



ABS/NBS Hamburg-Lübeck-Puttgarden
(Hinterlandanbindung FBQ)
Neubau der B 207
PFA Fehmarnsundquerung (FSQ)

Bericht zur N-A-Modellierung Endzustand Bahn

Hydro? logo!

Dr. Volkmar Dunger

Neue Hauptstraße 150 a
09618 Brand-Erbisdorf
ST Langenau

Zuarbeit zum hydrogeologischen Gutachten für den Absenktunnel Fehmarnsundquerung:

Ermittlung von starkregenimplizierten Durchflüssen im Umfeld des geplanten Absenktunnels Fehmarnsundquerung mittels Niederschlag-Abfluss-Modellierung – Entwässerungseinrichtungen der Deutschen Bahn

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Veranlassung, Zielstellung	5
2. Methodik	5
3. Umsetzung der Methodik auf den Untersuchungsstandort	10
4. Simulationsergebnisse, Ergebnisinterpretation	14
4.1. Scheiteldurchflüsse	14
4.2. Minimal notwendiges Speichervolumen für das Regenrückhaltebecken RRB 3	18
5. Literaturverzeichnis	19
7. Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	20
8. Anlagenverzeichnis	21

Anlagen

Vorbemerkungen

Im September 2008 wurde mit einem Staatsvertrag zwischen dem Königreich Dänemark und der Bundesrepublik Deutschland (BRD) der Bau einer „Festen Fehmarnbeltquerung“ beschlossen. Während Dänemark sich zum Bau des Tunnels durch den Fehmarnbelt verpflichtet hat, ist die Bundesrepublik Deutschland verantwortlich für die Herstellung einer leistungsfähigen landseitigen Straßen- und Schienenanbindung für das Bauwerk auf deutscher Seite (Hinterlandanbindung).

Für den Ausbau der Eisenbahnstrecke Lübeck – Puttgarden wurde die DB InfraGO AG (vor dem 01.01.2024 DB Netz AG) im Jahr 2008 auf der Grundlage des Bundesschienenwegeausbaugesetzes (BSWAG) vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV, vormals BMVI) beauftragt. Die vorhandene Eisenbahnstrecke Lübeck – Puttgarden (DB-Strecken-Nr. 1100) soll auf ca. 88 km zweigleisig ausgebaut, elektrifiziert und streckenweise auf eine maximale Geschwindigkeit von 200 km/h ertüchtigt werden. Als Ergebnis eines vom Land Schleswig-Holstein durchgeführten Raumordnungsverfahrens (ROV) werden durch Umfahrungen davon 55 km als Neubaustrecke realisiert.

Gemäß Bundesverkehrswegeplan 2030 und dem Gesetz zur Änderung des Fernstraßenausbaugesetzes vom 23.12.2016 wird die B 207 mit einem vierstreifigen Querschnitt zwischen Heiligenhafen-Ost und Puttgarden ausgebaut. Der Planfeststellungsbeschluss für den Ausbau der B 207 wurde 2015 erlassen. Dieser ist seit dem 25.08.2021 bestandskräftig. Die DEGES Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH (nachfolgend kurz DEGES) wurde im Jahr 2019 vom Land Schleswig-Holstein beauftragt, den Ausbau der B 207 zu realisieren.

Im Zuge der Anbindung des Fehmarnbelt-Tunnels an das deutsche Schienen- und Straßennetz ist ein leistungsfähiger Ersatz bzw. eine Erweiterung für die bestehende Fehmarnsundquerung zwischen der Insel Fehmarn und dem ostholsteinischen Festland notwendig. Im Jahr 2010 durchgeführte Belastungstests haben gezeigt, dass die Fehmarnsundbrücke von 1963 den künftigen Belastungen des Verkehrs von Straße und Schiene nicht mehr gewachsen ist.

Deshalb wurden nachgelagert zum Projektauftrag von 2008 ab dem Jahr 2014 in einem aufwändigen Verfahren zahlreiche Varianten (Bohr- und Absenktunnel sowie kombinierte und getrennte Brücken) für eine leistungsfähigere Sundquerung untersucht. Der auf Ebene der Vorplanung durchgeführte Variantenvergleich hat als Vorzugsvariante einen „Kombinierten Absenktunnel“ für den zukünftigen Straßen- und Eisenbahnverkehr ergeben.

Die Tunnellösung mit Erhalt der Fehmarnsundbrücke trägt den verkehrlichen Erfordernissen im Hinblick auf Leichtigkeit und Sicherheit Rechnung und entspricht zudem der im Rahmen der Öffentlichkeitsbeteiligung vom „Dialogforum Feste Fehmarnbeltquerung“ erarbeiteten Konsensvariante.

Der kombinierte Absenktunnel für Schiene und Straße wird gemeinsam von den Vorhabenträgerinnen DB InfraGO AG und Bundesrepublik Deutschland, letztgenannte vertreten durch das Land Schleswig-Holstein, vertreten durch die DEGES, geplant und realisiert. Die Ertüchtigung der Fehmarnsundbrücke für die langsamen Verkehre wird durch die DEGES im Auftrag des Landes Schleswig-Holstein als eigenständiges Projekt realisiert.

1. Veranlassung, Zielstellung

Im Zuge der Planungsarbeiten zur Errichtung des Fehmarnsundtunnels sind u. a. Informationen zu den Abflüssen/Durchflüssen notwendig, die im Bereich des Bauwerks im Starkregenfall auftreten. Dabei interessieren zum einen die Spitzendurchflüsse, die im Zusammenhang mit der Frage der schadlosen Abführbarkeit des abfließenden Wassers von Interesse sind und zum anderen die Durchflusssummen, die im Hinblick auf die Bemessung des Rückhaltebeckens RRB 3 essenziell sind.

2. Methodik

Die Ermittlung von Starkregenabflüssen stellt eine hydrologisch anspruchsvolle Aufgabe dar, weil der Abflussbildungsprozess ein hochdynamischer Prozess ist, der dazu noch von vielen Einflussfaktoren abhängig ist (Meteorologie, Morphologie, Pedologie, Landnutzung), die ihrerseits durch viele Parameter bestimmt werden. Um all diese Einflussfaktoren prozessadäquat berücksichtigen zu können, empfiehlt sich die Verwendung eines Niederschlag-Abfluss-Modells (N-A-Modell).

N-A-Modelle sind in der Lage, Durchflussganglinien für beliebige Punkte eines Einzugsgebiets zu erzeugen, aus denen u. a. solche Informationen wie Maximaldurchfluss (Scheiteldurchfluss), Scheiteleintrittszeit und Durchflusssumme ableitbar sind. Die hochdynamischen Prozesse Abflussbildung, -konzentration und -verlauf verlangen nach einer zeitlichen Auflösung, die im Minutenbereich liegen sollte.

Derzeit existiert in Deutschland eine Vielzahl von N-A-Modellen, die sich einer breiten Anwendung erfreuen. Zu nennen sind beispielhaft die Modelle NASIM (HYDROTEC, 2001), WaSiM-ETH (SCHULLA, 1997, SCHULLA, JASPER, 1998), ArcEGMO (BECKER ET AL., 2002, PFÜTZNER, 2002), WASMOD (RINKER, 2001) und BCENA1 (BCE, 1997). Gemeinsam ist diesen Modellen, dass sie GIS-gestützt arbeiten und folglich georeferenzierte digitale Karten zur Morphologie (DGM), zur Pedologie und zur Landnutzung benötigen.

Die genannten Modelle sind geeignete Werkzeuge, um bestimmte, z. T. sehr spezifische Probleme anzugehen. Allerdings sind sie ausnahmslos sehr komplex und erfordern einen hohen Aufwand hinsichtlich der Parametrisierung und Abarbeitung.

Mit Hinblick auf den konkreten Anwendungsfall muss eingeschätzt werden, dass die genannten N-A-Modelle bezüglich ihrer Anwendung nicht zuletzt wegen der Aufbereitung/Georeferenzierung des digitalen Kartenmaterials zu aufwändig erscheinen.

Einfachere Ansätze, die in der hydrologischen Praxis u. a. für Bemessungsaufgaben verwendet werden, sind für den konkreten Anwendungsfall besser geeignet. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang das Abflussbeiwertverfahren (s. z. B. MANIAK, 2016 und SCHNEIDER, 2022 bzw. DWA-Arbeitsblätter A 117, DWA, 2013 und A 118, DWA, 2006) und das Curve-Number-Verfahren (Us SCS, 1972, 1985, 1986), mit deren Hilfe der Abflussbildungsprozess mit vergleichsweise geringem Aufwand quantifizierbar ist.

Durch Anwendung des Faltungsintegrals in Kopplung mit einem Parallelkaskadenmodell (s. z. B. DYCK, PESCHKE, 1995 und SCHRÖDER U. A., 1999) ist in einem nachfolgenden Schritt der Prozess der Abflusskonzentration handelbar. Im Ergebnis erhält man Durchflussganglinien für verschiedene, i. d. R. vorgegebene Punkte des Einzugsgebiets. Die Überlagerung von Durchflussganglinien, bei denen Laufzeitdifferenzen berücksichtigt werden, kann mittels Isochronenmethode (s. u. a. DYCK, PESCHKE, 1995 und MANIAK, 2016) bewerkstelligt werden.

Die eben kurz umrissene praxisorientierte pragmatische Methodik ist im N-A-Modell HQBEMESS (DUNGER, 2015) softwareseitig umgesetzt. In enger Absprache mit dem Vorhabensträger wurde entschieden, das Modells HQBEMESS für den konkreten Anwendungsfall zu verwenden.

Beim Modell HQBEMESS handelt es sich um ein konzeptionelles Boxmodell, das aus drei Teilmodellen besteht:

- Teilmodell HQBEMESS zur Modellierung der Abflussbildung und -konzentration sowie zur Erzeugung von Durchflussganglinien,
- Teilmodell ISOCHRON zur zeitversetzten Überlagerung von Durchflussganglinien,
- Teilmodell SPEICHER zur hydrologischen Bemessung eines oder mehrerer Rückhalteräume.

Modellinhaltlich lässt sich das Modell HQBEMESS wie folgt kurz charakterisieren (ausführliche Modellbeschreibung → s. DUNGER, 2015):

Die räumliche Modelldiskretisierung orientiert sich horizontal an der Entwässerungsstrategie (Entwässerungsrichtung, Knotenpunkte, Lage der Einleitpunkte in ein bzw. mehrere Rückhaltebecken, in die Vorflut bzw. wie im vorliegenden Fall ins Meer) und setzt die Untergliederung des Untersuchungsraumes in Einzugsgebiete bzw. Teileinzugsgebiete voraus. Die zeitliche Modelldiskretisierung beträgt eine Minute. In Abfluss transformiert wird der Regen, welcher der Bemessung zugrunde gelegt wird (Bemessungsregen). Dieser ist durch die Größen Regenmenge, -dauer und -häufigkeit (Wiederkehrintervall) charakterisiert.

In Abhängigkeit von den morphologischen, pedologischen und Landnutzungseigenschaften im Einzugsgebiet werden auf der Grundlage des Bemessungsregens je nach örtlichen Gegebenheiten Durchflussganglinien simuliert, die sich hinsichtlich ihrer Form, Scheiteldurchflusshöhe und Durchflussdauer unterscheiden.

Einen Überblick über die Modellstruktur soll die Abbildung 1 geben. Die wesentlichen Modellein- und -ausgabegrößen sind in der Tabelle 1 aufgeführt.

Die Modellierung der Abflussbildung erfolgt mittels SCS-Verfahren (Us SCS, 1972, 1985, 1986, HAAN, 1982). Anstelle des Niederschlages schlechthin wird jedoch der Bemessungsregen hinsichtlich Regenmenge, Regendauer und Wiederkehrintervall für die Berechnung verwendet. Angaben zum Bemessungsregen sind dem KOSTRA-Atlas des Deutschen Wetterdienstes (KOSTRA-DWD-2020, JUNGHÄNEL U. A., 2022) zu entnehmen.

