden

ABSCHLUSS DER STUDIE
August 2019

REDAKTION
Referat Umwelt/Forschung
Bearbeiter Maïke Norpoth

PUBLIKATION ALS PDF
<https://www.dzsf.bund.de/Forschungsergebnisse/Forschungsberichte>

ISSN 2627-9851

[doi: 10.48755/dzsf.210019.02](https://doi.org/10.48755/dzsf.210019.02)

Bonn, August 2019

Inhaltsverzeichnis

Kurzbeschreibung	8
Abstract	9
Abkürzungs- und Formelverzeichnis	10
1 Veranlassung	13
2 Methodik der Bearbeitung	14
3 Überblick	18
4 Literaturrecherche (AP 1.1)	20
4.1 Historische Entwicklung der Normen und Regelwerke	20
4.2 Weiterführende Publikationen.....	22
4.3 Aktuell relevante Normen und Regelwerke für Entwässerungsanlagen.....	24
4.4 Zwischenfazit	25
5 Historische Entwicklung (AP 1.2)	26
5.1 Entwicklung der Bemessungsgrundlagen.....	26
5.2 Gleisentwässerung	27
5.2.1 Allgemeines	28
5.2.2 Geometrie und Bauweisen von Gleisentwässerungen	29
5.2.3 Hydraulische Bemessung von Gleisentwässerungen	30
5.2.4 Erkenntnisse aus aktuellen Forschungsprojekten und Zwischenfazit zur Gleisentwässerung	35
5.3 Durchlässe	36
5.3.1 Allgemeines	36
5.3.2 Geometrien und Bauweisen von Durchlässen.....	37
5.3.3 Hydraulische Bemessung von Durchlässen	41
5.3.4 Zwischenfazit zu den Durchlässen	42
6 Kategorisierung der Entwässerungsanlagen (AP 1.3)	43
7 Berechnungen für Gleisentwässerungen der Freien Strecke (AP 2)	45

7.1	Regelquerprofil der freien Strecke	45
7.2	Allgemeine Abflussbildung und Nachweis	46
7.2.1	Beschreibung der Abflussbildung	46
7.2.2	Berechnung der Abflussbildung für das Außeneinzugsgebiet	48
7.2.3	Berechnung der Abflussbildung für den Gleisbereich	52
7.2.4	Hydraulischer Nachweis	52
7.3	Parameterstudie zur Berechnung bemessungsrelevanter Abflüsse unter Berücksichtigung der historischen Entwicklung	53
7.3.1	Bemessungsregen	54
7.3.2	Abflusswirksame Flächen	56
7.3.3	Berechnung des Bemessungsabflusses Q_A	57
7.4	Berechnung der vorhandenen Kapazitäten Q_K der Gleisentwässerung.....	58
7.4.1	Übersicht über die Entwässerungselemente.....	59
7.4.2	Abflusskapazität Bahngraben – $Q_{K,Graben}$	59
7.4.3	Abflusskapazität Tiefenentwässerung – $Q_{K,TE}$	61
7.4.4	Retentionsvermögen des Sickerkörpers – $Q_{S,D}$	62
7.4.5	Gesamtkapazität der Gleisentwässerung	65
7.5	Hydraulischer Nachweis für Gleisentwässerungsanlagen	66
8	Berechnungen für Durchlässe (AP 2)	69
8.1	Eingangsparameter	69
8.1.1	Lage und Geometrie der Beispiele	69
8.1.2	Wahl des Hochwasserereignisses.....	69
8.2	Vorgehensweise	70
8.2.1	Auslesen der Gebietskennwerte für das zu betrachtende Einzugsgebiet	70
8.2.2	Berechnung der für die Durchlässe relevanten Abflüsse	71
8.3	Nachweis.....	72
9	Anwendungsbeispiel der freien Strecke (AP 3).....	76
9.1	Strecken- und Abschnittsbeschreibung.....	76
9.2	Gewählte Regenereignisse.....	78
9.3	Berechnungen mit dem statischen Modell	80

9.3.1	Eingangsparameter	80
9.3.2	Ergebnisse	81
9.4	Berechnungen mit dem dynamischen Modell.....	82
9.4.1	Eingangsparameter	82
9.4.2	Ergebnisse	83
9.5	Bewertung der beiden Verfahren im Hinblick auf den Klimawandel.....	85
9.6	Hydraulischer Nachweis des Durchlasses	87
10	Handlungsempfehlungen (AP 4).....	88
10.1	Gleisentwässerung freie Strecke	88
10.1.1	Möglichkeiten der Modifizierung von bemessungsrelevanten Eingangsparametern	88
10.1.2	Anwendung der Berechnungsmodelle.....	89
10.1.3	Berücksichtigung der Abflusskapazität des Bahngrabens	90
10.1.4	Weitere Empfehlungen und Hinweise.....	92
10.1.5	Zusammenfassung der Empfehlungen.....	93
10.2	Durchlässe mit Fließgewässern.....	94
10.2.1	Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit	94
10.2.2	Handlungsempfehlungen für Neubau und Sanierungen.....	96
10.2.3	Zusammenfassung der Empfehlungen.....	98
10.3	Tabellarische Zusammenstellung der Handlungsempfehlungen und Fazit .	98
10.3.1	Gleisentwässerung der freien Strecke.....	99
10.3.2	Durchlässe mit Fließgewässern.....	101
10.4	Ausblick und weiterführende Hinweise.....	102
	Abbildungsverzeichnis.....	104
	Tabellenverzeichnis	107
	Quellenverzeichnis	110
	Verzeichnis der Anhänge	114

Kurzbeschreibung

Der Klimawandel und die damit erwartete Zunahme von extremen Wetterereignissen wirken sich in allen Lebensbereichen aus und bringen auch neue Herausforderungen für die Verkehrsträger mit sich.

Eine kontinuierliche Überprüfung und Anpassung der Entwässerungsanlagen an veränderte klimatische Bedingungen spielen für die Bahn eine entscheidende Rolle, um eine regelkonforme Gleislage und somit Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit des Fahrweges sicherstellen zu können. Eine zentrale Frage ist in diesem Zusammenhang, ob die Bemessung und Dimensionierung der aktuellen Entwässerungsanlagen der Bahn und die Durchlässe mit Fließgewässern auch vor dem Hintergrund einer möglichen Zunahme von Starkregenereignissen durch den Klimawandel ausreichend ist.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit erfolgte eine umfangreiche Recherche zur Ausgestaltung und Bemessung von Entwässerungssystemen und Durchlässen in vergangenen und aktuellen Regelwerken. Die gesammelten Daten und Entwässerungsanlagen wurden kategorisiert und ausgewertet.

Auf Basis der Kategorisierung wurden die unterschiedlichen Anlagentypen der Gleis-entwässerung der freien Strecke und der Durchlässe rechnerisch auf ihre (Rest)Kapazität überprüft. Es wurden die theoretischen Ansätze der unterschiedlichen Berechnungsverfahren des statischen und dynamischen Modells verglichen und für Regenereignissen mit unterschiedlichen Wiederkehrzeiten hydraulische Nachweise geführt. Durch den Klimawandel möglicherweise erhöhte Starkregenereignisse flossen bei den Betrachtungen mit ein.

Die theoretischen Ansätze wurden durch die Betrachtung eines realen Streckenabschnittes ergänzt. Anhand dieses Fallbeispiels erfolgten Nachrechnungen und die Überprüfung der hydraulischen Dimensionierung für zurzeit übliche und für in Zukunft stärkere Regenereignisse sowohl mit einem statischen als auch mit einem dynamischen Modell.

In diesem Forschungsprojekt wurden die Entwässerungsanlagen der freien Strecke und die Durchlässe mit Fließgewässern sowie deren hydraulische Bemessung im Hinblick auf den Klimawandel betrachtet und bewertet. Es wurde aufgezeigt, dass vor allem bei der Gleisentwässerung der freien Strecke die Ableitung von größeren Abflussmengen auch nach Starkregenereignissen möglich ist. Dies beinhaltet eine mögliche Zunahme von Starkregen in Intensität und Häufigkeit unter dem Klimawandel. Für eine sichere und staufreie Ableitung des Wassers sind regelmäßige Inspektionen und Instandhaltungsmaßnahmen an den Entwässerungsanlagen eine wichtige Voraussetzung.

Für Durchlässe wurden beispielhafte hydraulische Nachweise durchgeführt und eine mögliche Herangehensweise zur Erstabschätzung der hydraulischen Kapazität erarbeitet. Flächendeckende Bewertungen von Durchlässen sind pauschal nicht möglich und müssen immer im Einzelfall betrachtet werden. Die Berücksichtigung von bestimmten baulichen Maßnahmen im Ein- und Auslaufbereich des Durchlasses können die Abflusskapazität erhöhen und Ausspülungen reduzieren.

Abstract

Climate change and the associated expected increase in extreme weather events affect all areas of life and entail new challenges for operators of transportation systems.

A continuous review and adaptation of drainage systems to changing climatic conditions play a critical role for the Deutsche Bahn in ensuring both compliance for the track geometry as well as the serviceability and load-bearing capacity of the railway. A central question in this context is whether the design and dimensioning of existing railway drainage systems and stream culverts are sufficient in light of the possible increase in both the intensity and frequency of severe precipitation events due to climate change.

This research effort included a comprehensive review of the design of drainage systems and culverts according to past and present technical guidelines. The data collected on drainage systems were categorized and evaluated.

Based on the categorization, the different types of track drainage systems on open railways and culverts were mathematically checked for their remaining capacity. The theoretical approaches of the different calculation methods of the static and dynamic models were compared and applied for precipitation events with varying return periods. Possible increases in severe precipitation events due to climate change were included in this consideration.

The theoretical approaches were complemented by the consideration of a real railway section. Based on this case study, follow-up calculations were conducted to check the hydraulic dimensioning using the static and dynamic model for the current common design precipitation rates as well expected increased future precipitation rates.

This research effort investigated and evaluated the drainage systems for open railways and stream culverts as well as their hydraulic design in the face of climate change. It was shown that particularly for existing track drainage systems of open railways, the drainage of increased run-off flow rates is possible, even in case of severe precipitation events. This also includes a possible increase in both the intensity and frequency of severe precipitation events due to climate change. Regular inspections and maintenance measures are essential for safe drainage of water.

Example calculations were performed to show the sufficient hydraulic capacity of culverts and a possible method for an initial assessment of hydraulic capacity was developed. A nationwide evaluation of culverts is not generally possible, and must instead be done on a case-by-case basis. The consideration of certain construction methods at in- and outflow-points of culverts can increase its hydraulic capacity and reduce undermining.

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Kürzel	Einheit	Bezeichnung / Bedeutung
A	[m ²]	Fließquerschnitt
A _{E,i}	[ha], [m ²]	Größe der zu entwässernden Teilfläche
AP	–	Arbeitspaket
A _U	[ha], [m ²]	berechnungswirksame undurchlässige Flächen
D	[min]	Regendauer
DB	–	Deutsche Bundesbahn
d _{hy}	[m]	hydraulischer Durchmesser zur Berechnung der Abflüsse bei Rechteckquerschnitten
DL		Durchlass
DR	–	Deutsche Reichbahn
DVWK	–	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V.
DWA	–	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
d	[mm]	Rohrdurchmesser
EPL	–	Erdplanum, bis 2008 gültige Bezeichnung für das Planum (PL).
Euler 1	–	Realitätsnaher Verlauf der Niederschlagsverteilung mit dem Spitzenintervall am Anfang und stetig abnehmendem Intensitätsverlauf
Euler 2	–	Realitätsnaher Verlauf der Niederschlagsverteilung mit einem Spitzenintervall bei einem Drittel der Gesamtdauer des Niederschlages
EÜ	–	Eisenbahnüberführung
FF	–	Feste Fahrbahn
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
Δh	[m]	Wasserspiegeldifferenz zwischen Ein- und Auslauf einschließlich des zulässigen Einstaus z Wird kein Aufstau angesetzt, kann Δh = I · L angenommen werden.
h _N	[mm]	Niederschlagshöhe /- menge für das betrachtete Regenergebnis

Kürzel	Einheit	Bezeichnung / Bedeutung
HQ	[m ³ /s]	Hochwasserabfluss
k _{St}	[m ^{1/3} /s]	Manning/Strickler-Beiwert bzw. Geschwindigkeitsbeiwert
k	[mm]	Wandrauheit von Rohren Für Tiefenentwässerungen wird einheitlich 0,4 mm und für Durchlässe 3 mm bzw. k _{St} = von 65 m ^{1/3} /s verwendet.
KG	–	Korngemisch
I	[1]	Sohlgefälle
I _E	[1]	Energieliniengefälle
L	[m]	Durchlasslänge
MHq	[l/(s·km ²)]	mittlere Hochwasserabflussspende
MQ	[m ³ /s]	Mittlerer Abfluss
MVF	–	Ministerium für Verkehrswesen
n	[a ⁻¹]	Regenhäufigkeit
NQ	[m ³ /s]	Niedrigwasserabfluss
OFTS	–	Oberfläche Tragschicht, bis 2008 wurde diese Ebene als Planum (PL) bezeichnet.
PD	–	Produktionsdurchführung
PL	–	Planum, technisch bearbeitete Oberfläche des Unterbaus bzw. Untergrundes. Dient als Auflager für die Trag- und Schutzschichten bzw. der Bettung.
q	[l/(s·km ²)]	Abflussspende
Q	[l/s]	Abfluss, Durchfluss
Q _A	[l/s]	Bemessungsabfluss, Bemessungsdurchfluss
Q _K	[l/s]	Gesamte Abflusskapazität der Entwässerungsanlage
Q _{K,Graben}	[l/s]	Abflusskapazität Bahngraben
Q _{K,TE}	[l/s]	Abflusskapazität TE
Q _R	[l/s]	Regenabfluss
q _R	[l/(s·ha)]	Regenabflussspende
Q _{S,D}	[l/s]	Retentionsvermögen des Sickerkörpers der TE bezogen auf eine Regendauer D [min], äquivalenter Abfluss

Kürzel	Einheit	Bezeichnung / Bedeutung
Q_z	[l/s]	gesammelte zugeführte Wassermenge
Q_u	[l/s]	unterirdischer Zufluss
$r_{D,n}$	[l/(s·ha)]	Regenspende mit Regendauer D [min] und Regenhäufigkeit n [a ⁻¹]
$r_{15,1}$	[l/(s·ha)]	Basisregenspende, Regendauer 15 min und jährlicher Wiederkehrzeit
$r_{15,0,1}$	[l/(s·ha)]	Regenspende, Regendauer 15 min und 10-jährlicher Wiederkehrzeit
$r_{15,0,05}$	[l/(s·ha)]	Regenspende, Regendauer 15 min und 20-jährlicher Wiederkehrzeit
$r_{15,0,01}$	[l/(s·ha)]	Regenspende, Regendauer 15 min und 100-jährlicher Wiederkehrzeit
r_{hy}	[m]	hydraulischer Radius $r_{hy} = A/U$
RSL	–	Radsatzlast
SE	–	Streckeneinstufung
SRI	–	Starkregenindex
TE	–	Tiefenentwässerung
v	[m/s]	Fließgeschwindigkeit
$\Psi_{s,i}$	[1]	Spitzenabflussbeiwert der zu entwässernden Fläche, Quotient aus der maximalen Regenabflussspende q_R und der Regenspende $r_{D,n}$
$\Psi_{m,i}$	[1]	mittlerer Abflussbeiwert der zu entwässernden Fläche, Quotient aus Abflussvolumen V_A und Niederschlagsvolumen V_R für einen definierten Zeitraum
$\varphi_{(D,n)}$	[1]	Zeitbeiwert nach REINHOLD für die Dauer D und Wiederkehrzeit n
ν	[m ² /s]	Kinematische Viskosität
U	[m]	benetzter Umfang
V_A	[m ³], [l]	Abflussvolumen
V_R	[m ³], [l]	Niederschlagsvolumen
z	[m]	zulässiger Aufstau am Einlauf des Durchlasses

1 Veranlassung

Eine kontinuierliche Anpassung der Entwässerungsanlagen an veränderte klimatische Bedingungen spielt für die Deutsche Bahn eine entscheidende Rolle, um eine regelkonforme Gleislage und somit Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit des Fahrweges sicherstellen zu können. Die Gebrauchstauglichkeit ist vor allem dann eingeschränkt, wenn sich aufgrund von unzureichend dimensionierter, aber auch bei eingeschränkt funktionstüchtiger Gleisentwässerung Stauwasser bilden kann, welches den Lastabtrag negativ beeinflusst. Gleislagefehler sind die Folge und die Gebrauchstauglichkeit wird herabgesetzt. Aber auch ein Verlust der Tragfähigkeit ist möglich, wenn z. B. Dammkörper zu stark vernässen.

Bei der zu geringen Dimensionierung von Durchlässen kann es zu einem schädlichen Aufstau stromaufwärts von Erdbauwerken und in der Folge zu einer Umspülung, Unterspülung oder Überflutung der Erdbauwerke kommen. Dies kann zum Verlust der Tragfähigkeit führen.

Um diesen schädlichen Einwirkungen entgegenzuwirken, ist eine Anpassung bzw. Überprüfung bestehender Anlagen bzw. die Dimensionierung neuer Anlagen jeweils nach dem aktuellen Regelwerk bzw. die ständige Regelwerksfortschreibung erforderlich. Deshalb wurde vom Eisenbahn-Bundesamt ein Forschungsprojekt initiiert, das die folgenden 4 Arbeitspakete (AP) beinhaltet:

- AP 1 – Umfassende historische Recherche zur Ausgestaltung von Entwässerungssystemen und Durchlässen
- AP 2 – Rechnerische Überprüfung der hydraulischen Restkapazität der unterschiedlichen Anlagen
- AP 3 – Rechnerische Überprüfung der hydraulischen Leistungsfähigkeit realer Systeme und Erarbeitung von Anpassungsmaßnahmen
- AP 4 – Erarbeitung möglicher Handlungsempfehlungen und Anpassungsmaßnahmen

2 Methodik der Bearbeitung

Arbeitspaket 1

Für die Bearbeitung des AP 1 „Umfassende historische Recherche zur Ausgestaltung von Entwässerungssystemen und Durchlässen“ wird folgende Methodik gewählt:

AP 1.1

Im ersten Schritt erfolgt in Kapitel 4 eine umfangreiche Recherche zu der historischen Entwicklung der Normen und Regelwerke. Außerdem wird recherchiert, welche weiterführenden Publikationen insbesondere zur Bemessung von Entwässerungsanlagen herausgegeben wurden. Im Anschluss erfolgt eine Zusammenstellung der aktuell relevanten Normen und Regelwerke für Entwässerungseinrichtungen und Durchlässe. Es wird herausgearbeitet, welche Regelwerke, Richtlinien und Bemessungsgrundlagen zu welcher Zeit herangezogen wurden.

AP 1.2

In Kapitel 5 wird die historische Entwicklung der Bemessungsgrundlagen herausgearbeitet. Dabei werden die bis zur Wiedervereinigung parallel existierenden Regelwerke und Vorschriften herangezogen.

Desweiteren wird dargestellt, welche Erscheinungsformen des Wassers bei der Bemessung der Gleisentwässerung zu beachten sind.

Für die Gleisentwässerung wird außerdem recherchiert, welche Geometrien und Bauweisen auf dem heutigen Gebiet der Bundesrepublik Deutschland chronologisch während des Baus und der Instandsetzung bzw. der Erneuerung von Entwässerungsanlagen und Durchlässen zur Anwendung kamen. Die Teilung Deutschlands zwischen 1945 und 1990 und die daraus resultierende getrennte Bearbeitung der Regelwerke haben Einfluss und werden dementsprechend mit berücksichtigt. Darauf aufbauend wird die Methodik der hydraulischen Bemessung der Gleisentwässerung erläutert und diskutiert.

Die Recherche zu den Gleisentwässerungseinrichtungen konzentriert sich im Wesentlichen auf die Zeit ab 1945 bzw. auf den Zeitpunkt, ab dem das erste zurzeit bekannte Regelwerk zur Anwendung kam, da davon auszugehen ist, dass die Entwässerungsanlagen seit 1945 größtenteils mindestens einmal instandgesetzt bzw. erneuert wurden.

Durchlässe sind teilweise noch aus der Zeit des Streckenbaus vorhanden. Es wird exemplarisch der Bestand von zwei Produktionsdurchführungen (PD) ausgewertet und anhand dieser ein Überblick zu baulichen Varianten und Querschnitten erarbeitet.

Im zweiten Schritt wird für die Entwässerungsanlagen und Durchlässen untersucht:

- ob regionale Unterschiede vorhanden sind,
- ob statistische Auswertungen bereits in den Anfangsjahren der Eisenbahn angewandt wurden und
- von welchen Regenerenissen im Laufe der Zeit ausgegangen wurde. Hier ist zu klären, ob das 15-minütige jährliche bzw. 10-jährliche Regenereniss ($r_{15,1}$ bzw.

$r_{15,0,1}$) bereits früher maßgebend war oder ob andere Ansätze (z. B. Regenspendenlinien, Blockregen¹, Modellregen nach Euler) gewählt wurden. Außerdem soll untersucht werden, wie sich die aktuellen Normungen auf das Überflutungsrisiko und das Schadenspotenzial bei Starkregenereignissen auswirken.

Dazu werden die zeitlichen Änderungen der örtlichen Regenspenden ausgewertet. Als Datengrundlage dienen die KOSTRA-Werte des DWD beziehungsweise Karten z. B. aus recherchierten Normen und Regelwerken.

Weiterhin erfolgt eine Auswertung und Darstellung der historischen Entwicklung der Abflussbeiwerte.

Die allgemeine Bemessung von Bauwerken an Flüssen erfolgt unter Berücksichtigung von Bemessungshochwässern. Für große Flüsse sind statistische Werte vorhanden und wurden abgefragt. Es ist zu klären, inwieweit dieses Vorgehen ebenfalls für kleine Flüsse möglich war bzw. ist und welche Methodik in der Vergangenheit angewandt wurde. Fehlen Bemessungshochwässer, sind projektspezifisch Abflüsse zu generieren und zu bewerten. Dafür sind folgende Ansätze denkbar:

- Einfache Abschätzung
Die Abschätzung des Abflusses von Oberflächengewässern erfolgt auf der Grundlage von Abflussspenden q (z. B. in $l/(s \cdot km^2)$), bei der die Größe des Einzugsgebietes A_E , die Morphologie des Einzugsgebietes und Art des Abflussereignisses (NQ, MQ, HQ) vorzugeben sind.
- Fließzeitverfahren mit Spitzenabflussbeiwerten (statisches Modell)
Die Verluste durch Verdunstung, Verwehung, Benetzung, Mulden usw. werden pauschal über Abflussbeiwerte berücksichtigt. Fließzeiten und Retentionseffekte an der Oberfläche in Abhängigkeit vom Geländegefälle und die daraus resultierende zeitliche Verzögerung bleiben unberücksichtigt. Die Einzelabflüsse werden im Entwässerungssystem um die jeweilige Fließzeit verschoben und an den Zusammenflüssen überlagert. Zur Anwendung können hier Regenspendenlinien oder Blockregenereignisse kommen.
- Berücksichtigung der Zeitverzögerung (dynamisches Modell)
Eine detaillierte Herangehensweise wird z. B. bei der Kanalnetzberechnung im Programm HYSTEM-EXTRAN verwendet. Es ist möglich, alle Einzelflächen, wie z. B. angrenzende Wiesen bzw. Grünflächen, mit einer Zeitverzögerung zur Bemessung der Entwässerungsanlagen anzusetzen und damit den Oberflächenabfluss (Abflussbildung und -konzentration) abzubilden.
- Niederschlags-Abfluss-Modelle (N-A-Modell)
Die Bildung von N-A-Modellen ist die zeitaufwendigste aber auch genaueste Möglichkeit, die Oberflächenabflüsse für das jeweilige Einzugsgebiet eines Durchlasses zu bestimmen.

¹ Ein Blockregen weist über eine betrachtete Dauer eine konstante Regenintensität auf.

AP 1.3

Darauf aufbauend werden in einem dritten Schritt die in den AP 1.1 und 1.2 erhaltenen Ergebnisse dahingehend ausgewertet, wann (historischer Bezug) welche Entwässerungseinrichtung (Art und Geometrie) wie (nach welchen Regelwerken und Berechnungsansätzen) bemessen wurde (Kapitel 6). Es erfolgt eine Bewertung der Gleisentwässerungsanlagen, getrennt von den Durchlässen für Fließgewässer. Ziel ist es, die Gleisentwässerungseinrichtungen und Durchlässe zu systematisieren und zu kategorisieren. Diese Kategorisierung soll eine wesentliche Grundlage für die Bearbeitung der folgenden AP 2 und 3 darstellen.

Arbeitspaket 2 (AP 2)

Die Bearbeitung des AP 2 „Rechnerische Überprüfung der hydraulischen Restkapazität der unterschiedlichen Anlagen“ erfolgt in Kapitel 7 für die Entwässerungsanlagen der freien Strecke und in Kapitel 8 für die Durchlässe.

In Kapitel 7 erfolgt der hydraulische Nachweis für die **Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke**. Es werden geometrische Randbedingungen beschrieben und hydraulische Nachweise für Streckenabschnitte mit 100 m, 500 m und 1.000 m Länge sowie für Wiederkehrzeiten von 1 Jahr, 10 Jahren, 20 Jahren und 100 Jahren anhand des **Fließzeitverfahrens** geführt.

Es wird das theoretische Abflussverhalten, das auf Basis des Fließzeitverfahrens berechnet wurde, mit dem realitätsnäheren Abflussverhalten verglichen, das mit einer hydrodynamischen Berechnung ermittelt wurde. Die für das Fließzeitverfahren notwendigen Spitzenabflussbeiwerte werden anhand von exemplarischen hydrodynamischen Berechnungen separat für das Außeneinzugsgebiet und für den Gleisbereich berechnet und darauf aufbauend Spitzenabflussbeiwerte abgeleitet.

Auf dieser Grundlage werden in einer Parameterstudie in Kapitel 7.3 die Bemessungsansätze für die Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke

- für die im Laufe der Zeit veränderten Bemessungsregen (Kapitel 7.3.1),
- für unterschiedliche abflusswirksame Flächen aufgrund verschiedener Spitzenabflussbeiwerte (Kapitel 7.3.2) und
- für die daraus resultierenden Bemessungsabflüsse Q_A (Kapitel 7.3.3)

zur Bestimmung des jeweiligen abflusswirksamen Niederschlages für die Jahre 1988, 1991, 1999, 2008, 2019 und als Prognose unter Berücksichtigung einer durch den Klimawandel angenommenen Regenspende für die Zukunft (2040) miteinander vergleichen.

Die vorhandenen Kapazitäten der Gleisentwässerung werden ausgewiesen und die hydraulischen Nachweise für angenommene Änderungen der Regenspende infolge des Klimawandels erbracht.

Es wird ein Ablaufschema aufgezeigt, wie die hydraulische (Rest)Kapazität der **Durchlässe** ermittelt werden kann und wie Prognosen bei Zunahme von abflussrelevanten Regenereignissen durchgeführt werden können. Für fünf Durchlassbeispiele wird diese Herangehensweise exemplarisch erläutert.

Arbeitspaket 3 (AP 3)

An einem realen Beispiel an der Strecke 6248 Dresden – Elsterwerda erfolgen in Kapitel 9 Berechnungen zur Bemessung der **Entwässerungsanlagen der freien Strecke** mit dem Fließzeitverfahren mit Spitzenabflussbeiwerten (statisches Modell), welches nach dem nach aktuell gültigen Regelwerk anzuwenden ist, sowie mit Berücksichtigung der Zeitverzögerung im dynamischen Modell.

Der Vergleich der Ergebnisse der beiden Bemessungen für die freie Strecke erfolgt im Hinblick auf eine durch den Klimawandel möglicherweise erhöhte Bemessungsregenspende. Weiterhin werden für das Fallbeispiel die Auslastungen der Entwässerungsanlagen berechnet. Dazu werden ein natürliches Starkregenereignis einer Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes des Jahres 2014 sowie ein Regenereignis einer am Standort befindlichen Wetterstation des Jahres 2019 herangezogen.

Arbeitspaket 4 (AP 4)

Die „Erarbeitung möglicher Handlungsempfehlungen und Anpassungsmaßnahmen“ erfolgt in Kapitel 10 getrennt für die Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke und für Durchlässe mit Fließgewässern.

Aufbauend auf den Ergebnissen der in den Kapiteln 7 und 8 durchgeführten exemplarischen Berechnungen sowie den Ergebnissen der in Kapitel 9 vorgenommenen vergleichenden Berechnungen für ein Fallbeispiel werden Handlungsempfehlungen in Hinblick auf die durch den Klimawandel möglicherweise erhöhte Bemessungsregenspende herausgearbeitet. Außerdem werden eine Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse vorgenommen sowie ein Ausblick gegeben. Die Handlungsempfehlungen und das Fazit werden getrennt für Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke und für Durchlässe erarbeitet.

3 Überblick

Bahntwässerungsanlagen und Durchlässe sind wesentliche Bestandteile der Bahnanlagen und werden den geotechnischen Bauwerken zugeordnet.

Eine grundlegende Einteilung der Bahnanlagen, eine Einteilung der Elemente des Bahnkörpers und die Unterteilung der Erdbauwerke und sonstigen geotechnischen Bauwerke kann z. B. aus Göbel & Lieberenz (2013) entnommen werden. Die allgemeine Einteilung der Bahnanlagen ist in Abbildung 1 dargestellt.

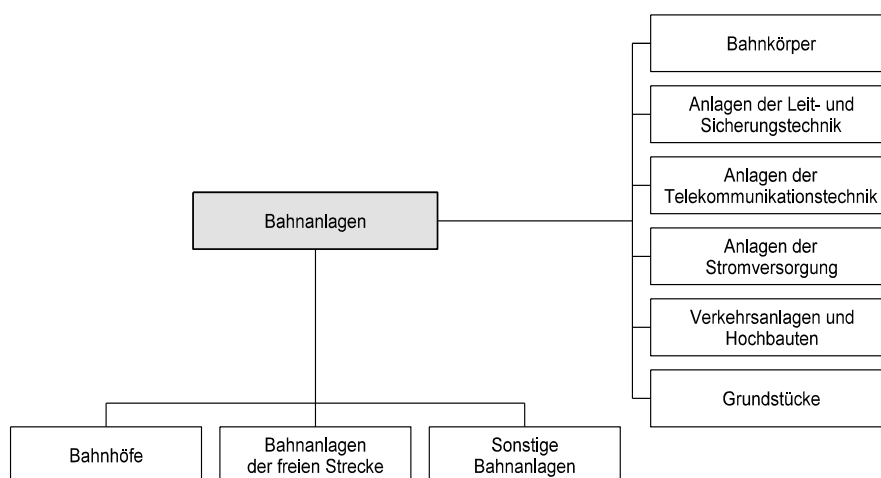


Abbildung 1 Übersicht der Bahnanlagen (Göbel & Lieberenz, 2013)

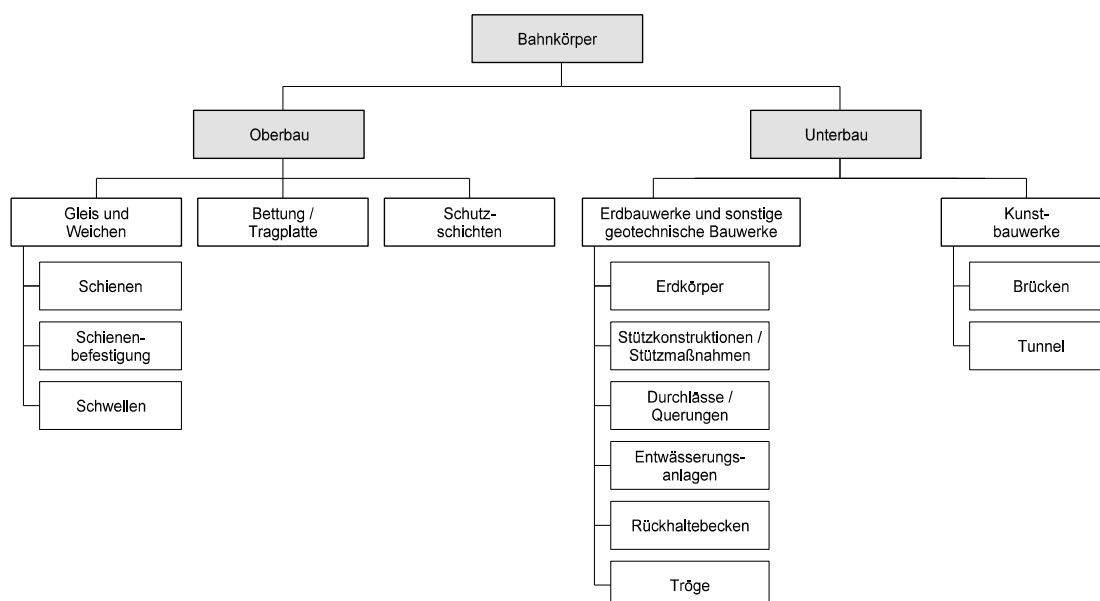


Abbildung 2: Übersicht der Elemente des Bahnkörpers (Göbel & Lieberenz, 2013)

Der in Abbildung 1 benannte Bahnkörper setzt sich aus Oberbau und Unterbau mit zugehörigen Elementen zusammen. Abbildung 2 beinhaltet eine Übersicht über die einzelnen Elemente des Ober- und Unterbaus.

Die dem Unterbau zugeordneten Erdbauwerke und sonstigen geotechnischen Bauwerke werden in Abbildung 3 detaillierter dargestellt.

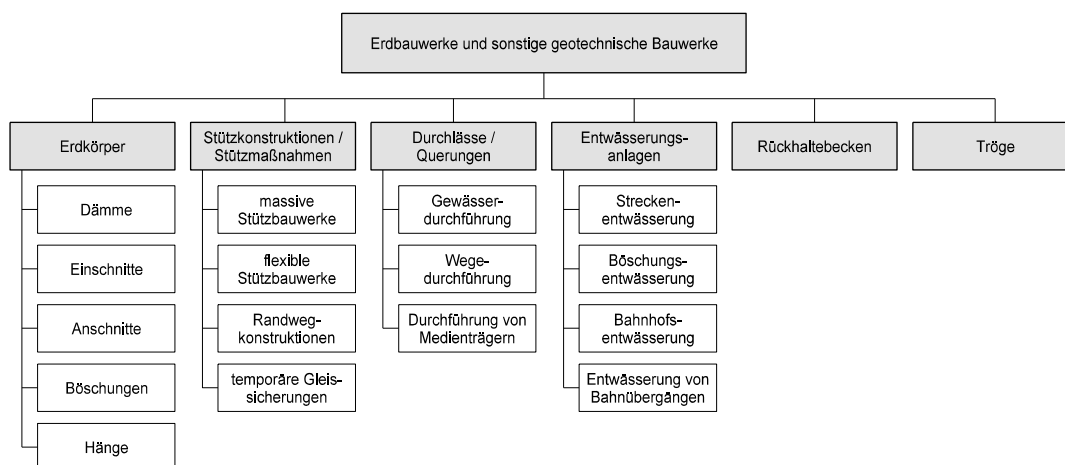


Abbildung 3: Übersicht der geotechnischen Bauwerke (Göbel & Lieberenz, 2013)

Die in Abbildung 1 bis Abbildung 3 dargestellten Übersichten bilden die Grundlage für die Herausarbeitung der wesentlichen Elemente von Entwässerungsanlagen und Durchlässe sowie für die in AP 1.3 durchgeführte Kategorisierung der Entwässerungsanlagen und Durchlässe.

4 Literaturrecherche (AP 1.1)

Dieses Kapitel fasst die recherchierte historische Entwicklung der Normen und Richtlinien (Kapitel 4.1) zusammen, stellt weiterführende Publikationen vor (Kapitel 4.2) und gibt einen Überblick über die zurzeit gültigen und relevanten Normen und Regelwerke für Entwässerungsanlagen (Kapitel 4.3). Es endet mit einem Zwischenfazit in Kapitel 4.4.

4.1 Historische Entwicklung der Normen und Regelwerke

Im Rahmen der Bearbeitung von AP 1.1 erfolgte eine umfangreiche Recherche zu den Normen und Regelwerken, vom Beginn des Eisenbahnbaus bis zur Gegenwart. Alle recherchierten Unterlagen sind im Quellenverzeichnis aufgeführt und die wesentlichen Meilensteine der Entwicklung der Normung zur Bemessung von Entwässerungsanlagen in Tabelle 1 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 1: Meilensteine der Entwicklung der Entwässerungsanlagen, Normen und Regelwerke

Jahr	Verfasser	Titel	Wesentlicher Inhalt
1897	Blum et al.	Die Eisenbahn-Technik der Gegenwart	Hinweise zur baulichen Gestaltung von Entwässerungsanlagen.
1938	Reichsverkehrsministerium	100 Jahre Deutsche Eisenbahnen	Hinweis auf Ausbildung eines „trockenen Erdkörpers“ bis 1,50 m.
1957	DB	Richtlinie 836. Richtlinien für die Entwässerung und Festigung der Erdbauten (Erdbaurichtlinien)	Planerische Vorgaben zur Entwässerungsgestaltung, aber keine Bemessung.
1976	DR	Automatisierte Projektierung, Zentrale Oberbauerneuerung und Wiederaufbau 2. Gleise, Richtlinie Tiefenentwässerung	Bemessung der Tiefenentwässerung, Abflussbeiwerte, Berechnungsregen, Zeitbeiwerte.
1979	DB	DS 836/2 – Vorläufige Richtlinien für die Planung und Erstellung der Erdbauwerke von Strecken mit Geschwindigkeiten über 160 km/h	Bemessung der Entwässerungsanlagen, Abflussbeiwerte, Berechnungsregen, Zeitbeiwerte.
1985	DB	DS 836. Vorschrift für Erd-	Bemessung der Tiefenent-

Jahr	Verfasser	Titel	Wesentlicher Inhalt
		bauwerke	wässerung und Bahngräben, Regenkarte mit vereinzelt Regenspenden für die BRD (heutige alte Bundesländer), Zeitbeiwerte nach REINHOLD, Angabe Abflussbeiwerte.
1985	MVF	TGL 12 098/01, 02, 03, 04 Anlagen des Straßenwesens – Entwässerung von Straßen	Bemessung der Entwässerung der Anlagen des Straßenwesens.
1987	RAS-Ew	FGSV Heft 539 Richtlinien für die Anlage von Straßen – Entwässerung	Hydraulische Bemessung von Straßenentwässerungsanlagen.
1988	DR	DR-A 2014, Richtlinie – Tiefenentwässerung	Bemessung und Konstruktion von Tiefenentwässerungen.
1990	DR	TGL 24 756/04, 05, 06, 07 – Fachbereichsstandard Eisenbahnunterbau Entwässerung Grundlagen	Grundlagen zur Entwässerung, bauliche Details zu Bahngräben und Tiefenentwässerungen.
1991 1993	DR	Ausführungsbestimmungen (ABest) zur Vorschrift für Erdbauwerke (VE)	Regenkarte mit vereinzelt Regenspenden für das Gebiet der DDR.
1999	DB Netz AG	Richtlinie 836.0801; Entwässerungsanlagen, Grundsätze	Bemessung der Tiefenentwässerungen und Bahngräben, Regenspenden für alle größeren Städte Deutschlands, Abflussbeiwerte, Berechnungsregen, Zeitbeiwerte.
2005	RAS-Ew	FGSV Heft 539 Richtlinien für die Anlage von Straßen – Entwässerung	Hydraulische Bemessung von Straßenentwässerungsanlagen.
2008	DB Netz AG	Richtlinie 836 4601 – Entwässerungsanlagen, Grundsätze 4602 – Streckenentwässerung 4603 – Sonstige Entwässerungsanlagen	Anpassungen der hydraulischen Bemessungen der Ril 836 Fassung 1999.