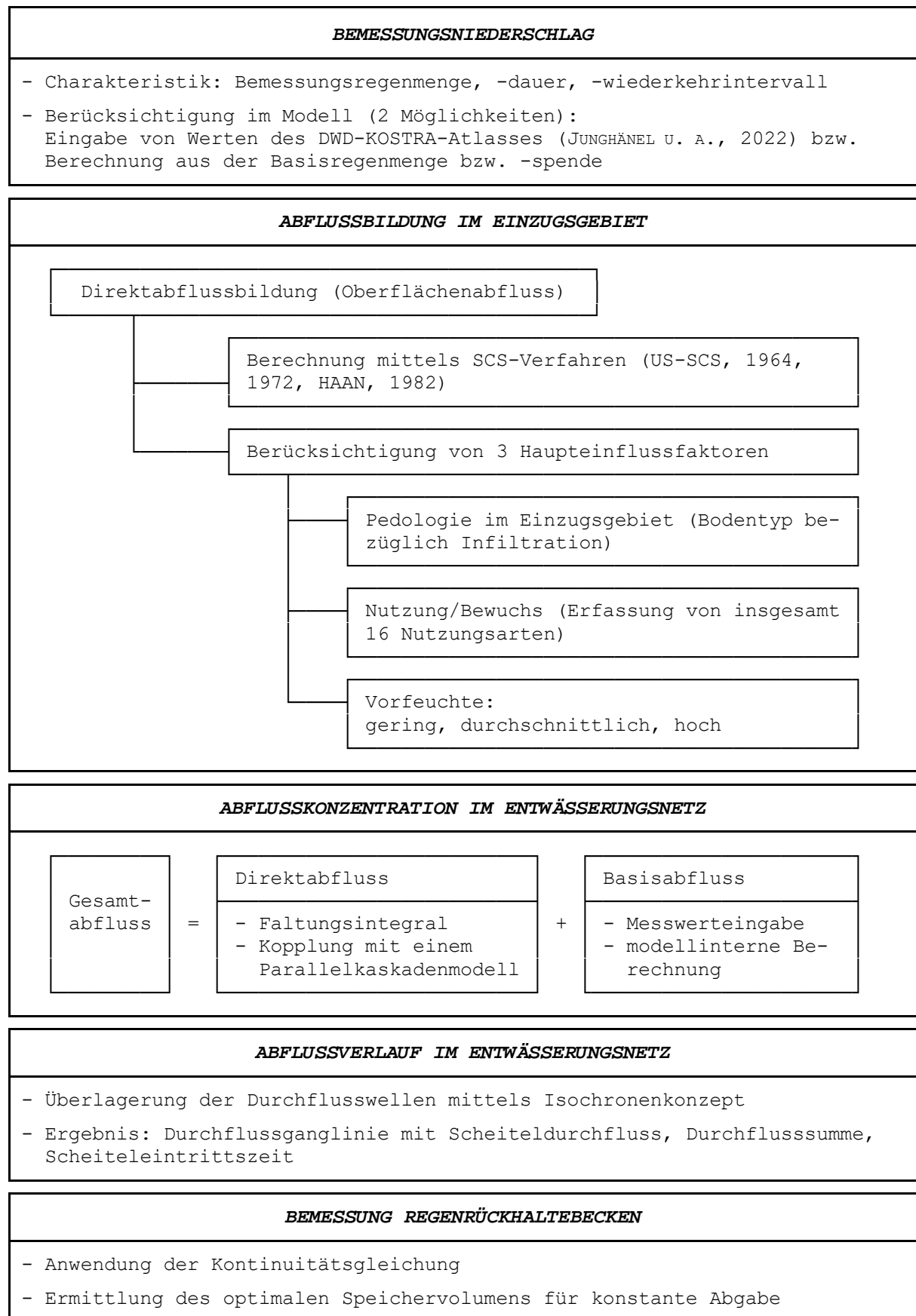


Abb. 1: Modellstruktur und wesentliche Modellansätze des Modells HQBEMESS

Tabelle 1: Wesentliche Eingabedaten und -parameter des N-A-Modells HQBEMESS

<u>Informationen zum Bemessungsregen:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Niederschlagsmenge (i. d. R. KOSTRA-Werte) - Bemessungsregendauer - Wiederkehrintervall (Jährlichkeit) - Regenverteilung: Blockregen, DVWK-Verteilung, PECHER-Regen anfangs- und endbetont
<u>Geographische und morphologische Parameter:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Einzugsgebietsfläche - Länge des längsten Fließweges - Länge aller nichtperiodischer Vorfluter - Höhenunterschied im Einzugsgebiet
<u>Pedologische Parameter:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Infiltrationsvermögen (4 Infiltrationsklassen)
<u>Nutzungs-/Bewuchsparemeter:</u> <ul style="list-style-type: none"> - prozentuale Anteile der Hauptnutzungsarten - landwirtschaftliche Kulturen (Hackfrüchte, Wein, Obstanlagen, Getreide, Futterpflanzen) - Dauergrünland (Wiese, Weide) - Ödland ohne nennenswerten Bewuchs - Wald mit Angaben zur Dichte des Waldes (aufgelockert ... sehr dicht)
<u>Sonstige Angaben:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Vorfeuchte (gering, mittel, hoch) - Angaben zur Art Entwässerung (flächenhaft oder mittels Entwässerungsnetz) - Laufzeitdifferenzen (Isochronen) des Abflusses

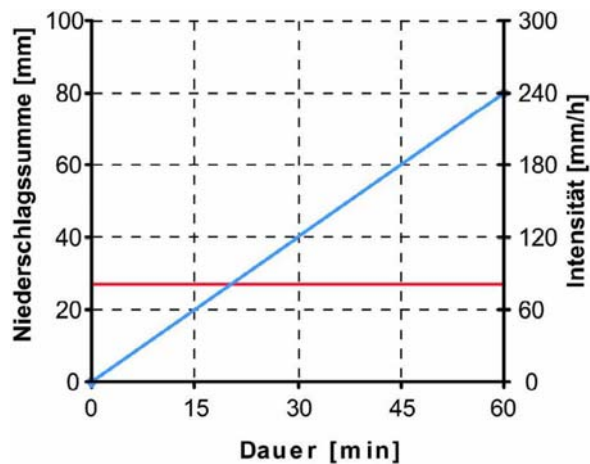
In Bezug auf die zeitlichen Verteilungen der Starkniederschläge können vier Verteilungen berücksichtigt werden:

- Blockregen, d. h. konstante Niederschlagsintensität über die gesamte Regendauer,
- DVWK-Verteilung mit den höchsten Intensitäten etwa in der Mitte des Regenereignisses (mittenbetont),
- PECHER-Regen mit den höchsten Intensitäten zu Beginn des Regenereignisses (anfangsbetont) und
- PECHER-Regen mit den höchsten Intensitäten am Ende des Regenereignisses (endbetont).

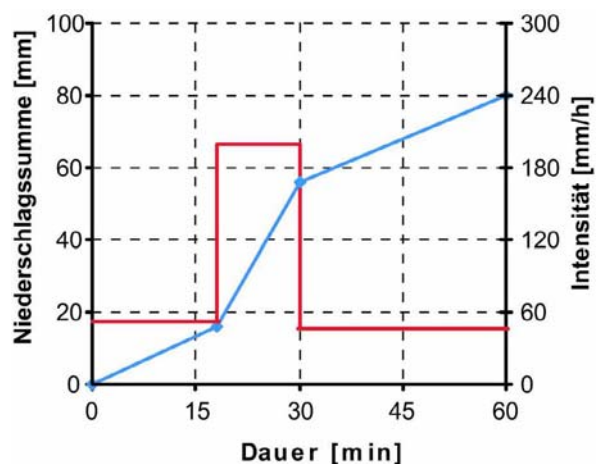
In der Abbildung 2 sind die vier Regenverteilungen visualisiert.

Der Oberflächenabfluss wird beim US-SCS-Verfahren auf der Grundlage von Gebietsgrößen ermittelt. Die Gebietsgrößen münden summarisch in einem sog. CN-Faktor (Curve Number), der von 0 bis 100 % variieren kann (CN = 0 % = vollständige Infiltration, CN = 100 % = vollständige Oberflächenabflussbildung).

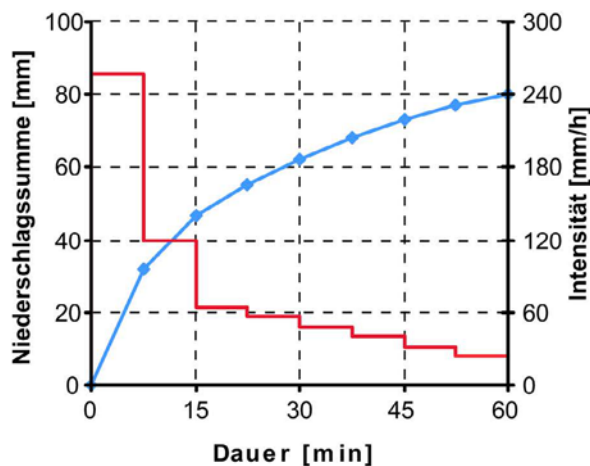
a) Blockregen



b) DVWK-Verteilung (mittenbetont)



c) PECHER-Regen (anfangsbetont)



d) PECHER-Regen (endbetont)

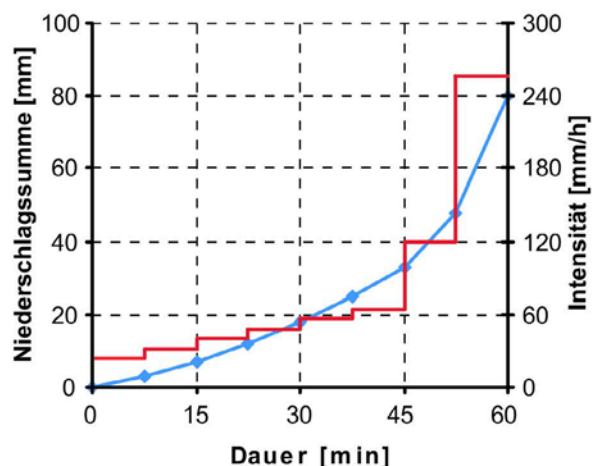


Abb. 2: Regenverteilungen, die im Modell HQBEMESS berücksichtigt werden können (NRW, 2004)

Durch den Abflusskonzentrationsprozess werden die gebildeten Abflussmengen in eine Durchflussganglinie (zeitvariable Durchflusswerte für einen bestimmten Betrachtungspunkt) transformiert. Dabei sind zwei Fälle bezüglich der Abflusskonzentration modellierbar: vergleichmäßigte, vorrangig flächenhafte Konzentration z. B. in weitgehend unversiegelten Einzugsgebieten bzw. schnelle Konzentration z. B. im Fall kleiner Gebiete u. /o. für den Fall, dass ein dichtes Entwässerungsnetz existiert. Diesbezügliche Anwendung findet ein Parallelkaskadenmodell. Die Anwendung der Fal tungsgleichung liefert die Ordinatenwerte der Durchflussganglinie. Im Ergebnis der Abflusskonzentrationsberechnung erhält man u. a. die Durchflussganglinie (Durchflusswerte zu verschiedenen Zeitpunkten des Bemessungsereignisses) und die Durchflusssumme.

Die für jeden Entwässerungspunkt ermittelten Durchflussganglinien werden entsprechend der Abflussrichtung mittels Isochronenmethode überlagert, d. h. es finden Laufzeitdifferenzen bei der Konzentration der gebildeten Abflüsse Berücksichtigung. Laufzeitdifferenzen bewirken eine Abflachung und eine Verzögerung der Scheiteldurchflüsse im Vergleich zur einfachen Superposition (Aufaddieren) der Einzeldurchflüsse.

Die Isochronenmethode ist eine hydrologische Routinemethode (s. u. a. DYCK, PESCHKE, 1995 und MANIAK, 2016). Im Starkregenfall zusätzliche Basisdurchflüsse (Zuflüsse aus dem Grundwasser) werden bei den Abflussmengen berücksichtigt. Zeitliche Verzögerungen resultieren aus den Fließgeschwindigkeiten in den Entwässerungseinrichtungen, die mittels hydraulischer Fließformeln z. B. der empirischen Fließformel nach MANNING (1891) unter Einbeziehung von Rauigkeitsbeiwerten nach STRICKLER (1923) berechnet werden können.

Die Bemessung der minimal notwendigen Volumina von Rückhalteräumen (hier RRB 3) basiert auf der Anwendung der Kontinuitätsgleichung:

$$dS(t) / dt = Q_Z(t) - Q_A(t) \quad (1)$$

mit: $dS(t)$ - Änderung des Speicherinhaltes [l/Zeiteinheit]
 $Q_Z(t)$ - Zuflussganglinie [l/Zeiteinheit]
 $Q_A(t)$ - Ausflussganglinie [l/Zeiteinheit] ($Q_A = Q_R = \text{Regelabgabe} = \text{konstant}$)

Für 2 aufeinander folgende Zeitschritte t_j und t_{j+1} sieht die Lösung der Kontinuitätsgleichung in Differenzenform folgendermaßen aus:

$$S(t_{j+1}) - S(t_j) = \Delta S = 0,5 \Delta t_{j,j+1} [Q_Z(t_{j+1}) + Q_Z(t_j)] - 0,5 \Delta t_{j,j+1} [Q_A(t_{j+1}) + Q_A(t_j)] \quad (2)$$

mit: $S(t_{j+1})$ - Speicherinhalt zum Zeitpunkt t_{j+1} [l]
 $S(t_j)$ - Speicherinhalt zum Zeitpunkt t_j [l]
 ΔS - Speicheränderung [l]
 $Q_Z(t_{j+1})$ - Zuflussmenge zum Speicher zum Zeitpunkt t_{j+1} [l/s]
 $Q_Z(t_j)$ - Zuflussmenge zum Speicher zum Zeitpunkt t_j [l/s]
 $Q_A(t_{j+1})$ - Ausflussmenge aus dem Speicher zum Zeitpunkt t_{j+1} [l/s]
 $Q_A(t_j)$ - Ausflussmenge aus dem Speicher zum Zeitpunkt t_j [l/s]
 $\Delta t_{j,j+1}$ - Zeitdifferenz zwischen t_j und t_{j+1} [s]

Gleichung 2 wird beginnend ab dem Zeitpunkt angewendet, ab dem der Zufluss größer als die Abgabe aus dem Speicher ist ($Q_Z > Q_A$). Der Zufluss ergibt sich aus den Oberflächen- und Basisabflüssen sowie aus den unmittelbar auf die Gräben und den Rückhalteraum fallenden Niederschlagsmengen.

Die für die Kontinuitätsgleichung notwendigen Zuflussganglinien werden durch das N-A-Modell HQBEMESS (s. o.) für alle KOSTRA-Regendauern bereitgestellt. Das maßgebende Speichervolumen entspricht dem größten Speichervolumen, das sich bei der Gegenüberstellung der Speichervolumina für die verschiedenen KOSTRA-Regendauern ergibt. Dabei führen i. d. R. deutlich größere Regendauern zum Speichervolumenmaximum als für die Bemessung der Abflussgräben maßgebend sind.

3. Umsetzung der Methodik auf den Untersuchungsstandort

Die Anwendung des N-A-Modells setzt die Kenntnis folgender Informationen voraus:

- KOSTRA-DWD-2020-Starkregenwerte (JUNGHÄNEL U. A., 2022) → Nutzung der seitens des DWD Deutscher Wetterdienst im Internet veröffentlichten Daten (gültig ab 2023, www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/kostra_dwd_rasterwerte). Ent-

sprechend der Empfehlung des DWD sind die KOSTRA-Regenmengen nicht um die Werte, die sich aus den statistischen Unsicherheiten (Toleranzen) ergeben, erhöht worden. Dieser Fall wird im Folgenden als „Mid Case“ bezeichnet. Um die Auswirkungen der Unsicherheiten auf die Starkregendurchflüsse abschätzen zu können, ist als Planspiel eine Variante mit erhöhten KOSTRA-Regenmengen (Erhöhung = oberes Ende des Toleranzbereiches = „Worst Case“) gerechnet worden. Die Toleranzen sind in Abhängigkeit von den Dauerstufen und Wiederkehrintervallen abzugreifen. Die Anlage 1 enthält die KOSTRA-DWD-2020-Starkregenwerte und die Toleranzbereiche für den Untersuchungsstandort.

- Wiederkehrintervall (Jährlichkeit) → Entsprechend den Vorgaben nach REwS bzw. GULV/WBV ist ein Wiederkehrintervall von 10 Jahren angesetzt worden.
- Regendauern → Das N-A-Modell berechnet die maßgebende Regendauer modellintern durch einen iterativen Prozess, bei dem die Regendauer so lange modifiziert wird, bis der Durchfluss maximal wird. Lediglich für die sehr kleinen Einzugsgebiete, die durch die FSQ-Baumaßnahmen beeinflusst sind, wurde die Regendauer mit 15 Minuten angesetzt. Im Hinblick auf die Dimensionierung des Rückhaltebeckens RRB 3 wurde anders verfahren. Dies hängt damit zusammen, dass zur Bemessung von Rückhalteräumen nicht die Scheitelwerte, sondern die Durchflusssummen relevant sind. In Bezug auf die volumetrische Bemessung der des Rückhaltebeckens RRB 3 ist so vorgegangen worden, dass die Regenauer, beginnend mit der kürzesten KOSTRA-Regendauer (5 Minuten) so lange variiert (erhöht) worden ist, bis das Volumen des Rückhalteriums zum Maximum wird.
- Regenverteilungen → Betrachtet wurden die im Abschnitt 2 dargestellten Verteilungen Blockregen, DWWK-Regen, PECHER-Regen anfangsbetont und PECHER-Regen endbetont.
- Einzugsgebietsparameter: Einzugsgebietsgrenzen, Flächengrößen, Höhenlagen des höchsten und niedrigsten Punkts im Einzugsgebiet, Länge des längsten Fließweges, Länge aller nichtperiodischer Vorfluter → Daten aus den Unterlagen der Ingenieurgemeinschaft fehmarlink2 sowie Auswertung des Digitalen Geländemodells GMM 1 des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein <https://geodaten.schleswig-holstein.de/gaialight-sh/apps/dldownload/dl-dgm1.html>
- prozentuale Anteile der Landnutzungen in den Einzugsgebieten → Auswertung des Digitalen Geländemodells GMM 1 des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein <https://geodaten.schleswig-holstein.de/gaialight-sh/apps/dldownload/dl-dgm1.html> sowie der Orthophotos, die Online als Open-Data einsehbar sind (Download nur mit schriftlicher Einwilligung des LVermGeo SH zulässig) <https://opendata.schleswig-holstein.de/dataset/digitale-orthophotos-dop20>.
- Charakteristik des Infiltrationsvermögens der Bodenoberfläche (Oberboden): im Modell in 4 Stufen (sehr gering, gering, mittel, hoch) festzulegen → Ermittlung auf Basis der Bodentypen/Bodenarten → Da das Untersuchungsgebiet noch nicht im Maßstab 1 : 25 000 kartiert ist, kann als Grundlage lediglich die Bodenübersichtskarte Schleswig-Holsteins im Maßstab 1 : 250 000 (<https://umweltportal.schleswig-holstein.de/trefferanzeige?docuuuid=607bf850-84c1-46c5-ae1d-f8d05326cc28>) mit dem dazugehörigen Erläuterungsband (https://umweltanwendungen.schleswig-holstein.de/nuis/upool/gesamt/geologie/bodenbroschuere_2019.pdf) dienen. Der Bodenübersichtskarte ist zu entnehmen, dass der Leitbodentyp ein Pseudogley-

Tschernosem ist, der sich aus periglazial schwach überprägtem Decklehm über Geschiebelehm bzw. -mergel entwickelt hat und häufig stauwasserbeeinflusst ist. Rein aus Sicht der Bodenbildung wäre ein Tschernosem nicht zu erwarten; jedoch zeigt der Tschernosem anmoorige Verhältnisse an.

Die Information, dass vorherrschend Geschiebelehm bzw. Geschiebemergel verbreitet sind, ergibt sich auch aus den zahlreichen Schnitten, die seitens der BBI Geo- und Umwelttechnik Ingenieurgesellschaft mbH Hamburg auf Basis von Bohrungen erarbeitet worden sind. Im Erläuterungsband zur Bodenübersichtskarte wird als vorherrschende Bodenart ein SI4 (stark lehmiger Sand) angegeben. Auch dies deckt sich mit der Charakteristik der Böden, die im Zuge der Auswertung der Bohrungen vorwiegend angesprochen worden sind. Lediglich ganz im Norden der geplanten Trasse (ab etwa 300 m außerhalb des Trops auf der Fehmarnseite) sind die Sande etwas schluffärmer. Die vorherrschende Trockenrohdichte wird im Erläuterungsband zur Bodenübersichtskarte mit $pT = 1,6 \text{ g/cm}^3$ angegeben, was entsprechend Bodenkundlicher Kartieranleitung BKA 5 (AG BODEN, 2005) genau der Grenze zwischen mittel (3) und hoch (4) entspricht.

Für einen SI4 mit $pT3 - pT4$ wird in der BKA 5 eine gesättigte Wasserleitfähigkeit von $k_f = 21 - 42 \text{ cm/d} = 2,4 - 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ angegeben, was nach BKA 5 einer mittleren Wasserleitfähigkeit entspricht. Auch im Erläuterungsband zur Bodenübersichtskarte wird eine mittlere Wasserdurchlässigkeit angegeben. Zu beachten ist dabei allerdings, dass sich diese Aussage allein auf die Bodenoberfläche bezieht. Da Pseudogleye durch Stauwasserhorizonte gekennzeichnet sind und diese ggf. oberflächennah anzutreffen sind (Tschernosem, anmoorig, s. o.), ist davon auszugehen, dass es zum Einstau von Sickerwasser kommt. Die Einstauhöhen können infolge von Starkregen durchaus bis zur Bodenoberfläche reichen und somit das Infiltrationsvermögen vermindern bzw. sogar ganz ausschließen. Deshalb ist im N-A-Modell folglich von einem geringen Infiltrationsvermögen ausgegangen worden.

- Angabe der Vorfeuchte (hydrologische Vorgeschichte) in 3 Stufen: gering, mittel, hoch → Es sind zwei Fälle betrachtet worden: mittlere Vorfeuchte in Kombination mit den KOSTRA-Regenmengen ohne Veränderungen (Mid Case) und hohe Vorfeuchte in Kombination mit den KOSTRA-Regenmengen, die um die Werte, die sich aus den statischen Unsicherheiten (Toleranzen) ergeben, erhöht wurden (Worst Case).
- Die modellierten Durchflussganglinien beinhalten neben den aus den Starkregen resultierenden Direktabflüssen (Oberflächenabflüssen) Basisabflüsse, die dem Fließgewässer z. B. aus dem Grundwasser zusitzen. Da die Basisabflüsse unbekannt sind, wurde entsprechend der in SCHRÖDER U. A. (1999) enthaltenen Annahmeverfahren, dass im Starkregenfall die doppelte Mittelwasserspense zum Abfluss gelangt. Für Flachlandregionen sind dies nach SCHNEIDER (2022) etwa $12 \text{ l / (s km}^2\text{)}$. Für alle Beton- und Asphaltflächen ist auf Grund der Versiegelung der Basisabfluss nicht existent.

Des Weiteren wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Für alle ackerbaulich genutzten Flächen wurden die Kulturen Kartoffeln/Mais/Raps angenommen. Solche Kulturen bewirken bei sonst gleichen Randbedingungen tendenziell höhere Oberflächenabflüsse.

- In Bezug auf die im derzeitigen Zustand vorwiegend landwirtschaftlich genutzten Restflächen FSQ FL 1, 2 und 3, GB EN 1N, FSQ FM 1, EZG S AS FM und AV EN 7N wurden für den Planungszustand angenommen, dass diese auf Grund der geringen Flächengrößen nicht weiter landwirtschaftlich genutzt werden. Vielmehr ist von Grünlandflächen mit einigen aufgelockert stehenden Bäumen ausgegangen worden.
- Die Vereinbarung einer Nutzung in Form von Rasengittersteinen ist im verwendeten N-A-Modell nicht direkt möglich. Die Portalbereiche FSQ FL POR und FSQ FM POR sowie die AS Großenbrode EZG S AS, die durch Rasengittersteine und Asphalt gekennzeichnet sind, mussten folglich hinsichtlich der Nutzung angepasst werden. Es wurde die Nutzung Feldwege (befestigt), die in Bezug auf das Infiltrationsvermögen einer Rasengitter-/Asphaltfläche vergleichbar ist, als Äquivalent vereinbart.
- Die Flächen EZG B RRB 1 EZG B RRB 2 und EZG B RRB 7, die als lehmige Sandböden zu charakterisieren sind, gehen als Ödlandflächen in die Modellierung ein.
- Für den Betriebsweg EZG S BW und die Deichverteidigungsstraße EZG S DVS wurde die Nutzung Feldwege (befestigt) gewählt.
- Alle Beton- bzw. Asphaltflächen (EZG B RRB 3 und 4, EZG S EA 1 und 2, EZG S LV, EZG S TRO, EZG S EA 3 und EZG S EA 4) wurden als versiegelte Flächen vereinbart.
- Für alle sehr kleinen Einzugsgebiete (Gebiete mit einer Einzugsgebietsfläche bis $0,1 \text{ km}^2$) wurde von einer schnellen Abflusskonzentration ausgegangen und eine maßgebende Regendauer von 15 Minuten angesetzt. Im Unterschied dazu ist für alle Einzugsgebiete $> 0,1 \text{ km}^2$ (dies sind im Wesentlichen die natürlichen Einzugsgebiete) von einer flächenhaften und damit langsameren Abflusskonzentration ausgegangen worden. Die maßgebende Regendauer ist für diese Gebiete in dem im Abschnitt 2 beschriebenen modellinternen Iterationsprozess ermittelt worden.

Eine Übersicht über alle wesentlichen Eingabeparameter des N-A-Modells enthält die Anlage 2.

Der Aufbau des N-A-Modells schließt die Entwässerungsstrategie (Entwässerungsrichtungen, Knotenpunkte) ein. In den Abbildungen 3 und 4 sind die Entwässerungsschemata für die Festland- und Inselseite grafisch dargestellt. Diese sind in Zusammenarbeit mit INGE fehmarlink2 erarbeitet worden. Zu vermerken ist, dass die N-A-Modellierung nicht den Planungsabschnitt PFA 5.2 beinhaltet.

Die für jeden Entwässerungspunkt ermittelten Durchflussganglinien werden entsprechend der Abflussrichtung mittels Isochronenmethode (vgl. Abschnitt 2) überlagert, d. h. es finden Laufzeitdifferenzen bei der Konzentration der gebildeten Abflüsse Berücksichtigung.

Da die Gestaltung der Entwässerungseinrichtungen hinsichtlich der Querprofile und hydraulischen Rauigkeiten zum gegenwärtigen Planungsstand nur näherungsweise bekannt ist und da die in diesem Bericht dokumentierten Ergebnissen Vorplanungscharakter haben, wurde in 0. Näherung von einer mittleren Fließgeschwindigkeit im Starkregenfall von 2 m/s ausgegangen.

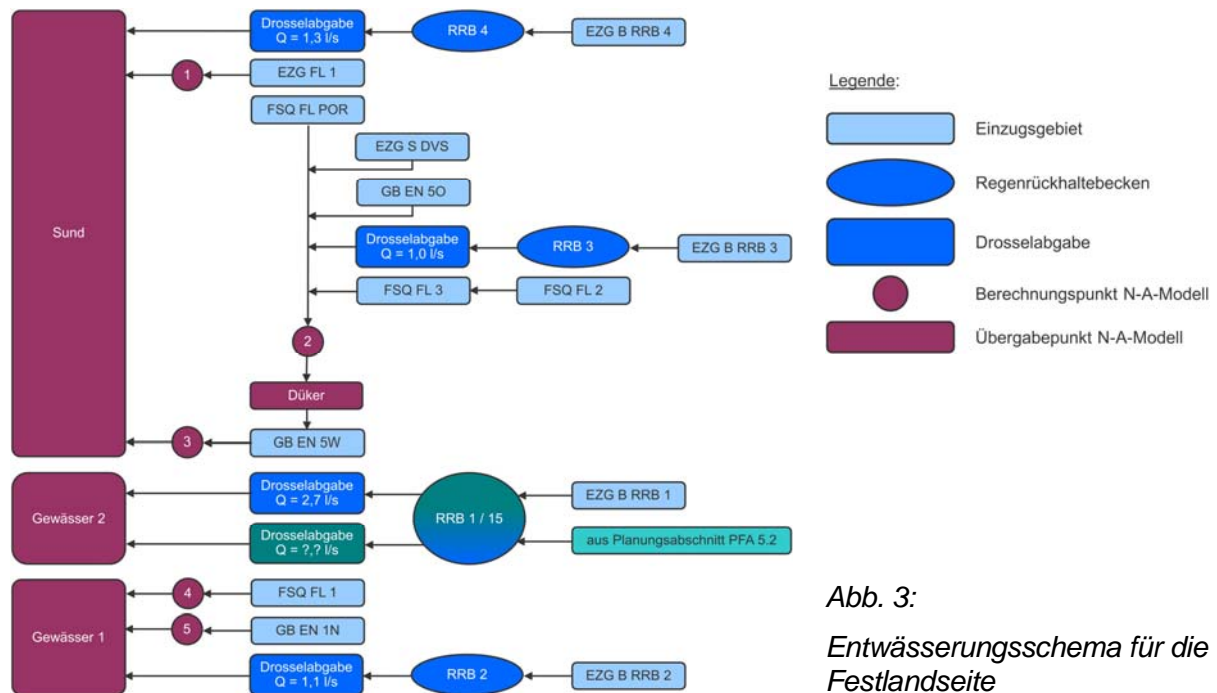


Abb. 3:
Entwässerungsschema für die Festlandseite

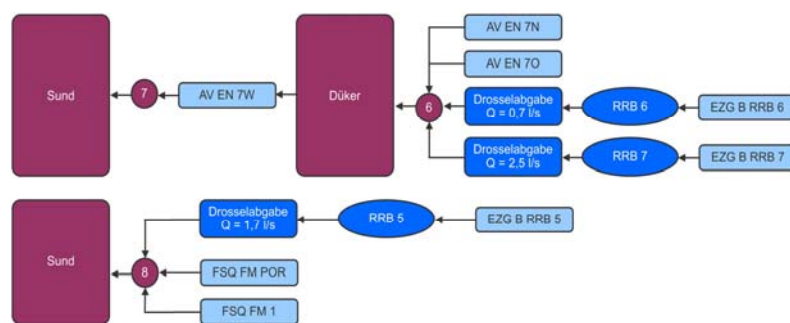


Abb. 4:
Entwässerungsschema für die Inselseite

4. Simulationsergebnisse, Ergebnisinterpretation

4.1. Scheiteldurchflüsse

Die Modellierung der Scheiteldurchflüsse erfolgte wie in Abschnitt 2 methodisch beschrieben. Die Parametrisierung ist entsprechend Abschnitt 3 realisiert worden. Betrachtet wurden die beiden Fälle (vgl. Abschnitt 3):

- Mid Case: Annahme einer mittleren Feuchte in den Einzugsgebieten zu Beginn des Starkregenereignisses (mittlere Vorfeuchte) in Kombination mit den KOSTRA-Regenmengen ohne Veränderungen und
- Worst Case: hohe Vorfeuchte in Kombination mit den KOSTRA -Regenmengen, die um die Werte, die sich aus den statistischen Unsicherheiten (Toleranzen) ergeben, erhöht wurden.