4.2 Weiterführende Publikationen

Im Zusammenhang mit der Entwicklung der Regelwerke, des Verständnisses einer gut funktionierenden Entwässerungsanlage und unterschiedlicher Berechnungsmethoden (ausgehend von Fließzeitverfahren bis hin zu hydrodynamischen Modellen) wurden Veröffentlichungen vorgenommen, Fachliteratur herausgegeben und die Ergebnisse von Versuchen zur Bestimmung des Abflussverhaltens von Bahnentwässerungsanlagen publiziert. Diese weiterführende Literatur ist in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Übersicht der weiterführenden Publikationen und Untersuchungen

Jahr	Verfasser	Titel	Wesentlicher Inhalt
1978	Chilian, G.; Lieberenz, K.	DR-Lehrbriefe für das Fachschul-Fernstudium, Oberbau	Bemessung der Bahngräben, Abflussbeiwerte, Berechnungsregen, Zeitbeiwerte, umfangreiche Erläuterungen zur hydraulischen Bemessung von Bahnanlagen.
1979	ORE Forschungs- und Versuchsamt	Verhalten der Tragschichten des Gleises und des Bodens unter dem Einfluss von Niederschlägen	Berechnung von Abflussmengen und Abflussbeiwerten am Gleis.
1988	Göbel, C.; Richter, F.	Eisenbahnunterbau	Bemessung der Tiefenentwässerung und Bahngräben, Abflussbeiwerte, Berechnungsregen, Zeitbeiwerte, umfangreiche Erläuterungen zur hydraulischen Bemessung von Bahnanlagen.
1996	Göbel, C.; Lieberenz, K.; Richter, F.	Der Eisenbahnunterbau	Bemessung der Tiefenentwässerung und Bahngräben, Regenspenden für alle größeren Städte Deutschlands, Abflussbeiwerte, Berechnungsregen, Zeitbeiwerte, umfangreiche Erläuterungen zur hydraulischen Bemessung von Bahnanlagen.
2003	Höntsches, J.	Diplomarbeit Untersuchungen zur Bahngleisentwässerung auf Grundlage der Richtlinie 836 der Deutschen Bahn Netz AG	Vergleich der Bemessung mit dem Fließzeitverfahren und einem hydrodynamischen Modell auf der freien Strecke.
2004	Göbel, C.; Lieberenz, K.	Handbuch Erdbauwerke der Bahnen	Umfangreiche Erläuterungen zur hydraulischen Bemessung

Jahr	Verfasser	Titel	Wesentlicher Inhalt
			sung von Bahnanlagen.
2007	Dittrich, V.	Straße und Autobahn, Special Straßenentwässerung	Folgen des Klimawandels – Müssen Straßenentwässerungseinrichtungen neu bemessen werden?
2008	Below et al.	Ergebnisse der Untersuchungen zum Abflussverhalten von Niederschlägen in Gleisanlagen	Abflussmessungen von Niederschlägen in Gleisentwässerungsanlagen an konkreten Beispielen.
2013	Göbel, C.; Lieberenz, K. (Hrsg.)	Handbuch Erdbauwerke der Bahnen, 2. Auflage	Umfangreiche Erläuterungen zur hydraulischen Bemessung von Bahnanlagen.
2015	Schmitt, T.	Weiterentwicklung des Starkregenindex zur Verwendung in der kommunalen Überflutungsvorsorge	Kategorisierung von Starkregen, Starkregenindex statt Regenspenden.
2017	DWD	KOSTRA-DWD 2010 R	In Abhängigkeit von verschiedenen Dauerstufen und verschiedenen Jährlichkeiten können die Starkniederschlagsauswertungen gebietskonkret entnommen werden.
2019	DB NETZ AG	Studie zur Qualität des Abflusses aus der Gleisentwässerung (in Bearbeitung)	Im Rahmen der Studie wurden Abflüsse an Entwässerungsanlagen der Bahn in Bezug auf die Regenereignisse gemessen.
2019	LfULG	HQ(T) und MHQ sächsischer Fließgewässer	Es werden für sächsische Fließgewässer Hochwasserabflusswerte sowie die dazugehörigen Einzugsgebiete ausgewiesen.
2019	DWD	Deutscher Klimaatlas	Projektionen/Klimaszenarien zur Veränderung der Niederschlagsereignisse in der Zukunft.

4.3 Aktuell relevante Normen und Regelwerke für Entwässerungsanlagen

Die aktuell gültigen Normen und Regelwerke, die zur Bemessung der Entwässerungsanlagen herangezogen werden sollen, sind in der Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Aktuelle Normen und Regelwerke

Norm / Regelwerk	Datum	Beschreibung
DIN 19661-1	Juli 1998	Wasserbauwerke, Teil 1: Kreuzungsbauwerke, Durchleitungs- und Mündungsbauwerke
DIN EN 752	April 2008	Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden; Deutsche Fassung EN 752:2008
DWA-A 110	August 2006	Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Abwasserleitungen und -kanälen
DWA-A 117	Dezember 2013	Bemessung von Regenrückhalteräumen
DWA-A 118	März 2006	Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen
DWA-A 138	April 2005	Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser
DWA-A 531	Mai 2017	Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer
DWA-M 119	November 2016	Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen
DWA-M 153	August 2007	Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser
RAS-Ew	November 2005	Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil Entwässerung
Richtlinie 836.4601	01.10.2008	Entwässerungsanlagen – Grundsätze
Richtlinie 836.4602	01.10.2008	Entwässerungsanlagen – Streckenentwässerung
Richtlinie 836.4603	01.10.2008	Entwässerungsanlagen – Sonstige Entwässerungsanlagen

4.4 Zwischenfazit

Anlagen zur Bahnentwässerung wurden seit Beginn des Eisenbahnbaus (1835) konzipiert. Die hydraulische Bemessung der Bahnentwässerungsanlagen einschließlich ihrer Elemente wurde jedoch erst seit ca. Mitte der 70er Jahre des 20. Jahrhunderts eingeführt. Erste Bemessungsansätze und Vorgaben sind in den „Vorläufigen Richtlinien für die Planung und Erstellung der Erdbauwerke von Strecken mit Geschwindigkeiten über 160 km/h“ (DB, 1979) und in der Richtlinie für die Tiefenentwässerung (DR, 1976) enthalten.

Die damals geltende Bemessung und die Parameter wurden kontinuierlich modifiziert; die Basisregenspende wurde ebenfalls angepasst. Die geometrischen Ausbildungen der Entwässerungsanlagen haben sich dagegen im Laufe der Zeit unwesentlich bzw. nicht geändert.

Die einzelnen Richtlinien und Normen der Bahn geben dabei immer einen Verweis bzw. haben immer einen Bezug zum Regelwerk der Straße. Die Bemessungsgrundlagen für die Bahnentwässerung wurden mit einzelnen Variationen in Anlehnung z. B. an MFV (1985): TGL 12 098/01, 02, 03 und 04 bzw. der RAS-Ew (1987) und RAS-Ew (2005) erarbeitet.

5 Historische Entwicklung (AP 1.2)

Dieses Kapitel befasst sich mit der historischen Entwicklung der konstruktiven Gestaltung und hydraulischen Bemessung von Entwässerungsanlagen.

Kapitel 5.1 beschreibt die Entwicklung der allgemeinen Bemessungsgrundlagen. In Kapitel 5.2 wird ausführlich auf die Gleisentwässerung der freien Strecke und in Kapitel 5.3 auf die Durchlässe eingegangen.

Kapitel 5.2 und Kapitel 5.3 enden jeweils mit einem Zwischenfazit.

5.1 Entwicklung der Bemessungsgrundlagen

Bis zur Wiedervereinigung wurden in beiden deutschen Ländern parallel Regelwerke und Vorschriften erarbeitet. Bei der Deutschen Reichsbahn (DR) lag 1988 u.a. das Regelwerk DR-A 2014 DR (1988) und bei der Deutschen Bundesbahn (DB) die DS 836 DB (1985) vor. Die Bemessung erfolgte in beiden Richtlinien nach dem Zeitbeiwertverfahren. Ähnlich waren auch die Ansätze zum abzuleitenden Wasser (Oberflächen-, Grund-, Schichten-, Stau- und Fremdwasser). Für den Zufluss von Grund- und Schichtenwasser sind im Regelwerk DR-A 2014 DR (1988) Ansätze vorhanden. In der DS 836 DB (1985) wird lediglich auf hydrologische Gutachten und weiterführende Literatur verwiesen.

Entwässerungsanlagen der DR wurden vorrangig mit dem jährlichen Regen und der Regendauer von 15 Minuten $r_{15,1}$ bemessen, während bei der DB die 10-jährliche Regenhäufigkeit und die Regendauer von 15 Minuten $r_{15,0,1}$ herangezogen wurden. Weitere große Unterschiede gab es bei den verwendeten Spitzenabflussbeiwerten².

Der Spitzenabflussbeiwert Ψ_s ist das Verhältnis der maximalen Regenabflussspende q_R in $l/(s \cdot ha)$ zur zugehörigen Regenspende $r_{D,n}$ in $l/(s \cdot ha)$. Durch den Spitzenabflussbeiwert werden Vorgänge wie Versickerung und Retention überschlägig abgeschätzt. Ein hoher Spitzenabflussbeiwert besagt einen geringen Grad an Versickerung und Retention, während ein geringer Spitzenabflussbeiwert einen hohen Grad an Versickerung und Retention bedeutet.

Die DB verwendete, aufbauend auf ORE (1979), überwiegend wesentlich höhere Abflussbeiwerte als die bei der DR gebräuchlichen. Durch die Verwendung höherer Spitzenabflussbeiwerte wurde somit bei der DB ein höherer Bemessungsabfluss berechnet und für den hydraulischen Nachweis der Gleisentwässerungsanlagen herangezogen. In der Folge wurden die Gleisentwässerungen der DB größer dimensioniert.

Mit der Wiedervereinigung galt formell das Regelwerk der DB (1985) für alle Bahnanlagen. Durch die Ausführungsbestimmungen (ABest) zur Vorschrift für Erdbauwerke (VE), siehe DR (1991) und DR (1993), konnten bis Mitte der 1990er Jahre das Regelwerk DR (1988) und geringere Abflussbeiwerte für Bahnanlagen auf dem Gebiet der ehema-

² In der Literatur DR (1988) und DB (1985) wird statt des Begriffes Spitzenabflussbeiwertes ein Abflussbeiwert ausgewiesen – fachlich ist dasselbe gemeint.

ligen DR weiterverwendet werden. Gemäß Höntschi (2003) waren bei diesen so bemessenen Anlagen „[...] keine nennenswerten hydraulischen Probleme [...]“ aufgetreten.

Seit Veröffentlichung der Ril 836 (DB Netz AG, 1999) gilt nur noch dieses einheitliche Regelwerk, welches sich in seinen Ansätzen vorrangig an der DS 836 (DB, 1985) orientiert. Vorentwürfe der Ril 836 (DB Netz AG, 1999) tendierten hinsichtlich seiner Bemessungsansätze eher zum Regelwerk der ehemaligen DR, diese wurden aber nicht umgesetzt.

Seit 2008 ist die Ril 836 in der Fassung DB Netz AG (2008) gültig. Die Spitzenabflussbeiwerte wurden bei dieser Fassung auf der Grundlage aktueller Untersuchungen zum Abflussverhalten (Below et al., 2008) wieder moderat gesenkt und die Wahl der Bemessungsregen und Datengrundlage an RAS-Ew (2005) angepasst bzw. die Verwendung der aktuellen Werte des KOSTRA-DWD empfohlen.

In einer Parameterstudie in Kapitel 7.3 werden die unterschiedlichen Bemessungsansätze zur Bestimmung des abflusswirksamen Niederschlages für die Jahre 1988, 1991, 1999, 2008 und 2019 miteinander verglichen und ein Ausblick für das Jahr 2040 gegeben. Tabelle 4 enthält die für diese Jahre gültigen Normen. Diese Jahre wurden gewählt, da sich im Regelwerk bemessungsrelevante Eingangsgrößen geändert haben.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Normen, die zur Parameterstudie herangezogen wurden

Jahr	Verfasser	Titel
1985	DB	DS 836. Vorschrift für Erdbauwerke
1988	DR	DR-A 2014, Richtlinie - Tiefenentwässerung
1991 1993	DR	Ausführungsbestimmungen (ABest) zur Vorschrift für Erdbauwerke (VE)
1999	DB Netz AG	Richtlinie 836.0801; Entwässerungsanlagen, Grundsätze
2008/ 2019	DB Netz AG	Richtlinie 836 4601 - Entwässerungsanlagen, Grundsätze 4602 - Streckenentwässerung 4603 - Sonstige Entwässerungsanlagen

5.2 Gleisentwässerung

In Kapitel 5.2.1 werden die Erscheinungsformen des Wassers am Bahnkörper erläutert. Kapitel 5.2.2 enthält die Rechercheergebnisse zur Geometrie und zu den Bauweisen der Gleisentwässerung. Die hydraulischen Bemessungsansätze werden in Kapitel 5.2.3 erläutert. In Kapitel 5.2.4 werden die Erkenntnisse aus aktuellen Forschungsprojekten zusammengefasst und ein Zwischenfazit gezogen.

5.2.1 Allgemeines

Die Erscheinungsformen des Wassers am Bahnkörper, die bei der Gleisentwässerung im Allgemeinen betrachtet werden müssen, sind in der Abbildung 4 (in Anlehnung an DB Netz AG, 2008) enthalten und werden u.a. basierend auf Göbel & Lieberenz (2013) nachfolgend beschrieben.

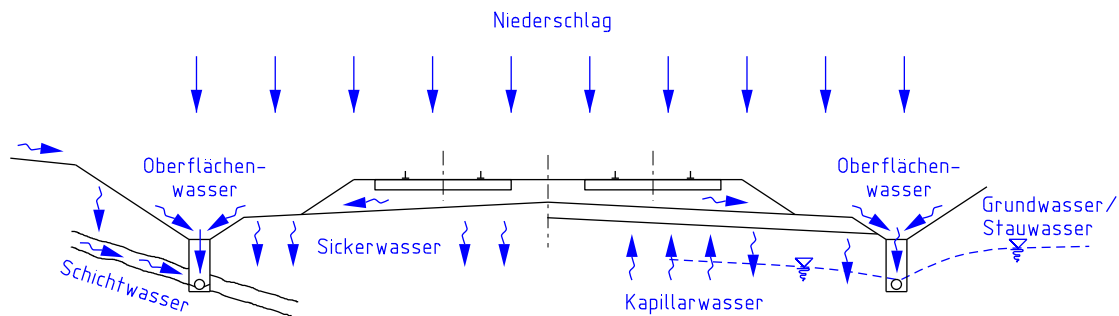


Abbildung 4: Erscheinungsformen des Wassers am Bahnkörper, in Anlehnung an DB Netz AG (2008)

- **Oberflächenwasser:**
Aus den Niederschlägen stammendes Wasser, das unmittelbar auf den Bahnkörper gelangt oder dem Bahnkörper vom angrenzenden Gelände zufließt.
- **Sickerwasser:**
Der Schwerkraft folgendes, in den Boden einsickerndes Oberflächenwasser. Bei gut durchlässigen Bodenarten sickert es zum Grundwasser. Bei Bodenarten mit Bindungsintensität bleibt es längere Zeit im Porenraum und führt zu Vernässungen.
- **Stauwasser:**
Sickerwasser, das infolge geringer Durchlässigkeit bzw. Bindungsintensität oder wegen einer undurchlässigen Schicht staut, die Bodenporen füllt und zu Vernässungen führt.
- **Schichtwasser:**
Stauwasser, das auf einer geneigten undurchlässigen Schicht abfließt.
Sickerwasser, das bei geschichtetem Boden in durchlässigem Boden auf undurchlässigem Boden fließt.
Ist die Geländeneigung größer als die Schichtneigung, so tritt es als Hangwasser aus.
- **Grundwasser:**
Wasser, das den Porenraum zusammenhängend ausfüllt und nur der Schwerkraft und dem hydrostatischen Druck unterliegt.
- **Kapillarwasser:**
Grundwasser, das infolge von Oberflächenkräften in engen zusammenhängenden Poren entgegen der Schwerkraft aufsteigt (kapillare Steighöhe).

- **Haftwasser:**

Bodenwasser, das infolge von Oberflächenkräften entgegen der Schwerkraft an den Einzelkörnern und zwischen ihnen gehalten wird.

- **Adsorptionswasser:**

Bodenwasser, das an die Oberfläche der Einzelkörner gebunden ist. Die Bindung kann durch Hydratation der Ionen oder osmotisch erfolgen.

Für die weitere Betrachtung und Berechnung innerhalb des AP 2 (Kapitel 7) werden im Wesentlichen die direkten Oberflächenabflüsse (Q_R in l/s), resultierend aus den Niederschlagsereignissen, berücksichtigt. Unterirdische Zuflüsse (Q_U in l/s) können regional sehr unterschiedlich ausfallen. Sie sind durch separate hydrologische Untersuchungen zu quantifizieren und spielen in der Regel eine sekundäre Rolle. Die hydraulische (Rest)Kapazität Q_K der Entwässerungsanlagen ist um den unterirdischen Zufluss zu reduzieren.

Es werden im AP 2 „normale“ Standardbedingungen zur Überprüfung der Restkapazitäten am Beispiel einer Strecke im Einschnitt mit 100 m, 500 m und 1000 m Länge sowie mit und ohne Außeneinzugsgebiet herangezogen.

Einige Spezialfälle sind gesondert und teilweise objektkonkret zu betrachten und sind nicht Gegenstand der Untersuchungen:

- Oberflächenabfluss bei z. B. jährlichen oder 10-jährlichen Regenereignissen und gefrorenem Boden (Winterhochwasser),
- Oberflächenabfluss während der Schneeschmelze sowie
- Oberflächenabflüsse und Bodenaustrag von landwirtschaftlich genutzten Flächen vor allem im Frühjahr kurz nach der Ansaat bzw. im Herbst nach der Ernte.

5.2.2 Geometrie und Bauweisen von Gleisentwässerungen

Ein historischer Abriss zur Gestaltung der baulichen Anlagen der Gleisentwässerung einschließlich Bezug auf die Quelle und das Regelwerk bis zum aktuellen Stand (DB Netz AG, 2008) kann dem Anhang 1 entnommen werden.

Der Anhang 1 enthält außerdem eine Übersicht über die wesentlichen Konstruktionselemente von Gleisentwässerungen aus der recherchierten Literatur. Weitere Details können direkt den Quellen entnommen werden.

Eine schematische Darstellung der aktuellen Geometrie eines Bahnkörpers mit konventionellem Schotteroberbau einschließlich der im Gleis stattfindenden Prozesse der Oberflächenwasserableitung und des Oberflächenabflusses Q_R ist in der Abbildung 5 enthalten. Unterirdische Zuflüsse zur Tiefenentwässerung wurden nicht mit dargestellt, um das Augenmerk auf die Oberflächenabflüsse zu richten. Ebenfalls nicht dargestellt wurde der Hanggraben an der Böschungsschulter des Einschnittes.

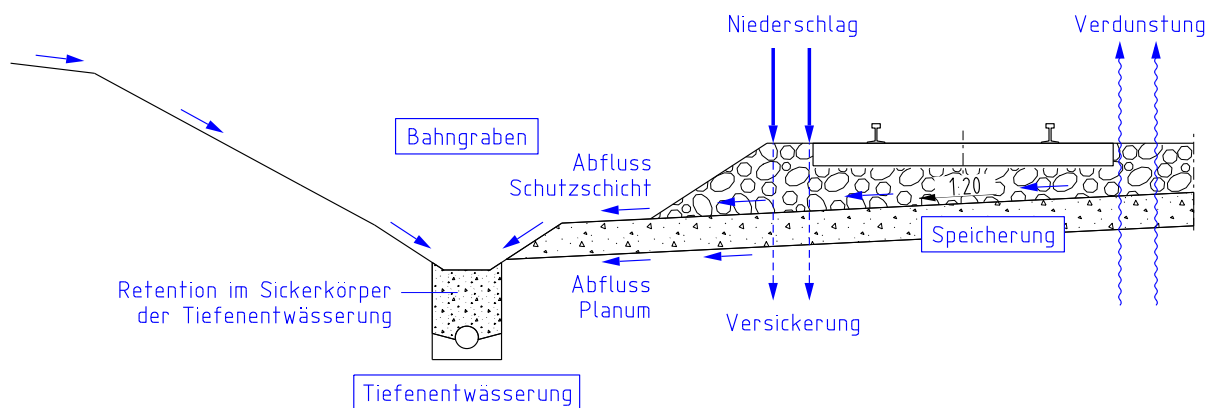


Abbildung 5 Aktuelle Geometrie einschließlich der einzelnen im Gleis stattfindenden Prozesse bei der Oberflächenwasserableitung

Als Hauptentwässerungselement zur Ableitung des Oberflächenzuflusses Q_R dient in allen Regelwerken der **offene Bahngraben**. Als offene Entwässerungsanlage ist dieser am einfachsten auf seine Funktionstüchtigkeit zu prüfen und instandzuhalten. Variationen in beengten Verhältnissen sind nach aktuellem Regelwerk die Ausführung des Bahngrabens als Bahnmulde, mit Trögen oder als verrohrter Bahngraben (DB Netz AG, 2008).

Die **Tiefenentwässerung** ist gemäß DB Netz AG (2008) eine „[...] geschlossene unterirdische Entwässerungsanlage [...]“, die vorrangig zur Aufnahme von ungebundenem Bodenwasser sowie Grund-, Stau- und Schichtenwasser dient, das für den Bahnkörper unschädlich abgeleitet und einer Vorflut zugeführt werden soll. Sie kann z. B. gemäß Göbel & Lieberenz (2013) ebenfalls zur Ableitung von Oberflächenwasser, vorrangig bei beengten Verhältnissen, ausgelegt werden. Rohre sind mit einem Durchmesser DN ≥ 100 mm vorgesehen. Ausführungsbeispiele können dem aktuellen Regelwerk DB Netz AG (2008) entnommen werden.

Wenn es die Randbedingungen zulassen, sind offene Entwässerungsanlagen den geschlossenen Entwässerungsanlagen immer vorzuziehen.

Die Entwässerungsanlagen lassen sich hydraulisch auf die einfachen geometrischen Querschnitte eines Trapezes und Kreises reduzieren.

5.2.3 Hydraulische Bemessung von Gleisentwässerungen

Die wesentlichen Berechnungsansätze und Gleichungen werden nachfolgend aufgeführt. Alle darin verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen werden im Formel- und Abkürzungsverzeichnis erläutert.

Berechnung des Regenabflusses

Die Berechnung des **Bemessungsabflusses** Q_A erfolgt gemäß DB Netz AG (2008) Modul Ril 836.4601 gegenwärtig nach der Gleichung 1:

$$Q_A = Q_R + Q_Z + Q_U \quad \text{(Gleichung 1)}$$

Die Berechnung des **Regenabflusses** Q_R erfolgt über das Zeitbeiwertverfahren nach Gleichung 2:

$$Q_R = r_{D,n} \cdot \sum(A_{E,i} \cdot \Psi_{s,i}) = r_{D,n} \cdot A_U \quad (\text{Gleichung 2})$$

Die Ermittlung der **maßgebenden Regenspende** $r_{D,n}$ erfolgt nach Gleichung 3 mit dem Zeitbeiwert $\varphi_{D,n}$ nach REINHOLD entsprechend Gleichung 4 z. B. aus Albert (2014):

$$r_{D,n} = \varphi_{D,n} \cdot r_{15,1} \quad (\text{Gleichung 3})$$

$$\varphi_{D,n} = \frac{38}{D+9} \cdot (n^{-0,25} - 0,369) \quad (\text{Gleichung 4})$$

Die Rechercheergebnisse zu den in den Regelwerken enthaltenen Regenhäufigkeiten, Regendauern, Spitzenabflussbeiwerten und Basisregenspenden, die zur Bemessung herangezogen wurden, sind chronologisch sortiert in Anhang 2, Anhang 3 und Anhang 4 enthalten. Die Tabelle 5 enthält eine Übersicht über die Berechnungseingangswerte der hydraulischen Bemessung, die Formelzeichen sowie die zugehörigen Anhänge.

Tabelle 5: Berechnungseingangswerte der hydraulischen Bemessung – aktuelle Normen und Regelwerke

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	zugehöriger Anhang
Regenhäufigkeit	n	[a ⁻¹]	Anhang 2
Regendauer	D	[min]	Anhang 2
Spitzenabflussbeiwert	Ψ_s	[1]	Anhang 3
Basisregenspende	$r_{D,n}$	[l/(s·ha)]	Anhang 4

Die im Anhang 3 enthaltenen Spitzenabflussbeiwerte wurden ähnlich benannten Flächen zugeordnet. Weiterhin enthält der Anhang 3 Ansätze zur Wahl von Versickerraten gemäß RAS-Ew (2005). Die mitgeltenden Regelwerke DWA-M 153 (2007) und DWA-A 117 (2013) enthalten ebenfalls Abflussbeiwerte, die als mittlere Abflussbeiwerte³ angegeben werden. Für Außeneinzugsgebiete können außerdem Spitzenabflussbeiwerte der Regelwerke DWA-A 118 (2006) und DWA-A 138 (2005) herangezogen werden.

Die Ermittlung der maßgebenden Regenspende $r_{D,n}$ erfolgte bis in die 1990er Jahre mit dem Zeitbeiwert nach REINHOLD (siehe RAS-Ew, 1987 sowie DB, 1985 und DB Netz AG, 1999). Der Zeitbeiwert nach REINHOLD bildet dabei einen über Deutschland gemittelten gebietsunabhängigen Wert ab.

Gebietskonkrete Regenereignisse werden gemäß DWD (2019a) seit ca. 30 Jahren in KOordinierte STarkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertungen des DWD (KOSTRA-DWD) angegeben, stets aktualisiert und an die tatsächlich auftretenden Niederschlagsereignisse angepasst. In Abhängigkeit von verschiedenen Dauerstufen und

³ Der mittlere Abflussbeiwert Ψ_m ist der Quotient aus Abflussvolumen V_A in m³ bzw. l und Niederschlagsvolumen V_R in m³ bzw. l für einen definierten Zeitraum.

verschiedenen Jährlichkeiten können die Starkniederschlagsauswertungen im aktuellen KOSTRA-DWD 2010R (DWD, 2017) gebietskonkret entnommen werden.

Für dieses Forschungsprojekt ist die Frage zu klären, welchen Einfluss diese unterschiedlichen Bemessungsansätze auf die berechneten Regenspenden und somit auf die hydraulische Bemessung von Gleisentwässerungen haben. Dazu wurden beispielhaft die Regenspenden eines Regens mit einer Dauer von 15 Minuten und den Wiederkehrzeiten von 1 Jahr, 10 Jahren, 20 Jahren und 100 Jahren nach REINHOLD mit den Werten aus KOSTRA-DWD 2010R (DWD, 2017) verglichen. Die vollständige Auswertung und Darstellung ist im Anhang 5 enthalten.

Es kann festgestellt werden, dass die Berechnung nach REINHOLD im Vergleich zu den regionalen Werten gemäß KOSTRA-DWD 2010R (DWD, 2017) je nach betrachteter Jährlichkeit bis zu 155 % höhere Regenspenden ergibt. Die Auswertung zeigt, dass vor allem bei höheren Jährlichkeiten mit Wiederkehrzeiten ≥ 10 Jahre die Regenspende nach REINHOLD im Vergleich zu den Werten aus KOSTRA-DWD 2010R z. T. deutlich größer ausfällt. Somit sind die Entwässerungsanlagen, die auf Basis von REINHOLD bemessen wurden, i.d.R. größer bemessen.

Der Ansatz nach REINHOLD soll nach RAS-Ew (2005) und dem aktuellen Regelwerk der Bahn DB NETZ AG (2008) gegenwärtig und zukünftig nicht mehr herangezogen werden. Auch wenn in DB NETZ AG (2008) die Zeitbeiwerte noch enthalten sind, wird empfohlen, die gebietskonkreten Werte des KOSTRA-DWD 2010R zu verwenden. In der zukünftigen Fassung des Regelwerkes der Bahn soll die Berechnung nach REINHOLD nicht mehr enthalten sein.

Eine flächendeckende Darstellung der Niederschlagshöhen $r_{15,1}$ und $r_{15,0,1}$ für Deutschland ist im Anhang 6 enthalten (DWD, 2017).

Eine erste Abschätzung der zukünftigen Niederschlagsverteilung bis 2100 kann für Deutschland dem Deutschen Klimaatlas (DWD, 2019) entnommen werden. Es handelt sich hierbei um das Szenario (A1B) der Klimadaten. Für das Bundesland Sachsen wird, bezogen auf das Kalenderjahr, eine Spanne der Niederschlagsveränderungen von ± 10 (85. Perzentil) für den Zeitraum um 2040 (z. B. Zeitschreibe 2010–2040) gegenüber 1961–1990 projiziert. Werden einzelne Monate betrachtet, kann es im Allgemeinen zu einer Erhöhung von 10 bis 30 % (85. Perzentil) und für den Monat März von 30 bis 50 % (85. Perzentil) kommen. Da eine Berechnung der Änderung der zukünftigen Bemessungsniederschläge aufgrund fehlender Datengrundlage derzeit nicht möglich ist, wurden die projizierten Änderungen der mittleren Niederschläge übertragen. Das heißt, dass für die weiteren Betrachtungen von einer Zunahme der zukünftigen Bemessungsregenmengen von 30 bzw. 50 % zum derzeit abruhbaren Wert in DWD (2017) ausgegangen wird.

Als Prognosejahr wird das Jahr 2040 (Datengrundlage: Zeitscheibe 2010–2040) gewählt, da mit Stand 2019 bis zu diesem Jahr eine Planung und der Bau einer Neubaus Strecke realisiert werden könnte.

Bahnanlagen mit dem Oberbau der Festen Fahrbahn (FF) sind bei der Bemessung der Gleislängsentwässerung aufgrund des im Vergleich zum Schotteroberbau anderen Abflussverhaltens gesondert zu betrachten. Hier ist die RAS-Ew (2005) relevant und es sind Spitzenabflussbeiwerte wie bei der Straße von $\Psi_s = 0,9$ anzusetzen. Bahnanlagen mit dem Oberbau Feste Fahrbahn sind Gegenstand des Forschungsberichtes.

Berechnung der Transport- / Abflussleistungen

Die Transportleistung eines **(Bahn-)Grabens** erfolgt nach MANNING/STRICKLER nach Gleichung 5.

$$Q = A \cdot k_{St} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (\text{Gleichung 5})$$

Die Abflusskapazität von **Rohrleitungen** (Kreisquerschnitte) und **Nicht-Kreisquerschnitten** wird nach PRANDL/COLEBROOK gemäß DWA-A 110 (2006) laut Gleichung 6 und 7 ermittelt bzw. ist in Albert et al. (2014) tabelliert.

$$Q = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \left(-2 \cdot \lg \left[\frac{2,51 \cdot v}{d \cdot \sqrt{2g \cdot d \cdot I_E}} + \frac{k}{3,71 \cdot d} \right] \cdot \sqrt{2g \cdot d \cdot I_E} \right) \quad (\text{Gleichung 6})$$

$$Q = A \cdot \left(-2 \cdot \lg \left[\frac{2,51 \cdot v}{4r_{hy} \cdot \sqrt{2g \cdot 4r_{hy} \cdot I_E}} + \frac{k}{14,84 \cdot r_{hy}} \right] \cdot \sqrt{2g \cdot 4r_{hy} \cdot I_E} \right) \quad (\text{Gleichung 7})$$

Die Bemessung von Rohrdurchlässen bei Vollfüllung kann gemäß RAS-Ew (2005) laut Gleichung 8 durchgeführt werden. Dieser Bemessungsansatz beinhaltet alle bei einem Durchlass auftretenden Einzelverluste.

$$Q = \sqrt{\frac{\Delta h}{\frac{8}{g \cdot \pi^2 \cdot d^4} \left(1,5 + \frac{2g \cdot L}{k_{st}^2 \cdot \left(\frac{d}{4} \right)^{\frac{4}{3}}} \right)}} \quad (\text{Gleichung 8})$$

Für die Bemessung von Rechteckprofilen erfolgt eine Umrechnung der Profilgeometrie in einen äquivalenten Kreisquerschnitt gemäß Albert et al. (2014) über den hydraulischen Durchmesser d_{hy} laut Gleichung 9.

$$d_{hy} = \frac{4A}{U} \quad (\text{Gleichung 9})$$

Für Rechteckprofile wurde in Gleichung 8 statt dem Rohrdurchmesser d der hydraulische Radius d_{hy} verwendet.

Hydraulischer Nachweis

Die Bemessung erfolgt elementbezogen als Nachweis, dass der Bemessungszufluss Q_A kleiner bzw. gleich dem zulässigen Abfluss bzw. der Abflusskapazität der Entwässerungsanlage Q_K ist.

$$Q_A = Q_R \leq Q_K \quad (\text{Gleichung 10})$$

Bei dem Ansatz des zulässigen Abflusses bzw. der Abflusskapazität darf die maximale Wasserspiegellage im Bahngraben z. B. gemäß DB (1985) die Höhe des Planums⁴ nicht überschreiten.

⁴ Die seit 2008 (siehe DB Netz AG, 2008) als Oberfläche Tragschicht (OFTS) definierte Ebene wurde bis 2008 (siehe DB Netz AG, 1999) als Planum (PL) bezeichnet. Die als Auflager für die Trag- und Schutzschicht dienende Schicht wurde bis 2008 (siehe DB Netz AG, 1999) als Erdplanum (EPL) und ist seit 2008 (siehe DB Netz AG, 2008) als Planum definiert.

Gemäß DB (1985) darf der Querschnitt von Bahngräben bei einfachen Verhältnissen auf Basis örtlicher Erfahrungswerte festgelegt werden.

Im aktuellen Regelwerk der Bahn (DB Netz AG, 2008) werden für drei verschiedene Streckeneinstufungen (SE) zulässige Wasserspiegellagen bzw. Einstauhöhen im Bahngraben angegeben. In Kapitel 7.4.1 wird detailliert auf diese Abstufung eingegangen.

Die Bemessung der Rohrleitungen erfolgt unter der Annahme, dass der Abfluss immer als Freispiegelgefälle erfolgt. Ein Rohrquerschnitt erreicht seine maximale Abflussleistung im Freispiegelgefälle bei ca. 90 % Füllstand. Dieser Füllstand wird in den derzeitigen Planungen in der Regel als Obergrenze zur Wahl des nächst größeren Rohrquerschnittes angesetzt.

Eine Bemessung der Gleisentwässerung mittels hydrodynamischen Modellen erfolgt zurzeit nur in Ausnahmefällen.

In Höntsch (2003) wurde ein Vergleich zwischen dem Fließzeitverfahren (statisches Modell) und hydrodynamischen Bemessungsansätzen (dynamisches Modell) vorgenommen, welcher in der Tabelle 6 dargestellt ist und die wesentlichen Unterschiede der beiden Berechnungsmodelle hervorhebt.

Tabelle 6: Vergleich von statischen und dynamischen Bemessungsansätzen (aus Höntsch, 2003)

Merkmal	Statisches Modell	Dynamisches Modell
Bemessungsregen	Zeitbeiwert/ KOSTRA → Blockregen nur Einzelereignisse	Blockregen, Modellregen, Naturregen, historische Regenreihen, Langzeitsimulation
Abflussbildung	Abflussbeiwert	verschiedene Verlustansätze möglich, Einzelverluste
Abflusskonzentration	Abflussbeiwert	hydrologische oder hydraulische Verfahren
Abflusstransport	stationärer Abfluss	instationärer Abfluss Einstau, Fließrichtungswechsel, Druckabfluss
Entwässerungsnetz	unvermascht, Verzweigungen bedingt möglich	vermascht, Sonderbauwerke, Betrachtung von Speicherräumen
Ausgabewerte	Spitzenabflusswerte	Ganglinien für jedes Element möglich, Überstauvolumina
Zeitaufwand, Eingangsparameter, Datengrundlage	geringer Aufwand bei sehr kleinen Netzen, Rechnung „per Hand“ möglich, unübersichtlich und aufwändig bei größeren Netzen	Rechnergestützte Simulation, Verwaltung der Daten und Parameter mit Datenbanksystemen
Anwendung	Neubemessung kleiner Netze	Neubemessung größerer Netze, Nachrechnung von Netzen

5.2.4 Erkenntnisse aus aktuellen Forschungsprojekten und Zwischenfazit zur Gleisentwässerung

Aktuelle Erkenntnisse und Forschungsprojekte (z. B. Höntsch, 2003 und Below et al., 2008) sowie die Messung von Abflüssen in der Tiefenentwässerung bei Pilotprojekten im Rahmen der Studie zur Qualität des Abflusses aus der Gleisentwässerung (DB Netz AG, 2019) haben gezeigt, dass lediglich ein geringerer Teil der im Zeitbeiwertverfahren als Spitzenabfluss berechneten Bemessungswassermenge Q_R tatsächlich den funktionsstüchtigen und instandgehaltenen Entwässerungsanlagen zufließt bzw. hier eine zeitliche Verzögerung vorhanden ist.

In der Folge fällt die Bemessungswassermenge Q_R kleiner aus, wird dafür aber über einen längeren Zeitraum von den Entwässerungsanlagen aufgenommen und abgeleitet.

Dies deutet darauf hin, dass bei der derzeitigen hydraulischen Bemessung der Gleisentwässerungsanlagen große Reserven vorhanden sind, sowohl in Hinblick auf die Eingangsparameter des Berechnungsverfahrens (Regenspende nach REINHOLD und Spitzenabflussbeiwert) als auch durch

- die nutzbare Speicherung,
- das natürliche Rückhaltevermögen von Lockergesteinen (Gleisschotter und Schutzschichtmaterial),
- die Oberflächenbenetzung des Schotters,
- die Berücksichtigung von Versickerungsraten (siehe z. B. RAS-Ew, 2005),
- die Verdunstung und
- die Nutzung des Porenraumes bei Verwendung eines grobkörnigen Filters beim Bau von Tiefenentwässerungen.

Diese oben genannten Prozesse sind der Grund, warum bei allen bisher betrachteten Pilotprojekten nicht die berechneten Spitzenabflüsse festgestellt wurden. Eine zusätzliche schädliche Vernässung bzw. Durchfeuchtung des Bahnkörpers findet durch diese natürlichen Prozesse dabei nicht statt.

Diese Reserven sind in Hinblick auf eine mögliche Zunahme von Starkregenereignissen von erheblichem Vorteil. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass Regenereignisse mit größerer Intensität schadlos für den Bahnkörper von den Entwässerungsanlagen aufgenommen und abgeleitet werden können.

In der Parameterstudie in Kapitel 7 werden die unterschiedlichen Bemessungsansätze und Eingangsparameter zur Bestimmung des abflusswirksamen Niederschlages für die Jahre 1988, 1991, 1999, 2008, 2019 und zwei Annahmen für das Jahr 2040 näher untersucht und miteinander verglichen. Der hydraulische Nachweis erfolgt anhand des Fließzeitverfahrens für Streckenabschnitte von 100 m, 500 m und 1.000 m Länge. Spitzenabflussbeiwerte für das Fließzeitverfahren werden für das Außeneinzugsgebiet und den Gleisbereich aus den exemplarischen hydrodynamischen Berechnungen des Kapitels 7.2 abgeleitet.

Eine genaue Untersuchung der in den Berechnungsansätzen vorhandenen Reserven wird unter Verwendung der empirischen Ansätze des Fließzeitverfahrens (statisches Modell) sowie einer dynamischen Modellierung im AP 4 (Kapitel 9) für einen konkreten Streckenabschnitt in Weinböhla (Sachsen) erfolgen.

5.3 Durchlässe

Kapitel 5.3.1 enthält eine allgemeine Definition zu Durchlässen. In Kapitel 5.3.2 werden die Rechercheergebnisse zur Geometrie und den Bauweisen von Durchlässen am Beispiel der Produktionsdurchführungen (PD) Dresden und Magdeburg vorgestellt. Die hydraulische Bemessung von Durchlässen werden in Kapitel 5.3.3 erläutert. In Kapitel 5.3.4 wird ein Zwischenfazit gezogen.

5.3.1 Allgemeines

Durchlässe können gemäß DIN 19661-1 (1998) als Durchleitungsbauwerke bezeichnet werden, „[...] die bei einer Kreuzung von Gewässern mit anderen Anlagen, wie Verkehrswegen, Wasserläufen und Dämmen notwendig werden“.

Als Durchlässe gemäß DIN 19661-1 (1998) werden alle Querungen bezeichnet, die eine Mindestnennweite DN 400 aufweisen. In DB (1957) wird eine Mindestnennweite von 0,30 m angegeben. In der TGL 24 756/07 (DR, 1975) wurde bereits der Mindestdurchmesser von 0,5 m und der Maximaldurchmesser von 2,0 m festgelegt.

Durchlässe sind gemäß DB Netz AG (2008), Modul 836.0101A99 Bauwerke mit einer lichten Weite ab 0,5 m bis kleiner 2,0 m. Sie haben die Aufgabe „[...] Straßen, Wege, Gewässer und dgl. unter Gleisanlagen hindurchzuführen [...]. Bauwerke unter 0,50 m lichter Weite oder Stützweite gehören [...] entweder zu den Entwässerungsanlagen des Bahnkörpers [...] oder [...] zu den entsprechenden Versorgungsanlagen.“ Bei einer lichten Weite $\geq 2,00$ m werden sie bei der Bahn als Eisenbahnüberführung (EÜ) geführt.

Die weiteren Ausführungen beziehen sich speziell auf die bei der PD Dresden und der PD Magdeburg durchgeführten Recherchen. Durchlässe werden hier nach der Art der Querung wie folgt unterteilt:

- Weg,
- Fließgewässer,
- Kanal (stehendes Gewässer),
- Graben für Oberflächenwasser,
- Abwasser (Schmutzwasser),
- Entwässerungsrohrleitung,
- Medienleitung mit Schutzrohr,
- Medienleitung ohne Schutzrohr und
- Sonstiges.

Weiterführend wurden die 1.152 Durchlässe der PD Dresden und die 1.066 Durchlässe der PD Magdeburg, die im Datenbanksystem der DB Netz AG unter Fließgewässer, Kanal (stehendes Gewässer), Graben für Oberflächenwasser und Sonstiges geführt werden, ausgewertet.

5.3.2 Geometrien und Bauweisen von Durchlässen

Zu Durchlässen werden im Regelwerk der DB Netz AG wenige Angaben gemacht. Ein historischer Abriss zur baulichen Gestaltung von Durchlässen einschließlich des Bezugs auf die Quelle bzw. das Regelwerk kann dem Anhang 7 entnommen werden.

Die Recherche in der PD Dresden zeigte, dass die Durchlässe größtenteils kategorisiert sind. Typische geometrische Durchlassquerschnitte sind der Kreis, das Rechteck, das Quadrat, das Ei- sowie das Maulprofil.

Die Bauweisen und damit einhergehend die verwendeten Baumaterialien variieren je nach Baujahr dahingehend, dass für Rohre Stahl oder (Stahl)Beton verwendet wurde bzw. wird und die Herstellung der viereckigen Querschnitte als Plattendurchlässe mit gemauerten Seitenwänden und abdeckender Platte oder als Rahmendurchlässe aus (Stahl)Beton erfolgte. Wurde statt einem geraden oberen Abschluss (Platte) ein Gewölbe hergestellt, wird dieser Durchlass in der Datenbank als Gewölbedurchlass geführt. Platten- und Gewölbedurchlässe sind historische Bauweisen. Als Standardbauweisen werden heute Rohre aus Stahlbeton und Stahl sowie Rahmendurchlässe aus Stahlbeton hergestellt.

Von den 1.152 ausgewerteten Durchlässen der PD Dresden sind fast die Hälfte (48 %) Rohrdurchlässe und ca. ein Drittel (34 %) sind Plattendurchlässe. In Abbildung 6 sind die vorhandenen Durchlässe den Geometrien zugeordnet.

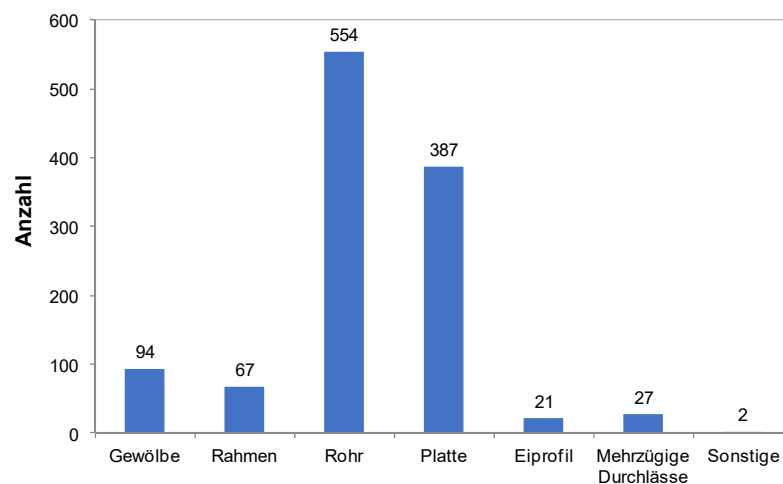


Abbildung 6 Anzahl der Durchlässe der PD Dresden, bezogen auf die Geometrie (Gesamtzahl: 1.152)

Da in der PD Dresden vor allem Rohrdurchlässe und Plattendurchlässe vorhanden sind, wurden diese hinsichtlich des Durchmessers bzw. der lichten Weite ausgewertet. Zwischenmaße wurden entsprechend zugeordnet, so z. B. 0,25...0,35 m dem Durchmesser 0,3 m bzw. der lichten Weite 0,3 m.

In Abbildung 7 ist die Anzahl der Rohrdurchlässe in Bezug auf den Durchmesser und in Abbildung 8 die Anzahl der Plattendurchlässe in Bezug auf die lichte Weite dargestellt.

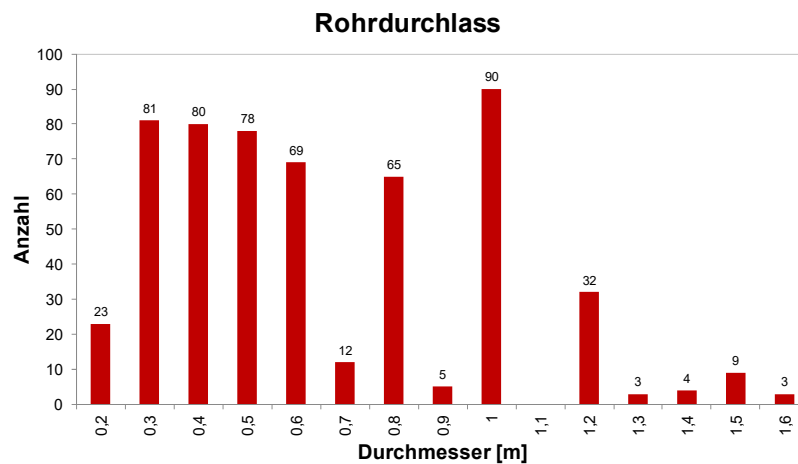


Abbildung 7 Anzahl der Rohrdurchlässe der PD Dresden, bezogen auf den Durchmesser (Gesamtzahl: 554)

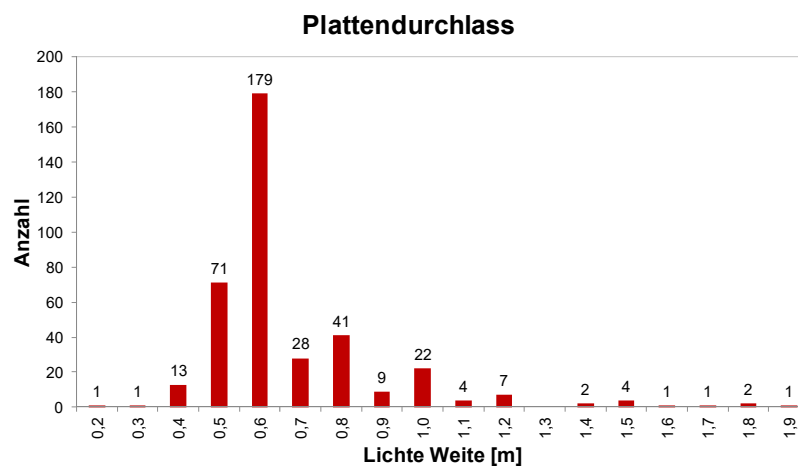


Abbildung 8 Anzahl der Plattendurchlässe der PD Dresden, bezogen auf die lichte Weite (Gesamtzahl 387)

Die Auswertung von 1.066 Durchlässen der PD Magdeburg ergab eine ähnliche Verteilung wie in der PD Dresden (Abbildung 9). In Abbildung 10 sind die Anzahl der Rohrdurchlässe in Bezug auf den Durchmesser und in Abbildung 11 die Anzahl der Plattendurchlässe in Bezug auf die lichte Weite dargestellt.

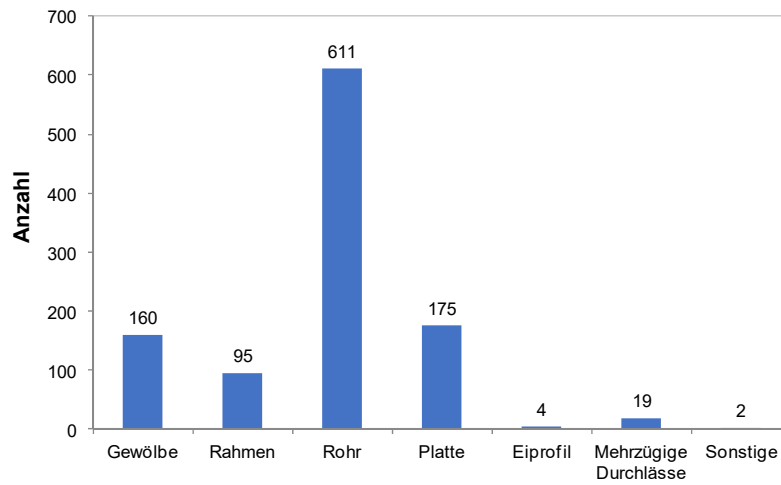


Abbildung 9 Anzahl der Durchlässe der PD Magdeburg, bezogen auf die Geometrie (Gesamtzahl: 1.066)

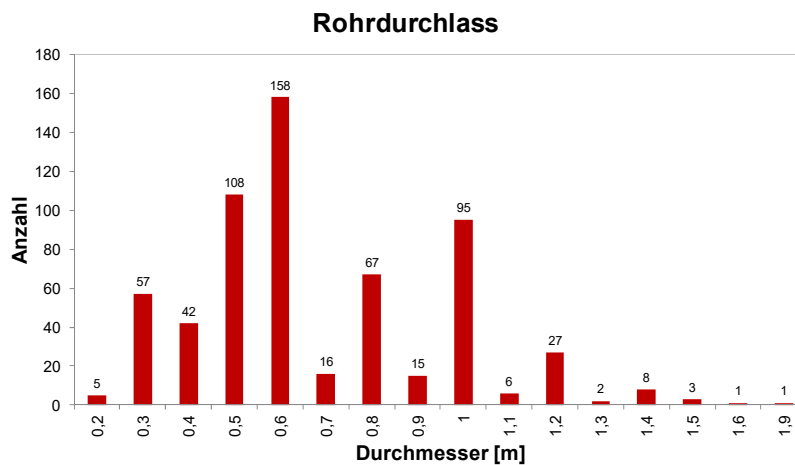


Abbildung 10 Anzahl der Rohrdurchlässe der PD Magdeburg, bezogen auf den Durchmesser (Gesamtzahl: 611)

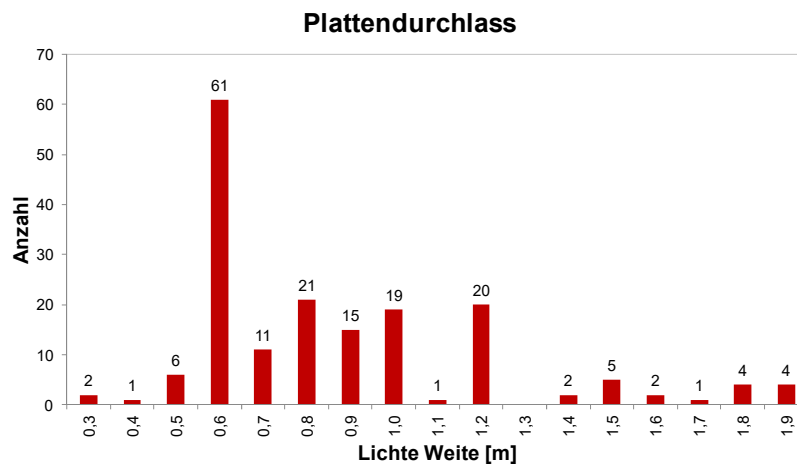


Abbildung 11 Anzahl der Plattendurchlässe der PD Magdeburg, bezogen auf die lichte Weite (Gesamtzahl 175)

Im aktuellen Regelwerk (DB Netz AG, 2008) werden als Durchlässe Bauwerke definiert, die eine lichte Weite ab 0,5 m bis kleiner 2,0 aufweisen. Aus Abbildung 7, Abbildung 8, Abbildung 10 sowie Abbildung 11 wird ersichtlich, dass in der PD Dresden und der PD Magdeburg einige wenige Durchlässe erfasst sind, die Durchmesser bzw. lichte Weiten kleiner 0,5 m besitzen. Es sind vermutlich Durchlässe älteren Baujahrs oder sie werden dennoch als Durchlass im Sinne der Definition DB Netz AG (2008) geführt.

In Tabelle 7 sind Mindestnennweiten von Durchlässen zusammengefasst, die in Normen und Regelwerken recherchiert werden konnten.

Tabelle 7: Übersicht zu Mindestnennweiten von Durchlässen

Quelle	Mindestabmessung	Bemerkung
DR (1975)	DN 500	Minstdurchmesser
TGL 24 756/07	DN 1000	Minstdurchmesser über 20 m Länge Bei Verlängerung vorhandener Durchlässe sind Ausnahmen zulässig.
DIN 19661-1 (1998)	0,80 m Höhe nicht schmaler als 0,60 m Breite < 1,20 m > 1,20 m Höhe	bekriechbar Mechanische Reinigungsfähigkeit sollte gegeben sein. begehbar, größere Maße sind anzustreben
RAS-Ew (2005)	DN 400 DN 500 DN 800 $L_w/l_h = 1,0 / 2,0$ m	Rohrdurchlass unter Wirtschaftswegen Rohrdurchlass unter Straßen (Überführungsrampen an Bundesstraßen) Längerer Rohrdurchlass unter Straßen sowie unter Bundesfernstraßen Rechteck-, Rahmendurchlass, begehbar

5.3.3 Hydraulische Bemessung von Durchlässen

Gemäß TGL 24 756/07 (DR, 1975) waren Querschnittsberechnungen von Durchlässen nicht erforderlich, „[...] wenn Bahngräben, die nur zeitweilig Wasser führen, durch den Bahnkörper [...] geleitet werden.“ Die lichten Weiten waren baulich und konstruktiv entsprechend der Örtlichkeiten festzulegen. Bei Vorflutgräben, Bächen und Gewässern waren die lichten Weiten durch Behörden (z. B. der Wasserwirtschaft,...) festzulegen.

In DIN 19661-1 (1998), DB (1985) und RAS-Ew (1987 und 2005) wird eine hydraulische Bemessung der Durchlässe generell gefordert. RAS-Ew (1987 und 2005) gibt Hinweise der Bemessung in Bezug auf das natürliche Einzugsgebiet.

Tabelle 8 enthält eine Zusammenfassung der zu berücksichtigenden Einzugsflächen und Berechnungsverfahren für die hydraulische Bemessung von Durchlässen (RAS-Ew, 2005).

Tabelle 8: Hydraulische Bemessung von Durchlässen – Übersicht über zu berücksichtigende Einzugsflächen und Berechnungsverfahren (RAS-Ew, 2005)

Einzugsflächen	Größe	Berechnungsverfahren
Straßenflächen	nicht benannt	Fließzeitverfahren
Straßenflächen und natürliches Einzugsgebiet	< 5 km ²	Bemessungsdurchfluss aus Überlagerung von Straßen- und Gebietsabflüssen. Berücksichtigung der zeitlichen Aufeinanderfolge der Abflussspitzen der Teilflächen.
Straßenflächen und natürliches Einzugsgebiet	5...20 km ²	Besondere hydrologische Untersuchungen für Straßenabflüsse und Gebietsabflüsse können erforderlich werden. Ggf. Niederschlags- und Abflussmessung zur Beurteilung der Niederschlag-Abfluss-Beziehung.
natürliches Einzugsgebiet	>20 km ²	Gebietsabflüsse zur Bemessung maßgebend.

Die Leistungsfähigkeit der Durchlässe kann bezogen auf die geometrischen Abmessungen nach Gleichung 8 und 9 berechnet werden. Eine detaillierte Berücksichtigung von Einlauf-, Auslaufverlusten sowie der hydraulischen Besonderheiten bei Einstau können u.a. aus Aigner & Bollrich (2015), Lattermann (2004), RAS-Ew (2005) und Schröder (1999) entnommen werden.

Ein Bezug auf die auftretenden Hochwasserabflüsse der Einzugsgebiete erfolgt bisher noch nicht. Überschlägige Hochwasserabflüsse werden in Vischer & Huber (1993), Schröder (1999) und Albert (2014) angegeben. Exemplarisch sind diese Schätzwerte für Abflussspenden aus Albert (2014) im Anhang 8 enthalten.

Falls keine Abflussdaten vorhanden sind, ist die Bestimmung von Gebietsabflüssen schwierig. Dazu wird u.a. in RAS-Ew (2005) folgender Hinweis gegeben: Es „[...] *bleibt letztlich nur die Abschätzung, wobei auch theoretische Berechnungsverfahren nichts anderes als Schätzverfahren [...]*“ sind. Abschätzungen sind im Flachland, wie z. B. im norddeutschen Raum unproblematischer als im Hügelland. Ein Nachweis durch Vergleich mit älteren Bauwerken wird auch in Hinblick auf historische Hochwasser als sinnvoll erachtet. Eine Abstimmung mit den zuständigen Wasserbehörden wird empfohlen.

Für das Bundesland Sachsen sind in LfULG (2011 und 2018) Hochwasserwerte für unterschiedliche Jährlichkeiten HQ(T) und MHQ für die sächsischen Fließgewässer vorhanden und nutzbar. Eine genaue Zuordnung z. B. eines Bahndurchlasses zu einem Flusslauf und dessen Einzugsgebietes kann auf der entsprechenden Internetseite (LfULG, 2019) erfolgen. Für die Methodik der hydraulischen Bemessung von Durchlässen wurde ein Ablaufschema entwickelt, welches in Anhang 9 dargestellt ist.

Neben den oben genannten hydraulischen Anforderungen an Durchlässe sind gemäß RAS-Ew (2005) faunistische Querbeziehungen (z. B. die ökologische Durchgängigkeit sowie Bermen z. B. für Fischotter oder Biber) zu beachten.

5.3.4 Zwischenfazit zu den Durchlässen

Es kann davon ausgegangen werden, dass die PD Dresden und die PD Magdeburg mit ihren Arten und der Anzahl an Durchlässen den charakteristischen Durchlassbestand der DB Netz AG widerspiegeln. Sie können daher als repräsentative Standorte bewertet werden (siehe dazu auch Kapitel 6).

Auf der Grundlage des Ablaufschemas aus Anhang 9 wird in Kapitel 8 exemplarisch an fünf ausgewählten Beispielen der PD Dresden eine Bewertung der hydraulischen (Rest)Kapazität für das Jahr 2019 und für eine klimabedingte Zunahme der Abflussmenge vorgenommen. Bei der Wahl der Durchlässe wird darauf geachtet, dass die Durchlässe gemäß Sächsischem Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG, 2019) ständig wasserführend sind.

Bei der Bewertung der (Rest)Kapazität wird auch die Zunahme der Niederschläge gemäß Deutschem Klimaatlas DWD (2019) berücksichtigt.

6 Kategorisierung der Entwässerungsanlagen (AP 1.3)

Die Grundlage der Kategorisierung (AP 1.3) bilden die im aktuellen Regelwerk Ril 836 (DB Netz AG, 2008) sowie in Göbel & Lieberenz (2013) beschriebenen Entwässerungsanlagen und deren einzelne Elemente (siehe Kapitel 3).

Ergänzend dazu wurden bei der PD Dresden und PD Magdeburg Recherchen zu deren aktuellem Anlagenbestand der Entwässerungsanlagen durchgeführt (siehe Kapitel 5.3).

Hierzu muss einschränkend festgestellt werden, dass die **Entwässerungsanlagen zur Gleisentwässerung** der Produktionsdurchführungen (Tiefenentwässerungen, Gräben, ...) erst zum jetzigen Zeitpunkt aufgenommen und in das Datenmanagementsystem der DB Netz AG eingepflegt werden. Deshalb ist ein umfassender Zugriff auf Daten zur Gleisentwässerung zurzeit noch nicht möglich.

Durchlässe sind dagegen weitestgehend kategorisiert und im Datenbanksystem der DB Netz AG vorhanden. Die PD Dresden repräsentiert einen für Deutschland typischen Standort mit Streckenabschnitten im Hügel- bzw. Bergland. Die PD ist eine von 34 PD in Deutschland und betreut insgesamt ca. 1.500 km Streckennetz. Es liegen Geometriedaten und Datensätze von 1.152 Durchlässen vor.

Für die PD Magdeburg, als PD mit Strecken im Flachland und einem Streckennetz von ca. 1.300 km, liegen Daten von insgesamt 1.066 Durchlässen vor, die zum Vergleich mit herangezogen wurden.

Auf der Grundlage des Regelwerks Ril 836 der DB Netz AG (2008) sowie der Recherche bei der PD Dresden und der PD Magdeburg wurden die Entwässerungsanlagen zusammengefasst und entsprechend Abbildung 12 kategorisiert. Die Kategorisierung der Entwässerungsanlagen erfolgt in diesem Forschungsbericht aus hydraulischer Sicht in Bezug auf die Bewertung der Anlagen hinsichtlich der durch den Klimawandel möglicherweise erhöhten Starkregenereignisse. Sie ist nicht zu verwechseln mit der Kategorisierung nach Erdbauwerken und sonstigen geotechnischen Bauwerken der Abbildung 3. Der Kategorie 2 werden demzufolge alle Durchlässe zugeordnet, die eine Entwässerungsaufgabe zu erfüllen haben.

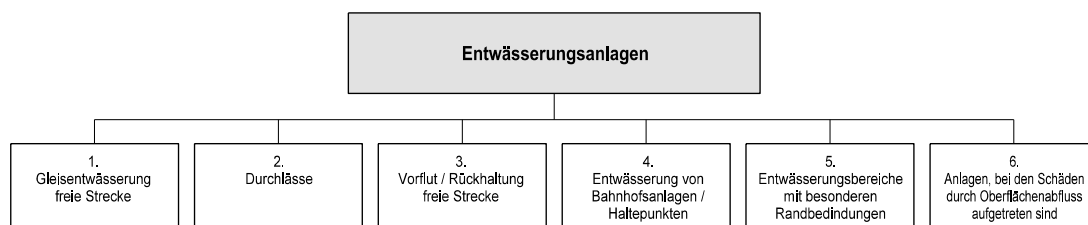


Abbildung 12 Kategorisierung der Entwässerungsanlagen aus hydraulischer Sicht

Im Anhang 10 sind Entwässerungsanlagen einschließlich der Unterteilung in weitere Elemente dargestellt. Sie wurden in die Kategorien 1 bis 6 unterteilt. In Anhang 11 wurden die Kategorien 1 bis 5 detaillierter charakterisiert. Anlagen, bei denen Schäden

durch Oberflächenabfluss aufgetreten sind (Kategorie 6), müssen immer objektkonkret untersucht werden.

Weiterführende Auswertungen und Berechnungen erfolgen in den nachfolgenden Kapiteln für die Kategorie 1: **Gleisentwässerung freie Strecke** und die Kategorie 2: **Durchlässe**.

Die Kategorien 3 bis 6 sind abstimmungsgemäß nicht Bestandteil dieses Forschungsprojektes und werden deshalb nicht weiter betrachtet.

In Kapitel 7 werden exemplarische hydraulische Berechnungen und Nachweise für die Gleisentwässerung der freien Strecke und in Kapitel 8 hydraulische Nachweise beispielhaft für fünf Durchlässe geführt. In Kapitel 9 erfolgt an einem realen Beispiel eine hydraulische Bemessung für eine Gleisentwässerung der freien Strecke. Aufbauend auf diesen Ergebnissen werden in Kapitel 10 Handlungsempfehlungen für bestehende und neue Entwässerungsanlagen gegeben.

7 Berechnungen für Gleisentwässerungen der Freien Strecke (AP 2)

In Kapitel 7 erfolgen hydraulische Berechnungen für **Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke**. Die geometrischen Randbedingungen werden in Kapitel 7.1 beschrieben. Die hydraulischen Nachweise werden für Streckenabschnitte von 100 m, 500 m und 1.000 m Länge sowie für Wiederkehrzeiten von 1 Jahr, 10 Jahren, 20 Jahren und 100 Jahren mit Hilfe des **Fließzeitverfahrens** geführt.

Eine allgemeine Beschreibung des Fließzeitverfahrens im Vergleich zur tatsächlichen Abflussbildung, welche sich mittels dynamischen Modellen besser beschreiben lässt, erfolgt in Kapitel 7.2.1. Das theoretische Abflussverhalten wird mit dem Fließzeitverfahren ermittelt und dem realitätsnäheren Abflussverhalten, das mit Hilfe der hydrodynamischen Berechnung berechnet werden kann, gegenübergestellt. Die für das Fließzeitverfahren notwendigen Spitzenabflussbeiwerte werden mittels exemplarischer hydrodynamischer Berechnungen – in Kapitel 7.2.2 für das Außeneinzugsgebiet und in Kapitel 7.2.3 für den unmittelbaren Gleisbereich – berechnet. In Kapitel 7.2.4 wird die Methodik des zu führenden hydraulischen Nachweises näher erläutert.

Auf dieser Grundlage werden in einer Parameterstudie in Kapitel 7.3 die Bemessungsansätze für die Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke, unter Berücksichtigung der historischen Entwicklung, für

- unterschiedliche Bemessungsregen (Kapitel 7.3.1),
- unterschiedliche abflusswirksame Flächen aufgrund verschiedener Spitzenabflussbeiwerte (Kapitel 7.3.2) und
- den unterschiedlichen daraus resultierenden Bemessungsabfluss Q_A (Kapitel 7.3.3)

zur Bestimmung des abflusswirksamen Niederschlages für die Jahre 1988, 1991, 1999, 2008, 2019 und als Prognose für das Jahr 2040 verwendet und die Ergebnisse miteinander verglichen. Die tatsächlich vorhandenen Kapazitäten der Gleisentwässerung Q_K werden in Kapitel 7.4 berechnet. Der hydraulische Nachweis, ob der Bemessungsabflusses Q_A kleiner bzw. gleich der Kapazität der Gleisentwässerung Q_K ist, erfolgt in Kapitel 7.5.

7.1 Regelquerprofil der freien Strecke

Der hydraulische Nachweis der Entwässerungsanlagen der freien Strecke erfolgt für das Regelquerprofil gemäß DB Netz AG (2008) – eine zweigleisige Strecke im Einzugsbereich.

Betrachtet wird ein Gleis mit dem Hochpunkt des Quergefälles in Streckenachse und dem Tiefpunkt im Bahngraben, einschließlich der darunterliegenden Tiefenentwässerung. Der Bahngraben wird vollständig dem Gleisbereich zugeordnet.

Anschließend folgen eine 5,0 m hohe und 1:1,8 geneigte Böschung sowie ein flach geneigtes Außeneinzugsgebiet von 100 m Breite, bestehend aus landwirtschaftlich genutzten Flächen. Ein Abfanggraben an der Böschungsschulter ist im Beispiel nicht vorhanden, da der Einfluss des Außeneinzugsgebiets auf die Bemessung der gleisnahen Entwässerungsanlagen dargestellt werden soll.

Die Geometrie des Regelquerschnittes ist in Abbildung 13 enthalten. Als Abschnittslängen werden 100 m, 500 m und 1000 m gewählt.

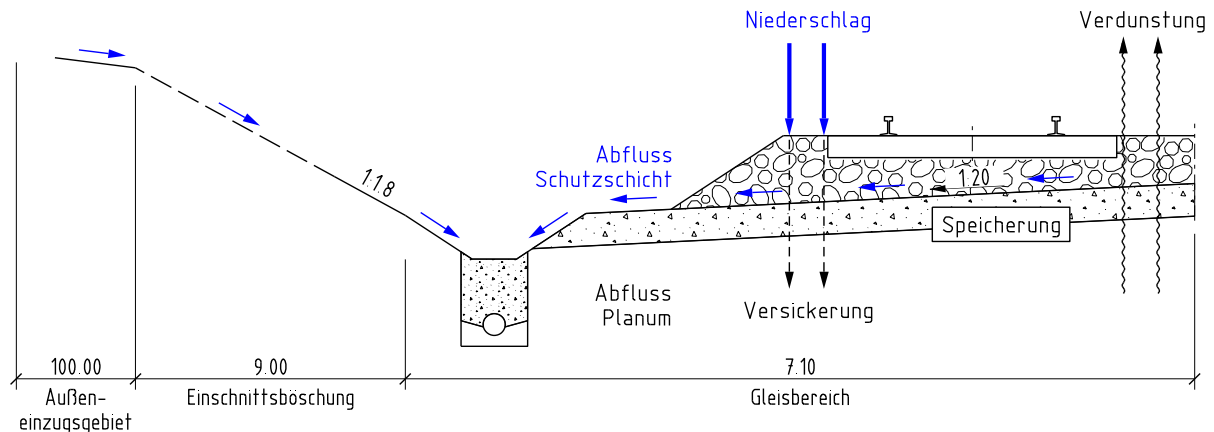


Abbildung 13 Prinzipskizze des Regelquerschnittes einschließlich der Darstellung der Oberflächenwasserableitung (blau)

7.2 Allgemeine Abflussbildung und Nachweis

Kapitel 7.2 erläutert die allgemeine Abflussbildung sowie den zu führenden hydraulischen Nachweis. Es werden Spitzenabflussbeiwerte für das Außeneinzugsgebiet mit dem Programm HYSTEM-EXTRAN und für den Gleisbereich mit dem Programm HYDRUS 2D/3D ermittelt. Diese Spitzenabflussbeiwerte fließen in die Parameterstudie in Kapitel 7.3 und das dort verwendete Fließzeitverfahren ein.

Dabei werden für die Gleisentwässerung der freien Strecke Abfluss- und Speicherreserven mit der derzeitigen Bemessung aufgezeigt, die rechnerisch unter Verwendung der empirischen Ansätze des Fließzeitverfahrens (statisches Modell) sowie einer hydrodynamischen Modellierung (dynamisches Modell) gestützt werden.

7.2.1 Beschreibung der Abflussbildung

Beim **Fließzeitverfahren** (ein statisches Modell zur Ermittlung der Abflussbildung) wird mit einem Blockregen über die gewählte Regendauer hydraulisch bemessen. Der tatsächliche Niederschlagsverlauf wird dabei nicht berücksichtigt. Weiterhin können die im Einzugsgebiet stattfindenden und den Spitzenabfluss reduzierenden Prozesse, wie sie in Abbildung 14 dargestellt sind, nur pauschal über einen Spitzenabflussbeiwert berücksichtigt werden.

Dieser Spitzenabflussbeiwert ist eine zeit- und intensitätsabhängige Größe. In der Abbildung 14 sind dazu zwei Zeitpunkte markiert. Zum Zeitpunkt t_1 erfolgt auch bei maximaler Niederschlagsintensität kein Oberflächenabfluss. Zum Zeitpunkt t_2 setzt sich der Abfluss zu 75 % aus Oberflächenabfluss und zu 25 % aus Versickerung, Muldenfüllung und Verdunstung zusammen.

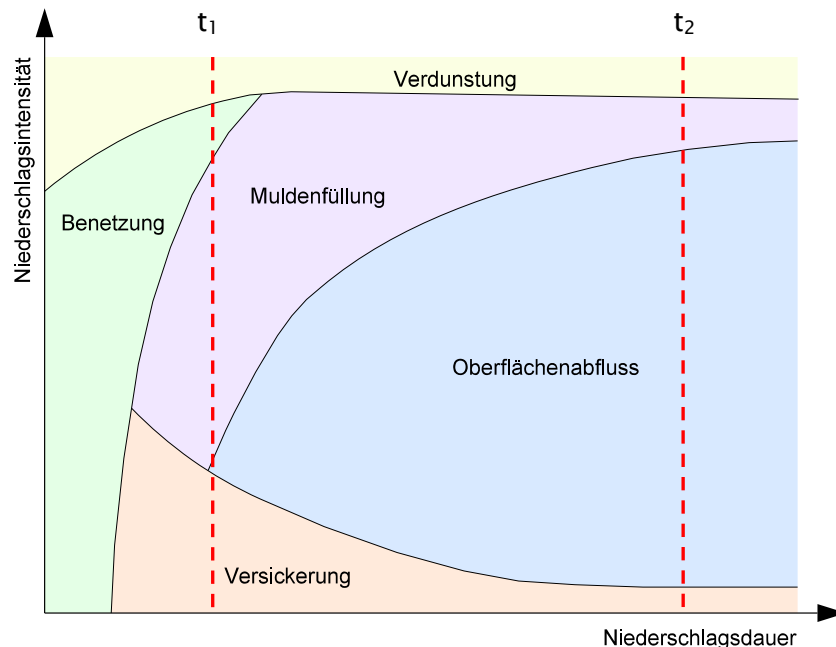


Abbildung 14 Schematischer Verlauf der Abflussbildung in der Natur für durchlässige Flächen, in Anlehnung an Höntsch (2003), ergänzt.

Die Abbildung 14 verdeutlicht dabei die Schwierigkeit der Festlegung des maßgebenden Zeitpunktes, der zu wählenden Regenereignisse und damit die Schwierigkeit der Ermittlung des entsprechenden Spitzenabflussbeiwertes.

Die naturnahen Abflussvorgänge aus Abbildung 14 können genauer mittels **hydrodynamischer Modellierung** (dynamisches Modell) abgebildet werden und sind exemplarisch

- für das Außeneinzugsgebiet mit dem Programm HYSTEM-EXTRAN in Kapitel 7.2.2 und
- für den Gleisbereich mit dem Programm HYDRUS 2D/3D in Kapitel 7.2.3

rechnerisch überprüft worden. Die räumliche Abgrenzung der Berechnungsprogramme ist in der Abbildung 15 enthalten. Aufgrund der Böschungsneigung von 1:1,8 und der kleinen Breite erfolgt ein schneller Abfluss des Oberflächenwassers. Eine detaillierte Betrachtung der Einschnittsböschung erfolgt innerhalb dieses Kapitels nicht. Innerhalb der Parameterstudie in Kapitel 7.3 werden Spitzenabflussbeiwerte entsprechend der Vorgaben der im Betrachtungsjahr gültigen Regelwerke herangezogen.