In einem ersten Schritt waren zunächst die mittleren maßgebenden Bemessungsregendauern für alle Berechnungspunkte mit mehreren Einzugsgebieten zu ermitteln. Dies betrifft die Berechnungspunkte BP 2, 3, 6, 7 und 8 (Lage → s. Abbildungen 3 und 4). Die maßgebende Regendauer ist die Regendauer, für die der Durchflussschmelz maximal wird und wird modellintern mittels eines iterativen Verfahrens berechnet

(Werte → s. Anlagen 3 und 4). Die Ergebnisse der sich für diese maßgebenden Regendauern ergebenden Scheiteldurchflüsse enthalten die Anlagen 5 und 6.

Dabei ist geprüft worden, welche der vier Regenverteilungen in Summe die höchsten Scheiteldurchflüsse erzeugt. Dies erfolgte beispielhaft für den Mid Case. Wie den Anlagen 4 b – 4 e zu entnehmen ist, werden für den Blockregen in Summe die höchsten Scheiteldurchflüsse modelliert. Im Sinne der Aufwandsoptimierung wurde für alle nachfolgenden Berechnungen ausschließlich der Blockregen zum Ansatz gebracht.

Die auf Basis der in 0. Näherung angenommenen mittleren Fließgeschwindigkeit im Starkregenfall von 2 m/s ergeben sich die für die Wellenüberlagerungen notwendigen Isochronen (Ergebnisse → s. Anlage 7).

In der Tabelle 2 sind die modellierten Scheiteldurchflüsse aufgelistet. In den Abbildungen 5 und 6 erfolgte eine Visualisierung der Scheiteldurchflüsse. Währenddessen in der Tabelle 2 lediglich die wesentlichen Berechnungspunkte aufgeführt sind, enthalten die Abbildungen 5 und 6 die Scheiteldurchflüsse für alle Berechnungspunkte.

Tabelle 2: Scheiteldurchflüsse für die wesentlichen Berechnungspunkte (Lage der Punkte → s. Abbildungen 3 und 4, alle Werte in l/s) für die beiden betrachteten Fälle

	Berechnungspunkt	Scheiteldurchfluss [l/s]	
		Mid Case	Worst Case
Festland	BP 1	1 292	2 710
	BP 2	265	562
	BP 3	706	1 466
	BP 4	12	49
	BP 5	12	49
Insel	BP 6	963	1 884
	BP 7	2 558	5 067
	BP 8	65	196

Die modellierten Scheiteldurchflüsse machen deutlich, wie groß der Einfluss der Vorfeuchte und der KOSTRA-Regentoleranzen auf die Modellierungsergebnisse ausfällt. Im Schnitt sind die für den Worst Case berechneten Scheiteldurchflüsse mehr als doppelt so hoch wie für den Mid Case.

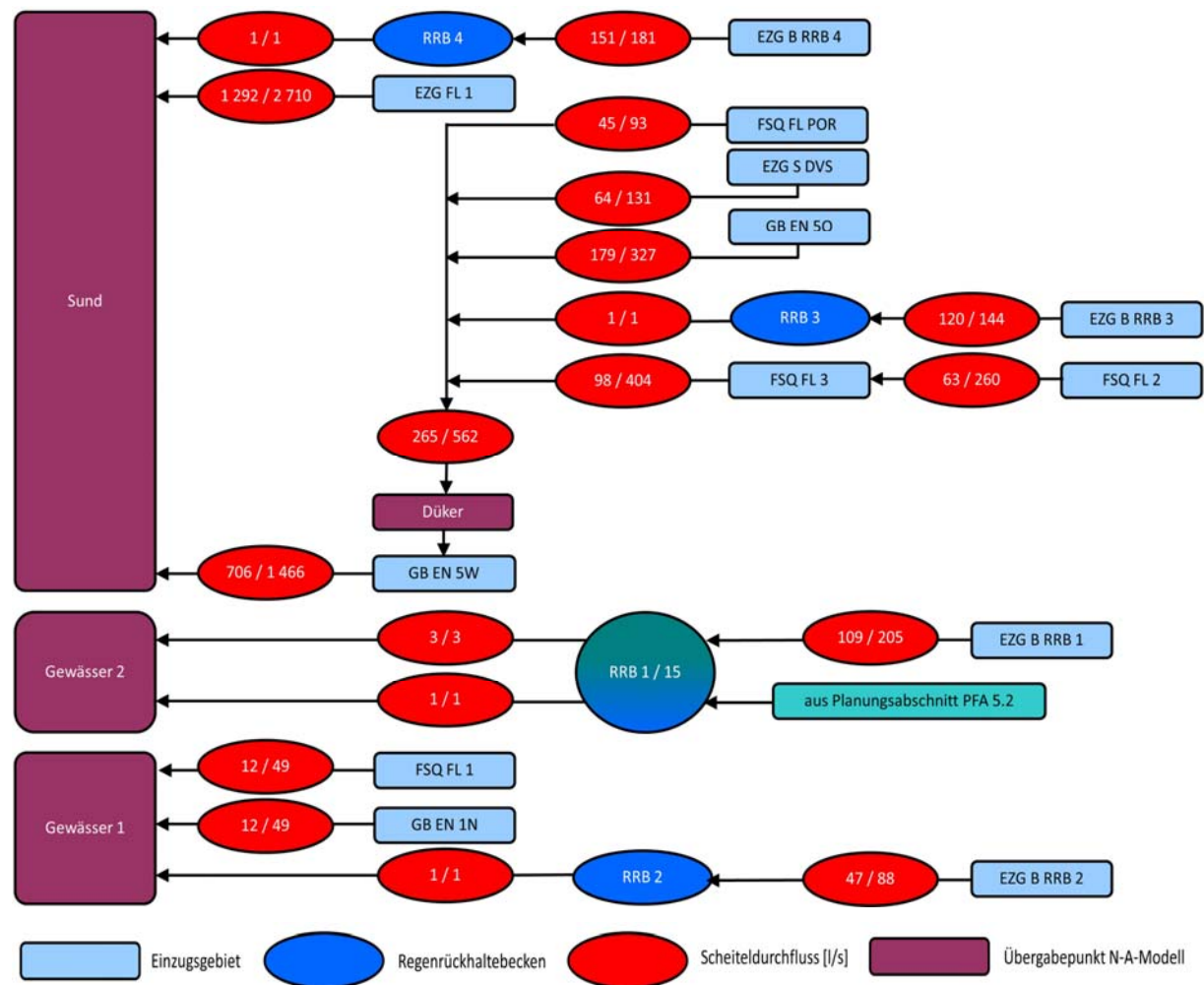


Abb. 5: Modellierte Scheiteldurchflüsse für die Festlandseite

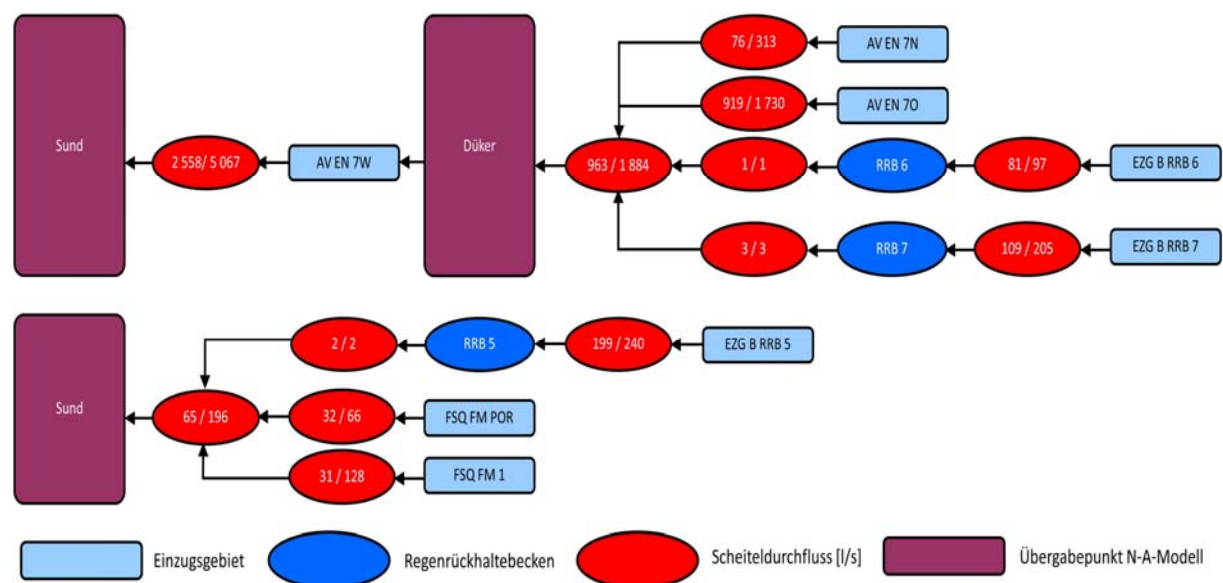


Abb. 6: Modellierte Scheiteldurchflüsse für die Inselseite

Die Abbildungen 7 und 8 beinhalten die Durchflussganglinien für die beiden Düker (Berechnungspunkte BP 2 und 6). Die Ganglinien für alle anderen Berechnungspunkte finden sich in den Anlagen 5 und 6.

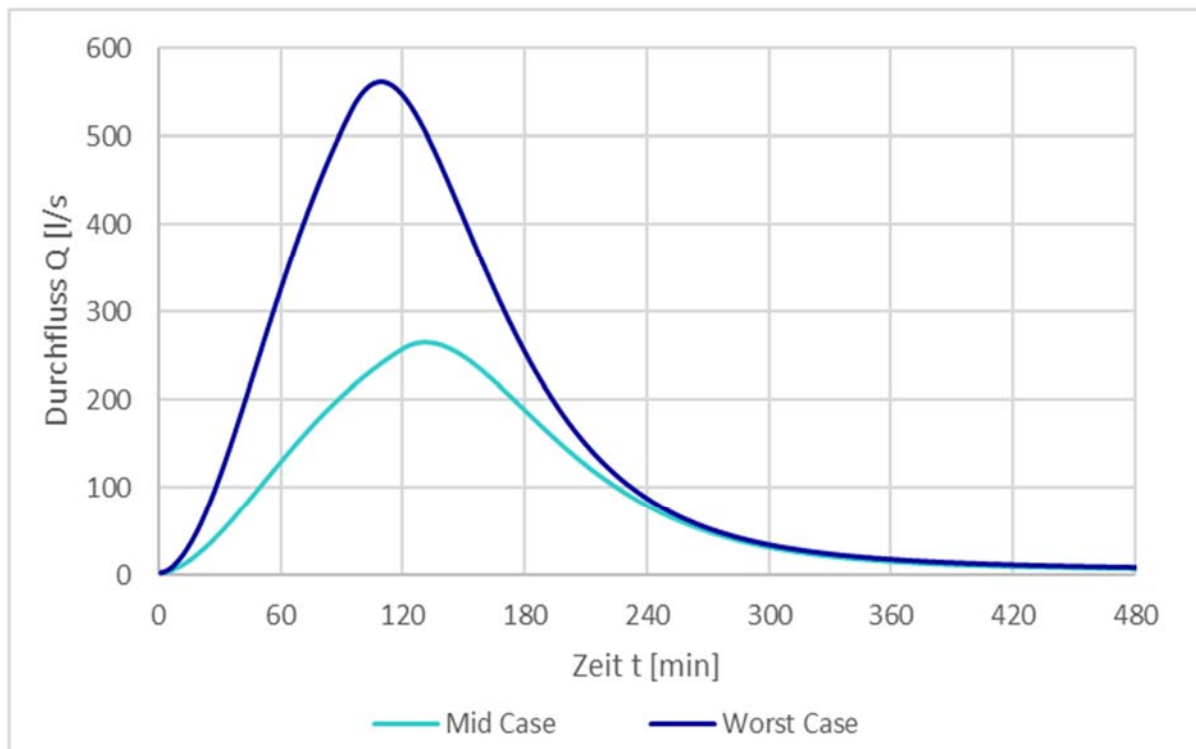


Abb. 7: Durchflussganglinien für den Düker auf der Festlandseite (Berechnungspunkt BP 2)

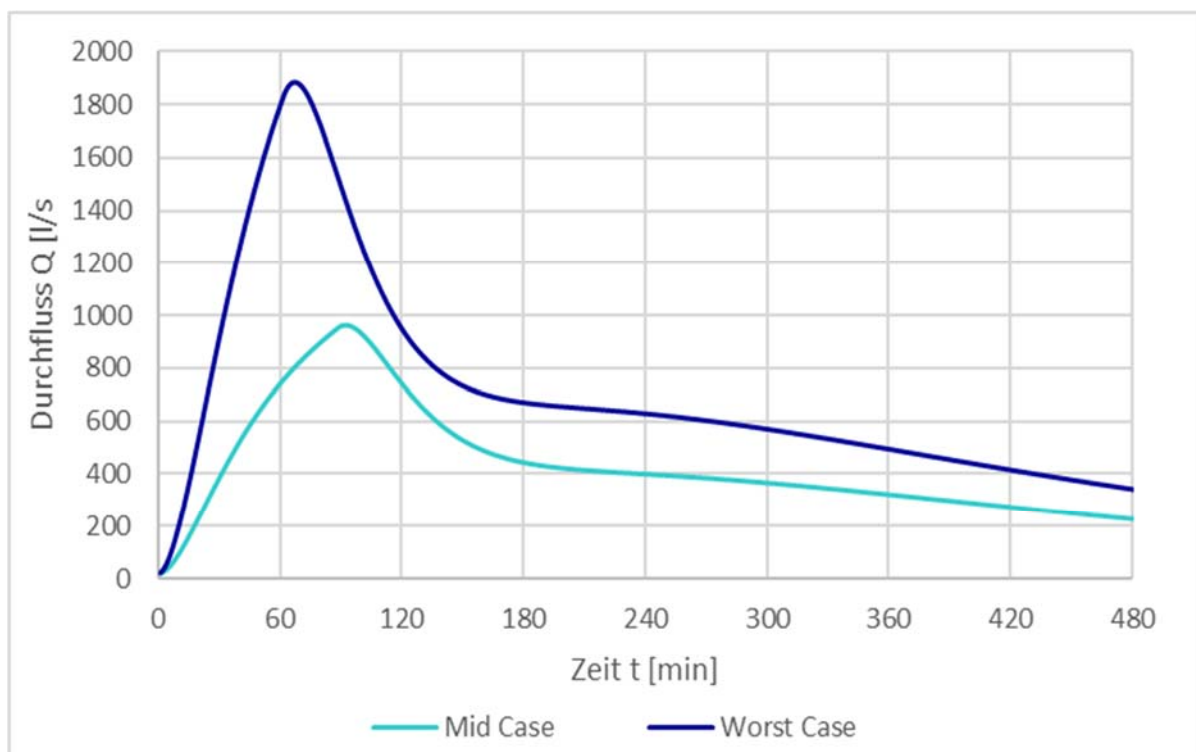


Abb. 8: Durchflussganglinien für den Düker auf der Inselseite (Berechnungspunkt BP 6)

4.2. Minimal notwendiges Speichervolumen für das Regenrückhaltebecken RRB 3

Für das Regenrückhaltebecken RRB 3 galt es, für die vorgegebene Drosselabgabe von 1 l/s das minimal notwendige Speichervolumen zu berechnen. Zur Berechnung des Speichervolumens ist das aus dem Einzugsgebiet EZG B RRB 3 zufließende Wasservolumen maßgebend, das durch die Regendauer maßgebend beeinflusst wird. Die Speicherbemessung muss folglich für verschiedene Regendauern erfolgen.

In der Anlage 8 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zum minimal notwendigen Speichervolumen für die o. g. Randbedingungen aufgeführt. Hierbei berücksichtigt sind die Wassermengen, die aus den direkt auf das RRB fallenden Niederschlägen resultieren. Die hierfür notwendige Flächengröße wurde durch die Ramboll Deutschland GmbH Hamburg bereitgestellt.

Der Anlage 8 ist zu entnehmen, dass für die Bemessung des Speichervolumen des RRB 3 eine deutlich höhere Regendauer maßgebend ist als bezüglich der Durchflussscheitel. Hierfür verantwortlich ist der Fakt, dass das Speichervolumen in erster Linie vom Wechselspiel der zufließenden Wassermenge und der Drosselabgabe aus den RRB abhängig ist.

Im Ergebnis der N-A-Modellrechnungen zur Bemessung des Rückhaltebeckens RRB ergeben sich die folgenden minimal notwendigen Speichervolumina:

- für den Mid Case: 294 m³ und
- für den Worst Case: 365 m³.

In den Abbildungen 9 und 10 sind die Zufluss- und Abgabeganglinien für das Regenrückhaltebecken RRB 3 dargestellt.

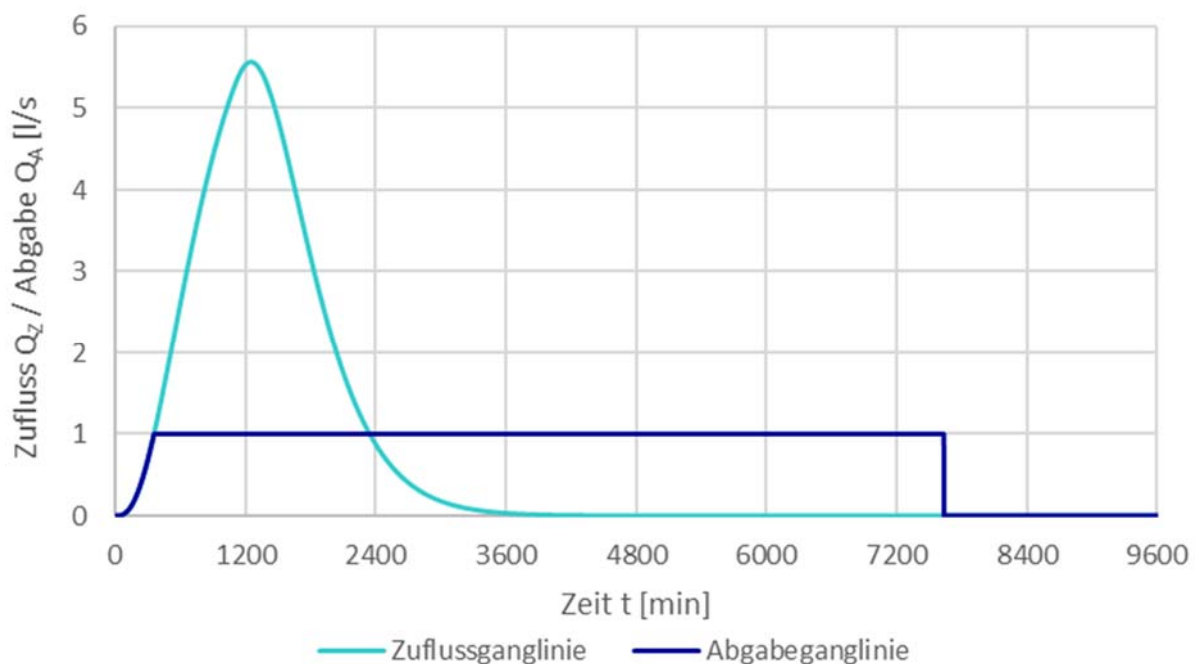


Abb. 9: Zufluss- und Abgabeganglinien für das Regenrückhaltebecken RRB 3, Mid Case

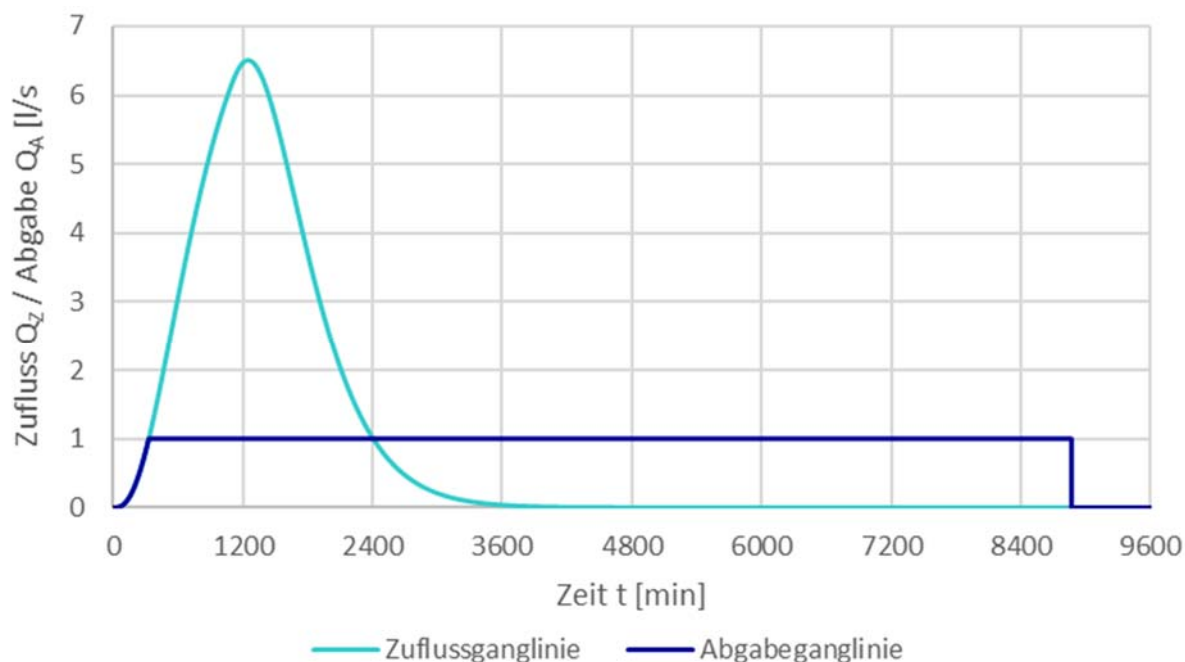


Abb. 10: Zufluss- und Abgabeganglinien für das Regenrückhaltebecken RRB 3, Worst Case

5. Literaturverzeichnis

AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung (BKA5), Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten, 5. Aufl., Hannover, 2005.

BCE (1997): Niederschlag – Abfluss – Modell BCENA1. Modellbeschreibung, Björnßen Beratende Ingenieure GmbH, Erfurt, (unveröff.).

Becker, A., B. Klöcking, W. Lahmer & B. Pfützner (2002): The Hydrologic Modelling System ArcEGMO. In: Mathematical Models of Large Watersheds Hydrology (Eds. Singh, V.P. & D.K. Frevert): Water Resources Publications, Littleton/Colorado, ISBN 1-887201-34, pp. 321 – 384.

Dunger, V. (2015): Dokumentation des Modells HQBEMESS zur quantitativen Abschätzung des Oberflächenabflusses in Einzugsgebieten sowie zur hydrologischen Bemessung von Entwässerungstrecken und zur Dimensionierung eines Rückhaltebeckens. Nutzerhandbuch, Version 12/2015.

DWA (2006): Arbeitsblatt DWD-A 118 – Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., März 2006.

DWA (2013): Arbeitsblatt DWD-A 117 – Bemessung von Regenrückhalteräumen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Dezember 2017.

Dyck, S. und G. Peschke (1995): Grundlagen der Hydrologie. 3. Auflage. Verlag für Bauwesen Berlin.

Haan, C. T. (1982): Hydrologic modelling of small watersheds. ASAE Monograph 5.

Hydrotec (2001): Niederschlags-Abfluss-Modell NASIM - Programmdokumentation. Hydrotec, Aachen, 554 S.

Junghänel, T., T. Deutschländer, U. Haberlandt, J. Ostermöller, B. Shehu und W. Willems (2022): KOSTRA-DWD-2020 – Die neue Starkregenstatistik für Deutschland, DACH2022, Leipzig, Deutschland, 21–25 Mar 2022, DACH2022-151.

Manning, R. (1891): On the flow of water in open channels and pipes. Transactions of the Institution of Civil Engineers Ireland.

Maniak, U. (2016): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. 7. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.

NRW (2004): Ermittlung von Bemessungsabflüssen nach DIN 19700 in Nordrhein-Westfalen. Merkblätter, Band 46, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.

Pfützner, B. (2002): Modelldokumentation ArcEGMO. ISBN 3-00-011190-5.

Rinker, A. (2001): Beschreibung der Wasser- und Stoffhaushaltsdynamik devastierter Flächen mit dem Simulationsmodell WASMOD am Beispiel des Braunkohlentagebaus Espenhain. Dissertation, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, TU Bergakademie Freiberg.

Schneider, K.-J. (2022): Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen. Verlag Reguvis Köln, 25. Auflage.

Schröder, W., G. Euler, F. Schneider und D. Knauf (1999): Grundlagen des Wasserbaus. Werner-Verlag, Düsseldorf, 4. Auflage.

Schulla, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Dissertation, Diss. ETH 12018, Verlag Geographisches Institut, ETH Zürich.

Schulla, J. und K. Jasper (1998): Modellbeschreibung WaSiM – ETH. Modellbeschreibung, ETH Zürich.

Strickler, A. (1923): Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahl für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. Mitteilung 16, Amt für Wasserwirtschaft, Bern.

US-SCS U.S. Soil Conservation Service (1972): SCS National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. USDA, Washington D.C.

US-SCS U.S. Soil Conservation Service (1985): SCS National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. USDA, Washington D.C.

US-SCS U.S. Soil Conservation Service (1986): Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55, Washington D.C.

6. Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung/Erklärung	Einheit
CN	Kurvenzahl (Curve Number)	-
D	Regendauer der KOSTRA-Regenmengen	min, h, d
hN	KOSTRA-Niederschlagshöhe	mm
KOSTRA	Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung	-
N-A-Modell	Niederschlag-Abfluss-Modell	-
$Q_A(t_i)$	Ausflussmenge aus dem Speicher zum Zeitpunkt t_i	l/s
$Q_A(t_{i+1})$	Ausflussmenge aus dem Speicher zum Zeitpunkt t_{i+1}	l/s
Q_{MAX}	Durchflussmaximum (Scheitelwert)	l/s, m ³ /s

Symbol	Bedeutung/Erklärung	Einheit
$Q_z(t_j)$	Zuflussmenge zum Speicher zum Zeitpunkt t_j	l/s
$Q_z(t_{j+1})$	Zuflussmenge zum Speicher zum Zeitpunkt t_{j+1}	l/s
$S(t_j)$	Speicherinhalt zum Zeitpunkt t_j	l
$S(t_{j+1})$	Speicherinhalt zum Zeitpunkt t_{j+1}	l
T	Wiederkehrzeit (Wiederkehrintervall, Jährlichkeit)	a
UC	Toleranzbereich der KOSTRA-Regenmengen	± %
US-SCS	Curve Number Verfahren des US Soil Conservation Service	-
ΔS	Speicheränderung	l
$\Delta t_{j,j+1}$	Zeitdifferenz zwischen t_j und t_{j+1}	s
Ψ	Abflussbeiwert	%

7. Anlagenverzeichnis

- Anlage 1: Niederschlagshöhen für den Untersuchungsstandort nach KOSTRA-DWD-2020 (JUNGHÄNEL U. A., 2022)
- Anlage 2: Wesentliche Eingabeparameter des N-A-Modells zur Berechnung der Oberflächenabflüsse im Starkregenfall für den Planungszustand
- Anlage 3: Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, freie Regendauern, Mid Case
- Anlage 4: Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, freie Regendauern, Worst Case
- Anlage 5: Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, maßgebende Regendauern, Mid Case, Blockregen
- Anlage 6: Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, maßgebende Regendauern, Worst Case Blockregen
- Anlage 7: Ergebnisse der Laufzeitberechnungen (Isochronen)
- Anlage 8: Ergebnisse der Untersuchungen zum minimal notwendigen Speichervolumen des Regenrückhaltebeckens RRB 3

Anlagen

Anlage 1:

Niederschlagshöhen für den Untersuchungsstandort nach KOSTRA-DWD-2020 (JUNGHÄNEL U. A., 2022)

a) Starkregenmengen für Zeile 64, Spalte 158 (Index_rc: 64158), Auswertungszeitraum: 1951 – 2020, Januar – Dezember:

	Niederschlagshöhen hN [mm] je Wiederkehrzeit T [a]								
Dauerstufe	1 a	2 a	3 a	5 a	10 a	20 a	30 a	50 a	100 a
5 min	5,5	6,7	7,5	8,4	9,9	11,3	12,3	13,5	15,3
10 min	7,4	9,1	10,1	11,4	13,3	15,2	16,5	18,2	20,6
15 min	8,6	10,5	11,7	13,2	15,4	17,7	19,2	21,1	23,9
20 min	9,5	11,6	12,9	14,6	17,0	19,5	21,1	23,3	26,4
30 min	10,8	13,2	14,7	16,6	19,3	22,2	24,0	26,5	30,0
45 min	12,2	14,9	16,6	18,7	21,8	25,1	27,2	29,9	33,9
60 min	13,3	16,2	18,0	20,3	23,7	27,2	29,5	32,5	36,8
90 min	14,9	18,1	20,2	22,8	26,6	30,5	33,1	36,4	41,2
2 h	16,1	19,6	21,8	24,7	28,8	33,0	35,8	39,4	44,6
3 h	18,0	21,9	24,3	27,5	32,1	36,8	39,9	44,0	49,8
4 h	19,4	23,7	26,3	29,7	34,7	39,8	43,1	47,5	53,8
6 h	21,6	26,3	29,3	33,1	38,6	44,3	48,0	52,9	59,9
9 h	24,1	29,3	32,6	36,8	42,9	49,3	53,4	58,8	66,6
12 h	26,0	31,6	35,1	39,7	46,3	53,1	57,6	63,4	71,8
18 h	28,9	35,1	39,0	44,1	51,5	59,1	64,0	70,5	79,9
1 d	31,1	37,9	42,1	47,6	55,5	63,7	69,0	76,0	86,1
2 d	37,3	45,4	50,4	57,0	66,5	76,3	82,7	91,1	103,1
3 d	41,4	50,4	56,0	63,3	73,9	84,8	91,9	101,2	114,6
4 d	44,7	54,4	60,4	68,3	79,6	91,4	99,0	109,1	123,5
5 d	47,3	57,6	64,0	72,3	84,4	96,8	105,0	115,6	130,9
6 d	49,6	60,4	67,1	75,9	88,5	101,5	110,0	121,2	137,2
7 d	51,6	62,9	69,8	79,0	92,1	105,7	114,5	126,2	142,9

Legende:

- T Wiederkehrzeit (Jährlichkeit) [a], in der ein Ereignis einen Wert einmal erreicht oder überschreitet
- D Dauerstufe [min, h], definierte Niederschlagsdauer einschließlich Unterbrechungen
- hN Niederschlagshöhe in Millimeter [mm] bzw. Liter pro Quadratmeter [l/m²]

Fortsetzung Anlage 1:

Niederschlagshöhen für den Untersuchungsstandort nach KOSTRA-DWD-2020 (JUNGHÄNEL U. A., 2022)

b) Toleranzbereiche (Unsicherheiten) für Zeile 64, Spalte 158 (Index_rc: 64158), Auswertungszeitraum: 1951 – 2020, Januar – Dezember:

	Toleranzbereich in plus-minus Prozent [±%] je Wiederkehrzeit T [a]								
Dauerstufe	1 a	2 a	3 a	5 a	10 a	20 a	30 a	50 a	100 a
5 min	15	15	15	16	16	17	17	18	18
10 min	14	16	17	17	19	20	20	21	21
15 min	15	17	18	19	20	21	22	23	23
20 min	15	17	18	20	21	22	23	23	24
30 min	15	18	19	20	22	23	23	24	25
45 min	15	17	19	20	22	23	23	24	25
60 min	14	17	18	20	21	22	23	24	24
90 min	13	16	17	19	20	21	22	23	24
2 h	13	15	17	18	19	21	21	22	23
3 h	12	14	16	17	18	20	20	21	22
4 h	12	14	15	16	18	19	19	20	21
6 h	12	13	14	15	17	18	18	19	20
9 h	12	13	14	15	16	17	18	18	19
12 h	13	14	14	15	16	17	17	18	18
18 h	14	14	15	15	16	17	17	18	18
1 d	16	16	15	16	16	16	17	17	18
2 d	20	19	18	18	18	19	19	19	19
3 d	22	21	21	20	20	20	20	20	20
4 d	24	23	22	22	22	22	22	22	22
5 d	25	24	24	23	23	23	23	23	23
6 d	27	25	25	24	24	24	24	24	24
7 d	28	26	26	25	25	25	25	24	24

Legende:

- T Wiederkehrzeit (Jährlichkeit) [a], in der ein Ereignis einen Wert einmal erreicht oder überschreitet
- D Dauerstufe [min, h, d], definierte Niederschlagsdauer einschließlich Unterbrechungen
- UC Toleranzbereich in plus-minus Prozent [±%]

Anlage 2:

Wesentliche Eingabeparameter des N-A-Modells zur Berechnung der Oberflächenabflüsse im Starkregenfall für den Planungszustand

a) morphometrische Parameter:

Einzugsgebiet	Fläche [km ²]	Längster Fließweg [km]	Länge aller Vorfluter [km]	Höchster Punkt [m NHN]	Niedrigster Punkt [m NHN]
Festlandseite					
EZG FL 1	0,4249	0,11	0,21	4,40	0,00
FSQ FL 1	0,0099	0,40	-	5,52	0,60
FSQ FL 2	0,0520	0,81	-	7,69	3,15
FSQ FL 3	0,0289	0,51	-	4,80	2,00
FSQ FL POR	0,0096	0,13	-	5,00	4,00
EZG B RRB 1	0,0212	0,076	-	4,14	3,23
EZG B RRB 2	0,0091	0,41	-	4,14	2,10
EZG B RRB 3	0,0086	0,59	-	2,10	-2,27
EZG B RRB 4	0,0108	0,47	-	-2,27	-6,30
EZG S DVS	0,0135	0,835	-	3,47	2,55
GB EN 1N	0,0098	0,83	-	7,00	3,70
GB EN 5O	0,1422	0,51	0,23	7,20	2,70
GB EN 5W	0,7341	1,36	2,69	7,20	0,00
Inselseite					
FSQ FM 1	0,0257	0,85	0,85	11,16	2,78
FSQ FM POR	0,0068	0,05	0,05	5,00	4,00
EZG B RRB 5	0,0143	0,70	-	-2,00	-6,52
EZG B RRB 6	0,0058	0,40	-	1,85	-2,00
EZG B RRB 7	0,0212	0,90	-	9,50	1,85
AV EN 7N	0,0627	1,03	0,35	13,70	2,70
AV EN 7O	1,3826	1,90	2,48	15,30	0,00
AV EN 7W	3,0857	2,39	9,34	16,50	0,00

Fortsetzung Anlage 2:

Wesentliche Eingabeparameter des N-A-Modells zur Berechnung der Oberflächenabflüsse im Starkregenfall für den Planungszustand

b) Nutzungsanteile (in % bezogen auf die gesamte Einzugsgebietsfläche):

Einzugsgebiet	Ödland (unbewachsen)	Kartoffeln/Mais/Raps	Wein (Terrassen)	Getreide, Futterpflanzen	Weide (fett)	Weide (normal)	Weide (karg)	Dauergrünland	Haine, Obstanlagen	Einzelne Büsche/Bäume	Wald (mitteldicht)	Wald (dicht)	Wald (sehr dicht)	Wirtschaftshöfe	Feldwege (befestigt)	versiegelte Flächen
Festlandseite																
EZG FL 1	2	91	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	2	1
FSQ FL 1	0	0	0	0	0	0	0	50	0	50	0	0	0	0	0	0
FSQ FL 2	0	0	0	0	0	0	0	50	0	50	0	0	0	0	0	0
FSQ FL 3	0	0	0	0	0	0	0	50	0	50	0	0	0	0	0	0
FSQ FL POR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0
EZG B RRB 1	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EZG B RRB 2	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EZG B RRB 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
EZG B RRB 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
EZG S DVS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0
GB EN 1N	0	0	0	0	0	0	0	50	0	50	0	0	0	0	0	0
GB EN 5O	0	90	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	2	2	2
GB EN 5W	3	71	0	0	0	0	0	19	0	2	0	0	0	0	2	3
Inselseite																
FSQ FM 1	0	0	0	0	0	0	0	50	0	50	0	0	0	0	0	0
FSQ FM POR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0
EZG B RRB 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
EZG B RRB 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
EZG B RRB 7	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AV EN 7N	0	0	0	0	0	0	0	50	0	50	0	0	0	0	0	0
AV EN 7O	0	91	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	1	3
AV EN 7W	1	74	0	0	0	0	0	16	0	5	0	0	0	0	1	3

Fortsetzung Anlage 2:

Wesentliche Eingabeparameter des N-A-Modells zur Berechnung der Oberflächenabflüsse im Starkregenfall für den Planungszustand

c) Art der Abflusskonzentration:

Einzugsgebiet	Fläche [km ²]	Vorrangige Nutzung	Art der Abflusskonzentration
Festlandseite			
EZG FL 1	0,4249	Landwirtschaft	langsam
FSQ FL 1	0,0099	Grünland, Büsche	schnell
FSQ FL 2	0,0520	Grünland, Büsche	schnell
FSQ FL 3	0,0289	Grünland, Büsche	schnell
FSQ FL POR	0,0096	teilversiegelt	schnell
EZG B RRB 1	0,0212	Ödland	schnell
EZG B RRB 2	0,0091	Ödland	schnell
EZG B RRB 3	0,0086	versiegelt	schnell
EZG B RRB 4	0,0108	versiegelt	schnell
EZG S DVS	0,0135	teilversiegelt	schnell
GB EN 1N	0,0098	Grünland, Büsche	schnell
GB EN 5O	0,1422	Landwirtschaft	langsam
GB EN 5W	0,7341	Landwirtschaft	langsam
Inselseite			
FSQ FM 1	0,0257	Grünland, Büsche	schnell
FSQ FM POR	0,0068	teilversiegelt	schnell
EZG B RRB 5	0,0143	versiegelt	schnell
EZG B RRB 6	0,0058	versiegelt	schnell
EZG B RRB 7	0,0212	Ödland	schnell
AV EN 7N	0,0627	Grünland, Büsche	schnell
AV EN 7O	1,3826	Landwirtschaft	langsam
AV EN 7W	3,0857	Landwirtschaft	langsam

Gründe für eine schnelle Abflusskonzentration: kurze Entwässerungstrecke (Einzugsgebietsgröße unter 0,1 km²) u./o. Teilversiegelung u./o. Vollversiegelung

Gründe für eine langsame Abflusskonzentration: natürliches Einzugsgebiet mit eher flächenhafter Abflusskonzentration (Einzugsgebietsgröße von mindestens 0,1 km²)

Anlage 3:

Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, freie Regendauern, Mid Case

a) Modellausgabe beispielhaft für das Einzugsgebiet EZG FL 1:

STARKREGEN-BEMESSUNGSABFLUSSPROGRAMM H Q B E M E S S

Das Modell HQBEMESS dient der Berechnung des Starkregenabflusses fuer unbeobachtete oder nicht ausreichend beobachtete Einzugsgebiete. Das Programm baut inhaltlich auf dem Bemessungsganglinienverfahren auf.