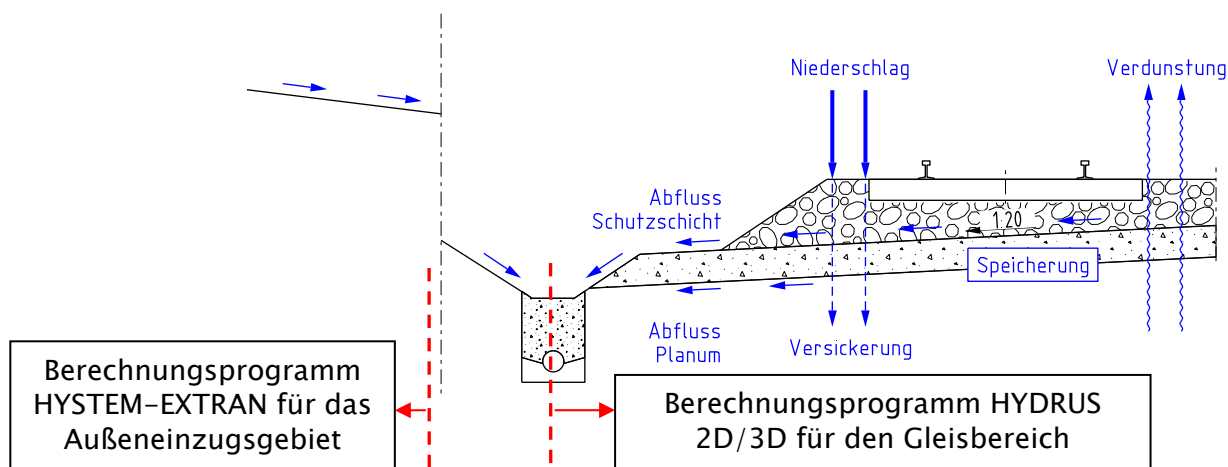


Abbildung 15 Schematische Aufteilung des Regelquerschnittes auf die zur exemplarischen Berechnung verwendeten Programme

7.2.2 Berechnung der Abflussbildung für das Außeneinzugsgebiet

Die Berechnungen für das Außeneinzugsgebiet erfolgten mit dem Programm HYSTEM-EXTRAN. Mit dem Programm können hydrodynamische Niederschlags- und Abflussmodelle und realitätsnahe Abflussvorgänge betrachtet werden.

Am Beispiel des Außeneinzugsgebietes von 100 m Breite und 100 m Länge wurden exemplarische Untersuchungen für vier verschiedene Parametersätze (Tabelle 9) durchgeführt.

Tabelle 9: Eingangsparameter für die Berechnungen mit HYSTEM-EXTRAN

Parametersatz	1	2	3	4
Bodenart mit Wassergehalt 5 %	Löss	Löss	Löss	Löss
Neigungsklasse	1 (0,5 %)	1 (0,5 %)	1 (0,5 %)	2 (2,5 %)
Benetzungsverluste [mm]	0	2	8	2
Muldenverluste [mm]	0	3	5	3
Verdunstung	nein	ja	ja	ja
Regenverteilung ¹⁾	Euler 1	Euler 1	Euler 1	Euler 1
Anfangsabflussbeiwert [%]	100	25	25	25
Endabflussbeiwert [%]	100	85	85	85
Dauerverlust [%]	0	15	15	15

¹⁾ Euler 1: Spitzenintervall der Niederschlagsintensität am Anfang und stetig abnehmendem Intensitätsverlauf.

Im Wesentlichen unterscheiden sich die Parametersätze hinsichtlich der gewählten

- Benetzungsverluste,
- Muldenverluste,
- Verdunstungsraten,
- Anfangs- und Endabflussbeiwerte und
- Neigungsklassen.

Der Parametersatz 1 kann dabei als sehr konservativ und der Parametersatz 3 als sehr „optimistisch“ beschrieben werden. Der Parametersatz 2 weist Eingangsparmeter auf, die als realitätsnah eingeschätzt werden. Mit den gewählten Mulden- und Benetzungsverlusten werden die Entwässerungsanlagen immer noch konservativ bemessen. Diese Werte könnten höher gewählt werden. Der Parametersatz 4 ist bis auf die steilere Neigungsklasse identisch mit dem Parametersatz 2.

Als Regenereignisse wurde ein 15minütiges Regenereignis mit Wiederkehrzeiten von 1 Jahr, 10 Jahren, 20 Jahren und 100 Jahren für den Standort Dresden gewählt. Die gemäß KOSTRA-DWD 2010R (DWD, 2017) zugehörigen aktuellen Regenspenden sind im Anhang 4 enthalten und können der Tabelle 11 und der Tabelle 12 (Kapitel 7.3.1) entnommen werden.

Für ein 15minütiges Regenereignis mit einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren ($r_{15, 0,1}$) sind die berechneten Abflussganglinien aus den in der Tabelle 9 vorgegebenen Parametern in der Abbildung 16 dargestellt. Der typische Verlauf der Niederschlagsverteilung mit dem Spitzenintervall am Anfang und stetig abnehmendem Intensitätsverlauf (Euler 1⁵) im Vergleich zum Blockregen ist ebenfalls mit dargestellt.

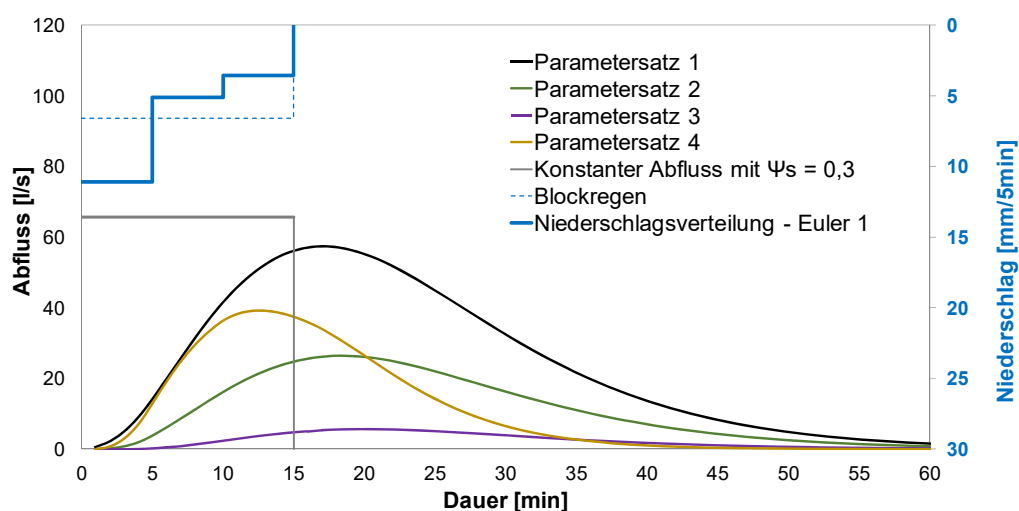


Abbildung 16 Beispielhafte Abflussganglinien der 4 Parametersätze für die Niederschlagsverteilung nach Euler 1 und Vergleich zum Blockregen für ein Regenereignis $r_{15, 0,1}$ und eine Einzugsfläche von 1 ha

Anhand der Beispiele wird deutlich, welche Auswirkungen die dynamischen Modelle der Parametersätze 1 bis 4 auf den Abfluss im Vergleich zum konstanten Blockregen

⁵ Im Vergleich zur Regenverteilung nach Euler 1 hat die Regenverteilung nach Euler 2 das Spitzenintervall bei einem Drittel der Gesamtdauer des Regenereignisses. Bei einem 15minütigen Regen wird der Hauptregen im mittleren 5-Minuten-Block modelliert.

(statisches Modell) mit 6,67 mm pro 5 Minuten⁶ und einem Spitzenabflussbeiwert $\Psi_s = 0,3$ sowie einem daraus resultierenden Abfluss von 66 l/s über eine Dauer von 15 Minuten haben. Das soll im Folgenden näher erläutert werden.

Zur Bemessung von Entwässerungsanlagen müsste der jeweilige maximale Wert der Abflussganglinie herangezogen werden. Dies bedeutet zum Beispiel für den Parametersatz 2 in Abbildung 16 ein Abfluss von 26,5 l/s. Dies entspricht 40 % des Bemessungswertes mit dem Fließzeitverfahren (statischen Modell) unter Ansatz des Blockregens. Aber auch der konservativ gewählte Parametersatz 1 liegt unter dem Bemessungswert des Fließzeitverfahrens.

Aus zeitlicher Sicht liegen die Maximalabflüsse bei allen Parametersätzen zwischen ca. 12 Minuten und 18 Minuten Regendauer und zeigen an diesem Beispiel bereits zeitliche Unterschiede auf. Werden weitere abflussrelevante Flächen an eine Gleisentwässerungsanlage angeschlossen, ist nicht der Maximalabfluss jeder angeschlossenen Fläche maßgebend, sondern der aus der Überlagerung der verschiedenen Abflussganglinien resultierende Abfluss. Dieser Bemessungsabfluss ist zum überwiegenden Teil kleiner als die Summe beider Maximalabflüsse der einzelnen Abflussganglinien.

Anhand der mit den vier Parametersätzen ermittelten Abflussganglinien und dem daraus resultierenden maximalen Abfluss wurden die Spitzenabflussbewerte für die Regenspenden der Wiederkehrzeiten von 1 Jahr, 10 Jahren, 20 Jahren und 100 Jahren berechnet und in Abbildung 17 dargestellt.

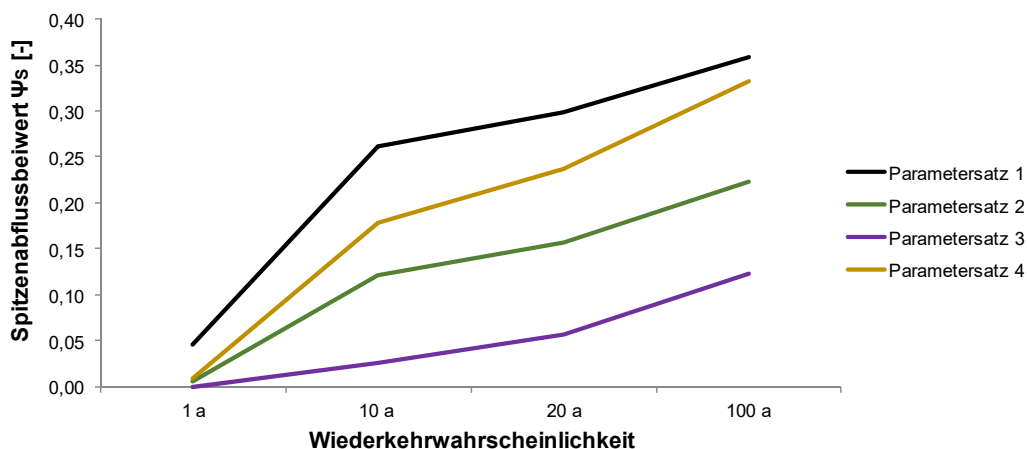


Abbildung 17 Änderung der Spitzenabflussbeiwerte der 4 Parametersätze bei unterschiedlichen Wiederkehrzeiten

Das Verhältnis zwischen dem Spitzenabflussbeiwert, berechnet mit Hilfe des dynamischen Modells, und dem beim statischen Modell verwendeten Spitzenabflussbeiwert von $\Psi_s = 0,3$ für die 15minütigen Regenereignisse und für unterschiedliche Wiederkehrzeiten in Tabelle 10 dargestellt.

⁶ Gemäß Tabelle 12 fallen bei einem 15minütigen Regen mit einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren ca. 20 mm Niederschlag. Wird der 15minütige Regen in 3 Intervalle unterteilt, fallen pro 5 Minuten 6,67 mm.

Da alle weiteren Eingangsgrößen konstant gehalten wurden, lassen sich aus diesem Verhältnis unmittelbar die Verringerung bzw. Erhöhung des Bemessungsabflusses ableiten. Für den Parametersatz 2 bedeutet dies, dass der mit Hilfe des dynamischen Modells ermittelte Bemessungsabfluss für ein 15minütigen Regenereignis und eine Wiederkehrzeit von 10 Jahren $r_{15, 0,1}$ ca. 40 % des mittels statischen Modells ermittelten Bemessungsabflusses beträgt.

Tabelle 10: Verhältnis zwischen dem Spitzenabflussbeiwert, berechnet mit dem dynamischen Modell, und dem Spitzenabflussbeiwert von $\Psi_S = 0,3$ für das statische Modell

Parametersatz	Wiederkehrzeit			
	1a	10a	20a	100a
1	15,6%	87%	100%	119%
2	1,7%	40%	52%	75%
3	0,0%	9%	19%	41%
4	2,9%	59%	79%	111%

Diese exemplarischen Berechnungen zeigen die komplexen Zusammenhänge und Einflussfaktoren auf die Wahl des Abflussbeiwertes.

Durch Wahl von pauschalen Spitzenabflussbeiwerten erfolgt deshalb oft eine Überbemessung der Entwässerungsanlagen, bezogen auf das vorgegebene Regenereignis, z. B. $r_{15, 0,1}$. Die so bemessenen Anlagen weisen damit i.d.R. Reserven für Starkregenereignisse auf.

Das zurzeit zur Bemessung der Entwässerungsanlagen herangezogene Regelwerk (DB Netz AG, 2008) gibt Spitzenabflussbeiwerte für Böschungen und Außeneinzugsgebiete, unabhängig von der Dauer und Wiederkehrzeit vor (siehe Anhang 3). Es obliegt dem Planer, diese plausibel zu wählen.

Empfehlungen zur Wahl von Spitzenabflussbeiwerten für das Fließzeitverfahren in Abhängigkeit der Geländeneigung und der Regenspende sind in DWA-A 118 (2006) enthalten.

In Kapitel 7.3 erfolgt für das Fließzeitverfahren eine Bewertung der Bemessung von Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke, unter Berücksichtigung der historischen Entwicklung der Bemessungsansätze sowie für unterschiedliche Wiederkehrzeiten.

Die in diesem Kapitel angeführten hydrodynamischen Berechnungen für den Parametersatz 2 zeigen, dass die Wahl eines **einheitlichen Spitzenabflussbeiwertes von $\Psi_S = 0,2$** auch bei unterschiedlichen Wiederkehrzeiten (bis 100 Jahre) den damit erhaltenen Bemessungsabfluss ausreichend abdeckt. Dieser Spitzenabflussbeiwert wird ab dem Betrachtungsjahr 2019 und für die Annahmen bis 2040 einheitlich für das **Außeneinzugsgebiet** herangezogen.

7.2.3 Berechnung der Abflussbildung für den Gleisbereich

Die Berechnung der Abflussbildung für den Gleisbereich erfolgt mit dem Programm HYDRUS 2D/3D. HYDRUS 2D/3D ist ein Simulationsprogramm, welches die Strömungsprozesse in der Bodenzone unter variabel gesättigten hydraulischen Bedingungen abbilden kann.

Für den Gleisbereich wurden die in Abbildung 15 dargestellten Prozesse einschließlich der Pufferung (Speicherung) mit dem Programm HYDRUS 2D/3D simuliert. Detaillierte Erläuterungen zur Berechnungsmethodik und der detaillierten Berechnungsergebnisse können dem Anhang 12 entnommen werden.

Das wesentliche Ergebnis dieser Untersuchung ist die im Vergleich zum Fließzeitverfahren ermittelte lange Zeitdauer, bis ein Regenereignis bemessungsrelevante Abflüsse am Fußpunkt der Schotterbettung bzw. einen Maximalabfluss aufweist. Eine darauf aufbauende Berechnung von Spitzabflussbeiwerten liefert damit geringere, als die in der Ril 836 gegenwärtig angegebenen Werte (DB Netz AG, 2008).

Auch die Modellierung der Abflussvorgänge im Gleisbereich zeigen auf, dass eine Bemessung der Entwässerungsanlagen mit dem Fließzeitverfahren Reserven für Starkregenereignisse aufweist (siehe z. B. auch Below et al., 2008 und Höntschi, 2003).

In Kapitel 7.3 erfolgt für das Fließzeitverfahren eine Bewertung der Bemessung von Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke, unter Berücksichtigung der historischen Entwicklung der Bemessungsansätze sowie für unterschiedliche Wiederkehrzeiten.

Die in diesem Kapitel und Anhang 12 angeführten Berechnungen zeigen, dass die Wahl eines **einheitlichen Spitzenabflussbeiwertes von $\Psi_s = 0,4$** für den Gleisbereich den damit berechneten Bemessungsabfluss ausreichend abdeckt. Dieser Spitzenabflussbeiwert wird ab dem Betrachtungsjahr 2019 und für die Annahmen bis 2040 einheitlich für den **Gleisbereich** herangezogen.

7.2.4 Hydraulischer Nachweis

Der hydraulische Nachweis für Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke erfolgt unter Verwendung der Gleichung 10 (Kapitel 5.2.3) aus einem Vergleich des abzuleitenden Bemessungsabflusses Q_A mit der gesamten Abflusskapazität Q_K .

Für das zu untersuchende Beispiel beinhaltet Q_A vereinfachend nur den Regenabfluss Q_R .

Die Abflusskapazität Q_K der Entwässerungsanlage setzt sich aus der Abflusskapazität des Bahngrabens $Q_{K,Graben}$ und der Tiefenentwässerung $Q_{K,TE}$ zusammen.

Es muss nachgewiesen werden, dass die Abflusskapazität Q_K mindestens dem Wert des Bemessungsabflusses $Q_A = Q_R$ entspricht. Der entsprechende hydraulische Nachweis ist in Gleichung 11 enthalten.

$$Q_A = Q_R \leq Q_K = Q_{K,Graben} + Q_{K,TE} \quad (\text{Gleichung 11})$$

Die Speicherkapazität des vorhandenen Retentionsraums eines Sickerkörpers von Tiefenentwässerungen $Q_{S,D}$ könnte theoretisch bei der Nachweisführung ebenfalls berücksichtigt werden. Sie wird in Kapitel 7.4.4 mit ausgewiesen, wird zurzeit aber nicht zur Kapazitätsberechnung herangezogen. Auch zukünftig sollte diese zusätzliche Speicherkapazität nur als Reserve für ein das Bemessungsregenereignis übersteigendes Starkregenereignis dienen.

7.3 Parameterstudie zur Berechnung bemessungsrelevanter Abflüsse unter Berücksichtigung der historischen Entwicklung

Die Parameterstudie zeigt die Bemessungsansätze für die Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke, unter Berücksichtigung der historischen Entwicklung, für

- unterschiedliche Bemessungsregen (Kapitel 7.3.1),
- unterschiedliche abflusswirksame Flächen aufgrund verschiedener Spitzenabflussbeiwerte (Kapitel 7.3.2) und
- den unterschiedlichen daraus resultierenden Bemessungsabfluss Q_A (Kapitel 7.3.3)

zur Bestimmung des abflusswirksamen Niederschlages für die Jahre 1988, 1991, 1999, 2008, 2019 und als Prognose für das Jahr 2040. Die Ergebnisse der Parameterstudie werden miteinander verglichen.

Diese Jahre und das jeweils in diesem Jahr erschienene Regelwerk (siehe auch Tabelle 4 in Kapitel 5.1) wurden gewählt, um zum einen zu zeigen, welche Auswirkungen die Wahl der Bemessungsregenspende (nach REINHOLD oder KOSTRA-DWD 2010R) auf den Bemessungsabfluss hat. Zum anderen kann damit gezeigt werden, welchen Einfluss die in den Regelwerken angegebenen Spitzenabflussbeiwerte für vergleichbare Flächen auf die Größe des Bemessungsabflusses hat.

Um die Vergleichbarkeit mit früheren Berechnungsgrundlagen und Eingangsparametern zu garantieren, erfolgen die Berechnungen und Nachweise am Beispiel eines 15minütigen Regens mit Wiederkehrzeiten von 1 Jahr, 10 Jahren, 20 Jahren und 100 Jahren auf Basis des Fließzeitverfahrens. Des Weiteren werden die Änderung der Regelwerke und Bemessungsansätze für die Bestimmung der Regenspende berücksichtigt und die Spitzenabflussbeiwerte variiert.

Einige Spezialfälle sind gesondert und teilweise objektkonkret zu betrachten und sind nicht Gegenstand dieser Parameterstudie:

- ein Oberflächenabfluss bei z. B. jährlichen oder 10-jährlichen Regenereignissen und gefrorenem Boden (Winterhochwasser),
- ein Oberflächenabfluss während der Schneeschmelze sowie
- Oberflächenabflüsse und Bodenaustrag von landwirtschaftlich genutzten Flächen vor allem im Frühjahr kurz nach der Ansaat bzw. im Herbst nach der Ernte.

7.3.1 Bemessungsregen

Zur Ermittlung der Bemessungsregenspende wurde der Standort Dresden gewählt. Auf Grund der umfangreichen Datengrundlage (Anhang 4) wurden 15minütige Bemessungsregenspenden der Jahre 1988, 1991, 1999, 2008 und 2019 herangezogen. Die Basisregenspende mit jährlichen Wiederkehrzeiten wurde bis 2008 auf Basis der Wiederkehrzeiten von 10 Jahren, 20 Jahren und 100 Jahren nach REINHOLD berechnet. Für das Jahr 2019 wurden die Werte des KOSTRA-DWD 2010R (DWD, 2017) verwendet.

Die Werte von 2019 wurden für die Annahme des zukünftigen Bemessungsregens für das Jahr 2040 um 30 % bzw. 50 % erhöht (siehe Kapitel 5.2.3). Die Bemessungsregenspenden sind in der Tabelle 11 in $l/(s \cdot ha)$ und als Niederschlagshöhe in mm in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 11: Bemessungsregenspenden $r_{15,n}$ für Dresden [$l/(s \cdot ha)$]. Die Regenhäufigkeit für die Zukunft (2040) ergibt sich unter der Annahme der prozentualen Zunahme der Bemessungsregenspende auf Basis der derzeitigen Werte des KOSTRA-DWD 2010R (DWD, 2017)

Regenhäufigkeit n [a^{-1}]	Bezugsjahr						
	1988	1991	1999	2008	2019	2040	2040
	REINHOLD				KOSTRA	+30 %	+50 %
1	100	102	113	113	116	151	174
0,1	223	228	252	252	219	285	329
0,05	276	282	312	312	251	326	377
0,01	442	451	500	500	323	420	485

Tabelle 12: Niederschlagshöhen für Dresden [mm]. Die Niederschlagshöhe für die Zukunft (2040) ergibt sich unter der Annahme der prozentualen Zunahme der Bemessungsregenspende auf Basis der derzeitigen Werte des KOSTRA-DWD 2010R (DWD, 2017)

Regenhäufigkeit n [a^{-1}]	Bezugsjahr						
	1988	1991	1999	2008	2019	2040	2040
	REINHOLD				KOSTRA	+30 %	+50 %
1	9	9	10	10	10	14	16
0,1	20	20	23	23	20	26	30
0,05	25	25	28	28	23	29	34
0,01	40	41	45	45	29	38	44

Die grafische Darstellung dieser Werte erfolgt in Abbildung 18 und Abbildung 19. In Abbildung 18 ist der Verlauf der anzusetzenden Bemessungsregenspende in den Jahren 1988 bis 2040 dargestellt. In Abbildung 19 erfolgt für die Jahre 2019 und 2040 ein direkter Vergleich der Bemessungsregenspende gemäß dem Regelwerk Ril 836 nach REINHOLD (DB Netz AG, 2008) mit den Werten KOSTRA-DWD 2010R aus DWD (2017). Auch hier werden Wiederkehrzeiten von 10 Jahren, 20 Jahren und 100 Jahren betrachtet.

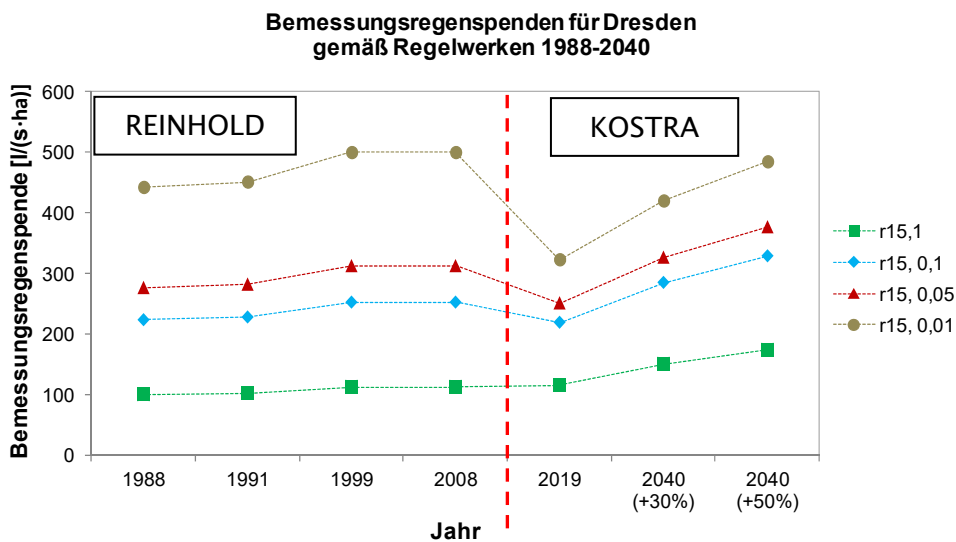


Abbildung 18 Überblick über die 15minütigen Bemessungsregenspenden r_{15} im Verlauf der Zeit für Dresden, für die Wiederkehrzeiten von 1 Jahr (1 a^{-1}), 10 Jahren ($0,1 \text{ a}^{-1}$), 20 Jahren ($0,05 \text{ a}^{-1}$) und 100 Jahren ($0,01 \text{ a}^{-1}$)

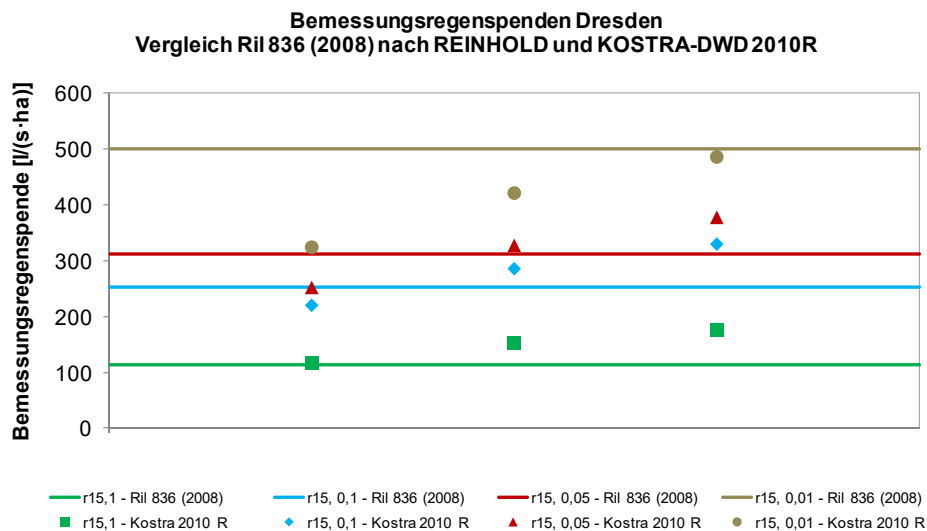


Abbildung 19 Überblick über die 15minütigen Bemessungsregenspenden r_{15} 2019 bezogen auf die Ril 836 (2008) sowie als Ausblick im Jahr 2040 mit 30% und 50% Erhöhung bezogen auf das Jahr 2019. Es werden Wiederkehrzeiten von 1 Jahr (1 a^{-1}), 10 Jahren ($0,1 \text{ a}^{-1}$), 20 Jahren ($0,05 \text{ a}^{-1}$) und 100 Jahren ($0,01 \text{ a}^{-1}$) dargestellt

Die Auswertungen zeigen eine stetige Zunahme der jährlichen Bemessungsregenspenden $r_{15,1}$. Wie aus Abbildung 18 erkennbar ist, liegen die Bemessungsregenspenden gemäß DWD (2017) für das Jahr 2019 ab einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren unterhalb der bisherigen Werte nach REINHOLD.

Bei einer möglichen zukünftigen Zunahme der Bemessungsregenspende um 30 % bzw. 50 % bis zum Jahr 2040 liegen die Werte gemäß DWD (2017) bis zu einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren oberhalb der bisherigen Werten nach REINHOLD und ab einer Wiederkehrzeit von 20 Jahren unterhalb der Werte nach REINHOLD. Das Regenereignis mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren ($r_{15, 0,01}$) im Jahr 2019 könnte unter Annahme einer ca. 50 %igen Zunahme der derzeitigen Bemessungsregenspende durch den Klimawandel für ein Regenereignis mit einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren ($r_{15, 0,1}$) stehen (vgl. auch Tabelle 11 und Tabelle 12).

7.3.2 Abflusswirksame Flächen

Neben den Bemessungsregen variieren aufgrund von unterschiedlichen Spitzenabflussbeiwerten Ψ_S im untersuchten Beispiel auch die abflusswirksamen undurchlässigen Flächen A_U . Die Einzugsfläche A_E beträgt jeweils bezogen auf 100 m Streckenlänge

- für den Gleisbereich mit Schutzschicht aus einem Korngemisch 1 (KG 1) einschließlich Bahngraben 710 m²,
- für die Einschnittsböschung 900 m² und
- für das Außeneinzugsgebiet 10.000 m² (1 ha).

Die zugehörigen Spitzenabflussbeiwerte und die sich daraus ergebenden berechnungswirksamen undurchlässigen Flächen A_U sind in Tabelle 13 enthalten. Die Spitzenabflussbeiwerte wurden für die Jahre 1988 bis 2008 den jeweiligen Regelwerken entnommen (Anhang 3). Da nicht alle Flächen in allen Regelwerken gleich benannt werden bzw. teilweise auch keine Angaben vorhanden sind, wurden die Spitzenabflussbeiwerte anhand der in den Regelwerken angegebenen Spannen plausibel als mittlere Werte gewählt bzw. ähnliche Flächen herangezogen.

Tabelle 13: Zuordnung der Spitzenabflussbeiwerte Ψ_S zur jeweiligen Einzugsfläche A_E und die daraus ermittelte undurchlässige Fläche A_U bezogen auf eine Streckenlänge von 100 m

Fläche A_E [m ²]		Bezugsjahr und Spitzenabflussbeiwert Ψ_S				
		1988	1991	1999	2008	ab 2019
Gleis mit Schutzschicht aus Korngemisch 1 (KG 1)	710	0,2	0,5	0,7	0,5	0,4
Böschung (bindig)	900	0,5	0,5	0,7	0,6	0,5
Außeneinzugsgebiet	10.000	0,15	0,15	0,3	0,3	0,2
undurchlässige Fläche A_U [m ²]		2092	2305	4127	3895	2734

Ab 2019 wurde die Spitzenabflussbeiwerte für das Außeneinzugsgebiet gemäß Kapitel 7.2.2 und für den Gleisbereich gemäß Kapitel 7.2.3 herangezogen. Für die Einschnittsböschung erfolgte in Kapitel 7.2 keine separate Berechnung eines Spitzenabflussbeiwertes. Aufgrund der Erkenntnisse aus Kapitel 7.2.2 und 7.2.3 wird der Wert im Vergleich zum Spitzenabflussbeiwert für Böschungen aus dem Jahr 2008 um 10% auf $\Psi_S = 0,5$ reduziert.

7.3.3 Berechnung des Bemessungsabflusses Q_A

Die Berechnung des Bemessungsabflusses erfolgt über die Gleichung 2. Bezogen auf das zu betrachtende Beispiel (Abbildung 13) errechnet sich der Bemessungsabfluss wie folgt:

$$Q_A = Q_R = r_{D,n} \cdot \sum(A_{E,i} \cdot \Psi_{S,i}).$$

Die Ergebnisse der zu verwendenden Bemessungsabflüsse mit und ohne Einzugsgebiet sind in Abbildung 20 und Abbildung 21 enthalten.

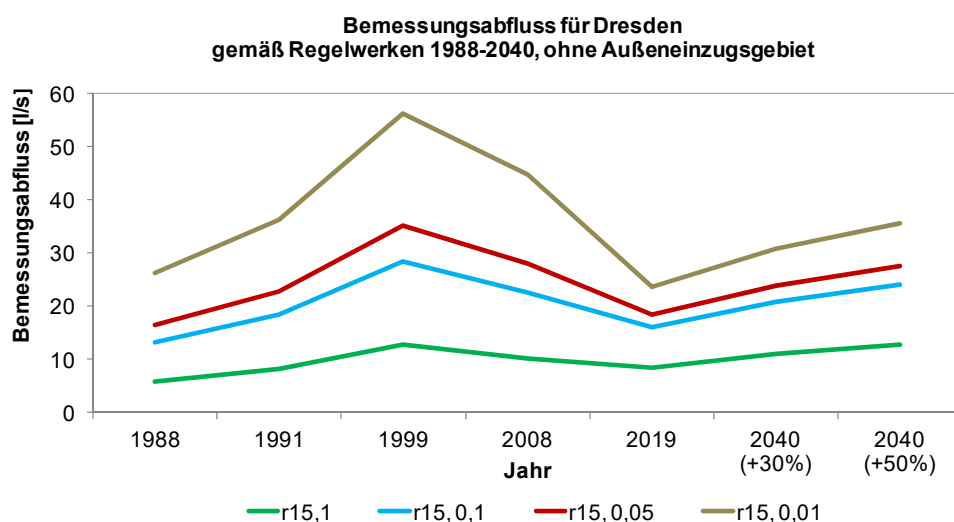


Abbildung 20 Bemessungsabfluss (l/s) für das Gleis und die Böschung **ohne** Außeneinzugsgebiet für 100 m Strecke für ein 15minütiges Regenereignis mit Wiederkehrzeiten von 1 Jahr (1 a^{-1}), 10 Jahren ($0,1 \text{ a}^{-1}$), 20 Jahren ($0,05 \text{ a}^{-1}$) und 100 Jahren ($0,01 \text{ a}^{-1}$)

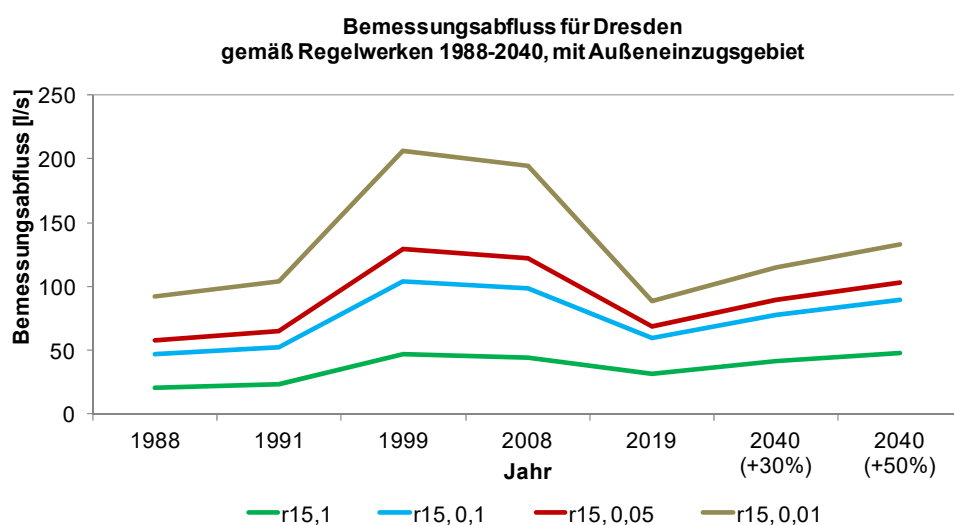


Abbildung 21 Bemessungsabfluss (l/s) für das Gleis und die Böschung **mit** Außeneinzugsgebiet für 100 m Strecke für ein 15minütiges Regenereignis mit Wiederkehrzeiten von 1 Jahr (1 a^{-1}), 10 Jahren ($0,1 \text{ a}^{-1}$), 20 Jahren ($0,05 \text{ a}^{-1}$) und 100 Jahren ($0,01 \text{ a}^{-1}$)

Die Darstellungen zeigen deutlich, welchen Einfluss die unterschiedlichen Ansätze der Regenspenden und der verwendeten Spitzabflussbeiwerte auf die Bemessung der Entwässerungsanlagen haben. Auch bei einer Erhöhung der Regenspende bis 2040 ist der Bemessungsabfluss gleich groß bzw. kleiner als bei der Bemessung gemäß Ril 836 aus dem Jahr 1999 (DB Netz AG, 1999).

7.4 Berechnung der vorhandenen Kapazitäten Q_K der Gleisentwässerung

Im vorangegangenen Kapitel wurde der zur Bemessung der Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke heranzuziehende Bemessungsabfluss Q_A erläutert.

In diesem Kapitel 7.4 werden die vorhandenen Kapazitäten Q_K der einzelnen Elemente der Gleisentwässerung ermittelt.

In Kapitel 7.4.1 erfolgt eine kurze Darstellung dieser Entwässerungselemente. Es wird eine Zuordnung zu den 3 Streckeneinstufungen gemäß DB Netz AG (2008) vorgenommen und die zulässigen Kapazitäten der Entwässerungsanlagen anhand dieser Zuordnung berechnet. Für die Elemente Bahngraben (Kapitel 7.4.2), Tiefenentwässerung (Kapitel 7.4.3) und den Sickerkörper der Tiefenentwässerung (Kapitel 7.4.4) werden die Kapazitäten einzeln ermittelt. In Kapitel 7.4.5 erfolgt die Berechnung der Gesamtkapazität der Entwässerungselemente, bezogen auf die 3 Streckeneinstufungen.

7.4.1 Übersicht über die Entwässerungselemente

Als Entwässerungselemente der freien Strecken werden der offene **Bahngraben** und die **Tiefenentwässerung** betrachtet. Der **Porenraum** des oberhalb des Rohres einer **Tiefenentwässerung** angeordneten Sickerkörpers wurde bisher noch nicht zur Bestimmung der Kapazität der Gleisentwässerung herangezogen.

Gemäß Ril 836 (DB Netz AG, 2008) werden die zulässigen Kapazitäten dieser Entwässerungsanlagen an drei Streckeneinstufungen gebunden. Die Streckeneinstufung ist abhängig von den Streckenparametern Geschwindigkeit und Belastung. Die Gleisentwässerung kann mit einem Regenereignis $r_{15,1}$ bemessen werden, wenn der Nachweis gegen einen temporären Einstau in den Oberbau für ein $r_{15,0,1}$ erbracht wird. Je geringer dabei die Streckeneinstufung ist, desto größer darf der zulässige temporäre Einstau in den Oberbau bzw. im Bahngraben sein.

In Tabelle 14 sind die in der DB Netz AG (2008) benannten Streckeneinstufungen, die zulässigen Einstauhöhen in den Oberbau unter der Unterkante des Schotters sowie die daraus resultierenden zulässigen Wasserstände im Bahngraben zusammengefasst. Nähere Details können dem Anhang 13 entnommen werden.

Tabelle 14: Streckeneinstufung, Zulässige Einstauhöhe für ein $r_{15,0,1}$ (DB Netz AG, 2008) und zulässiger Wasserstand im Bahngraben

Strecken- einstufung	Strecken- parameter	Zulässige Einstauhöhe unter Unterkante Schotter [m]	Zulässiger Wasserstand im Bahngraben [m]
I	$v \leq 120\text{km/h}$ $RSL \leq 20\text{ t}$	0,20	0,40
II	$120\text{ km/h} < v \leq 160\text{km/h}$ $RSL \leq 22,5\text{ t}$	0,35	0,25
III	$v > 160\text{km/h}$ $RSL \leq 25\text{ t}$	0,50	0,13

7.4.2 Abflusskapazität Bahngraben – $Q_{K,Graben}$

In diesem Kapitel erfolgen hydraulische Berechnungen gemäß Gleichung 5 (siehe Kapitel 5.2.3) für den offenen Bahngraben gemäß Abbildung 13 (siehe auch DB Netz AG, 2008).

Die Berechnung erfolgt exemplarisch für drei verschiedene Gerinnerauigkeiten im Bahngraben mit den in Tabelle 15 angegebenen Manning/Strickler-Beiwerten. Die Gerinnerauigkeiten wurden entsprechend der in der Realität vorkommenden tatsächlichen Verhältnisse plausibel gewählt.

Tabelle 15: Gerinnerauigkeit (Manning/Strickler-Beiwert – k_{St}) für einen Bahngraben, gemäß Bollrich (2007), Göbel & Lieberenz (2013) bzw. DB Netz AG (2008)

Wandbeschaffenheit	Zuordnung zu realitätsnahen Verhältnissen	k_{St} [$m^{1/3}/s$]
sehr grobes Material, stark bewachsener Bahngraben, grobe Steinschüttung	vor dem Grünschnitt, Lagerung von Schotter und Gehölz im Graben (ohne wesentliche Reduzierung des Abflussquerschnittes)	20
niedriger Grasbewuchs	nach dem jährlichen Grünschnitt, kurze Grasnarbe im Gerinne	40
festes, feines Material gepflasterte Böschungen und Sohle aus Sand/Kies	Neubau	50

Die Abflusskapazität eines Bahngrabens $Q_{K,Graben}$ bei Vollfüllung ist in Abbildung 22 exemplarisch in Abhängigkeit von der Gerinnerauigkeit und des Sohlgefälles dargestellt. Mit dieser Darstellung kann aufgezeigt werden, wie groß die Abflusskapazität eines Bahngrabens bei Vollfüllung sein kann. Diese Vollfüllung ist gemäß Tabelle 14 für die Streckeneinstufung I zulässig.

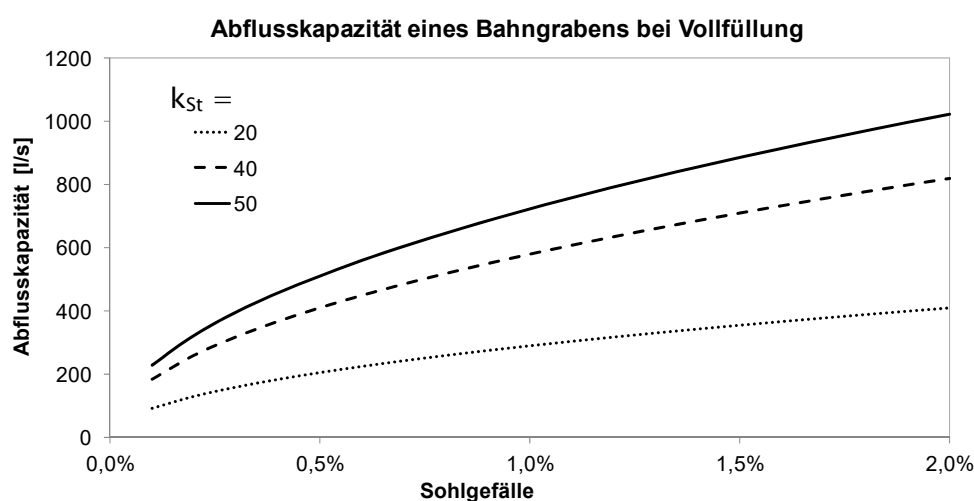


Abbildung 22 Abflusskapazität (l/s) des Bahngrabens $Q_{K,Graben}$ bei Vollfüllung (40 cm Wasserstandshöhe, entspricht der Streckeneinstufung I) in Abhängigkeit des Gefälles und unterschiedlicher verschiedener Rauigkeitsbeiwerte

Abbildung 23 zeigt die allgemeine Wasserstands-Abfluss-Beziehung bezogen auf ein Sohlgefälle von 1 % auf den für die jeweilige Streckeneinstufung (SE) zugelassenen Wasserstand im Bahngraben (siehe Tabelle 14). Die Darstellung der Wasserstands-Abfluss-Beziehung erfolgt wiederum für die drei Gerinnerauigkeitsbeiwerte, die wie in Tabelle 15 beschrieben, realitätsnahe Zustände des Bahngrabens beschreiben.

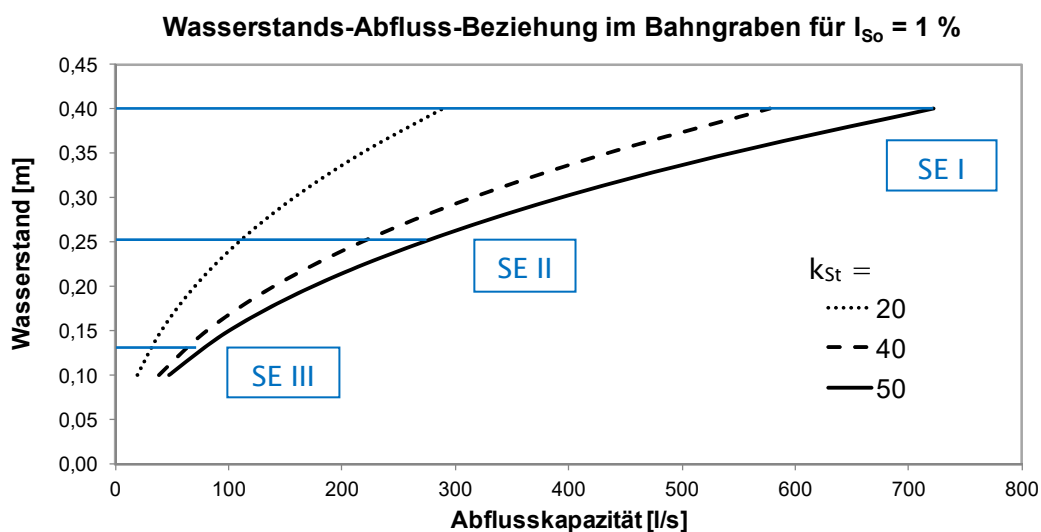


Abbildung 23 Abflusskapazität (l/s) des Bahngrabens $Q_{K,Graben}$ unter Berücksichtigung verschiedener Rauigkeitsbeiwerte für ein Sohlgefälle $I = 1\%$ sowie die zulässigen Wasserstände im Bahngraben für die Streckeneinstufungen (SE) I, II und III

Am Beispiel der Streckeneinstufung II wird die Abflusskapazität nachfolgend anhand der Abbildung 23 erläutert. Der Bahngraben darf für diese Streckenkategorie zur Ableitung von Oberflächenwasser einen maximalen Wasserstand von 25 cm aufweisen. Je nach Zustand des Bahngrabens, hier über die k_{St} -Werte dargestellt, können bei diesem Wasserstand für

- $k_{St} = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ maximal 109 l/s,
- $k_{St} = 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ maximal 218 l/s und
- $k_{St} = 50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ maximal 272 l/s

abgeleitet werden.

Dies zeigt die große Bedeutung von instand gehaltenen und beräumten Bahngräben. In den Handlungsempfehlungen in Kapitel 10 wird darauf nochmals näher eingegangen.

7.4.3 Abflusskapazität Tiefenentwässerung – $Q_{K,TE}$

In diesem Kapitel erfolgen hydraulische Berechnungen gemäß Gleichung 6 (siehe Kapitel 5.2.3) für die Ermittlung der Abflusskapazität von Tiefenentwässerungen.

In Tabelle 16 ist die Abflusskapazität einer Tiefenentwässerung $Q_{K,TE}$ für verschiedene Rohrrinnendurchmesser und eine konstante Wandrauheit von $k = 0,4 \text{ mm}$ in Abhängigkeit vom Sohlgefälle dargestellt und kann für den hydraulischen Nachweis herangezogen werden.

Tabelle 16: Abflusskapazität (l/s) einer Tiefenentwässerung ($k = 0,4 \text{ mm}$) in Abhängigkeit des Gefälles und unterschiedlichen Rohrrinnendurchmessern

Gefälle [%]	Innendurchmesser [mm]					
	150	200	250	300	350	400
0,3	10	22	39	63	95	135
0,4	12	25	45	73	110	156
0,5	13	28	51	82	123	175
0,6	14	31	55	90	135	192
0,7	16	33	60	97	146	207
0,8	17	36	64	104	156	222
0,9	18	38	68	110	166	235
1,0	19	40	72	116	175	248
1,1	20	42	76	122	183	260
1,2	20	44	79	128	192	272
1,3	21	46	82	133	199	283
1,4	22	47	85	138	207	294
1,5	23	49	88	143	214	305

7.4.4 Retentionsvermögen des Sickerkörpers – $Q_{S,D}$

In diesem Kapitel wird das Retentionsvermögen des Sickerkörpers einer Tiefenentwässerung betrachtet. In der Abbildung 5 in Kapitel 5.2.2 ist die Lage dieses Sickerkörpers dargestellt.

Das Retentionsvermögen des Sickerkörpers $Q_{S,D}$ wurde für den Bereich oberhalb des Rohrscheitels für eine Breite von 0,6 m, eine Höhe von 0,5 m und einen nutzbaren Porenraum von 30 % berechnet. Die geometrischen Abmessungen sind dabei Mindestmaße gemäß DB Netz AG (2008) und werden bei größeren Rohrdurchmessern der Tiefenentwässerung ebenfalls größer. Damit würde der Retentionsraum entsprechend zunehmen.

Bezogen auf eine Länge von 100 m ergibt sich ein nutzbares Speichervolumen von 9.000 l⁷.

Um dieses Retentionsvermögen auf den Bemessungsabfluss Q_A anrechnen zu können, wurde es bezogen auf die jeweilige Regendauer in einen äquivalenten Abfluss umgerechnet und in Tabelle 17 aufgelistet.

⁷ $0,5 \text{ m} \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 100 \text{ m} \cdot 0,3 = 9 \text{ m}^3 = 9.000 \text{ l}$

Tabelle 17: Retentionsvermögen des Sickerkörpers bezogen auf 100 m Länge

Regendauer D [min]	Retentionsvermögen / äquivalenter Abfluss ¹⁾
	Q _{S,D} [l/s]
5	30
10	15
15	10
20	7,5
30	5

1) Beispiel: Für ein 15minütiges Regenereignis erfolgt die Umrechnung wie folgt:
 $9.000 \text{ l} / 15 \text{ min} / 60 \text{ s/min} = 10 \text{ l/s}$.

Dieses Retentionsvermögen Q_{S,D} könnte direkt vom Bemessungsabfluss Q_A abgezogen werden. Bei einer Berücksichtigung dieses Retentionsvermögens ergibt sich für das untersuchte Beispiel ohne Außeneinzugsgebiet ein in Abbildung 24 dargestellter reduzierter Bemessungsabfluss. Für das Beispiel mit Außeneinzugsgebiet ist der reduzierte Bemessungsabfluss aus Abbildung 25 ersichtlich.

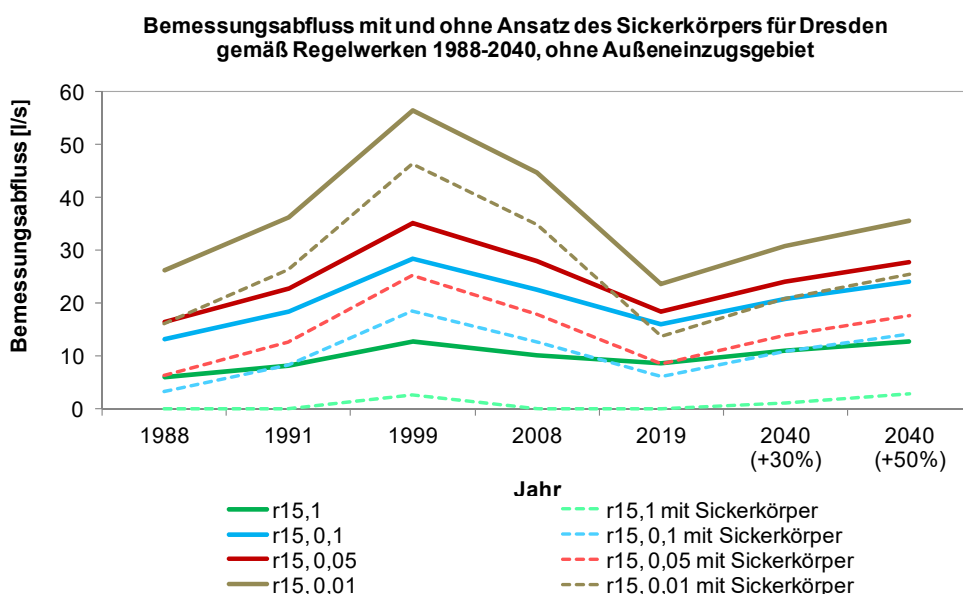


Abbildung 24 Bemessungsabfluss (l/s) ohne Außeneinzugsgebiet für 100 m Länge – im Vergleich mit und ohne Ansatz des Retentionsvermögens eines Sickerkörpers der Tiefenentwässerung für ein 15minütiges Regenereignis mit Wiederkehrzeiten von 1 Jahr (1 a⁻¹), 10 Jahren (0,1 a⁻¹), 20 Jahren (0,05 a⁻¹) und 100 Jahren (0,01 a⁻¹)

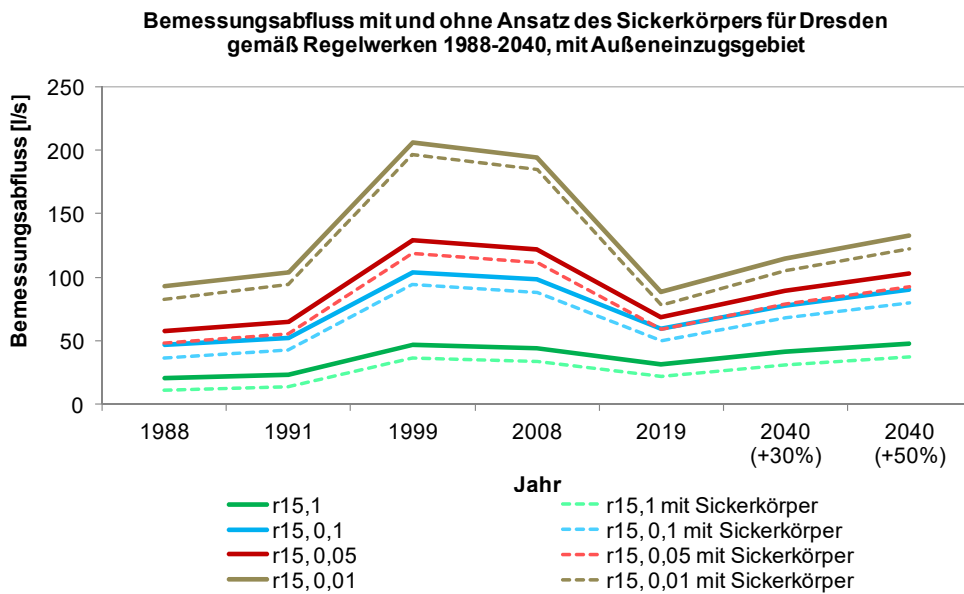


Abbildung 25 Bemessungsabfluss (l/s) mit Außeneinzugsgebiet für 100 m Länge – im Vergleich mit und ohne Ansatz des Retentionsvermögens eines Sickerkörpers der Tiefenentwässerung für ein 15minütiges Regenereignis mit Wiederkehrzeiten von 1 Jahr (1 a^{-1}), 10 Jahren ($0,1 \text{ a}^{-1}$), 20 Jahren ($0,05 \text{ a}^{-1}$) und 100 Jahren ($0,01 \text{ a}^{-1}$)

In Tabelle 18 und Tabelle 19 sind die prozentualen Bemessungsabflüsse unter Berücksichtigung des Retentionsraumes der Tiefenentwässerung für 100 m Länge dargestellt. Für ein ausgewähltes Beispiel werden die beiden Tabellen nachfolgend erläutert.

Könnte der Retentionsraum als Speicherelement herangezogen werden, so müssten im Bezugsjahr 2019 für die hydraulische Bemessung der Tiefenentwässerung mit einem Regenereignis $r_{15, 0,1}$ nur 38 % des eigentlichen Bemessungsabflusses angesetzt werden. Das heißt, 62 % des anfallenden Wassers könnten im Sickerkörper der TE zwischengespeichert und abgeführt werden unter der Voraussetzung, dass der Porenraum nicht verstopft ist.

Tabelle 18: Prozentualer Bemessungsabfluss für ein 15minütiges Regenereignis unterschiedlicher Regenhäufigkeiten n bei Berücksichtigung des Sickerkörpers als Retentionsraum – ohne Außeneinzugsgebiet

Regenhäufigkeit $n \text{ [a}^{-1}\text{]}$	Bezugsjahr						
	1988	1991	1999	2008	2019	2040 (+30%)	2040 (+50%)
1	0%	0%	21%	1%	0%	10%	22%
0,1	24%	45%	65%	56%	38%	52%	59%
0,05	39%	56%	72%	64%	46%	58%	64%
0,01	62%	72%	82%	78%	58%	68%	72%

Tabelle 19: Prozentualer Bemessungsabfluss für ein 15minütiges Regenereignis unterschiedlicher Regenhäufigkeiten n bei Berücksichtigung des Sickerkörpers als Retentionsraum – mit Außeneinzugsgebiet

Regenhäufigkeit n [a^{-1}]	Bezugsjahr						
	1988	1991	1999	2008	2019	2040 (+30%)	2040 (+50%)
1	52%	57%	79%	77%	68%	76%	79%
0,1	79%	81%	90%	90%	83%	87%	89%
0,05	83%	85%	92%	92%	85%	89%	90%
0,01	89%	90%	95%	95%	89%	91%	92%

Die Nutzung des Retentionsraumes des Sickerkörpers und deren positive Auswirkung auf den Bemessungsabfluss Q_A wurden in diesem Kapitel beispielhaft berechnet und diskutiert.

Der Retentionsraum wird in den nachfolgenden Betrachtungen nicht weiter angesetzt. Er stellt aber eine wichtige zusätzliche Reserve für Starkregenereignisse dar.

7.4.5 Gesamtkapazität der Gleisentwässerung

In diesem Kapitel werden die einzelnen Kapazitäten der Entwässerungselemente aus Kapitel 7.4.2, 7.4.3 und 7.4.4 zusammenfassend als Gesamtkapazität der Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke dargestellt.

Die Gesamtkapazität der Gleisentwässerungsanlagen wird exemplarisch für ein Beispiel mit den in Tabelle 20 angegebenen Randbedingungen ermittelt und bewertet.

Tabelle 20: Randbedingungen zur Berechnung der Gesamtkapazität von Gleisentwässerungen

Parameter	Kürzel	Wert	Einheit
Rauigkeit des Bahngrabens	k_{St}	40	$m^{1/3}/s$
Gefälle des Bahngrabens und der TE	l_{So}	1	%
Wandrauheit des Rohres	k	0,4	mm
Innenrohrdurchmesser	DN	200	mm

Die daraus berechnete Gesamtkapazität der Entwässerungsanlagen ist in Abhängigkeit von den Streckeneinstufungen und den möglichen Einstauhöhen in Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 21: Zusammenfassung der Gesamtkapazität (l/s) der Entwässerungsanlagen, bezogen auf die Streckeneinstufungen

Element	Kürzel	Streckeneinstufung		
		I	II	III
Bahngraben	$Q_{K,Graben}$	578	218	62
TE	$Q_{K,TE}$	40	40	40
Sickerkörper ¹⁾	$Q_{S,D}$	10	10	10
Gesamtkapazität	Q_K	628	268	112

1) Der Sickerkörper der Tiefenentwässerung wird hier bezogen auf eine Streckenlänge von 100 m mit ausgewiesen. Da dieser Wert abhängig vom Regenereignis ist, wird er im Anhang 14 nicht berücksichtigt.

Für die Randbedingungen der Tabelle 20 ergeben sich

- 628 l/s Gesamtkapazität für Streckeneinstufung I,
- 268 l/s Gesamtkapazität für Streckeneinstufung II und
- 112 l/s Gesamtkapazität für Streckeneinstufung III

als maximal mögliche Abflussleistung (Kapazität) der Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke.

Eine umfassende Auswertung für unterschiedliche Rauigkeiten, Gefälle und Streckeneinstufungen können dem Anhang 14 entnommen werden. Das Retentionsvermögen des Sickerkörpers einer Tiefenentwässerung wurde bei der Berechnung, wie in Kapitel 7.4.4 bereits erläutert, nicht berücksichtigt. Für die im Anhang 14 berechneten und in Tabelle 21 beispielhaft angegebenen Gesamtkapazitäten Q_K erfolgt der hydraulische Nachweis in Kapitel 7.5.

7.5 Hydraulischer Nachweis für Gleisentwässerungsanlagen

In diesem Kapitel werden der hydraulische Nachweis geführt und die hydraulischen Restkapazitäten der Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke dargestellt.

Der hydraulische Nachweis erfolgt nach Gleichung 10 (Kapitel 5.2.3) aus dem Vergleich des abzuleitenden Bemessungsabflusses Q_A und der Abflusskapazität Q_K einer Entwässerungsanlage.

Der abzuleitende Bemessungsabflusses Q_A wurde in Kapitel 7.3.3 berechnet. Die Gesamtkapazität Q_K , bestehend aus

- der Abflusskapazität des Bahngrabens $Q_{K,Graben}$ und
- der Tiefenentwässerung $Q_{K,TE}$,

wurde in Kapitel 7.4.5 ausgewiesen.

In Abbildung 26 und Abbildung 27 werden der Bemessungsabfluss und die Abflusskapazität ohne und mit Außeneinzugsgebiet unter Berücksichtigung der historischen Entwicklung der verschiedenen Regelwerke und Bemessungsansätze sowie für die verschiedenen Regenhäufigkeiten grafisch aufbereitet und gegenübergestellt. Die logarithmische Skalierung der Ordinatenachse ist zu beachten. Die dargestellte Abflusskapazität basiert dabei auf den in Tabelle 20 dargestellten Eingangswerten.

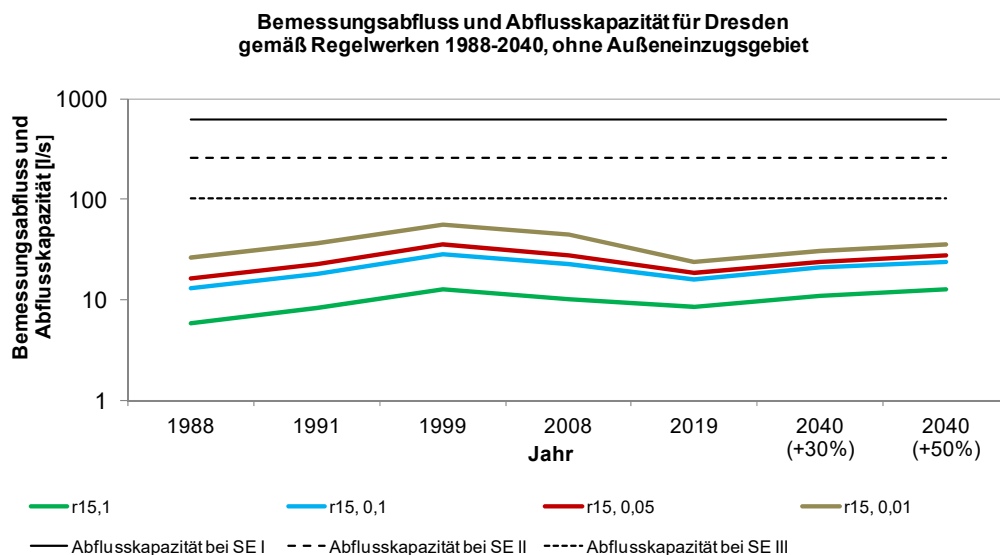


Abbildung 26 Vergleichende Darstellung des Bemessungsabflusses und der Abflusskapazität des Bahngrabens für unterschiedliche Streckeneinstufungen, ohne Außeneinzugsgebiet, Streckenlänge 100 m, Sohlgefälle 1 %

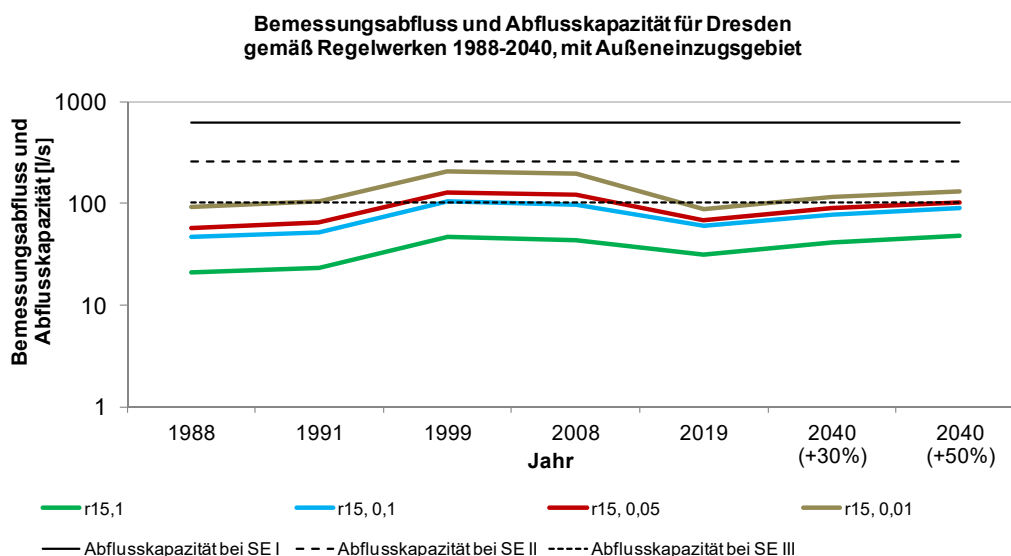


Abbildung 27 Vergleichende Darstellung des Bemessungsabflusses und der Abflusskapazität des Bahngrabens für unterschiedliche Streckeneinstufungen mit Außeneinzugsgebiet, Streckenlänge 100 m, Sohlgefälle 1 %

Die Auswertungen für eine Länge von 100 m und 1 % Sohlgefälle zeigen, dass in Abhängigkeit der Streckeneinstufungen und Regenereignisse auch in Zukunft bis zu einem Regenereignis $r_{15,0,1}$ die Abflusskapazität der Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke ausreichend ist. Überschreitungen der Abflusskapazität ergeben sich erst ab einem Regenereignis $r_{15,0,05}$ und bei Streckeneinstufung III mit Außeneinzugsgebiet.

Die zuvor angeführte beispielhafte Darstellung wurde im Anhang 15 für Längen von 100 m, 500 m und 1.000 m mit Variation der Sohlgefälle von 0,3%, 1,0%, 1,5% berechnet, grafisch dargestellt und deren Auslastung in Prozent bestimmt. Der Durchmesser der Tiefenentwässerung betrug bei allen durchgeführten Berechnungen konstant 200 mm (= hydraulisch wirksamer Durchmesser).

Wird der hydraulische Nachweis erbracht ($Q_A \leq Q_K$) fließt das Wasser bei der theoretischen Betrachtung mit dem Fließzeitverfahren nahezu in der Zeit des betrachteten Regenereignisses ab. Bei einem 15minütigen Regen, voll funktionsfähiger Entwässerungsanlage und funktionierender Vorflut ist somit rein theoretisch jeder Bemessungsabfluss in etwa 15 Minuten abgeleitet.

Aus diesen Berechnungsergebnissen und Erkenntnissen können Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, die ausführlich in Kapitel 10.1 dargestellt sind.

8 Berechnungen für Durchlässe (AP 2)

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass für die Bemessung von Durchlässen in den Regelwerken keine Festlegungen zum zu betrachtenden Einzugsgebiet getroffen wurden und werden. Auf Basis der Auswertung von Datensätzen der PD Dresden und der PD Magdeburg konnten jedoch geometrische Standardbauwerke herausgearbeitet werden. Für diese Standardbauwerke kann eine Bewertung der hydraulischen (Rest)Kapazität, auch in Hinblick auf die Zunahme der Niederschläge gemäß Deutschem Klimaatlas DWD (2019), durchgeführt werden. Dazu wurde ein Ablaufschema zur hydraulischen Bemessung von Durchlässen entwickelt (Anhang 9). Die Nachweiserführung wird anschließend exemplarisch für fünf Durchlässe der PD Dresden durchgeführt.

8.1 Eingangsparmeter

In den Kapiteln 8.1.1 und 8.1.2 werden die Lage und die Geometrien der untersuchten Durchlässe erläutert und es wird auf die Wahl von konkreten Hochwasserereignissen eingegangen.

8.1.1 Lage und Geometrie der Beispiele

Vier der fünf hydraulisch zu untersuchenden Durchlässe befinden sich auf der Bahnstrecke 6363 Dresden – Leipzig bei Streckenkilometer km 36,755, km 51,000, km 78,092 und km 95,215. Ein Durchlass befindet sich auf der Bahnstrecke 6194 Lübbenau – Kamenz.

Folgende Gewässer queren die Bahnstrecke 6363:

- „Lossa“ bei km 36,755 mit einem Rohrdurchlass DN 800,
- „Merkwitzer Wasser“ bei km 51,000 mit einem Rohrdurchlass DN 1.200,
- „Grenzgraben“ bei km 78,092 mit einem Rohrdurchmesser DN 1.000 und
- „Pechgraben“ bei km 95,215 mit einem Rohrdurchlass DN 600.

Das Gewässer „Rotes Wasser“ quert mit einem Plattendurchlass DN 600 die Bahnstrecke 6194 bei km 151,478.

Sowohl die geometrischen Randbedingungen der Durchlässe mit Nennweiten DN 600 bis DN 1200 als auch deren Ausführung als Rohrdurchlass stellen charakteristische Varianten dar (siehe Kapitel 5.3.2). Außerdem sind alle genannten Gewässer höchstwahrscheinlich ständig wasserführend und deshalb für die weitere Betrachtung gut geeignet.

8.1.2 Wahl des Hochwasserereignisses

Als konkrete Hochwasserabflüsse werden in Anlehnung an DB Netz AG (2008) die 20-jährlichen und die 100-jährlichen Hochwasserabflüsse (HQ_{20} und HQ_{100}) gewählt. Mittlere Hochwasserabflussspenden (MHq), wie sie Anhang 8 enthalten sind, ergeben zu geringe Abflüsse. Sie stellen je nach Lage des Einzugsgebietes nur einen geringen Prozentsatz eines konkreten Hochwasserabflusses dar.

Es wird empfohlen, die Werte im Anhang 8 nicht bzw. nur unter Verwendung eines Faktors heranzuziehen. Dieser Faktor bzw. das Verhältnis, bezogen auf die Fläche, ist abhängig vom konkret nachzuweisenden Hochwasserabfluss und beträgt für die nachfolgende Beispiele $HQ_{20}/MHQ \sim 2,3$ und $HQ_{100}/MHQ \sim 4,1$. Weitere Stichproben an kleineren Gewässern im Erzgebirge und im Elbsandsteingebirge ergaben einen Faktor $HQ_{100}/MHQ \sim 4,75$.

8.2 Vorgehensweise

Dieses Kapitel beschreibt die Vorgehensweise zur Nutzung von Online-Portalen für die Bestimmung von gebietsspezifischen Abflüssen. In Kapitel 8.2.1 wird erläutert, wie gebietsspezifische Kenngrößen einem konkreten Bahndurchlass zugeordnet und welche Daten über Online-Portale abgerufen werden können. Aus diesen Daten werden in Kapitel 8.2.2 die für den hydraulischen Nachweis relevanten Abflüsse berechnet.

8.2.1 Auslesen der Gebietskennwerte für das zu betrachtende Einzugsgebiet

Die Zuordnung der Durchlässe, bezogen auf den Bahnstreckenkilometer, kann z. B. über das Online-Tool GEO++® (2019) der Firma Geo++ GmbH erfolgen. Im Online-Tool des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie LfULG (2019) werden dem Bahnstreckenkilometer die Lage im Gewässernetz zugeordnet und die Gebietskennwerte für das Einzugsgebiet ausgegeben. Für die fünf zu untersuchenden Beispiele werden Gebietskenngrößen, Abflussspenden und Abflüsse für das 20-jährliche und 100-jährliche Hochwasserereignis in Tabelle 22 ausgewiesen. Weitere Jährlichkeiten, z. B. ein HQ_{10} oder HQ_{200} könnten ebenfalls ausgelesen werden.

Tabelle 22: Gebietskenngrößen, Abflussspenden und Abflüsse der fünf zu untersuchenden Gewässer, gemäß LfULG (2019)

Kenngröße	Einheit	Lossa	Merkwitzer Wasser	Grenzgraben	Pechwasser	Rotes Wasser
Gesamteinzugsgebiet	km ²	8,18	15,3	7,9	3,68	5,19
Abflussspende MHq	l/(s·km ²)	66	87,9	90,7	234	80,7
Abflussspende Hq ₂₀	l/(s·km ²)	148	198	204	527	181
Abflussspende Hq ₁₀₀	l/(s·km ²)	268	357	368	951	327
Abfluss MHQ	[m ³ /s]	0,539	1,34	0,717	0,861	0,419
Abfluss Hq ₂₀	[m ³ /s]	1,21	3,02	1,61	1,94	0,941
Abfluss Hq ₁₀₀	[m ³ /s]	2,19	5,45	2,91	3,5	1,7

8.2.2 Berechnung der für die Durchlässe relevanten Abflüsse

Die Bahnstrecke und die Durchlässe liegen innerhalb von Einzugsgebieten, für die Gebietskenngrößen vorhanden sind. Würden die Durchlässe am Gebietsauslauf liegen, könnten die Werte der Tabelle 22 direkt verwendet werden. Da die Durchlässe innerhalb des Einzugsgebietes liegen, müssen das Einzugsgebiet bis zum zu untersuchenden Durchlass und der daraus resultierende Abfluss über die jeweilige Abflusspende in $l/(s \cdot km^2)$ konkret bestimmt werden. Die für die Durchlässe bemessungsrelevanten Abflüsse für das Jahr 2019 sind in der Tabelle 23 enthalten. Eine Berücksichtigung der Erhöhung der Niederschlagsmengen und damit auch der bemessungsrelevanten Abflüsse um 30 % erfolgt in Tabelle 24 bzw. 50 % bis zum Jahr 2040 in Tabelle 25.

Tabelle 23: Bemessungsrelevante Abflüsse für die Durchlässe für das Jahr 2019

Kenngröße	Einheit	Lossa	Merkwitzer Wasser	Grenzgraben	Pechwasser	Rotes Wasser
Einzugsgebiet bis zum Durchlass	km ²	5,93	5,97	3,82	1,46	1,05
Bemessungsabfluss HQ ₂₀	[m ³ /s]	0,88	1,18	0,779	0,77	0,19
Bemessungsabfluss HQ ₁₀₀	[m ³ /s]	1,59	2,13	1,41	1,39	0,34

Tabelle 24: Bemessungsrelevante Abflüsse für die Durchlässe – 30% Erhöhung bis zum Jahr 2040

Kenngröße	Einheit	Lossa	Merkwitzer Wasser	Grenzgraben	Pechwasser	Rotes Wasser
Einzugsgebiet bis zum Durchlass	km ²	5,93	5,97	3,82	1,46	1,05
Bemessungsabfluss HQ ₂₀	[m ³ /s]	1,15	1,53	1,01	1,00	0,25
Bemessungsabfluss HQ ₁₀₀	[m ³ /s]	2,07	2,77	1,83	1,81	0,44

Tabelle 25: Bemessungsrelevante Abflüsse für die Durchlässe – 50% Erhöhung bis zum Jahr 2040

Kenngröße	Einheit	Lossa	Merkwitzer Wasser	Grenzgraben	Pechwasser	Rotes Wasser
Einzugsgebiet bis zum Durchlass	km ²	5,93	5,97	3,82	1,46	1,05
Bemessungsabfluss HQ ₂₀	[m ³ /s]	1,32	1,77	1,17	1,16	0,29
Bemessungsabfluss HQ ₁₀₀	[m ³ /s]	2,39	3,20	2,12	2,09	0,51

8.3 Nachweis

Der vereinfachte hydraulische Nachweis erfolgt aus dem Vergleich des abzuleitenden Bemessungsabflusses Q_A bei einem HQ₂₀ bzw. HQ₁₀₀ und der vorhandenen Abflusskapazität Q_K des Durchlasses unter Berücksichtigung eines Freispiegelgefälles im Durchlass sowie ohne Einstau am Einlauf des Durchlasses.

Die Abflusskapazität des Durchlasses wird nach Gleichung 8 und 9 (siehe Kapitel 5.2.3) für einen maximalen Füllstand von 80 % des Querschnittes bei einer betrieblichen Rauigkeit von 3 mm⁸ bzw. einem Rauigkeitsbeiwert $k_{St} = 65 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ berechnet. Die verbleibenden 20 % dienen dabei als Reserve für Sedimentation und Ablagerungen auf der Sohle.

Im Anhang 16 sind die hydraulischen Nachweise in Bezug auf das HQ₂₀ und HQ₁₀₀ für verschiedene Sohlgefälle geführt worden. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden alle Rohrdurchmesser zwischen DN 400 und DN 2.000 dargestellt. Die erforderlichen Durchlasslängen wurden für die fünf Durchlässe vorsichtig mit Hilfe des Online-Tools GEO++[®] (2019) abgeschätzt. Die hydraulische Leistungsfähigkeit wird wie folgt farblich kategorisiert:

- Bei der grünen Kategorie ist die hydraulische Leistungsfähigkeit für beide Jährlichkeiten und vorgegebener Auslastung ausreichend.
- Bei der gelben Kategorie ist die hydraulische Leistungsfähigkeit für die 20-jährliche Wiederkehrzeit ausreichend, für die 100-jährliche Wiederkehrzeit jedoch nicht mehr.
- Bei der roten Kategorie ist die hydraulische Leistungsfähigkeit des Durchlassquerschnittes für beide Jährlichkeiten nicht mehr ausreichend.

Die Auslastungen der Durchlässe sind unter Variation der Sohlgefälle für die Bezugsjahre 2019 und 2040 in Tabelle 26 bis Tabelle 30 zusammenfassend dargestellt.

⁸ Eine Wandrauheit von 3 mm ist für Betonrohre mit Holzschalung bzw. mäßig inkrustierte Stahlrohre üblich (Bollrich, 2007).

Tabelle 26: Auslastung des Durchlasses für das Gewässer „Lossa“ im Bezugsjahr 2019 und 2040 mit 30 % und 50 % Erhöhung

Sohlgefälle [%]	HQ ₂₀			HQ ₁₀₀		
	2019	2040 (+30%)	2040 (+50%)	2019	2040 (+30%)	2040 (+50%)
1,0	167%	219%	251%	302%	399%	454%
2,0	118%	155%	177%	214%	282%	321%
3,0	97%	126%	145%	175%	231%	262%

Tabelle 27: Auslastung des Durchlasses für das Gewässer „Merkwitzer Wasser“ im Bezugsjahr 2019 und 2040 mit 30 % und 50 % Erhöhung

Sohlgefälle [%]	HQ ₂₀			HQ ₁₀₀		
	2019	2040 (+30%)	2040 (+50%)	2019	2040 (+30%)	2040 (+50%)
1,0	89%	115%	133%	161%	209%	241%
2,0	63%	82%	94%	114%	148%	171%
3,0	51%	67%	77%	93%	121%	139%

Tabelle 28: Auslastung des Durchlasses für das Gewässer „Grenzgraben“ im Bezugsjahr 2019 und 2040 mit 30 % und 50 % Erhöhung

Sohlgefälle [%]	HQ ₂₀			HQ ₁₀₀		
	2019	2040 (+30%)	2040 (+50%)	2019	2040 (+30%)	2040 (+50%)
1,0	87%	113%	131%	158%	205%	238%
2,0	62%	80%	93%	112%	145%	168%
3,0	51%	65%	76%	91%	119%	137%

Tabelle 29: Auslastung des Durchlasses für das Gewässer „Pechwasser“ im Bezugsjahr 2019 und 2040 mit 30 % und 50 % Erhöhung

Sohlgefälle [%]	HQ ₂₀			HQ ₁₀₀		
	2019	2040 (+30%)	2040 (+50%)	2019	2040 (+30%)	2040 (+50%)
1,0	273%	355%	412%	493%	642%	742%
2,0	193%	251%	291%	349%	454%	525%
3,0	158%	205%	238%	285%	371%	428%

Tabelle 30: Auslastung des Durchlasses für das Gewässer „Rotes Wasser“ im Bezugsjahr 2019 und 2040 mit 30 % und 50 % Erhöhung

Sohlgefälle [%]	HQ ₂₀			HQ ₁₀₀		
	2019	2040 (+30%)	2040 (+50%)	2019	2040 (+30%)	2040 (+50%)
1,0	75%	99%	115%	135%	175%	203%
2,0	53%	70%	81%	95%	124%	143%
3,0	44%	57%	66%	78%	101%	117%

Die Durchlässe

- bei km 51,000 für das Gewässer „Merkwitzer Wasser“,
- bei km 78,092 für das Gewässer „Grenzgraben“ und
- bei km 151,478 für das Gewässer „Rotes Wasser“

sind mindestens ab einem Sohlgefälle von 2 % auch in Zukunft unter Berücksichtigung von durch den Klimawandel erhöhte Hochwasserabflüsse eines HQ₂₀ ausreichend leistungsfähig, sofern der geometrisch zu Verfügung stehende Abflussquerschnitt auch in der Realität vorhanden ist.

Die ermittelten Auslastungen zeigen, dass die Durchlassgeometrie für das Gewässer „Lossa“ ab einer angenommenen 30 % Erhöhung der Abflussmengen bis zum Jahr 2040 für ein HQ₂₀ nicht mehr ausreichend ist. Bei dem Durchlass für das Gewässer „Pechwasser“ ist die Auslastung nach dieser Berechnungsmethode bereits für ein HQ₂₀ im Jahr 2019 überschritten.

Für alle anderen Sohlgefälle und einem Hochwasserabflüsse müssten detaillierte Betrachtungen durchgeführt werden. Dies könnte mit Hilfe einer detaillierten Nachrechnung durch

- die Überprüfung des tatsächlichen Einzugsgebietes (Lage in einer Siedlung, begrenzende Linienbauwerke, etc.),
- eine Bewertung des Einstaus des Durchlasses oder
- ein detailliertes Niederschlagsabflussmodell (N–A–Modell)

erfolgen. Durch einen Einstau würde sich die mögliche Abflussmenge wieder vergrößern. Die Notwendigkeit der aufwändigen N–A–Modelle ist dabei vorher abzuwägen.

Genauere Betrachtungen durch eine Berücksichtigung

- von Einlauf- und Auslaufverlusten,
- von hydraulischen Besonderheiten bei Einstau und
- von örtlichen Randbedingungen

können u.a. aus Aigner & Bollrich (2015), Lattermann (2004), RAS–Ew (2005) und Schröder (1999) entnommen werden. Bei einer Auslastung, wie sie bei dem Durchlass für das Gewässer „Lossa“ und „Pechwasser“ berechnet wurde, wird eine genauere Betrachtung bzw. die Bewertung eines Hochwasserereignisse HQ_{100} empfohlen.

Erfahrungen aus bisherigen Hochwasserereignissen sollten mindestens immer dann mit herangezogen, wenn der hydraulische Nachweis nicht erbracht werden kann.

Für eine Erstabschätzung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Durchlässen zum heutigen Zeitpunkt und bei durch den Klimawandel möglicherweise erhöhten Abflüssen könnte die Methodik der zuvor erläuterten Nachweisführung herangezogen werden. Eine zukünftige Übertragung auf andere Bundesländer ist möglich, insofern Abflusspenden und Abflüsse für Gewässer wie in Sachsen oder auch in Baden–Württemberg existieren und in frei verfügbaren Portalen zur Verfügung gestellt werden. Das Ablaufschema für diese Nachweisführung ist in Anhang 9 beigefügt.

In Kapitel 10.2 werden Bemessungsabflusspenden für Durchlässe, bei denen keine gebietspezifischen Daten in frei verfügbaren Portalen abgerufen werden können, vorgeschlagen und Handlungsempfehlungen gegeben.

9 Anwendungsbeispiel der freien Strecke (AP 3)

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Kapitel 7 und 8 erfolgt in diesem Kapitel die hydraulische Bemessung und Bewertung der Anlagen im Hinblick auf den Klimawandel an einem konkreten Fallbeispiel für die freie Strecke.

Der betrachtete Streckenabschnitt wird in 9.1 näher erläutert, zusätzlich wird auf die Allgemeingültigkeit des Beispiels eingegangen. Kapitel 9.2 enthält eine Beschreibung und Darstellung der gewählten Regenereignisse. In Kapitel 9.3 werden die Berechnungen mit dem statischen Modell (Fließzeitverfahren) und in Kapitel 9.4 mit dem dynamischen Modell durchgeführt. Der Vergleich der Ergebnisse der beiden Bemessungen für die freie Strecke auch im Hinblick auf eine durch den Klimawandel möglicherweise erhöhte Bemessungsregenspende erfolgt in Kapitel 9.5. Die hydraulische Bemessung des Durchlasses und die Bewertung bei klimabedingt erhöhten Abflüssen folgt in Kapitel 9.6.

9.1 Strecken- und Abschnittsbeschreibung

In diesem Kapitel wird auf die geometrischen und bautechnischen Randbedingungen sowie die Allgemeingültigkeit des Beispiels eingegangen.

Der gewählte Streckenabschnitt liegt auf der zweigleisigen Bahnstrecke 6248 Dresden – Elsterwerda zwischen km 17,873 bis km 18,115 im bahnrechten Gleis innerhalb der Ortschaft Weinböhl. Die Bahnstrecke wurde in den letzten Jahren ertüchtigt und 2018 wieder in Betrieb genommen. Für diese Bahnstrecke liegen die Bestandsunterlagen des Streckenausbaus sowie der Entwässerung mit DB Netz AG (2019a) vor.

Ein Lageplan mit Darstellung der abgeschätzten Einzugsgebiete, der Haltungslängen⁹, der geometrischen Randbedingungen und ein Querprofil sind im Anhang 17 enthalten.

In der Tabelle 31 sind die wichtigsten Kriterien zur Wahl des Beispielstreckenabschnittes sowie die im Beispiel vorhandenen Randbedingungen aufgelistet.

Als Besonderheit ist die neben dem Sicherheitsraum vorhandene Lärmschutzwand zu nennen. In wie weit diese den Abfluss aus dem Gleis zusätzlich beeinflusst, kann nicht mit Sicherheit benannt werden. Im Allgemeinen werden die Anschlüsse an den Betonsockel der Lärmschutzwand mit gut durchlässigem Material hergestellt, so dass das Wasser in Richtung der Entwässerungsanlagen abfließen kann.

⁹ Als Haltung wird der Abschnitt zwischen zwei Schächten bezeichnet.

Tabelle 31: Kriterium zur Auswahl des Streckenbeispiels

Kriterium		Erfüllung
Streckenlänge	200 m bis 1.000 m	ja 242 m km 17,873 bis km 18,115
	Bahnkörper	Schotteroberbau
	Lage in Geländegleiche / Einschnitt	ja
	Schutzschicht	KG 1 25 cm KG 2 40 cm bindemittelverbesserter Boden
Entwässerung	Bahngraben	nein / bzw. nur teilweise und nicht durchgängig
	Tiefenentwässerung	ja Mehrzweckrohre MP DN 200 bis DN 300
	definiertes, bekanntes und funktionierendes Entwässerungsnetz	ja Neubau 2018
	Schachanzahl mind. 5 Stück	7 Stück 6 Haltungen
	Durchlass als Vorflut	ja bei km 17,873 Stahlbeton, DN 400 Sohlgefälle $I_{so} = 2,3 \%$ Länge 16,8 m
	nur Oberflächenabfluss	höchstwahrscheinlich, minimaler unterirdischer Zufluss, kein Zufluss von Dritten
	kein Zufluss aus dem Außeneinzugsgebiet	(ja) nur sehr kleine Flächen des Außeneinzugsgebietes, die anschließen
Regendaten	Niederschlags- und Abflussmessungen vorhanden	ja 10-minütige Werte von 10/2018 - 06/2019 (Ahlers, 2019)
	Starkregenereignisse vorhanden	ja 1- und 10-minütige Regendaten 5. Juli 2012 und 8. Juli 2014 (DWD, 2019b)

Der Streckenabschnitt in Weinböhl repräsentiert einen typischen und allgemeingültigen Streckenabschnitt für die Gleisentwässerung der freien Strecken im Ausbau- und Neubaubereich ohne Außeneinzugsgebiet. Da kein durchgängiger Bahngraben zur Ableitung des Oberflächenwassers vorhanden ist und das Wasser nur durch die Tiefenentwässerung abgeleitet wird, steht das Beispiel gleichzeitig für Streckenabschnitte mit beengten Verhältnissen, wo ein Bahngraben geometrisch nicht möglich ist.

9.2 Gewählte Regenereignisse

In diesem Kapitel werden die für die Bemessung herangezogenen Modellregen sowie die tatsächlichen Naturregen erläutert.

Der Bemessung mittels statischem Modell (Fließzeitverfahren) in Kapitel 9.3 und dem dynamischen Modell in Kapitel 9.4 liegen sechs Regenereignisse zugrunde. In der Tabelle 32 sind die wesentlichen Daten dieser Regenereignisse aufgelistet.

Tabelle 32: Auflistung der wichtigsten Daten der einzelnen Regenereignisse

Bezeichnung	Art	Dauer / Zeitspanne	Wiederkehrzeit [a]	Niederschlagshöhe h_N [mm]	Quelle
$r_{15, 0,1}$	Blockregen	15 min	10	19,2	DWD (2017)
$r_{15, 0,1}$	Euler 2	15 min	10	19,2	DWD (2017)
$r_{15, 0,01}$	Blockregen	15 min	100	28,1	DWD (2017)
$r_{15, 0,01}$	Euler 2	15 min	100	28,1	DWD (2017)
Wetterstation Garsebach	Naturregen	08.07.2014 02:13 – 03:42 Uhr	–	38,2	DWD (2019b)
Messstation Weinböhl	Naturregen	26.04.2019 20:00 – 00:00 Uhr	–	21,2	Ahlers (2019)

Für die Auswertung und Nachrechnung eines Starkregenereignisses wurden vom Deutschen Wetterdienst Daten der drei nächstliegenden Wetterstationen Dresden-Klotzsche, Garsebach bei Meißen und Heyda bei Riesa übergeben (DWD, 2019b). Als maßgebender Regen wurde das Ereignis am 08.07.2014 der Wetterstation Garsebach gewählt und für die weiteren Berechnungen herangezogen. Die Wetterstation Garsebach stellt nicht unmittelbar den Niederschlag an der Beispielstrecke in Weinböhl dar. Der gemessene Regen ist allerdings ein typisches Beispiel für einen natürlichen Regenverlauf und könnte auch so in Weinböhl aufgetreten sein. Er wird deshalb für die weiteren Betrachtungen herangezogen.

Im Zuge der Studie zur Qualität des Abflusses aus der Gleisentwässerung (DB Netz AG, 2019 und Ahlers, 2019) erfolgt am Standort Weinböhl eine kontinuierliche Regenmessung seit Oktober 2018. Die Daten wurden ausgewertet und als bisher stärkster Regen das Ereignis am 26.04.2019 herausgefiltert.

Alle sechs Regenereignisse sind zur besseren Übersicht nebeneinander in Abbildung 28 dargestellt. Es erfolgte eine einheitliche Umrechnung der Niederschlagsmengen in mm pro 5minütigem Intervall.

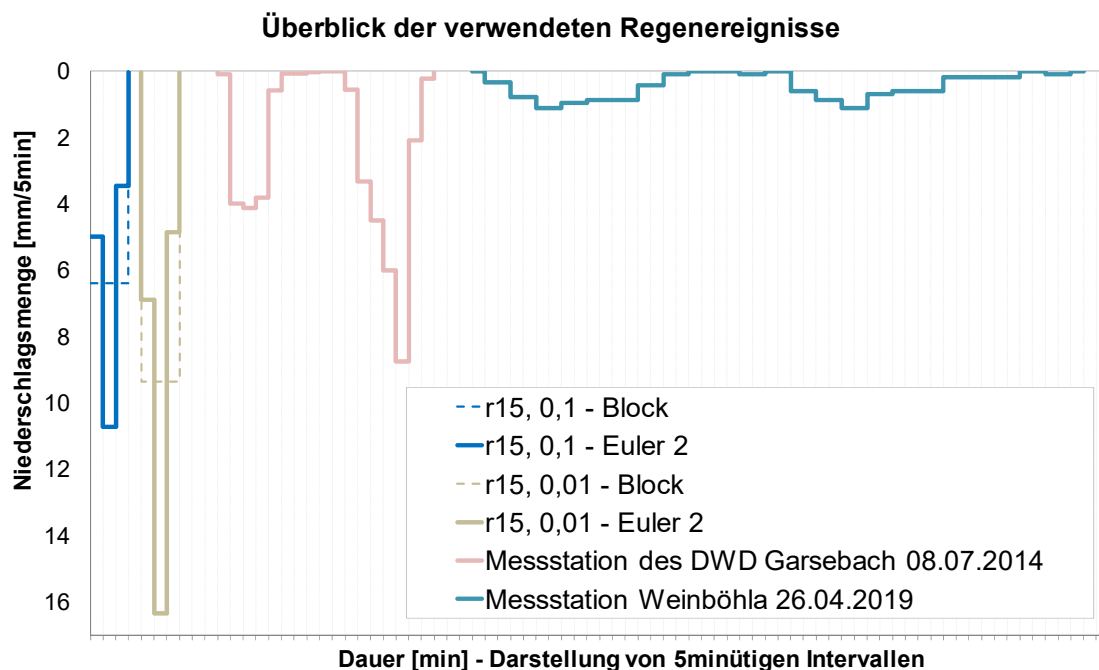


Abbildung 28 Überblick der verwendeten Regenereignisse. Einheitliche Darstellung der Niederschlagsmengen in mm pro 5minütigem Intervall

Für die Berechnungen mittels statischem Modell (Fließzeitverfahren) in Kapitel 9.3 werden die beiden Blockregen basierend auf den KOSTRA-Daten (DWD, 2017) herangezogen. Die Regenereignisse mit der Verteilung nach Euler bzw. die Naturregen lassen sich nicht mit dem statischen Modell abbilden.

Das Regenereignis mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren ($r_{15, 0,01}$) im Jahr 2019 könnte unter Annahme einer ca. 50 %igen Zunahme der derzeitigen Bemessungsregenspende durch den Klimawandel für ein Regenereignis mit einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren ($r_{15, 0,1}$) stehen (vgl. auch Tabelle 11 und Tabelle 12). Kann der hydraulische Nachweis auch mit dem Regenereignis mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren erbracht werden, ist die Entwässerungsanlage im Fallbeispiel auch bei einer möglichen Zunahme der Regenmenge durch den Klimawandel ausreichend dimensioniert.

Für die Berechnungen mittels dynamischen Modell in Kapitel 9.4 werden die beiden Regen mit der Verteilung nach Euler 2 (siehe 7.2.2) und die beiden Naturregen herangezogen. Die vier Regenereignisse weisen dabei wesentliche Unterschiede in der Dauer des Regens und der maximalen Niederschlagsmenge pro 5 Minuten auf. Beide Modellregen weisen eine Dauer von 15min unterteilt in drei Intervalle auf.

Der Naturregen, erfasst an der Messstation Garsebach, besteht aus zwei kurz nacheinander folgenden Regenereignissen, wobei der erste Teil über ca. 20 Minuten und der zweite Teil über 35 Minuten geht. Der Hauptregen des zweiten Teilregens entspricht in 15 Minuten der Niederschlagshöhe eines $r_{15, 0,1}$. Die Regenmenge des zweiten Teilregens ist dabei um ca. 33 % höher als der aktuelle Bemessungsregen $r_{15, 0,1}$.

Das größte gemessene Regenereignis der Messstation Weinböhla weist ebenfalls zwei Teilregen auf. Bei beiden Teilregen kam es zu etwa gleichgroßen Niederschlagsmen-

gen von ca. 10 mm. Bezogen auf die lange Regendauer von jeweils ca. 70 min fallen die Niederschlagsmengen pro Intervall gering aus.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen zeigen sich in den Berechnungen mittels dynamischem Modell in Kapitel 9.4.

9.3 Berechnungen mit dem statischen Modell

Dieses Kapitel enthält die Ansätze (Kapitel 9.3.1) und Ergebnisse (Kapitel 9.3.2) des Nachweises mit dem statischen Modell.

9.3.1 Eingangsparameter

Die der Planung zugrundeliegende hydraulische Bemessung der Gleisentwässerung konnte zur Überprüfung und Kalibrierung der Berechnung nicht herangezogen werden. Die Werte mussten deshalb auf den Istzustand angepasst werden. Für das Fließzeitfahren wurde das Einzugsgebiet gemäß Anhang 17 ermittelt. Die Spitzenabflussbeiwerte der einzelnen Flächen wurden so gewählt, dass bei der Berechnung mit den KOSTRA-Daten (DWD, 2017) für einen 15minütigen Regen mit einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren alle Haltungen eine Auslastung unter 100 % aufweisen. Mindestens eine Haltung musste um die 90 % liegen. Aufgrund der Bindemittelverbesserung der anstehenden Böden im Gleisbereich wurde ein hoher Spitzenabflussbeiwert $\Psi_s = 0,8$ gewählt. Bei heutigen Planungen ist dieser Wert eine übliche Größenordnung bei Bindemittelverbesserung. Für den Außenbereich liegt der Spitzenabflussbeiwert bei $\Psi_s = 0,3$ und für die Böschungen bei $\Psi_s = 0,5$.

Die verwendeten Regendaten nach REINHOLD und die KOSTRA-Daten (DWD, 2017) sind vergleichend in Tabelle 33 gegenübergestellt. Es ist erkennbar, dass die Regenspenden von REINHOLD höher liegen als die der KOSTRA-Daten. Dies ist besonders beim 100jährigen Ereignis auffällig. Dies entspricht auch den Rechercheergebnissen in Kapitel 5.2.3 (siehe auch Anhang 5).

Tabelle 33: Regenspenden und Niederschlagshöhen für den Standort Weinböhl

Datengrundlage / Verfahren	Kürzel	Regenspende [l/(s·ha)]	Niederschlagshöhe [mm]
REINHOLD	$r_{15, 0,1}$	253	22,8
KOSTRA	$r_{15, 0,1}$	213	19,2
REINHOLD	$r_{15, 0,01}$	501	45,1
KOSTRA	$r_{15, 0,01}$	312	28,1

9.3.2 Ergebnisse

Die hydraulischen Berechnungen mit dem Fließzeitverfahren für die Regenspenden mit einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren befinden im Anhang 18. Die hydraulischen Berechnungen für die Regenspenden mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren können dem Anhang 19 entnommen werden.

In Anhang 18 und Anhang 19 ist die zurzeit übliche Listenberechnung zur Bemessung von Kanalnetzen bzw. der Tiefenentwässerung mittels Fließzeitverfahren, wie sie z. B. in Albert (2014) enthalten ist, beigefügt. Es wird dabei von stationären Abflussverhältnissen in der Haltung ausgegangen. Es erfolgt der Nachweis der Haltungen über die Berechnung der Auslastung als einfacher Vergleich zwischen dem Regenabfluss Q_R (Gleichung 2, Kapitel 5.2.3) und der Abflusskapazität $Q_{K,TE}$ (Gleichung 6, Kapitel 5.2.3). Bei einer Auslastung $> 90\%$ wird üblicherweise der nächst größere Rohrdurchmesser gewählt.

Für die vier Regenspenden der Tabelle 33 sind die im Anhang 18 und Anhang 19 berechneten Auslastungen in der Tabelle 34 zusammengefasst. Als Referenz für das Fließzeitverfahren dient das 15minütige Regenereignis mit einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren und basierend auf den KOSTRA-Daten.

Tabelle 34: Vergleich der Auslastung der Haltungen bei Regenereignissen mit 10 und 100 jährlicher Wiederkehrzeit für Regenspenden nach REINHOLD und KOSTRA

Haltung	$r_{15, 0,1}$		$r_{15, 0,01}$	
	REINHOLD	KOSTRA	REINHOLD	KOSTRA
1	38%	32%	74%	46%
2	36%	30%	71%	44%
3	48%	40%	95%	59%
4	58%	48%	114%	71%
5	62%	52%	122%	76%
6	109%	92%	217%	135%

Die Auslastungen gemäß Tabelle 34 zeigen, dass bereits bei der Wahl von Regendaten nach REINHOLD mit einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren die rechnerische Auslastung der Haltung 6 überschritten wird. Ein Rückstau in den Sickerkörper und ein Einstau in die Schächte wären die Folge. Bei Regenereignissen mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren wird die mögliche Abflusskapazität teilweise um das Doppelte überschritten.

Die hydraulischen Berechnungen mit dem Fließzeitverfahren und den KOSTRA-Daten zeigen für das Regenereignis mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren eine Überschreitung der Auslastung um 35%. Damit ist bei einer angenommenen Erhöhung der Bemessungsniederschläge in der Zukunft, die sich im Rahmen des Klimawandels nicht ausschließen lassen, eine **Überlastung** der Haltung 6 bei Starkregen möglich.

Der mittlere Abflussbeiwert Ψ_m (Quotient aus Abflussvolumen V_A zu Niederschlagsvolumen V_R) der zu entwässernden Fläche wird bei dem Fließzeitverfahren für den konkreten Fall konstant für alle Regenereignisse mit $\Psi_m = 0,63$ berechnet. Das Abflussvolumen V_A für ein Regenereignis mit einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren beträgt 42 m^3 .

Für den Vergleich in Kapitel 9.5 mit den mittels dynamischen Modells berechneten Abflussmengen und der Auslastungen (siehe Kapitel 9.4) wird der 15minütige Regen mit einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren basierend auf KOSTRA-Daten herangezogen.

9.4 Berechnungen mit dem dynamischen Modell

Dieses Kapitel enthält die Ansätze (Kapitel 9.4.1) und Ergebnisse (Kapitel 9.4.2) des Nachweises mit dem dynamischen Modell.

9.4.1 Eingangsparmeter

Die Berechnungen für das Einzugsgebiet gemäß Anhang 17 erfolgten mit dem Programm HYSTEM-EXTRAN. Eine Kalibrierung des Modells an einem tatsächlich aufgetretenen Regenereignis und ein daraus resultierend Abfluss konnte nicht durchgeführt werden, da im Bearbeitungszeitraum kein Starkregenereignis mit zugehörigem relevantem Abfluss aufgetreten ist.

Das Einzugsgebiet wurde in die vier verschiedenen Flächen

- Böschung,
- Außeneinzugsgebiet,
- Gleisbereich (Schotterfußpunkt / Randweg) und
- Gleisbereich (Schotterbettung)

unterteilt und die einzelnen Parameter konservativ gewählt. Der für die Bemessung der Entwässerungsanlagen zu ermittelnde Abfluss wird damit überschätzt. Die Erkenntnisse aus der Modellierung im Gleisbereich (siehe Kapitel 7.2.3) flossen dabei nur bedingt ein.

Ein Bodengutachten konnte nicht recherchiert werden. In der geologischen Karte (GK 50, 1994) wird in diesem Bereich Plänersandstein / -mergel ausgewiesen. Es wird eingeschätzt, dass damit lokal ein Boden mit geringem Versickerungsvermögen ansteht. Für die Böschungflächen und Außeneinzugsgebiete wurde deshalb der Boden „Löss“ mit geringer Versickerung gewählt. Für den Gleisbereich mit Bindemittelverbesserung wurde der Boden „Ton/Lehm“ mit einer sehr geringen Versickerungsrate gewählt.

Die Neigung der Oberfläche Tragschicht (OFTS) im Gleis von 5% lässt sich mit den zur Verfügung stehenden Neigungsklassen im Programm nicht ganz genau modellieren. Für die Schotterbettung wurde deshalb die Neigungsklasse 2 (2,5%) und für den Randweg bis zur Tiefenentwässerung die Neigungsklasse 3 (7 %) gewählt.

Die Verdunstungsrate ist abhängig von der Jahres- und Tageszeit. Das Starkregenereignis im Juli 2014 wurde zwischen 01:00 und 04:00 Uhr registriert. Für alle betrachteten Regenereignisse wurden der Monat Juli und der Regenbeginn um 01:00 Uhr berücksichtigt.

Die wesentlichen Eingangsparameter enthält die Tabelle 35.

Tabelle 35: Eingangsparameter für die dynamischen Berechnungen

Parametersatz	Böschung	Gleis (Schotter)	Gleis (Schotterfußpunkt / Randweg)	Außeneinzugsgebiet
Bodenart mit Wassergehalt 10 %	Löss	Ton/Lehm	Ton/Lehm	Löss
Neigungsklasse	5 (20,0 %)	2 (2,5 %)	3 (7,0 %)	2 (2,5 %)
Benetzungsverluste [mm]	4	4	4	4
Muldenverluste [mm]	4	4	4	4
Verdunstung ¹⁾	ja	ja	ja	ja
Regenverteilung	Euler 2	Euler 2	Euler 2	Euler 2
Anfangsabflussbeiwert [%]	50	80	80	50
Endabflussbeiwert [%]	50	80	80	50
Dauerverlust [%]	50	20	20	50

¹⁾ Die Verdunstung wird automatisch programmintern generiert. Das Jahresmittel beträgt 657 mm/a.

9.4.2 Ergebnisse

Um die Ergebnisse in Kapitel 9.5 vergleichen zu können, werden die Auslastung der einzelnen Haltungen, Abflussvolumen und der mittlere Abflussbeiwert Ψ_m für die einzelnen Regenereignisse ausgewertet.

In Tabelle 36 sind alle Auslastungsgrade der einzelnen Haltungen für die unterschiedlichen Regenereignisse am Beginn der Haltung, am Ende der Haltung und als Mittelwert zusammengefasst.

Tabelle 36: Auf die Profilhöhen bezogene Auslastungsgrade der einzelnen Haltungen in [%] für die unterschiedlichen Regenereignisse, am Beginn der Haltung (1), am Ende der Haltung (2) und als Mittelwert (3)

Haltung	$r_{15, 0,1}$			$r_{15, 0,01}$			08.07.2014 (Garsebach)			26.04.2019 (Weinböhl)
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	-
H1	27%	39%	33%	37%	55%	46%	29%	43%	36%	0%
H2	32%	38%	35%	44%	54%	49%	35%	42%	39%	0%
H3	38%	51%	45%	54%	76%	65%	42%	58%	50%	0%
H4	43%	44%	44%	63%	68%	66%	48%	51%	50%	0%
H5	44%	59%	52%	68%	94%	81%	51%	69%	60%	0%
H6	59%	48%	54%	94%	67%	81%	69%	54%	62%	0%

Die Tabelle 37 enthält die Niederschlagshöhen und -volumen, das gesamte Abflussvolumen und den berechneten mittleren Abflussbeiwert.

Tabelle 37: Zusammenfassung der Niederschlagshöhen und -volumen, Abflussvolumen und des daraus resultierenden mittleren Abflussbeiwerts

Bezeichnung	Kürzel	Einheit	$r_{15, 0,1}$	$r_{15, 0,01}$	08.07.14 (Garsebach)	26.04.19 (Weinböhl)
Niederschlagshöhe	h_N	[mm]	19,2	28,1	38,2	21,2
Niederschlagsvolumen	V_R	[m ³]	67	98	134	74
Abflussvolumen	V_A	[m ³]	17	34	43	0
mittlerer Abflussbeiwert	Ψ_m	[-]	0,25	0,35	0,32	0

Die Auslastung der Haltungen zeigen, dass alle betrachteten Regenereignisse, auch das Regenereignis mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren $r_{15, 0,01}$, von den Entwässerungsanlagen ohne Überstau bzw. Überlastung aufgenommen und abgeleitet werden können. Damit ist bei einer angenommenen Erhöhung der Bemessungsniederschläge in der Zukunft, die sich im Rahmen des Klimawandels nicht ausschließen lassen, **keine Überlastung** der Haltung 6 bei Starkregen zu erwarten.

Bei dem Regenereignis vom 26.04.2019 kam es rechnerisch zu keinem Abfluss. Dies ist plausibel und stellt die Realität sehr gut dar, da an der Messstelle bisher noch kein relevanter Durchfluss messbar war.

Deutlich erkennbar ist der je nach Regenereignis variable Abflussbeiwert. Dies bestätigt die theoretischen Betrachtungen in Kapitel 7.2.2.

In Kapitel 9.5 werden die Ergebnisse der Berechnung mit dem statischen Modell und dem dynamischen Modell vergleichend gegenübergestellt und die Entwässerungsanlagen im Hinblick auf die durch den Klimawandel möglicherweise erhöhten Bemessungsregenmengen bewertet.

9.5 Bewertung der beiden Verfahren im Hinblick auf den Klimawandel

Die jeweils heranzuziehenden Eingangsparameter, die Berechnungen und Ergebnisse der Kapitel 9.3 und Kapitel 9.4 verdeutlichen die Unterschiede der beiden Modelle. Für beide Modelle und einen 15minütigen Regen mit einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren sind die ermittelten Abflüsse pro Haltung in der Abbildung 29 dargestellt. Es handelt sich hier um die maximal ermittelten Abflüsse beider Modelle. Bei dem Fließzeitverfahren wird der maximale Abfluss als Blockabfluss betrachtet (siehe nähere Erläuterungen in 7.2.2). Bei dem dynamischen Modell tritt dieser maximale Abfluss als Peak der Abflussganglinie kurzzeitig auf und liegt zum überwiegenden Teil unter diesem Maximalwert.

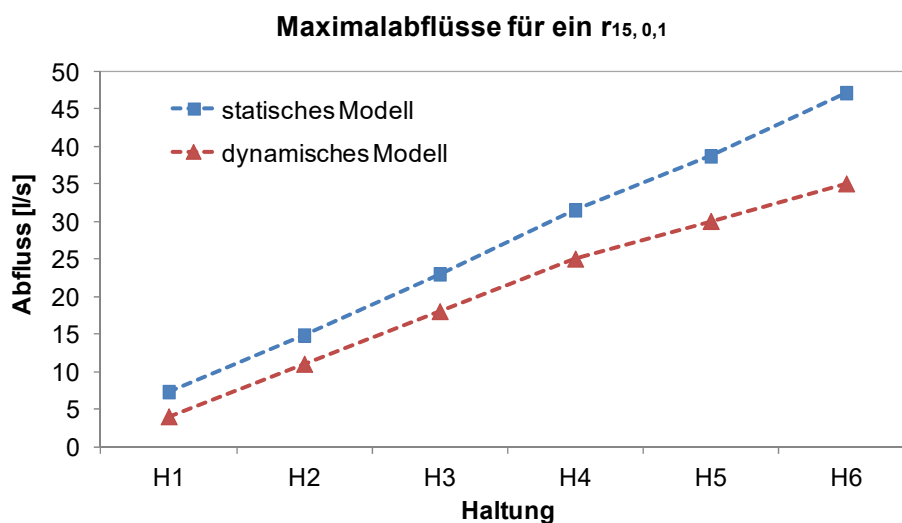


Abbildung 29 Maximalabflüsse für alle Haltungen für das statische und das dynamische Modell

In der Abbildung 30 werden der Blockabfluss und die Abflussganglinie am Beispiel der Haltung H6 dargestellt. Bei der Betrachtung der aus beiden Modellen resultierenden Gesamtabflussmenge V_A fallen die Unterschiede noch stärker auf. Während bei dem dynamischen Modell insgesamt 17 m^3 Wasser abfließen, sind es bei dem statischen Modell mit 42 m^3 etwa das 2,5-fache.

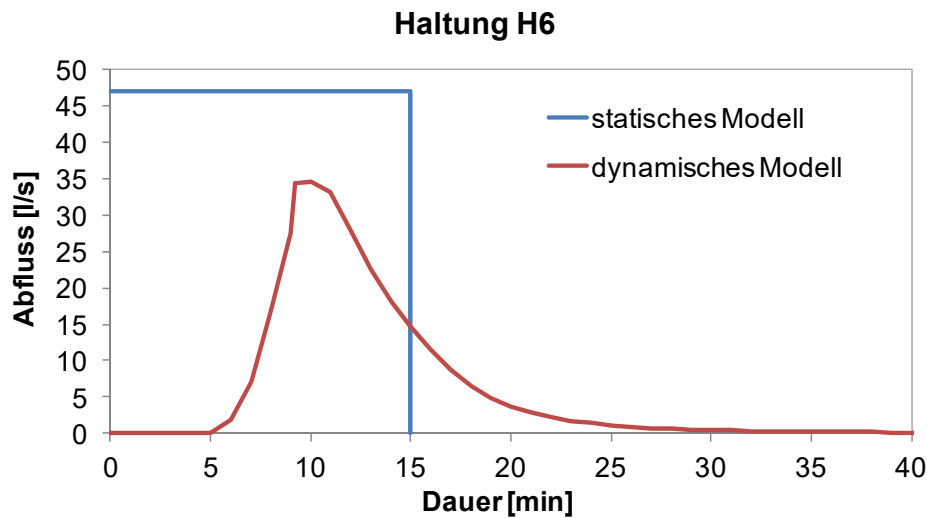


Abbildung 30 Blockabfluss des statischen Modells und Abflussganglinie des dynamischen Modells am Beispiel der Haltung H6

Die Ergebnisse zeigen, dass das Fallbeispiel, bemessen mit dem Fließzeitverfahren (statisches Modell), im Hinblick auf Starkregenereignisse Reserven aufweist.

Das Fallbeispiel „Weinböhma“ stellt ein relativ einfaches Netz mit wenigen Haltungen dar, welches auch mit dem Fließzeitverfahren (statisches Modell) ohne größeren zeitlichen Aufwand berechnet werden kann. Bei größeren Netzen und längeren Abschnitten lassen sich noch größere Unterschiede aufzeigen.

Das Fallbeispiel sollte unter Berücksichtigung

- von tatsächlichen Baugrunddaten,
- der Planung zugrundeliegenden hydraulischen Berechnungen und der damit verbundenen Überprüfung der Größe des Einzugsgebietes,
- eines weiteren Starkregenereignisses größerer Intensität als das Ereignis vom 26.04.2019 und
- den daraus gewonnenen Erkenntnissen

nachgerechnet, kalibriert und überprüft werden.

Berechnungen mit dem dynamischen Modell zeigten, dass auch ein Regenereignis mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren rechnerisch sicher abgeleitet werden kann. Bezogen auf die in diesem Forschungsbericht gewählten Eingangsparameter im dynamischen Modell sind die Entwässerungsanlagen dieses Fallbeispiels auch unter der Annahme einer 30 bis 50 %igen Erhöhung von zukünftigen Regenmengen ausreichend dimensioniert und bei guter Instandhaltung in der Lage, auch zukünftig durch den Klimawandel eventuell erhöhte Bemessungsregenspenden im Bereich einer 30 bis 50 %igen Erhöhung zu heute sicher aufzunehmen und abzuleiten.

Höchstwahrscheinlich fällt der tatsächliche Abfluss Q_A vor allem aus dem Gleisbereich noch geringer als berechnet aus. Die Auslastungsgrade der einzelnen Haltungen wären damit ebenfalls geringer. Damit sind weitere zur Verfügung stehende Reserven vorhanden, falls es zu einer größeren als der jetzt angenommenen Erhöhung um 50 % der Regenspenden kommt.

9.6 Hydraulischer Nachweis des Durchlasses

Der die Bahn querende Durchlass bei km 17,873 dient zur Ableitung des Wassers auf die bahnlinke Seite. Es ist im Sinne dieses Projektes zwar kein Durchlass für ein Fließgewässer, wird aber der Vollständigkeit halber mit bemessen.

Die hydraulische Abflusskapazität des Durchlasses DN 400 aus Stahlbeton bei km 17,873 beträgt gemäß Gleichung 8 für die vorhandenen geometrischen Randbedingungen, ein Sohlgefälle von 2,3 %, einen angenommenen Rauigkeitsbeiwert von $k_{St} = 65 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ etwa 155 l/s. Die dem Durchlass aus der Tiefenentwässerung zugeführten Abflüsse (je nach gewähltem Modell 35 - 47 l/s) können sicher und schadfrei abgeleitet werden.

Eine klimabedingte Erhöhung des Bemessungsabflusses Q_A um 50 % kann ebenfalls schadfrei abgeleitet werden. In Bezug auf die Vollfüllung des Durchlasses könnte der Bemessungsabfluss Q_A um den Faktor 3 ansteigen.

10 Handlungsempfehlungen (AP 4)

Aufbauend auf den Ergebnissen der in den Kapiteln 7 und 8 durchgeführten exemplarischen Berechnungen sowie den Ergebnissen der in Kapitel 9 vorgenommenen vergleichenden Berechnungen für einen realen Streckenabschnitt auf der Strecke 6248 werden in diesem Kapitel Handlungsempfehlungen für die Entwässerungsanlagen der Kategorie 1 – Gleisentwässerung freie Strecke und Kategorie 2 – Durchlässe (siehe Anhang 10 und Anhang 11) im Hinblick auf die durch den Klimawandel möglicherweise erhöhte Bemessungsregenspende herausgearbeitet.

Kapitel 10.1 enthält Handlungsempfehlungen für die Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke. In Kapitel 10.2 werden Handlungsempfehlungen für die Durchlässe für Fließgewässer gegeben. In Kapitel 10.3 werden die wichtigsten Erkenntnisse tabellarisch zusammengefasst und das abschließende Kapitel 10.4 enthält weitere Hinweise und einen Ausblick.

10.1 Gleisentwässerung freie Strecke

Im Folgenden werden, basierend auf den Ergebnissen der vorherigen Kapitel, mögliche Handlungsempfehlungen für die Gleisentwässerung der freien Strecke gegeben. Sie umfassen Modifizierungen von bemessungsrelevanten Eingangsparametern, eine differenzierte Anwendung von Berechnungsmodellen, die Erläuterung der Bedeutung des Bahngrabens sowie weitere Empfehlungen und Hinweise. Abschließend folgt eine Zusammenfassung der Handlungsempfehlung für die Gleisentwässerung der freien Strecke.

10.1.1 Möglichkeiten der Modifizierung von bemessungsrelevanten Eingangsparametern

Grundlage für die Handlungsempfehlungen für Gleisentwässerungen der freien Strecke bilden die Ergebnisse der Parameterstudie einschließlich der in Kapitel 7 durchgeführten hydraulischen Nachweise.

Bei den durchgeführten Berechnungen ist deutlich geworden, dass für die hydraulische Bemessung der Gleisentwässerungsanlagen entscheidend ist, welche Berechnungseingangswerte für das Fließzeitverfahren gewählt wurden. Als bemessungsrelevante Eingangsparameter haben sich vor allem

- der Bemessungsregen nach REINHOLD oder KOSTRA-DWD 2010R sowie
- die verwendeten Spitzenabflussbeiwerte

herauskristallisiert.

Es konnte aufgezeigt werden, dass bei Verwendung der Ril 836 von 1999 (DB Netz AG, 1999) und der Ril 836 von 2008 (DB Netz AG, 2008) die größten bemessungsrelevanten Abflüsse (Q_A) berechnet werden. Dabei wurde deutlich, dass bei einem Ansatz des Bemessungsregens nach REINHOLD ab Regenereignissen mit Wiederkehrzeiten

≥ 10 Jahren die Abflüsse Q_A im Vergleich zu den mit dem Bemessungsregen auf Basis der KOSTRA Daten (DWD, 2017) i.d.R. größere Abflüsse ermittelt werden.

Des Weiteren hat die Parameterstudie gezeigt, dass in der Ril 836 von 1999 (DB Netz AG, 1999) und der Ril 836 von 2008 (DB Netz AG, 2008) die Spitzenabflussbeiwerte der einzelnen Flächen und hier vor allem des Gleisbereiches sehr hoch festgelegt sind. Gut instandgehaltene Anlagen, die nach diesen Regelwerken bemessen worden sind, weisen Reserven für durch den Klimawandel möglicherweise erhöhte Regenspenden auf.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Bemessung gemäß Ril 836 von 1999 (DB Netz AG, 1999) und 2008 (DB Netz AG, 2008) aufgrund der konservativen Ansätze beim Bemessungsregen und bei den Spitzenabflussbeiwerten große Reserven aufweist. Trotz eventuell zunehmender Starkregenereignisse durch den Klimawandel könnten über die Verwendung der KOSTRA Daten (DWD, 2017) sowie über eine Anpassung der Spitzenabflussbeiwerte an realistische Bedingungen die ermittelten Abflussmengen reduziert werden.

Das Regenereignis mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren ($r_{15, 0,01}$) im Jahr 2019 könnte unter Annahme einer 50 %igen Zunahme der derzeitigen Bemessungsregenspende durch den Klimawandel für ein Regenereignis mit einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren ($r_{15, 0,1}$) stehen. Die Annahme eines solchen Ereignisses wäre eine Möglichkeit, die Entwässerungsanlagen hinsichtlich des durch den Klimawandel möglicherweise zunehmenden Starkregens zu bewerten. Diese Bewertung sollte dann aber mit dem dynamischen Modell erfolgen.

Eine weitere Möglichkeit der moderaten Anpassung der Eingangswerte könnte die Wahl einer anderen als der zurzeit üblichen Bemessungsregenspende für den Gleisbereich mit einer Dauer D von z. B. 30 Minuten oder größer ($r_{30, 0,1}$) sein. In Höntschi (2003) wird eine Regendauer D für das Gleis von 540 Minuten empfohlen. Nähere Untersuchungen zum Abflussverhalten bei unterschiedlichen Regendauern wurden im Rahmen dieses Projektes nicht durchgeführt und könnten in einer fortführenden Bearbeitung erfolgen.

10.1.2 Anwendung der Berechnungsmodelle

Die Bemessung der Gleis Entwässerungsanlagen der freien Strecke könnte auch in Zukunft mittels Fließzeitverfahren (statisches Modell) aufgrund seiner im Vergleich zu der dynamischen Modellierung einfachen Handhabung und vor allem wegen der verbleibenden Reserven für durch den Klimawandel möglicherweise erhöhte Regenspenden durchgeführt werden. Als Eingangswerte sollen generell die aktuellen ortsspezifischen KOSTRA-Daten des Deutschen Wetterdienstes herangezogen werden. Die Spitzenabflussbeiwerte für die einzelnen Flächen der Bahn könnten auch im Hinblick auf wirtschaftliche Aspekte reduziert werden. Der Schutz vor durch den Klimawandel möglicherweise erhöhten Starkregenereignissen bei Verringerung der Bau- und Instandhaltungskosten würde erhalten bleiben. Sollte eine Abminderung der Spitzenabflussbeiwerte angestrebt werden, sollte die Höhe der Abminderung im Hinblick auf den Abfluss und die mögliche Zunahme der Starkregenereignisse durch den Klimawandel bewertet werden.

Bei Neubauvorhaben von Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke sind die Anlagen auch bei den angenommenen Niederschlagsänderungen bei Klimawandel von bis zu 50 % mittels Fließzeitverfahren ausreichend bemessen. Die Funktionsfähigkeit der Entwässerungsanlagen wird durch die geänderte Niederschlagsituation in Folge des Klimawandels nicht beeinträchtigt.

Eine Nachrechnung von bestehenden Systemen und Netzen sowie die Bemessung von stark verzweigten Netzen z. B. in Bahnhöfen könnte über dynamische Modelle erfolgen (siehe Tabelle 6, Kapitel 5.2.3 und DIN EN 752, 2008). Durch die Bemessung mittels dynamischer Modelle könnte eine kostengünstigere Dimensionierung der Entwässerungsanlagen bei gleicher Sicherheit erfolgen.

10.1.3 Berücksichtigung der Abflusskapazität des Bahngrabens

Die Berechnungen in Kapitel 7.4 für Entwässerungsanlagen der freien Strecke (Abbildung 13) haben gezeigt, dass ein funktionstüchtiger Bahngraben einen hohen Einfluss auf die Abflusskapazität der gesamten Gleisentwässerung hat. Wird der Bahngraben bei der Ableitung des Abflusses Q_A einbezogen, weisen die vorhandenen Entwässerungsanlagen in Abhängigkeit der Länge der Streckenentwässerung bis zur Ableitung in die Vorflut sehr oft Reserven für durch den Klimawandel möglicherweise erhöhte Starkregenereignisse auf.

Vor allem die Beschaffenheit des Bahngrabens ist dabei von großer Bedeutung. Diese wird bei der Berechnung über die Gerinnerrauigkeit mit Manning/Strickler-Bewerten berücksichtigt (Kapitel 7.4.2, Tabelle 15). Ein instandgehaltener Bahngraben weist nach dem jährlichen Grünschnitt (beschrieben durch $k_{St} = 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) im Vergleich zu einem schlecht instandgehaltenen Bahngraben ohne Pflege (z. B. mit starken Bewuchs, reduziertem Gefälle und Ablagerungen) eine doppelt so große Abflusskapazität auf. Grobe Verschmutzung und Ablagerungen können die Abflusskapazität des Bahngrabens bis auf 0 % reduzieren. Für die Gesamtkapazität der Entwässerungsanlagen (siehe Tabelle 21, Kapitel 7.4.5) bedeutet dies einen Verlust der Abflusskapazität um ca.

- 93 % bei Streckeneinstufung I,
- 85 % bei Streckeneinstufung II und
- 60 % bei Streckeneinstufung III.

Bei diesen vergleichenden Berechnungen wurde eine voll funktionsfähige Tiefenentwässerung vorausgesetzt.

Die Pflege und Instandhaltung vorrangig der Bahngräben, aber auch der Tiefenentwässerung, ist für eine Starkregenvorsorge von entscheidender Bedeutung. Die bisher geltenden Inspektionsintervalle sollten nach derzeitigem Sachstand ausreichend sein. Infolge Unwetterereignissen (z. B. Starkregenereignis) sollten die Bahnseitengräben und die ableitenden Durchlässe kontrolliert und ggf. beräumt werden. Der Vegetationsrückschnitt darf nicht im Bahngraben abgelagert und liegen gelassen werden.

Wichtig sind auch eine Dokumentation des Istzustandes und die Ableitung des Handlungsbedarfs. Es wird vorgeschlagen, sich an den Regularien Ril 836.8001 und 836.8002 zu orientieren.

Die Bedeutung von funktionstüchtigen Gleisentwässerungsanlagen sollte stärker kommuniziert werden und in das Bewusstsein aller Gewerke und Behörden gelangen. Ohne funktionstüchtige Gleisentwässerung sind ein Schutzschichteinbau sowie die Pflege und Instandhaltung des Oberbaus nicht nachhaltig. Als Negativbeispiel soll hier die Anordnung von Signal- und Oberleitungsmasten in den Bahngräben genannt werden, die ohne zusätzliche Maßnahmen Hindernisse darstellen und den Abfluss behindern. Die Wiederherstellung einer durchgehenden Entwässerung ist deshalb dringend erforderlich.

Prinzipiell sollten die offenen Systeme, wie z. B. offene Bahngräben, den geschlossenen Systemen, wie z. B. Tiefentwässerungen, vorgezogen werden. Diese lassen sich besser inspizieren und leichter instandsetzen. Auf kontinuierliche Inspektionen und Instandsetzungen soll großes Augenmerk gelegt werden. Die Bedeutung des offenen Bahngrabens zeigt sich darin, dass dieses Entwässerungselement bereits in den Anfangsjahren der Eisenbahn sowie in allen nachfolgenden Regelwerken erwähnt und dargestellt wird (siehe Anhang 1) und im instandgehaltenen Zustand eine große Abflusskapazität aufweist (siehe Tabelle 21).

Durch die Einteilung in Streckeneinstufungen gemäß Ril 836 (DB Netz AG, 2008) werden zulässige Wasserstände bei einem 15minütigen Regenereignis mit einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren im Bahngraben definiert (siehe Tabelle 14 und Anhang 13). Damit sollen eine Durchfeuchtung des Unter- und Oberbaus und damit Gleislagefehler vermieden werden. Dieser zulässige Wasserstand in den Entwässerungsanlagen wurde der Berechnung der Abflusskapazität für die Streckeneinstufungen I, II und III zugrunde gelegt (Anhang 14). In Anhang 15 sind die Auslastungen für unterschiedliche Streckenlängen und Sohlgefälle auch im Hinblick auf eine Erhöhung der Regenmengen durch den Klimawandel enthalten.

Die Beispiele ohne Außeneinzugsgebiet zeigen, dass die Entwässerungsanlagen der Streckeneinstufung I in den Bemessungsjahren 2019 und 2040 mit einer durch den Klimawandel angenommenen Erhöhung der Niederschläge um 30 % auch für 15minütige Regenereignisse mit Wiederkehrzeiten von 20 und 100 Jahren hydraulisch ausreichend dimensioniert sind. Vorausgesetzt wurde hier eine voll funktionstüchtige Entwässerungsanlage.

Lediglich für das Prognosejahr 2040 mit einer durch den Klimawandel angenommenen Erhöhung der Niederschläge um 50 % wird die Auslastung bei einem Sohlgefälle von 0,3 % und einer Streckenlänge von 1.000 m um 5 % überschritten. Da die Berechnungen mit dem Fließzeitverfahren durchgeführt wurden, könnte z. B. eine Überprüfung mittels dynamischen Modells erfolgen. Eine weitere Möglichkeit wäre dann die Verwendung eines größeren Rohres der Tiefenentwässerung, z. B. DN 300 (siehe Gesamtkapazität Anhang 14).

Aus diesen Ergebnissen lassen sich zwei Empfehlungen ableiten. Erstens sollte es nach Möglichkeit vermieden werden, dass Außeneinzugsgebiete an die Entwässerungsanlagen der Bahn angeschlossen werden bzw. der Zufluss aus einem Außeneinzugsgebiet zu den Anlagen der Gleisentwässerung sollte auf ein Minimum begrenzt werden. Oberflächenwasser aus Außeneinzugsgebieten sollte vielmehr vorrangig über Abfanggräben an der Böschungsschulter gefasst und unabhängig von der Gleisentwässerung zur Vorflut geleitet werden. Wenn der Zufluss aus den Außengebieten nicht vermieden werden kann, sollte geprüft werden, ob ein flächiger statt ein konzentrierter Zufluss

(z. B. mit Kaskaden) möglich ist. Bei konzentriertem Zufluss sollten bauliche Vorkehrungen am Gleis zum Schutz vor Verschlammung und Überflutung erfolgen.

Zweitens wird empfohlen, dass für die Streckeneinstufungen II und ggf. III, das heißt für Geschwindigkeiten > 120 km/h und für Regenereignisse mit Wiederkehrzeiten von 20 und 100 Jahren, nach Möglichkeit ein kurzzeitiger (z. B. für 30 min) Wasserstand im Bahngraben (Einstau in den Oberbau) analog der Streckeneinstufung I zugelassen werden sollte.

10.1.4 Weitere Empfehlungen und Hinweise

Für die zukünftige hydraulische Bemessung könnte überdacht werden, ob weiterhin von einem Regenereignis mit einer definierten Dauer und Wiederkehrzeit ausgegangen werden soll (z. B. $r_{15, 0,1}$), oder ob die Einführung eines ortsunabhängigen Starkregenindex (SRI) gemäß DWA-M 119 (2016) und Schmitt (2015) auch für Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke sinnvoll wäre. Eine mögliche Zuordnung der Wiederkehrzeit zu einem Starkregenindex ist in Anhang 20 enthalten. Entwässerungsanlagen könnten mit einem Starkregenindex SRI 3 als Bemessungsregen überstaufrei bis zur jeweiligen zulässigen Wasserstandshöhe im Bahngraben entsprechend der Streckeneinstufung I, II oder III bemessen werden. Der Überflutungsschutz für seltenere Starkregen könnte z. B. bis SRI 6 oder 7 bewertet werden.

Die Retention des Sickerkörpers einer Tiefenentwässerung wurde beispielhaft in Kapitel 7.4.4 berechnet. Eine generelle hydraulische Bemessung unter Berücksichtigung des Sickerkörpers wird für den Regelquerschnitt (siehe Abbildung 13) nicht empfohlen. Dieser Retentionsraum sollte immer als Reserve für Starkregenereignisse dienen. Bei schwierigen Randbedingungen oder beengten Verhältnissen (z. B. verrohrter Bahngraben) sollte aber die Möglichkeit bestehen, diese Reserve teilweise nutzen zu können.

Der Abstand zur Ableitung des Wassers der Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke zur Vorflut sollte nicht zu lang gewählt werden. Abschlüge bzw. Ableitungen zur Vorflut von 250 m bis 350 m Streckenlänge könnten dabei als Richtwert dienen, auch wenn der hydraulische Nachweis für längere Strecken erbracht werden könnte (siehe auch Fallbeispiel in Kapitel 9.1). Kurze Längen mit Abschlag zur Vorflut sichern einen schnellen Abfluss. Die einzelne Überlastung bzw. ein einzelnes Versagen einer Haltung hätte geringe Auswirkung auf die gesamte Streckenentwässerung.

Im Zusammenhang mit der Regelinspektion sollte immer eine Inspektion der Vorflut (Inspektion Zuleitung zur Vorflut und der Einleitstelle der Bahnentwässerung in die Vorflut) ggf. unter Beteiligung der zuständigen Behörden erfolgen, sofern ein Zutritt möglich ist. Ziel der Inspektion ist die Kontrolle der hydraulischen Durchgängigkeit bis zum Einleitbereich weg vom Gleis zur Vorflut. Nicht funktionierende Einleitungen (Zuleitung und Einleitstelle) in Vorfluten können zu einem Rückstau und zur Minderung der Abflusskapazität der Gleisentwässerung führen. Als Inspektionsintervalle sollten mindestens die Intervalle der Gleisentwässerung angesetzt werden.

Bei schwierigen Verhältnissen und weit voneinander entfernten Vorfluten bzw. wenn keine Versickerungsmöglichkeit besteht, könnten, wo die Möglichkeiten gegeben sind, anstelle der Standardbahngräben größere Gräben ohne Hebeanlagen zur Schaffung zusätzlicher Retentionsflächen ausgebildet werden. Diese so geschaffenen Stauräume

sollten bei der fortführenden Betrachtung der Kategorien 3 und 4 (siehe Anhang 10 und Anhang 11, bzw. Kapitel 6) näher untersucht werden.

Die dargestellten Berechnungen und hydraulischen Bemessungen stellen Beispiele aufgrund des direkten Oberflächenabflusses Q_R dar. Unterirdische Zuflüsse Q_U wurden nicht mit berücksichtigt. Die Berechnungen ersetzen keinesfalls objektkonkrete Planungen und Bemessungen der Entwässerungsanlagen. Die Darstellungen und Berechnungen in Anhang 14 und Anhang 15 können als Hilfestellung herangezogen werden. Die Berechnungen im Anhang 15 wurden dabei bewusst nur mit einem Durchmesser DN 200 für die Tiefenentwässerung durchgeführt. Treten unterirdische Zuflüsse Q_U auf, können diese durch Vergrößerung des Rohrdurchmessers der Tiefenentwässerung kompensiert werden.

10.1.5 Zusammenfassung der Empfehlungen

Nachfolgend werden die **wesentlichen** Punkte für die Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke zusammengefasst:

- Option der Verringerung der Bemessungswassermengen durch Anpassung der konservativen Ansätze des Fließzeitverfahrens
- Wahl einer anderen als zurzeit üblichen Bemessungsregenspende könnte geprüft werden
- Fließzeitverfahren weiter anwendbar für kleine Systeme, ggf. durch Anpassung der Eingangswerte weiter optimierbar
- Anwendung von dynamischen Modellen bei komplexen Abflusssystemen und zur Nachrechnung bestehender Systeme
- Die Pflege und Instandhaltung der Bahngräben und Tiefenentwässerung sollte eine hohe Priorität haben.
- Stärkere Kommunikation der Bedeutung einer gut funktionierenden Gleisentwässerungsanlage auch bei anderen Gewerken und den zuständigen Behörden
- Offene Systeme (Bahngräben) bereits bei der Planung den geschlossenen Systemen vorziehen
- Außeneinzugsgebiete nach Möglichkeit nicht an die Entwässerungsanlagen der Bahn anschließen
- Für Streckeneinstufungen II und III sollte ein kurzzeitiger Wasserstand im Bahngraben (Einstau in den Oberbau) für Regenereignisse mit Wiederkehrzeiten von 20 und 100 Jahren analog der Streckeneinstufung I zugelassen werden.
- Die Angabe des Starkregenindex (SRI) sollte diskutiert werden.
- Die Retention des Sickerkörpers der Tiefenentwässerung sollte auch weiterhin als zusätzliche Reserve für Starkregenereignisse verbleiben.
- Längen zur Vorflut sollten gering gehalten werden.
- Größere Gräben ohne Hebeanlagen anstelle der Standardbahngräben anlegen als eine Möglichkeit der Retention
- Der Weg bis zum Einleitbereich weg vom Gleis zur Vorflut sollte bei regelmäßigen Inspektionen der Gleisentwässerung mit inspiziert und einbezogen werden.

Insgesamt sind die Entwässerungseinrichtungen mit dem Fließzeitverfahren ausreichend dimensioniert. Durch die zurzeit im aktuellen Regelwerk vorgegeben Bemessungsansätze und die modellbedingten Reserven sind die bestehenden Entwässerungsanlagen des Regelquerschnittes der freien Strecke mit Schotteroberbau (Abbildung 5) sowie die in Zukunft danach bemessenen Entwässerungsanlagen in der

Lage, auch einen um 50 % erhöhten Bemessungsregen $r_{15,0,1}$ ohne schadhafte Rückstau aufzunehmen und ableiten zu können. Maßgeblich für eine sichere und staufreie Ableitung des Wassers sind regelmäßige Inspektionen und Instandhaltungsmaßnahmen. Dies betrifft die Entwässerungsanlagen selbst aber auch die Zuleitung zur Vorflut sowie die Einleitstelle der Bahntwässerung in die Vorflut.

10.2 Durchlässe mit Fließgewässern

In diesem Kapitel werden die für Beispiele in Sachsen durchgeführte Herangehensweise der Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Durchlässe zum jetzigen Zeitpunkt und für eine mögliche klimabedingte Erhöhung der Hochwasserabflüsse (siehe Kapitel 8 und Anhang 9) im Sinne einer Ersteinschätzung auf Deutschland erweitert und allgemeine Handlungsempfehlungen zum Neubau und der Instandhaltung gegeben.

10.2.1 Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit

In Kapitel 8.2.1 erfolgte beispielhaft für fünf Durchlässe das Auslesen und Zuordnen von bemessungsrelevanten Gebietskennwerten aus frei verfügbaren Online-Portalen. Derartige Portale sind in Deutschland noch nicht flächendeckend frei verfügbar. Eine Möglichkeit zur flächendeckenden Erstabschätzung von bemessungsrelevanten Gebietskennwerten wird nachfolgend beschrieben.

Im Anhang 8 sind mittlere Hochwasserabflussspenden (MHq) enthalten. Diese werden für unterschiedliche topografische Lagen der Einzugsgebiete in Flachland, Hügelland, Mittelgebirge und Hochgebirge unterteilt. Anhand des stichprobenartig ermittelten Verhältnisses zwischen der Abflussspende H_{q100} und der mittleren Hochwasserabflussspende M_{hq} für Sachsen (vgl. Kapitel 8.1.2) von ca. 4,1 bis ca. 4,75 können die Werte im Anhang 8 exemplarisch auf ein H_{q100} hochgerechnet werden. Da dieser Faktor keine Allgemeingültigkeit hat und auch innerhalb Sachsens variiert, ist er lediglich als exemplarische Stichprobe zu verstehen, um eine Erstabschätzung zu ermöglichen. Der Faktor wurde dabei für die weitere Betrachtung auf 5 erhöht. In Anlehnung an die Tabelle 8 (siehe Kapitel 5.3.3) werden für Einzugsgebietsgrößen von 100 ha, 500 ha und 1.000 ha die Hochwasserabflussspenden H_q in $l/(s \cdot ha)$ und Hochwasserabflüsse H_Q in m^3/s für ein Hochwasser mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren berechnet (Tabelle 38). Es werden Einzugsgebiete im Flach- und Hügelland sowie im Mittelgebirge gewählt. Die Abschätzung für Hochgebirge weisen für die vor allem für die Einzugsgebietsgrößen von 500 ha und 1.000 ha solche großen Abflüsse auf, dass auch der größte Durchlass nicht ausreichen würde. Hochgebirgsabflüsse werden nicht weiter betrachtet.

Tabelle 38: Mittlere Hochwasserabflussspende MHq gemäß Anhang 8, abgeschätzte Abflussspende Hq_{100} und auf drei verschiedene Einzugsgrößen bezogener Abfluss HQ_{100}

Lage des Einzugsgebiet	MHq [l/(s · ha)]		Hq ₁₀₀ ¹⁾ [l/(s · ha)]		HQ ₁₀₀ [m ³ /s]					
					100 ha		500 ha		1.000 ha	
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
Flachland	0,08	0,50	0,36	2,25	0,04	0,25	0,20	1,25	0,40	2,50
Hügelland	0,80	2,00	3,60	9,00	0,40	1,00	2,00	5,00	4,00	10,0
Mittelgebirge	2,00	10,0	9,00	45,0	1,00	5,00	5,00	25,0	10,0	50,0

1) Verhältnis $Hq_{100}/MHq = 5$ als Schätzwert zur Erstabschätzung.

2) Eine Umrechnung der Tabellenwerte für eine Hochwasserabflussspende und Hochwasserabflüsse mit einer Wiederkehrzeit von 20 Jahren – Hq_{20} bzw. HQ_{20} könnte über den Faktor $HQ_{100}/HQ_{20} = 5/2,5 = 2$ erfolgen.

Für die Spannweiten jedes HQ_{100} erfolgt in Abhängigkeit der Lage des Einzugsgebietes eine hydraulische Erstabschätzung und eine Zuordnung möglicher Durchlassquerschnitte in Anhang 21.

Zur Vergleichbarkeit wurden alle Rohrdurchmesser zwischen DN 400 und DN 2000 und typische Rechteckquerschnitte dargestellt. Als Auslastung wurden wieder 80 % gewählt. Ein Einstau wird nicht zugelassen. Die Durchlasslänge wurde einheitlich mit 20 m gewählt. Die hydraulische Leistungsfähigkeit wird wie folgt farblich kategorisiert:

- Bei der grünen Kategorie ist die hydraulische Leistungsfähigkeit bei vorgegebener Auslastung für beide Werte der Spanne ausreichend.
- Bei der gelben Kategorie ist die hydraulische Leistungsfähigkeit für den unteren Wert der Spanne ausreichend, für den oberen Wert jedoch nicht mehr.
- Bei der roten Kategorie ist die hydraulische Leistungsfähigkeit des Durchlassquerschnittes für beide Werte nicht mehr ausreichend.

Kann das Einzugsgebiet grob abgeschätzt werden und liegt der Durchlass in der grünen Kategorie, ist die Wahl eines dieser Querschnitte im Sinne einer Erstabschätzung denkbar.

Für die gelbe und rote Kategorie wären wiederum gesonderte Betrachtungen notwendig (siehe Kapitel 8.3).

Ist die Größe und Lage des Einzugsgebietes näher bekannt, können auch die Abflussspende Hq_{100} der Tabelle 38 direkt zur Erstabschätzung herangezogen und der Abfluss berechnet werden.

Eine allgemeine flächendeckende Aussage einer (Rest)Kapazität von Durchlässen mit Fließgewässern bei klimabedingter Erhöhung der Abflüsse ist pauschal nicht möglich und sollte immer objektkonkret erfolgen.

Zur Erstabschätzung der hydraulischen Leistungsfähigkeit könnten die Tabellen und Berechnungen im Anhang 21 herangezogen werden. Weiterhin ermöglichen sie eine schnelle Abschätzung, ob der Durchlass noch ausreichende Kapazitäten aufweist, wenn der Durchlassquerschnitt im Zuge einer Sanierung verkleinert wird bzw. ob durch den Klimawandel und die damit möglicherweise erwarteten Starkregenereignisse höhere Abflüsse abzuleiten sind.

Generell sollte bei unzureichender Datengrundlage für die hydraulische Bemessung vorab die zuständige Behörde nach aktuellen Hochwasserabflüssen und Prognosen angefragt werden. Bei der Wahl der Abflüsse aus Tabelle 38 zur Ersteinschätzung wird eine Abstimmung mit den zuständigen Wasserbehörden empfohlen. Erfahrungen aus zurückliegenden Hochwasserabflüssen am konkreten Standort sollten bei der Bewertung der Daten mit herangezogen werden.

Für die zukünftigen hydraulischen Bemessungen der Durchlässe sollten unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen Aspekten Vorgaben für das nachzuweisende Sicherheitsniveau gemacht werden. Denkbar wären die bereits in Kapitel 8.1.2 gewählten Hochwasserabflüsse mit einer Wiederkehrzeit von 20 bzw. 100 Jahren (HQ_{20} bzw. HQ_{100}). Für bestehende Durchlässe wäre der hydraulische Nachweis z. B. bei einer Sanierung (Instandsetzung vorhandener Durchlässe, keine neue Innenschale) mit einem Hochwasserereignis mit einer Wiederkehrzeit von 20 Jahren HQ_{20} denkbar. Für Durchlassneubauten (hierzu zählt auch eine neue Innenschale) könnten Hochwasserereignisse mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren (HQ_{100} Daten) herangezogen werden.

Durch den Klimawandel bedingte höhere Abflüsse sollten immer für den jeweiligen Durchlass bewertet werden. Eine pauschalierte flächendeckende Aussage ist nicht möglich.

10.2.2 Handlungsempfehlungen für Neubau und Sanierungen

Die bauliche Gestaltung von Durchlassneubauten für Fließgewässer könnte in Anlehnung an die RAS-Ew (2005) erfolgen. Neben den hydraulischen Anforderungen an Durchlässe sind gemäß RAS-Ew (2005) faunistische Querbeziehungen (z. B. die ökologische Durchgängigkeit sowie Bermen z. B. für Fischotter oder Biber) zu beachten. Tendenziell sollten Durchlassneubauten größer als das hydraulische notwendige Maß ausgebildet werden. Eine Ausbildung des Sohlsubstrates von mindestens 10 cm (siehe Anhang 7) kann damit aus hydraulischer Sicht problemlos erfolgen.

Für die bauliche Gestaltung von Durchlässen könnten zukünftig die Hinweise der Tabelle 7 (siehe Kapitel 5.3.2) mit herangezogen werden. Anhang 22 enthält eine Fotodokumentation mit Beispielen für Ausführungsvarianten und Schäden an Durchlässen.

Weitere bauliche Details zur Ausführung von Durchlässen für Fließgewässer, hier vor allem im Ein- und Auslaufbereich, werden u. a. in Dittrich (2007) gegeben. Die wesentlichen Details werden in den nachfolgenden Handlungsempfehlungen mit berücksichtigt.

Neben der eigentlichen hydraulischen Bemessung der Durchlassgröße ist ein großes Augenmerk auf die Gestaltung der Ein- und Auslaufgestaltung zu legen. In Abhängigkeit des anschließenden Abflussquerschnittes sind die Ein- und Ausläufe zu befesti-

gen. Umspülungen und Umströmen sollten verhindert werden. Auch dazu sind in der RAS-Ew (2005) und im Anhang 7 Varianten vorhanden.

Ein großes Problem der Gewährleistung der hydraulischen Kapazität ist die Verklausung¹⁰. Aufgrund der Größe der Einzugsgebiete und der Lage auf den Geländen Dritter ist eine generelle Vermeidung der Verklausung durch Pflege und Beräumung seitens der Bahn nicht realisierbar. Im näheren Umfeld von Durchlässen bis zur Bahngrenze soll eine Lagerung von Rückschnitt vermieden werden. Für den weiteren oberstromigen Verlauf des Gewässers ist der Gewässerunterhaltungspflichtige zuständig. Im Außenbereich beträgt dieser Gewässerrandstreifen gewöhnlich 5 m links und rechts gemessen ab der Böschungsoberkante des Fließquerschnittes.

Die Anordnung eines Rechens im Einlauf- oder/und Auslaufbereich wird nicht empfohlen, da bereits kleinstes Schwemmgut kontinuierlich zurückgehalten wird und zum Zusetzen des Durchlasses und damit zur Minderung der Abflusskapazität führen kann. Ohne Rechen würde das kleine Schwemmgut oft durch den Durchlass hindurchfließen. Bei sehr steilen Zuflüssen, nur bei Starkregen wasserführenden Gewässern und zum Schutz von Bauwerken kann der Einbau eines Rechens allerdings unverzichtbar sein. Der Rechen sollte in diesem Fall vom Bauwerk zurückversetzt angeordnet werden. Eine Um- und Überströmung ist damit weiter gewährleistet. Im Anhang 22 sind Beispiele für Rechenanordnungen enthalten.

Ein entscheidender Punkt bei der Instandhaltung ist die regelmäßige Kontrolle und Beräumung der abgelagerten Sedimente. Die Beräumung sollte regelmäßig bis auf das Maß der geforderten Höhe zur Beibehaltung der ökologischen Durchgängigkeit im Durchlass sowie im direkten Ein- und Auslaufbereich erfolgen.

Generell ist es nicht angedacht, Eisenbahndämme als Deiche zu konzipieren bzw. einen längeren Einstau zuzulassen. Dies betrifft vor allem Bestandsdämme der Eisenbahn. Dementsprechend sind die Durchlässe ausreichend zu dimensionieren. Über einen kurzfristigen Einstau mit definierten Randbedingungen sollte immer im Einzelfall entschieden werden. Separate geotechnische und hydrologische Gutachten müssen objektbezogen erarbeitet werden.

Bei Neubaustrecken sollte es nur bei nachweislich örtlichen Problemen mit der Ableitung des Bahnwassers möglich sein, einen größeren Einstau als im Regelwerk festgeschrieben planmäßig zuzulassen, wenn dafür alle notwendigen Nachweise der Tragfähigkeit (u. a. Geländebruch, Durchsickerung) und der Gebrauchstauglichkeit geführt werden können. Dabei ist sicherzustellen, dass am Erdbauwerk keine nachteiligen Begleiterscheinungen durch einen Einstau (z. B. das Abrutschen von Oberboden im Bereich des Einstaus, Erosion des Oberbodens) entstehen können.

¹⁰ Als Verklausung wird die Reduzierung bzw. das Zusetzen des Abflussquerschnittes des Rohres durch mitgeführtes Totholz bzw. Schwemmgut verstanden.

10.2.3 Zusammenfassung der Empfehlungen

Nachfolgend werden die wesentlichen baulichen Punkte in Anlehnung an Dittrich (2007), Maßnahmen zur Inspektion und Instandhaltung sowie Empfehlungen zur Bewertung der (Rest)Kapazität bei durch den Klimawandel möglicherweise bedingte erhöhte Starkregenereignissen und daraus resultierende höhere Abflüssen bei Durchlässen zusammengefasst:

- Vermeidung von doppelzügigen Durchlässen
- Befestigung von Ein- und Ausläufen besonders bei Fließrichtungswechsel
- Verzicht auf Rechen im Ein- und Auslaufbereich
- Wahl von hydraulisch günstigen Querschnitten des zum Durchlass führenden Gerinnes
- Anordnung eines hydraulisch günstigen Querschnittes des nachfolgenden Gerinnes sowie auf den Durchlassquerschnitt und die im Durchlass entstehende Fließgeschwindigkeit angepasste Form
- Kontrolle und Beräumung der abgelagerten Sedimente nach Hochwasserereignissen
- Genaue Vorgaben für das nachzuweisende Sicherheitsniveau
- Nur im begründeten Ausnahmefall dürfen bestehende Eisenbahndämme im Einzelfall mit geotechnischem und hydrologischem Gutachten als Deiche im Sinne von Hochwasserschutzmaßnahmen ausgelegt werden.
- Retention und Hochwasserrückhalt durch Eisenbahndämme ist im Rahmen von Neubauvorhaben grundsätzlich eine Möglichkeit
- Eine flächendeckende Aussage zur (Rest)Kapazität von Durchlässen bei klimabedingter Erhöhung der Abflüsse ist pauschal nicht möglich.
- Die Abfrage nach aktuellen Hochwasserabflüssen und Prognosen muss bei den zuständigen Behörden erfolgen.
- Eine Erstabschätzung der hydraulischen Leistungsfähigkeit könnte mit den Tabellen im Anhang 21 erfolgen.
- Objektkonkrete Abschätzung der Kapazität bei Sanierung bzw. bei durch den Klimawandel erhöhtem Abfluss möglich
- Die Erfahrungen aus bisherigen Hochwasserereignissen sollten bei der Bewertung mit einfließen.
- Hochwasserabflüsse mit einer Wiederkehrzeit von 20 Jahren für bestehende Durchlässe und von 100 Jahren für Durchlassneubauten denkbar

10.3 Tabellarische Zusammenstellung der Handlungsempfehlungen und Fazit

In Kapitel 10.3.1 werden die zuvor in Kapitel 10.1 erwähnten Handlungsempfehlungen tabellarisch dem Bestand und dem Neubau zugeordnet. Für Durchlässe erfolgt diese Zuordnung der Handlungsempfehlungen des Kapitels 10.2 in Kapitel 10.3.2.

10.3.1 Gleisentwässerung der freien Strecke

In Tabelle 39 ist die Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen für die freie Strecke enthalten.

Tabelle 39: Empfehlungen und mögliche Optionen für die Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke mit Schotteroberbau zur Gewährleistung der Ableitung von durch den Klimawandel möglicherweise erhöhten Starkregenereignissen

Empfehlung / Option	Bestand		Neubau		Hinweise / Verweise
	HEUTE	ZUKÜNFTIG	HEUTE	ZUKÜNFTIG	
Bemessungsregen nach...	REINHOLD	KOSTRA (DWD, 2017) bzw. aktuelle Version der KOSTRA Daten des DWD heranziehen	(REINHOLD) KOSTRA (DWD, 2017)	KOSTRA (aktuelle Version der KOSTRA Daten des DWD heranziehen)	Berücksichtigung ortspezifischer aktueller Daten durch KOSTRA Anhang 5 Abbildung 18 Abbildung 19
Empfohlene Bemessungsregenspende	$r_{15,1}$ $r_{15,0,1}$ ($r_{15,0,01}$)	$r_{15,1}$ $r_{15,0,1}$	$r_{15,1}$ $r_{15,0,1}$ ($r_{15,0,01}$)	$r_{15,1}$ $r_{15,0,1}$	optional z. B. $r_{30,0,1}$
Wahl des Berechnungsmodells	statisches Modell	statisches Modell, dynamisches Modell für Nachrechnung möglich	statisches Modell	statisches Modell, dynamisches Modell	siehe auch Tabelle 6
Wahl des Spitzenabflussbeiwertes	nach Ril 836 (DB Netz AG, 2008)	Anpassung / Abminderung vor allem im Gleisbereich denkbar	nach Ril 836 (DB Netz AG, 2008)	Anpassung / Abminderung vor allem im Gleisbereich denkbar	siehe z. B. Kapitel 7.2.3 und Anhang 12
Pflege und Instandhaltung der Entwässerungsanlagen	wichtige Elemente zur schadlosen Ableitung des Wasser aus dem Gleisbereich Orientierung an den Regularien Ril 836.8001 und 836.8002 (DB Netz AG, 2008) möglich				siehe Abbildung 22 Abbildung 23 Anhang 14
Priorität der Entwässerungsanlagen	Bedeutung von funktionstüchtigen Gleisentwässerungsanlagen sollte stärker bei allen Gewerken und Behörden kommuniziert werden				-
Wahl von offenen Systemen	nur bedingt im Bestand anpassen		einfachere Inspektion und Instandsetzung große Abflusskapazität eines Bahngrabens		siehe Tabelle 21 und Anhang 14
Außeneinzugsgebiete	Kann der Zufluss nicht vermieden werden, Prüfung des flächigen statt konzentrierten Zuflusses (z. B. mit Kaskaden) Bei konzentriertem Zufluss		Nach Möglichkeit die Einleitung von Wasser aus Außeneinzugsgebieten vermeiden Abfanggraben an Böschungsschulter und direkte Einleitung		Unterschiede mit und ohne Außeneinzugsgebiet Anhang 15 und

Empfehlung / Option	Bestand		Neubau		Hinweise / Verweise
	HEUTE	ZUKÜNFTIG	HEUTE	ZUKÜNFTIG	
	sollten bauliche Vorkehrungen am Gleis zum Schutz vor Verschlammung und Überflutung erfolgen.		in Vorflut		Abbildung 25 Abbildung 26
Wahl der Streckeneinstufung (SE) I, II und III	Zulässiger Einstau gemäß Regelwerk (DB Netz AG, 2008) definiert	Erhöhung der Abflusskapazität bei SE II und III durch Zulassen eines kurzzeitigen Einstaus in den Oberbau bis SE I empfohlen	Zulässiger Einstau gemäß Regelwerk (DB Netz AG, 2008) definiert	Erhöhung der Abflusskapazität bei SE II und III durch Zulassen eines kurzzeitigen Einstaus in den Oberbau bis SE I empfohlen	Zulässiger Einstau in Anhang 13 Bemessung in Anhang 15
Angabe des Bemessungsregens als Starkregenindex	-	-	Optionale Einführung dieser Darstellung könnte geprüft werden.		SRI siehe Anhang 20
Retention des Sickerkörpers (SRI)	Retentionsraum sollte immer als Reserve für Starkregenereignisse dienen. Bei schwierigen oder beengten Randbedingungen sollte die Möglichkeit bestehen, diese Reserve teilweise bzw. ganz nutzen zu können.				Retentionsvermögen / äquivalenter Abfluss in Tabelle 17
Wahl der Längen bis zur Vorflut	im Bestand kaum änderbar Kontrolle der hydraulischen Durchgängigkeit bis Einleitbereich		Abschläge bzw. Ableitungen zur Vorflut von 250 m bis 350 m Streckenlänge könnten als Anhaltspunkt dienen		-
Planung von größeren Gräben	im Bestand kaum änderbar		Schaffung zusätzlicher Retentionsflächen durch größere Gräben ohne Hebeanlagen sollte überlegt werden		

Insgesamt sind die Entwässerungseinrichtungen der freien Strecke mit dem Fließzeitverfahren auch für durch den Klimawandel größere Starkregenereignisse ausreichend dimensioniert. Voraussetzung dafür sind eine instandgehaltene Entwässerungsanlage und übliche Entwässerungslängen.

10.3.2 Durchlässe mit Fließgewässern

In Tabelle 40 ist die Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen für Durchlässe mit Fließgewässern enthalten.

Tabelle 40: Empfehlungen und Optionen für Durchlässe mit Fließgewässern zur Gewährleistung der Ableitung von durch den Klimawandel erhöhten Hochwasserabflüssen

Empfehlung / Option	Bestand		Neubau		Hinweise / Verweise
	heute	zukünftig	heute	zukünftig	
Flächendeckende allgemeine Bewertung	Flächendeckende Bewertung ist bei Durchlässen nicht möglich. Die Einzelnachweise in Kapitel 8 sind jeweils standortkonkret zu ermitteln und zu bewerten.				Kapitel 8
Wahl des Hochwasserereignisses zum Nachweis der hydraulischen Leistungsfähigkeit	Nachweis für ein HQ ₂₀ , Erfahrungen aus Hochwasserabflüssen der Vergangenheit heranziehen	Nachweis für ein HQ ₂₀ , ggf. HQ ₁₀₀ Prüfung und Wertung eines 30 % bis 50 % höheren Wertes	Nachweis für ein HQ ₂₀ , ggf. HQ ₁₀₀ Prüfung und Wertung eines 30 % bis 50 % höheren Wertes	Nachweis für ein HQ ₁₀₀ Prüfung und Wertung eines 30 % bis 50 % höheren Wertes	Zuständige Behörden einbeziehen
Allgemeine Datengrundlage zur Bestimmung HQ _(T)	Erstabschätzung durch Tabellen	Vorrang sollte immer Abfrage bei Behörden haben. Erstabschätzung durch Tabellen	Vorrangig Nachfrage bei den zuständigen Behörden, ob gebietskonkrete Hochwasserwerte vorliegen.		Tabelle 38 Anhang 21 Erfahrungen aus bisherigen Hochwasserereignissen sollten bei der Bewertung mit einfließen
Online vorhandene Datengrundlage zur Bestimmung des HQ _(T) z. B. für das Bundesland Sachsen	Online-Tool LfULG (2019)	Online-Tool des LfULG (immer aktuellste Datengrundlage)	Online-Tool LfULG (2019)	Online-Tool LfULG (immer aktuellste Datengrundlage)	Beispielhaft an fünf Durchlässen in Kapitel 8
Vorgehensweise bei der Nachweisführung	Exemplarische Nachweise wurden für fünf Durchlässe innerhalb von Sachsen anhand des Ablaufschemas durchgeführt. Diese Vorgehensweise könnte bei entsprechender Anpassung der Online-Portale auch in anderen Bundesländern zur Anwendung kommen.				Ablaufschema Anhang 9
Faunistische Querbeziehung und ökologische Durchgängigkeit	-	bei Sanierung sollten diese Einflussfaktoren mit bewertet werden	wird z. T. berücksichtigt	sollte generell bei Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit mit berücksichtigt werden	-
bauliche Durchbildung	Bauliche Details zur Gestaltung der Durchlässe können den Kapitel 10.2.2 und 10.2.3 entnommen werden.				

Eine allgemeine flächendeckende Aussage einer (Rest)Kapazität von Durchlässen für Fließgewässer bei klimabedingter Erhöhung der Abflüsse ist pauschal nicht möglich und muss objektkonkret erfolgen.

10.4 Ausblick und weiterführende Hinweise

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Entwässerungsanlagen der Kategorie 1 und 2 (siehe Abbildung 12 sowie Anhang 10 und Anhang 11) und deren hydraulische Bemessung im Hinblick auf den Klimawandel betrachtet. Es wurde aufgezeigt, dass vor allem bei der Gleisentwässerung der Strecke eine Ableitung von Starkregenereignissen möglich ist (siehe Kapitel 7, Kapitel 9 und Kapitel 10.1). Wesentliche Bestandteile dabei sind die regelmäßigen Inspektionen und Instandhaltungsmaßnahmen. Für Durchlässe wurden beispielhafte hydraulische Nachweise durchgeführt und eine mögliche Herangehensweise zur Erstabschätzung des hydraulischen Nachweises beschrieben (siehe Kapitel 8 und Kapitel 10.2).

Einige Spezialfälle sind gesondert und teilweise objektkonkret zu betrachten und können bei der Regelbemessung und Bewertung im Hinblick auf den Klimawandel nicht mit berücksichtigt werden. Sie sind nicht Gegenstand dieses Forschungsberichtes:

- ein Oberflächenabfluss bei z. B. jährlichen oder 10-jährlichen Regenereignissen und gefrorenem Boden (Winterhochwasser),
- ein Oberflächenabfluss während der Schneeschmelze sowie
- Oberflächenabflüsse und Bodenaustrag von landwirtschaftlich genutzten Flächen vor allem im Frühjahr kurz nach der Ansaat bzw. im Herbst nach der Ernte.
Durch die Aufnahme von Ackerboden und in ihm gespeichertes Wasser kann es zu Murgängen und einer deutlichen Erhöhung der Abflussbeiwerte kommen. Durch den Klimawandel, die daraus resultierenden längeren Trockenperioden in Verbindung mit der Starkregenzunahme ist eine Zunahme von solchen Murgängen wahrscheinlich.

Es erfolgte bis auf das Fallbeispiel die Bewertung der Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke anhand der zurzeit üblichen Bemessungsregenspenden mit einer Dauer von 15 Minuten. Ungünstige Ereignissequenzen wurden nicht betrachtet und müssten standortbezogen überprüft werden.

Neben den Kategorien 1 (Gleisentwässerung freie Strecke) und 2 (Durchlässe) wurden vier weitere Kategorien in diesem Bericht herausgearbeitet (siehe Abbildung 12). Diese werden nachfolgend nochmals angeführt:

- Kategorie 3 – Vorflut / Rückhaltung freie Strecke
- Kategorie 4 – Entwässerung von Bahnhofsanlagen / Haltepunkten
- Kategorie 5 – Entwässerungsbereiche mit besonderen Randbedingungen
- Kategorie 6 – Anlagen, bei den Schäden durch Oberflächenabfluss aufgetreten sind

Für diese Kategorien sollte ebenfalls eine Bewertung der Anlagen und die Erarbeitung von Handlungsempfehlungen in Anlehnung an diesen Forschungsbericht durchgeführt werden.

Im Hinblick auf die Bearbeitung bzw. Bewertung der Kategorie 6 ist eine Recherche, Zusammenstellung und Auswertung von Strecken mit aufgetretenen Schadensereignissen nach Starkregenereignissen denkbar. Hier wäre vor allem herauszuarbeiten, warum es zu den einzelnen Schäden kam. Die Ursachen dafür können unterschiedlich sein:

- Einleitung von Oberflächenabflüssen Dritter,
- die Anlagen waren ausreichend bemessen, aber nicht instandgehalten,
- der Schaden lag an einer Strecke, die aufgrund der Historie und der Topografie nicht als Regelquerschnitt ausgebildet werden konnte,
- u.v.m.

Für das Beispiel an der realen Strecke in Weinböhlä könnte eine Kalibrierung der Modellparameter anhand der Abflüsse bei Starkregenereignissen erfolgen, da alle zum Zeitpunkt der Bearbeitung des Abschlussberichtes vorliegenden Regendaten keine relevanten Abflüsse ergaben.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Übersicht der Bahnanlagen (Göbel & Lieberenz, 2013).....	18
Abbildung 2:	Übersicht der Elemente des Bahnkörpers (Göbel & Lieberenz, 2013).....	18
Abbildung 3:	Übersicht der geotechnischen Bauwerke (Göbel & Lieberenz, 2013).....	19
Abbildung 4:	Erscheinungsformen des Wassers am Bahnkörper, in Anlehnung an DB Netz AG (2008).....	28
Abbildung 5	Aktuelle Geometrie einschließlich der einzelnen im Gleis stattfindenden Prozesse bei der Oberflächenwasserableitung	30
Abbildung 6	Anzahl der Durchlässe der PD Dresden, bezogen auf die Geometrie (Gesamtzahl: 1.152)	37
Abbildung 7	Anzahl der Rohrdurchlässe der PD Dresden, bezogen auf den Durchmesser (Gesamtzahl: 554).....	38
Abbildung 8	Anzahl der Plattendurchlässe der PD Dresden, bezogen auf die lichte Weite (Gesamtzahl 387).....	38
Abbildung 9	Anzahl der Durchlässe der PD Magdeburg, bezogen auf die Geometrie (Gesamtzahl: 1.066)	39
Abbildung 10	Anzahl der Rohrdurchlässe der PD Magdeburg, bezogen auf den Durchmesser (Gesamtzahl: 611)	39
Abbildung 11	Anzahl der Plattendurchlässe der PD Magdeburg, bezogen auf die lichte Weite (Gesamtzahl 175).....	40
Abbildung 12	Kategorisierung der Entwässerungsanlagen aus hydraulischer Sicht	43
Abbildung 13	Prinzipskizze des Regelquerschnittes einschließlich der Darstellung der Oberflächenwasserableitung (blau)	46
Abbildung 14	Schematischer Verlauf der Abflussbildung in der Natur für durchlässige Flächen, in Anlehnung an Höntsch (2003), ergänzt.....	47
Abbildung 15	Schematische Aufteilung des Regelquerschnittes auf die zur exemplarischen Berechnung verwendeten Programme.....	48
Abbildung 16	Beispielhafte Abflussganglinien der 4 Parametersätze für die Niederschlagsverteilung nach Euler 1 und Vergleich zum	

	Blockregen für ein Regenereignis $r_{15, 0,1}$ und eine Einzugsfläche von 1 ha 49	49
Abbildung 17	Änderung der Spitzenabflussbeiwerte der 4 Parametersätze bei unterschiedlichen Wiederkehrzeiten 50	50
Abbildung 18	Überblick über die 15minütigen Bemessungsregenspenden r_{15} im Verlauf der Zeit für Dresden, für die Wiederkehrzeiten von 1 Jahr (1 a^{-1}), 10 Jahren ($0,1 \text{ a}^{-1}$), 20 Jahren ($0,05 \text{ a}^{-1}$) und 100 Jahren ($0,01 \text{ a}^{-1}$) 55	55
Abbildung 19	Überblick über die 15minütigen Bemessungsregenspenden r_{15} 2019 bezogen auf die Ril 836 (2008) sowie als Ausblick im Jahr 2040 mit 30% und 50% Erhöhung bezogen auf das Jahr 2019. Es werden Wiederkehrzeiten von 1 Jahr (1 a^{-1}), 10 Jahren ($0,1 \text{ a}^{-1}$), 20 Jahren ($0,05 \text{ a}^{-1}$) und 100 Jahren ($0,01 \text{ a}^{-1}$) dargestellt 55	55
Abbildung 20	Bemessungsabfluss (l/s) für das Gleis und die Böschung ohne Außeneinzugsgebiet für 100 m Strecke für ein 15minütiges Regenereignis mit Wiederkehrzeiten von 1 Jahr (1 a^{-1}), 10 Jahren ($0,1 \text{ a}^{-1}$), 20 Jahren ($0,05 \text{ a}^{-1}$) und 100 Jahren ($0,01 \text{ a}^{-1}$) 57	57
Abbildung 21	Bemessungsabfluss (l/s) für das Gleis und die Böschung mit Außeneinzugsgebiet für 100 m Strecke für ein 15minütiges Regenereignis mit Wiederkehrzeiten von 1 Jahr (1 a^{-1}), 10 Jahren ($0,1 \text{ a}^{-1}$), 20 Jahren ($0,05 \text{ a}^{-1}$) und 100 Jahren ($0,01 \text{ a}^{-1}$) 58	58
Abbildung 22	Abflusskapazität (l/s) des Bahngrabens $Q_{K,Graben}$ bei Vollenfüllung (40 cm Wasserstandshöhe, entspricht der Streckeneinstufung I) in Abhängigkeit des Gefälles und unterschiedlicher verschiedener Rauigkeitsbeiwerte 60	60
Abbildung 23	Abflusskapazität (l/s) des Bahngrabens $Q_{K,Graben}$ unter Berücksichtigung verschiedener Rauigkeitsbeiwerte für ein Sohlgefälle $I = 1\%$ sowie die zulässigen Wasserstände im Bahngraben für die Streckeneinstufungen (SE) I, II und III 61	61
Abbildung 24	Bemessungsabfluss (l/s) ohne Außeneinzugsgebiet für 100 m Länge – im Vergleich mit und ohne Ansatz des Retentionsvermögens eines Sickerkörpers der Tiefenentwässerung für ein 15minütiges Regenereignis mit Wiederkehrzeiten von 1 Jahr (1 a^{-1}), 10 Jahren ($0,1 \text{ a}^{-1}$), 20 Jahren ($0,05 \text{ a}^{-1}$) und 100 Jahren ($0,01 \text{ a}^{-1}$) 63	63
Abbildung 25	Bemessungsabfluss (l/s) mit Außeneinzugsgebiet für 100 m Länge – im Vergleich mit und ohne Ansatz des Retentionsvermögens eines Sickerkörpers der	

	Tiefenentwässerung für ein 15minütiges Regenereignis mit Wiederkehrzeiten von 1 Jahr (1 a^{-1}), 10 Jahren ($0,1 \text{ a}^{-1}$), 20 Jahren ($0,05 \text{ a}^{-1}$) und 100 Jahren ($0,01 \text{ a}^{-1}$).	64
Abbildung 26	Vergleichende Darstellung des Bemessungsabflusses und der Abflusskapazität des Bahngrabens für unterschiedliche Streckeneinstufungen, ohne Außeneinzugsgebiet, Streckenlänge 100 m, Sohlgefälle 1 %.....	67
Abbildung 27	Vergleichende Darstellung des Bemessungsabflusses und der Abflusskapazität des Bahngrabens für unterschiedliche Streckeneinstufungen mit Außeneinzugsgebiet, Streckenlänge 100 m, Sohlgefälle 1 %.....	68
Abbildung 28	Überblick der verwendeten Regenereignisse. Einheitliche Darstellung der Niederschlagsmengen in mm pro 5minütigem Intervall	79
Abbildung 29	Maximalabflüsse für alle Haltungen für das statische und das dynamische Modell	85
Abbildung 30	Blockabfluss des statischen Modells und Abflussganglinie des dynamischen Modells am Beispiel der Haltung H6	86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Meilensteine der Entwicklung der Entwässerungsanlagen, Normen und Regelwerke.....	20
Tabelle 2:	Übersicht der weiterführenden Publikationen und Untersuchungen	22
Tabelle 3:	Aktuelle Normen und Regelwerke	24
Tabelle 4:	Zusammenfassung der Normen, die zur Parameterstudie herangezogen wurden	27
Tabelle 5:	Berechnungseingangswerte der hydraulischen Bemessung – aktuelle Normen und Regelwerke.....	31
Tabelle 6:	Vergleich von statischen und dynamischen Bemessungsansätzen (aus Höntsch, 2003).	34
Tabelle 7:	Übersicht zu Mindestnennweiten von Durchlässen.....	40
Tabelle 8:	Hydraulische Bemessung von Durchlässen – Übersicht über zu berücksichtigende Einzugsflächen und Berechnungsverfahren (RAS-Ew, 2005).....	41
Tabelle 9:	Eingangsparameter für die Berechnungen mit HYSTEM-EXTRAN	48
Tabelle 10:	Verhältnis zwischen dem Spitzenabflussbeiwert, berechnet mit dem dynamischen Modell, und dem Spitzenabflussbeiwert von $\Psi_s = 0,3$ für das statische Modell.....	51
Tabelle 11:	Bemessungsregenspenden $r_{15,n}$ für Dresden [l/(s·ha)]. Die Regenhäufigkeit für die Zukunft (2040) ergibt sich unter der Annahme der prozentualen Zunahme der Bemessungsregenspende auf Basis der derzeitigen Werte des KOSTRA-DWD 2010R (DWD, 2017)	54
Tabelle 12:	Niederschlagshöhen für Dresden [mm]. Die Niederschlagshöhe für die Zukunft (2040) ergibt sich unter der Annahme der prozentualen Zunahme der Bemessungsregenspende auf Basis der derzeitigen Werte des KOSTRA-DWD 2010R (DWD, 2017)	54
Tabelle 13:	Zuordnung der Spitzenabflussbeiwerte Ψ_s zur jeweiligen Einzugsfläche A_E und die daraus ermittelte undurchlässige Fläche A_U bezogen auf eine Streckenlänge von 100 m	56
Tabelle 14:	Streckeneinstufung, Zulässige Einstauhöhe für ein $r_{15, 0,1}$ (DB Netz AG, 2008) und zulässiger Wasserstand im Bahngraben.....	59

Tabelle 15:	Gerinnerauigkeit (Manning/Strickler-Beiwert – k_{St}) für einen Bahngraben, gemäß Bollrich (2007), Göbel & Lieberenz (2013) bzw. DB Netz AG (2008)	60
Tabelle 16:	Abflusskapazität (l/s) einer Tiefenentwässerung ($k = 0,4$ mm) in Abhängigkeit des Gefälles und unterschiedlichen Rohrinnendurchmessern	62
Tabelle 17:	Retentionsvermögen des Sickerkörpers bezogen auf 100 m Länge	63
Tabelle 18:	Prozentualer Bemessungsabfluss für ein 15minütiges Regenereignis unterschiedlicher Regenhäufigkeiten n bei Berücksichtigung des Sickerkörpers als Retentionsraum – ohne Außeneinzugsgebiet	64
Tabelle 19:	Prozentualer Bemessungsabfluss für ein 15minütiges Regenereignis unterschiedlicher Regenhäufigkeiten n bei Berücksichtigung des Sickerkörpers als Retentionsraum – mit Außeneinzugsgebiet	65
Tabelle 20:	Randbedingungen zur Berechnung der Gesamtkapazität von Gleisentwässerungen	65
Tabelle 21:	Zusammenfassung der Gesamtkapazität (l/s) der Entwässerungsanlagen, bezogen auf die Streckeneinstufungen	66
Tabelle 22:	Gebietskenngrößen, Abflussspenden und Abflüsse der fünf zu untersuchenden Gewässer, gemäß LfULG (2019).....	70
Tabelle 23:	Bemessungsrelevante Abflüsse für die Durchlässe für das Jahr 2019.....	71
Tabelle 24:	Bemessungsrelevante Abflüsse für die Durchlässe – 30% Erhöhung bis zum Jahr 2040	71
Tabelle 25:	Bemessungsrelevante Abflüsse für die Durchlässe – 50% Erhöhung bis zum Jahr 2040	72
Tabelle 26:	Auslastung des Durchlasses für das Gewässer „Lossa“ im Bezugsjahr 2019 und 2040 mit 30 % und 50 % Erhöhung	73
Tabelle 27:	Auslastung des Durchlasses für das Gewässer „Merkwitzer Wasser“ im Bezugsjahr 2019 und 2040 mit 30 % und 50 % Erhöhung.....	73
Tabelle 28:	Auslastung des Durchlasses für das Gewässer „Grenzgraben“ im Bezugsjahr 2019 und 2040 mit 30 % und 50 % Erhöhung	73

Tabelle 29:	Auslastung des Durchlasses für das Gewässer „Pechwasser“ im Bezugsjahr 2019 und 2040 mit 30 % und 50 % Erhöhung	74
Tabelle 30:	Auslastung des Durchlasses für das Gewässer „Rotes Wasser“ im Bezugsjahr 2019 und 2040 mit 30 % und 50 % Erhöhung.	74
Tabelle 31:	Kriterium zur Auswahl des Streckenbeispiels	77
Tabelle 32:	Auflistung der wichtigsten Daten der einzelnen Regenereignisse	78
Tabelle 33:	Regenspenden und Niederschlagshöhen für den Standort Weinböhl.....	80
Tabelle 34:	Vergleich der Auslastung der Haltungen bei Regenereignissen mit 10 und 100 jährlicher Wiederkehrzeit für Regenspenden nach REINHOLD und KOSTRA	81
Tabelle 35:	Eingangsparameter für die dynamischen Berechnungen.....	83
Tabelle 36:	Auf die Profilhöhen bezogene Auslastungsgrade der einzelnen Haltungen in [%] für die unterschiedlichen Regenereignisse, am Beginn der Haltung (1), am Ende der Haltung (2) und als Mittelwert (3)	84
Tabelle 37:	Zusammenfassung der Niederschlagshöhen und -volumen, Abflussvolumen und des daraus resultierenden mittleren Abflussbeiwerts	84
Tabelle 38:	Mittlere Hochwasserabflusssspende MHq gemäß Anhang 8, abgeschätzte Abflusssspende Hq ₁₀₀ und auf drei verschiedene Einzugsgrößen bezogener Abfluss HQ ₁₀₀	95
Tabelle 39:	Empfehlungen und mögliche Optionen für die Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke mit Schotteroberbau zur Gewährleistung der Ableitung von durch den Klimawandel möglicherweise erhöhten Starkregenereignissen	99
Tabelle 40:	Empfehlungen und Optionen für Durchlässe mit Fließgewässern zur Gewährleistung der Ableitung von durch den Klimawandel erhöhten Hochwasserabflüssen.....	101

Quellenverzeichnis

Ahlers, C. (2019): Dr. Köhler & Dr. Pommerening GmbH, Daten des Niederschlagsmessers für den Standort Weinböhma im Zeitraum 10/2018 bis 05/2019, Übergabe per E-Mail am 10.05.2019

Aigner, D.; Bollrich, G. (2015): Handbuch der Hydraulik für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 1. Auflage, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Albert, A. (Hrsg.) (2014): Schneider – Bautabellen für Ingenieure, 21. Auflage, Köln: Bundesanzeiger Verlag.

Below et al. (2008): Below, M.; Fischer, R.; Hetzel, G.; Ahlers, C.; Pommerening, J.: Ergebnisse der Untersuchungen zum Abflussverhalten von Niederschlägen in Gleisanlagen, Eisenbahningenieurkalender EIK, 2008, 301 – 317.

Blum et al. (1897): Blum, von Borries, Barkhausen: Die Eisenbahn-Technik der Gegenwart: Der Eisenbahnbau der Gegenwart, Band 2, Wiesbaden: C. W. Kreidel´s Verlag.

Bollrich, G. (2007): Technische Hydromechanik, Band 1 – Grundlagen, 6. Auflage, Berlin: Huss-Medien GmbH, Verlag Bauwesen.

Chilian, G.; Lieberenz, K. (1978): DR – Lehrbriefe für das Fachschul-Fernstudium, Oberbau- Ingenieurschule für Verkehrstechnik Dresden

DB (1957): Richtlinie 836 – Richtlinien für die Entwässerung und Festigung der Erdbauten (Erdbaurichtlinien), München

DB (1979): DS 836/2 – Vorläufige Richtlinien für die Planung und Erstellung der Erdbauwerke von Strecken mit Geschwindigkeiten über 160 km/h, Heft 2 der DS 836 Erdbaurichtlinien.

DB (1985): DS 836 – Vorschrift für Erdbauwerke (VE), Karlsruhe.

DB Netz AG (1999): Richtlinie 836 – Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten.

Ril 836 Modul 0801 – Entwässerungsanlagen, Grundsätze

DB Netz AG (2008): Richtlinie 836 – Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten, Fassung vom 20.12.1999 mit 1. Aktualisierung vom 01.10.2008.

Ril 836 Modul4601 – Entwässerungsanlagen, Grundsätze

4602 – Streckenentwässerung

4603 – Sonstige Entwässerungsanlagen

DB Netz AG (2014): Richtlinie 836 – Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten, Fassung vom 20.12.1999 mit 4. Aktualisierung vom 01.03.2014.

DB Netz AG (2019): Durchflussdaten für 5 Standorte der Studie zur Qualität des Abflusses aus der Gleisentwässerung, übergeben per E-Mail durch Herrn Herold am 27.02.2019.

DB Netz AG (2019a): Lagepläne, Querprofile und Fotos zu einem Standort der Studie zur Qualität des Abflusses aus der Gleisentwässerung in Weinböhma, übergeben per E-Mail durch Herrn Herold am 10.05.2019.

DIN 19661-1 (1998): Wasserbauwerke – Teil 1: Kreuzungsbauwerke , Durchleitungs- und Mündungsbauwerke, Berlin: Beuth Verlag.

- DIN EN 752** (2008): Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden; Deutsche Fassung EN 752:2008, Berlin: Beuth Verlag.
- Dittrich, V.** (2007): Folgen des Klimawandels – Müssen Straßenentwässerungseinrichtungen neu bemessen werden? Straße und Autobahn, Special Straßenentwässerung, 12, 2007, 696 – 700.
- DR** (1975): TGL 24 756/07 – Fachbereichsstandard Eisenbahnunterbau – Besondere Anlagen und Sonderfälle der Entwässerung, Wissenschaftlich–Technisches Zentrum DDR.
- DR** (1976): EVDR Automatisierte Projektierung – Zentrale Erneuerung und Wiederaufbau 2. Gleise – Richtlinie Tiefenentwässerung, Teil 1a, 2. Fassung, Berlin.
- DR** (1979): EVDR–FE Automatisierte Projektierung – Zentrale Oberbauerneuerung und Bau 2. Gleise – Richtlinie Tiefenentwässerung, Teil 1b, 1. Fassung, Berlin.
- DR** (1979): EVDR–FE Automatisierte Projektierung – Zentrale Oberbauerneuerung und Wiederaufbau 2. Gleise – Richtlinie Tiefenentwässerung, Teil 2, 1. Fassung, Berlin.
- DR** (1988): Richtlinie – Tiefenentwässerung DR–A 2014, Ministerium für Verkehrswesen – Hauptverwaltung der Bahnanlagen der Deutschen Reichsbahn.
- DR** (1990): Entwurf TGL 24 756/04 – Fachbereichsstandard Eisenbahnunterbau – Entwässerung Grundlage, Wissenschaftlich–Technisches Zentrum DDR.
- DR** (1990): Entwurf TGL 24 756/05 – Fachbereichsstandard Eisenbahnunterbau – Entwässerung Bahngräben, Vorflutanlagen, Wissenschaftlich–Technisches Zentrum DDR.
- DR** (1990): Entwurf TGL 24 756/06 – Fachbereichsstandard Eisenbahnunterbau – Entwässerung Tiefenentwässerung, Wissenschaftlich–Technisches Zentrum DDR.
- DR** (1991): Ausführungsbestimmungen (ABest) zur Vorschrift für Erdbauwerke (VE), ABest zur DS836, Gültig ab 01.07.1991, Berlin: Drucksachenverlag.
- DR** (1993) : Ausführungsbestimmungen (ABest) zur Vorschrift für Erdbauwerke (VE), ABest zur DS 836, Gültig ab 01.03.1993 , Berlin: Drucksachenverlag.
- DVWK** (1982): Katalog von Übertragungsfunktionen; Materialien für die Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag–Abfluss–Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil III, Bonn.
- DVWK** (1988): Katalog von Übertragungsfunktionen; Materialien für die Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag–Abfluss–Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Ergänzungsband zum Katalog 1982 Teil III, Bonn.
- DVWK** (1990): Regeln zur Wasserwirtschaft; Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag–Abfluss–Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Heft 113/1984, 2. durchgesehene Auflage, Bonn (Hamburg und Berlin): Kommissionsvertrieb Paul Parey.
- DWA–A 138** (2005): Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser, Arbeitsblatt, Hennef.
- DWA–A 118** (2006): Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen, Arbeitsblatt, Hennef.
- DWA–A 110** (2006): Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Abwasserleitungen und –kanälen, Arbeitsblatt, Hennef.
- DWA–M 153** (2007): Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser, Merkblatt, Hennef.

DWA-M 552 (2012): Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, Merkblatt, Hennef.

DWA-A 117 (2013): Bemessung von Rückhalteräumen, Arbeitsblatt, Hennef.

DWA-M 119 (2016): Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen, Merkblatt, Hennef.

DWA-A 531 (2017): Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer, Merkblatt, Hennef.

DWD (2017): Junghänel, T.; Ertel, H.; Deutschländer, T. KOSTRA-DWD-2010R – Bericht zur Revision der koordinierten Starkregenregionalisierung und –auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main.

DWD (2019): Deutscher Klimaatlas [online]
https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html [14.03.2019].

DWD (2019a): KOSTRA-DWD [online]
https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/kostra_dwd_rasterwerte.html [20.03.2019].

DWD (2019b): Niederschlagsdaten der Stationen Dresden-Klotzsche, Garsebach bei Meißen und Heyda bei Riesa am 05.07.2012 und 08.07.2014, Übergabe per E-Mail am 16.05.2019 durch den Deutschen Wetterdienst, Abteilung KU4 – Hydrometeorologie, Referat KU41 – Hydrometeorologische Beratungsleistungen

EBA (2018): Eisenbahnbundesamt, Untersuchung der Regelwerke für den Bahnbetrieb auf Schwachstellen hinsichtlich des zu erwartenden Klimawandels, Los 1 – Infrastruktur – EBA Forschungsbericht 2018-08a.

GEO++® (2019): Online-Tool zur bahnstreckenbezogenen Kilometrierungsanzeige ,
http://db.geopp.de/gnrailnav_servlet/GNOpenLayersV3.

GK 50 (1994): Geologische Karte der eiszeitlichen bedeckten Gebiete von Sachsen, Blatt 2668 „Dresden“, M 1:50.000, 1. Auflage, Freiberg, Landesvermessungsamt Sachsen.

Göbel, C.; Richter, F. (1988): Eisenbahnunterbau, 1. Auflage, transpress VEB Verlag für Verkehrswesen.

Göbel, C.; Lieberenz, K.; Richter, F. (1996): Der Eisenbahnunterbau – DB-Fachbuch; Band 8/20; Heidelberg/ Mainz: Eisenbahn-Fachverlag.

Göbel, C.; Lieberenz, K. (2004): Handbuch Erdbauwerke der Bahnen, 1. Auflage, Hamburg: Eurailpress.

Göbel, C.; Lieberenz, K. (Hrsg.)(2013): Handbuch Erdbauwerke der Bahnen, 2. Auflage, Hamburg: Eurailpress.

Höntsche, J. (2003): Untersuchungen zur Bahngleis entwässerung auf Grundlage der Richtlinie 836 der Deutschen Bahn Netz AG, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.

Lattermann, E. (2004): Wasserbaupraxis mit Berechnungsbeispielen, Band 1, 2. Auflage, Dresden: Bauwerk Verlag GmbH.

LfULG (2011): Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Flächenhafte Bestimmung von Hochwasserspenden – Schlussbericht 2010, Schriftenreihe des LfULG , Heft 3/2012.– Dresden.

- LfULG** (2018): Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Durchflusskennwerte und Querbauwerke, Vorläufige Version – Oktober 2018, Eigenverlag des LfULG, www.smul.sachsen.de/lfulg.– Dresden.
- LfULG** (2019): Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, HQ(T) und MHQ sächsischer Fließgewässer (Stand: 2015), <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/infosysteme/mnqhq-regio/website/>
- MFV** (1985): TGL 12 098/01, Anlagen des Straßenwesens, Entwässerung von Straßen, Abflussermittlung, hydraulische Bemessung: Berlin.
- MFV** (1985): TGL 12 098/02, Anlagen des Straßenwesens, Oberflächenentwässerung: Berlin.
- MFV** (1985): TGL 12 098/03, Anlagen des Straßenwesens, Untergrundentwässerung: Berlin.
- MFV** (1985): TGL 12 098/03, Anlagen des Straßenwesens, Gräben, Regenwasserleitungen und Versickerungsanlagen: Berlin.
- ORE** (1979): Forschungs- und Versuchsamt des Internationalen Eisenbahnverbandes – Verhalten der Tragschichten des Gleises und des Bodens unter dem Einfluss von Niederschlägen, Bericht Nr. 13, Utrecht.
- RAS-Ew** (1987): Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil Entwässerung, Heft 539, Köln: FGSV Verlag.
- RAS-Ew** (2005): Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil Entwässerung, Heft 539, Köln: FGSV Verlag.
- Reichsverkehrsministerium** (1938): 100 Jahre Deutsche Eisenbahnen: Jubiläumsschrift zum hundertjährigen Bestehen der deutschen Eisenbahn, 2. neu überarbeitete und ergänzte Auflage, Berlin.
- Schmitt, T. G.** (2015): Weiterentwicklung des Starkregenindex zur Verwendung in der kommunalen Überflutungsvorsorge, *gwf Wasser/Abwasser* 2015, 7–8, 774 – 781.
- Schröder, W.** (HRSG.) (1999): Grundlagen des Wasserbaus, 4. Auflage, Düsseldorf: Werner Verlag.
- Technische Normen, Gütervorschriften und Lieferbedingungen** (1975): TGL 24737 – Bestimmung des Bemessungshochwassers für Hydromelioration.
- UIC Kodex 719 E** (1994): Erdbauwerke und Tragschichten für Eisenbahnstrecken, 2. Ausgabe, Internationaler Eisenbahnverband.
- Vischer, D.; Huber, A.** (1993): Wasserbau, 5. Auflage, Berlin Heidelberg, Springer-Lehrbuch.
- Werisch, S.; Grischek, T.** (2018): Wasserwirtschaftlich relevante Änderungen durch den Klimawandel – Aktuelles für die Elbe, *energie wasser praxis* 12, 52–59.

Verzeichnis der Anhänge

- Anhang 1 Bauliche Anlagen – Strecke
- Anhang 2 Regenhäufigkeiten n und Regendauer D
- Anhang 3 Spitzenabflussbeiwerte und Versickerraten
- Anhang 4 Basisregenspenden
- Anhang 5 Vergleich der Regenspenden nach REINHOLD vs. KOSTRA–DWD R
- Anhang 6 KOSTRA–DWD 2010 R
- Anhang 7 Bauliche Anlagen – Durchlässe
- Anhang 8 Schätzwerte für Abflussspenden
- Anhang 9 Ablaufschema zur hydraulischen Bemessung der Durchlässe
- Anhang 10 Gliederung der Entwässerungsanlagen
- Anhang 11 Kategorisierung der Entwässerungsanlagen
- Anhang 12 Simulation des Wassertransports im Gleiskörper mit dem Programm HYDRUS 2D/3D
- Anhang 13 Zulässiger Einstau in den Oberbau
- Anhang 14 Kapazitäten der Gleisentwässerungsanlagen
- Anhang 15 Hydraulische Nachweise – Variation der Streckenlängen und Sohlgefälle
- Anhang 16 Nachweis der Durchlassbeispiele
- Anhang 17 Übersicht Beispielstrecke
- Anhang 18 Hydraulische Berechnungen Fließzeitverfahren Weinböhla $r_{15, 0,1}$
- Anhang 19 Hydraulische Berechnungen Fließzeitverfahren Weinböhla $r_{15, 0,01}$
- Anhang 20 Darstellung des Starkregenindex
- Anhang 21 DL–Querschnitte in Abhängigkeit des Gebietsabflusses
- Anhang 22 Beispielfotos für Durchlässe