Modelling by V. Dunger (1995, up-date 11/2002)
Programming by N. Schultze (2014)

E I N G A B E W E R T E :

Gebietsbezeichnung : EZG FL 1
Dateiname fuer die Eingabedaten: EZG FL 1

Regendauer PD : unbekannt
Wiederkehrsintervall des Regens : 10

KOSTRA-Regenmengen P:

- fuer PD = 5 min	:	9.9 mm
- fuer PD = 10 min	:	13.3 mm
- fuer PD = 15 min	:	15.4 mm
- fuer PD = 20 min	:	17.0 mm
- fuer PD = 30 min	:	19.3 mm
- fuer PD = 45 min	:	21.8 mm
- fuer PD = 60 min	:	23.7 mm
- fuer PD = 90 min	:	26.6 mm
- fuer PD = 2 h	:	28.8 mm
- fuer PD = 3 h	:	32.1 mm
- fuer PD = 4 h	:	34.7 mm
- fuer PD = 6 h	:	38.6 mm
- fuer PD = 9 h	:	42.9 mm
- fuer PD = 12 h	:	46.3 mm
- fuer PD = 18 h	:	51.5 mm
- fuer PD = 24 h	:	55.5 mm

Landschaftscharakter des Gebietes : Flachland
Vorfeuchte des Gebietes (- hydrologische Sicherheit).... : mittel

Hydrographisch-morphologische Einzugsgebietscharakteristik:

* Einzugsgebietsflaeche	:	0.4249 km ²
* Hoehendifferenz Wasserscheide-Bemessungsstelle	:	4.4 m
* laengster Fliessweg Wasserscheide-Bemessungsstelle	:	0.11 km

- * Gesamtlänge aller Vorfluter im Einzugsgebiet : 0.21 km
- * Basisabfluss am Bemessungspegel : unbekannt

Art der Abflusskonzentration: flächenhafter Abfluss

Nutzungsanteile im Einzugsgebiet:

- * Ödland : 2 %
- * Hackfrüchte, Wein : 91 %
- * Dauerwiese : 2 %
- * Wald (aufgelockert) : 2 %
- * Feldwege : 2 %
- * Versiegelte Fläche : 1 %

Bodentypen bezüglich Infiltrationsvermögen

- * Ödland : BT 3
- * Hackfrüchte, Wein : BT 3
- * Dauerwiese : BT 3
- * Wald (aufgelockert) : BT 3
- * Feldwege : BT 3
- * Versiegelte Fläche : BT 4

BT 1 - gutes Infiltrationsvermögen
 BT 2 - mittleres Infiltrationsvermögen
 BT 3 - geringes Infiltrationsvermögen
 BT 4 - sehr geringes Infiltrationsvermögen

L Ö S U N G S W E G U N D E R G E B N I S S E :

Hinweis: Es wird lediglich die im Ergebnis der Iteration gefundene Lösung für die optimale Regendauer (entspricht der maximalen Abflussmenge) dargestellt

1. NIEDERSCHLAGSGANGLINIE:

- * Regenspende fuer einen jaehrlichen 15-minuetigen Regen:
 - Basisregenspende PS (15,1): PS = 0.01/s/ha
- * Daraus ergibt sich nach Berechnung unter Zugrundelegung von /1/:
 - eine massgebende Regenmenge von: P = 18.5mm
 - fuer eine massgebende Regendauer von: PD = 26.5min
 - fuer das Wiederkehrintervall von: T = 10.0a
- * Abminderung der Regenhöhe für Einzugsgebiete > 30 km² (aus /2/):
 - Abminderungsfaktor: Beta = 1.0
 - resultierende Regenmenge: P = 18.5 mm
- * maßgebende Regendauer: PD = 27 min
- * Anzahl der Regenintervalle (i = 1 ... n): n = 27
- * Regenintensitaet: PI = 41.9mm/min
- * räumliche Variabilität: im Einzugsgebiet als konstant angenommen
- * zeitliche Variabilität: Blockregen (konstante Intensität)

2. OBERFLÄCHENABFLUSSWIRKSAMER NIEDERSCHLAG (EFFEKTIVNIEDERSCHLAG):

Anwendung des SCS-Verfahrens aus Gebietskenngrößen bei Berücksichtigung

der pedologischen Eigenschaften der Oberfläche, Bewuchs und Vorfeuchte (/3/ und /4/):

- * Anfangs-CN-Faktor (flächengewichtet): CN = 84.0 %
- * Größe X für Anfangsverlust $IA=X(1000/CN-10)$: X = 5.0 %
- * Anfangsabflussbeiwert aus CN-Verfahren PHICN: PHICN = 30.9 %
- * Anfangsoberflächenabfluss (flächengewichtet): RO = 5.7 mm

3. NIEDERSCHLAG-ABFLUSS-TRANSFORMATION

- * Methodik: Anwendung des Faltungsintegrals (s. u.a. /5/ bis /7/) unter Verwendung eines Parallelkaskadenmodells

- * Berechnung notwendiger Größen für die Impulsantwortfunktion $u(T,t_j)$:

- berechnete Flusssdichte nach /2/: DF = 0.5
- berechneter hydrographischer Faktor aus /8/: HF = 0.5
- Speicherkonstanten für das Parallelkaskadenmodell nach /2/:
 - K1 = 8.3min
 - K2 = 13.8min
 - DELTA = 1.00

- * Gleichung der Impulsantwortfunktion:

$$U(T,t_j) = AE(3,6 [DELTA/K1(t_j/K1) e^{-t_j/K1} + (1-DELTA)/K2(t_j/K2) e^{-t_j/K2}]$$

- * Die Anwendung der Faltungsgleichung liefert die Ordinatenwerte der Oberflächenabflussganglinie $QD(t)$:

$$QD(t_j) = T * [SUM(i=1 \dots n) IPEFF * u(T,t_j - (j-1) * T] \quad \text{in l/s}$$

4. GESAMTABFLUSSGANGLINIE $Q(t)$:

Die Gesamtabflussganglinie $Q(t)$ ergibt sich für jeden Zeitschritt t_j aus der Superposition von Direkt- und Basisabfluss:

$$Q(t_j) = QD(t_j) + QB(t_j)$$

$$\text{mit } QB(t_j) = \text{const.} = 5.10 \text{ L/s}$$

- * Die Lösung erfolgt schrittweise. Die Ergebnisse sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Simulationsergebnisse (Regendauer PD = 27 min)			
t min	u(T,t) l/(s*mm)	QD(t) l/s	Q(t) l/s
1	90.633	19.566	24.664
2	160.747	54.267	59.366
3	213.827	100.427	105.526
4	252.829	155.007	160.106
5	280.262	215.509	220.607
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
23	148.322	1179.736	1184.834
24	137.252	1209.365	1214.464

t min	u(T,t) l/(s*mm)	QD(t) l/s	Q(t) l/s
25	126.786	1236.735	1241.834
26	116.932	1261.978	1267.077
27	107.684	1285.224	1290.323
28	99.031	1287.037	1292.136
29	90.958	1271.971	1277.070
30	83.443	1243.825	1248.923
31	76.464	1205.752	1210.850
32	69.996	1160.360	1165.459
33	64.012	1109.795	1114.894
34	58.486	1055.809	1060.908
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
138	0.001	0.032	5.131
139	0.001	0.029	5.127
140	0.001	0.026	5.124
141	0.001	0.023	5.122

5. ZUSAMMENFASSUNG

Für das Wiederkehrsintervall ergeben sich aus der Abflussganglinie folgende wesentliche Parameter:

- * Abflussmaximum: QMAX = 1292.14 L/s
- * Anstiegszeit: TA = 28.00 min
- * Durchflusssumme: QSUM = 2.52 (Tausend) m³

6. LITERATUR

- /1/ Bartels, H., B. Dietzer, G. Malitz, F.M. Albrecht und J. Guttenberger (2005): KOSTRA-DWD-2000, Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951-2000) Fortschreibungsbericht - Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie, Offenbach a. M., Selbstverlag
- /2/ Schroeder, W., G. Euler, F.-K. Schneider und D. Knauf (1994): Grundlagen des Wasserbaus. 3. Auflage. Werner-Verlag Duesseldorf.
- /3/ U.S. Departement of Agriculture, Soil Conservation Service (1964): SCS national engineering handbook, Section 4: Hydrology. Washington.
- /4/ Haan, C. T. (1982): Hydrologic modelling of small watersheds. ASAE Monograph 5, 1982.
- /5/ Maniak, U. (1992): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einfuehrung fuer Ingenieure. 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- /6/ Dyck, S. u.a. (1980): Angewandte Hydrologie, Teil 1: Berechnung und Regelung des Durchflusses der Fluesse. 2. Auflage, Verlag W. Ernst & Sohn Berlin.

- /7/ Dyck, S. und G. Peschke (1995):
Grundlagen der Hydrologie. 2. Auflage, Verlag fuer Bauwesen Berlin.
- /8/ Wackermann, R. (1981):
Eine Einheitsganglinie aus charakteristischen Systemwerten ohne
Niederschlag-Abfluss-Messungen. Wasser und Boden, Heft 1, 1981..

Fortsetzung Anlage 3:

Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, freie Regendauern, Mid Case

b) Ergebnisse für alle Einzugsgebiete, Blockregen:

Festlandseite				
Einzugsgebiet	Regendauer [min]	Abflussbeiwert Ψ [%]	Oberflächenabfluss [mm]	Scheiteldurchfluss [l/s]
EZG FL 1 = BP 1	27	30,9	5,7	1 292
FSQ FL POR	15	33,8	5,2	45
EZG S DVS	15	33,8	5,2	64
GB EN 50	120	41,8	12,0	179
EZG B RRB 3	15	100,0	15,4	120
FSQ FL 2	15	8,6	1,3	63
FSQ FL 3	15	8,6	1,3	35
Maßgebende Regendauer BP 2	120	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier GB EN 50)		
GB EN 5W	64	34,2	8,2	465
Maßgebende Regendauer BP 3	64	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier GB EN 5W)		
FSQ FL 1 = BP 4	15	8,6	1,3	12
EZG B RRB 1	15	36,7	5,7	109
EZG B RRB 2	15	36,7	5,7	47
EZG B RRB 4	15	100,0	15,4	151
GB EN 1N = BP 5	15	8,6	1,3	12
Inselseite				
Einzugsgebiet	Regendauer [min]	Abflussbeiwert Ψ [%]	Oberflächenabfluss [mm]	Scheiteldurchfluss [l/s]
AV EN 7N	15	8,6	1,3	76
AV EN 7O	89	39,9	10,6	919
EZG B RRB 6	15	100,0	15,4	81
EZG B RRB 7	15	36,7	5,7	109
Maßgebende Regendauer BP 6	89	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier AV EN 7O)		
AV EN 7N	15	8,6	1,3	76
AV EN 7O	89	39,9	10,6	919
EZG B RRB 6	15	100,0	15,4	81
EZG B RRB 7	15	36,7	5,7	109
AV EN 7W	64	34,1	8,2	1 809
Maßgebende Regendauer BP 7	64	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier AV EN 7W)		
FSQ FM 1	15	8,6	1,3	31
FSQ FM POR	15	33,8	5,2	32
EZG B RRB 5	15	100,0	15,4	199
Maßgebende Regendauer BP 8	15	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier FSQ FM POR, weil EZG RRB 5 gedrosselt)		
Synchron überlagerter Gesamtdurchfluss [l/s]				5 850

Fortsetzung Anlage 3:

Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, freie Regendauern, Mid Case

c) Ergebnisse für alle Einzugsgebiete, DvWK-Regen:

Festlandseite				
Einzugsgebiet	Regendauer [min]	Abflussbeiwert Ψ [%]	Oberflächenabfluss [mm]	Scheiteldurchfluss [l/s]
EZG FL 1 = BP 1	27	30,9	5,7	1 286
FSQ FL POR	15	33,8	5,2	43
EZG S DVS	15	33,8	5,2	61
GB EN 50	116	41,6	11,9	171
EZG B RRB 3	15	100,0	15,4	120
FSQ FL 2	15	8,6	1,3	76
FSQ FL 3	15	8,6	1,3	42
Maßgebende Regendauer BP 2	116	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier GB EN 50)		
GB EN 5W	57	33,4	7,8	454
Maßgebende Regendauer BP 3	57	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier GB EN 5W)		
FSQ FL 1 = BP 4	15	8,6	1,3	14
EZG B RRB 1	15	36,7	5,7	104
EZG B RRB 2	15	36,7	5,7	45
EZG B RRB 4	15	100,0	15,4	151
GB EN 1N = BP 5	15	8,6	1,3	14
Inselseite				
Einzugsgebiet	Regendauer [min]	Abflussbeiwert Ψ [%]	Oberflächenabfluss [mm]	Scheiteldurchfluss [l/s]
AV EN 7N	15	8,6	1,3	91
AV EN 7O	87	39,7	10,4	888
EZG B RRB 6	15	100,0	15,4	81
EZG B RRB 7	15	36,7	5,7	104
Maßgebende Regendauer BP 6	87	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier AV EN 7O)		
AV EN 7N	15	8,6	1,3	91
AV EN 7O	89	39,7	10,4	888
EZG B RRB 6	15	100,0	15,4	81
EZG B RRB 7	15	36,7	5,7	104
AV EN 7W	57	33,4	7,8	1 764
Maßgebende Regendauer BP 7	57	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier AV EN 7W)		
FSQ FM 1	15	8,6	1,3	37
FSQ FM POR	15	33,8	5,2	31
EZG B RRB 5	15	100,0	15,4	199
Maßgebende Regendauer BP 8	15	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier FSQ FM POR, weil EZG RRB 5 gedrosselt)		
Synchron überlagerter Gesamtdurchfluss [l/s]				5 776

Fortsetzung Anlage 3:

Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, freie Regendauern, Mid Case

d) Ergebnisse für alle Einzugsgebiete, PECHER-Regen, anfangsbetont:

Festlandseite				
Einzugsgebiet	Regendauer [min]	Abflussbeiwert Ψ [%]	Oberflächenabfluss [mm]	Scheiteldurchfluss [l/s]
EZG FL 1 = BP 1	46	34,8	7,6	1 259
FSQ FL POR	15	33,8	5,2	34
EZG S DVS	15	33,8	5,2	48
GB EN 50	42	34,5	7,3	131
EZG B RRB 3	15	100,0	15,4	120
FSQ FL 2	15	8,6	1,3	49
FSQ FL 3	15	8,6	1,3	27
Maßgebende Regendauer BP 2	42	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier GB EN 50)		
GB EN 5W	240	42,7	14,8	479
Maßgebende Regendauer BP 3	57	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier GB EN 5W)		
FSQ FL 1 = BP 4	15	8,6	1,3	9
EZG B RRB 1	15	36,7	5,7	83
EZG B RRB 2	15	36,7	5,7	35
EZG B RRB 4	15	100,0	15,4	151
GB EN 1N = BP 5	15	8,6	1,3	9
Inselseite				
Einzugsgebiet	Regendauer [min]	Abflussbeiwert Ψ [%]	Oberflächenabfluss [mm]	Scheiteldurchfluss [l/s]
AV EN 7N	15	8,6	1,3	60
AV EN 7O	240	46,6	16,2	939
EZG B RRB 6	15	100,0	15,4	81
EZG B RRB 7	15	36,7	5,7	83
Maßgebende Regendauer BP 6	240	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier AV EN 7O)		
AV EN 7N	15	8,6	1,3	60
AV EN 7O	240	46,6	16,2	939
EZG B RRB 6	15	100,0	15,4	81
EZG B RRB 7	15	36,7	5,7	83
AV EN 7W	240	42,7	14,8	1 888
Maßgebende Regendauer BP 7	240	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier AV EN 7W)		
FSQ FM 1	15	8,6	1,3	24
FSQ FM POR	15	33,8	5,2	34
EZG B RRB 5	15	100,0	15,4	199
Maßgebende Regendauer BP 8	15	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier FSQ FM POR, weil EZG RRB 5 gedrosselt)		
Synchron überlagerter Gesamtdurchfluss [l/s]				5 742

Fortsetzung Anlage 3:

Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, freie Regendauern, Mid Case

e) Ergebnisse für alle Einzugsgebiete, PECHER-Regen, endbetont:

Festlandseite				
Einzugsgebiet	Regendauer [min]	Abflussbeiwert Ψ [%]	Oberflächenabfluss [mm]	Scheiteldurchfluss [l/s]
EZG FL 1 = BP 1	15	26,9	4,2	1 160
FSQ FL POR	15	33,8	5,2	42
EZG S DVS	15	33,8	5,2	58
GB EN 50	60	37,1	8,8	164
EZG B RRB 3	15	100,0	15,4	120
FSQ FL 2	15	8,6	1,3	67
FSQ FL 3	15	8,6	1,3	37
Maßgebende Regendauer BP 2	60	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier GB EN 50)		
GB EN 5W	30	29,4	5,7	415
Maßgebende Regendauer BP 3	30	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier GB EN 5W)		
FSQ FL 1 = BP 4	15	8,6	1,3	13
EZG B RRB 1	15	36,7	5,7	99
EZG B RRB 2	15	36,7	5,7	43
EZG B RRB 4	15	100,0	15,4	151
GB EN 1N = BP 5	15	8,6	1,3	13
Inselseite				
Einzugsgebiet	Regendauer [min]	Abflussbeiwert Ψ [%]	Oberflächenabfluss [mm]	Scheiteldurchfluss [l/s]
AV EN 7N	15	8,6	1,3	80
AV EN 7O	38	34,0	7,0	809
EZG B RRB 6	15	100,0	15,4	81
EZG B RRB 7	15	36,7	5,7	99
Maßgebende Regendauer BP 6	89	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier AV EN 7O)		
AV EN 7N	15	8,6	1,3	80
AV EN 7O	38	34,0	7,0	809
EZG B RRB 6	15	100,0	15,4	81
EZG B RRB 7	15	36,7	5,7	99
AV EN 7W	30	29,4	5,7	1 615
Maßgebende Regendauer BP 7	30	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier AV EN 7W)		
FSQ FM 1	15	8,6	1,3	33
FSQ FM POR	15	33,8	5,2	29
EZG B RRB 5	15	100,0	15,4	199
Maßgebende Regendauer BP 8	15	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier FSQ FM POR, weil EZG RRB 5 gedrosselt)		
Synchron überlagerter Gesamtdurchfluss [l/s]				5 327

Anlage 4:

Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, freie Regendauern, Worst Case

Ergebnisse für alle Einzugsgebiete, Blockregen:

Festlandseite				
Einzugsgebiet	Regendauer [min]	Abflussbeiwert Ψ [%]	Oberflächenabfluss [mm]	Scheiteldurchfluss [l/s]
EZG FL 1 = BP 1	27	53,5	12,0	2 710
FSQ FL POR	15	57,7	10,7	93
EZG S DVS	15	57,7	10,7	131
GB EN 5O	95	62,5	20,2	327
EZG B RRB 3	15	100,0	18,5	144
FSQ FL 2	15	29,8	5,5	260
FSQ FL 3	15	29,8	5,5	144
Maßgebende Regendauer BP 2	95	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier GB EN 5O)		
GB EN 5W	60	56,5	16,2	932
Maßgebende Regendauer BP 3	60	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier GB EN 5W)		
FSQ FL 1 = BP 4	15	29,8	5,5	49
EZG B RRB 1	15	57,7	10,7	205
EZG B RRB 2	15	57,7	10,7	88
EZG B RRB 4	15	100,0	18,5	181
GB EN 1N = BP 5	15	29,8	5,5	49
Inselseite				
Einzugsgebiet	Regendauer [min]	Abflussbeiwert Ψ [%]	Oberflächenabfluss [mm]	Scheiteldurchfluss [l/s]
AV EN 7N	15	29,8	5,5	313
AV EN 7O	62	59,8	17,3	1 730
EZG B RRB 6	15	100,0	18,5	97
EZG B RRB 7	15	57,7	10,7	205
Maßgebende Regendauer BP 6	62	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier AV EN 7O)		
AV EN 7N	15	29,8	5,5	313
AV EN 7O	62	59,8	17,3	1 730
EZG B RRB 6	15	100,0	18,5	97
EZG B RRB 7	15	57,7	10,7	205
AV EN 7W	60	56,4	16,1	3 628
Maßgebende Regendauer BP 7	60	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier AV EN 7W)		
FSQ FM 1	15	29,8	5,5	128
FSQ FM POR	15	57,7	10,7	66
EZG B RRB 5	15	100,0	18,5	240
Maßgebende Regendauer BP 8	15	entspricht der Regendauer des Einzugsgebiets mit dem höchsten Durchfluss (hier FSQ FM POR, weil EZG RRB 5 gedrosselt)		

Anlage 5:

Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, maßgebende Regendauern, Mid Case, Blockregen

a) tabellarische Übersicht:

Festlandseite				
Einzugsgebiet	Regendauer [min]	Abflussbeiwert Ψ [%]	Oberflächenabfluss [mm]	Scheiteldurchfluss [l/s]
EZG FL 1 = BP 1	27	30,9	5,7	1 292
FSQ FL POR	120	49,5	14,2	16
EZG S DVS	120	49,5	14,2	22
GB EN 5O	120	41,8	12,1	178
EZG B RRB 3	120	100,0	28,8	28
FSQ FL 2	120	18,9	5,5	33
FSQ FL 3	120	18,9	5,5	18
Berechnungspunkt BP 2	120			265
FSQ FL POR	64	44,9	10,8	22
EZG S DVS	64	44,9	10,8	31
GB EN 5O	64	37,5	9,0	161
EZG B RRB 3	64	100,0	24,1	44
FSQ FL 2	64	15,5	3,7	42
FSQ FL 3	64	15,5	3,7	23
GB EN 5W	64	34,2	8,2	463
Berechnungspunkt 3	64			706
FSQ FL 1 = BP 4	15	8,6	1,3	12
EZG B RRB 1	15	36,7	5,7	109
EZG B RRB 2	15	36,7	5,7	47
EZG B RRB 4	15	100,0	15,4	151
GB EN 1N = BP 5	15	8,6	1,3	12

Fortsetzung Anlage 5:

Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, maßgebende Regendauern, Mid Case, Blockregen

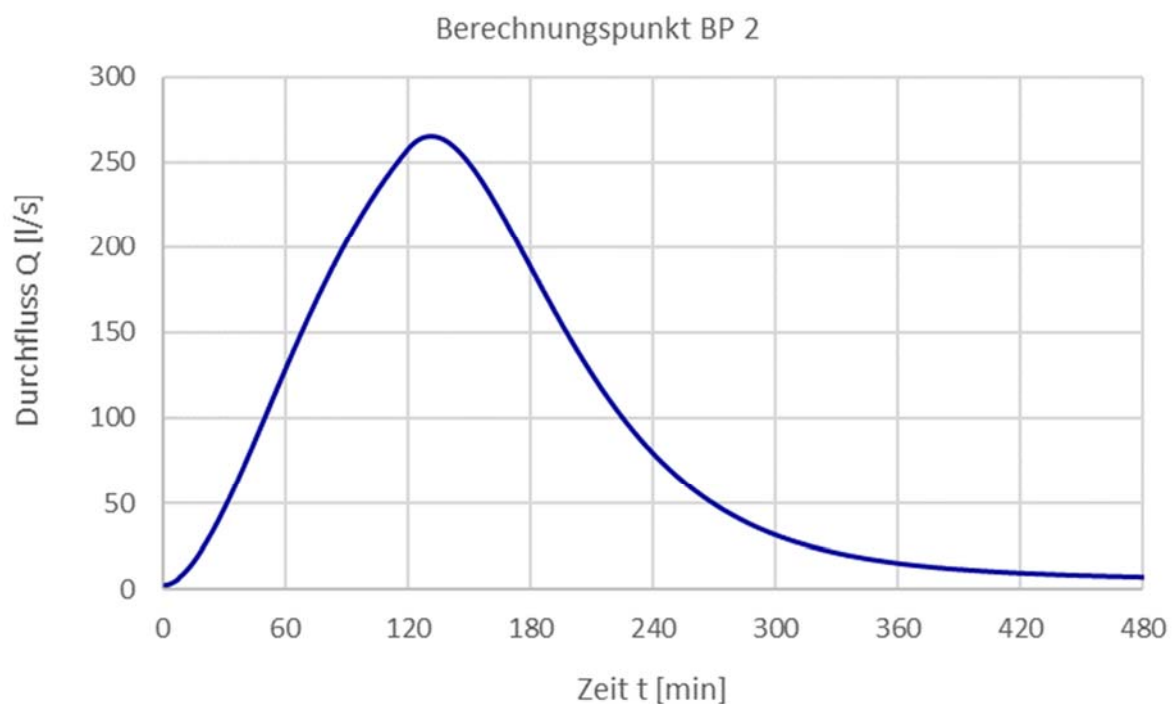
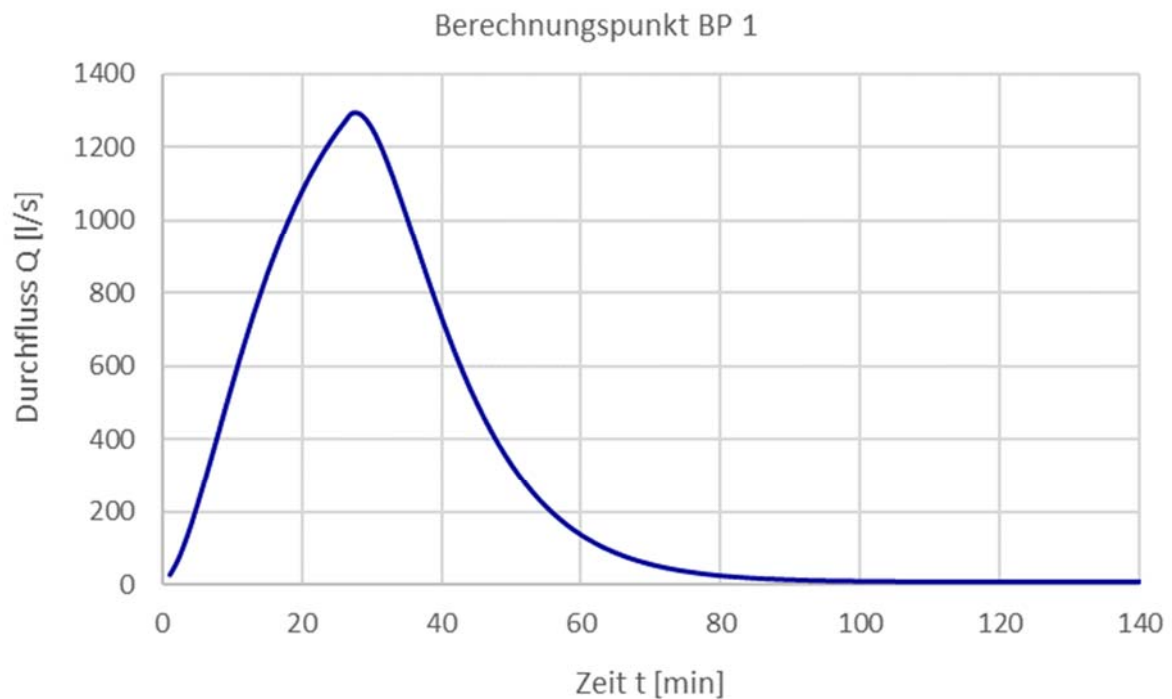
a) tabellarische Übersicht:

Inselseite				
Einzugsgebiet	Regendauer [min]	Abflussbeiwert Ψ [%]	Oberflächenabfluss [mm]	Scheiteldurchfluss [l/s]
AV EN 7N	89	17,3	4,6	45
AV EN 7O	89	40,0	10,6	917
EZG B RRB 6	89	100,0	26,5	23
EZG B RRB 7	89	50,4	13,4	43
Berechnungspunkt BP 6	89			963
AV EN 7N	64	15,5	3,7	51
AV EN 7O	64	37,7	9,1	901
EZG B RRB 6	64	100,0	24,1	30
EZG B RRB 7	64	48,0	11,6	52
AV EN 7W	64	34,1	8,2	1 801
Berechnungspunkt 7	64			2 558
FSQ FM 1	15	8,6	1,3	31
FSQ FM POR	15	33,8	5,2	32
EZG B RRB 5	15	100,0	15,4	199
Berechnungspunkt 8	15			65

Fortsetzung Anlage 5:

Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, maßgebende Regendauern, Mid Case, Blockregen

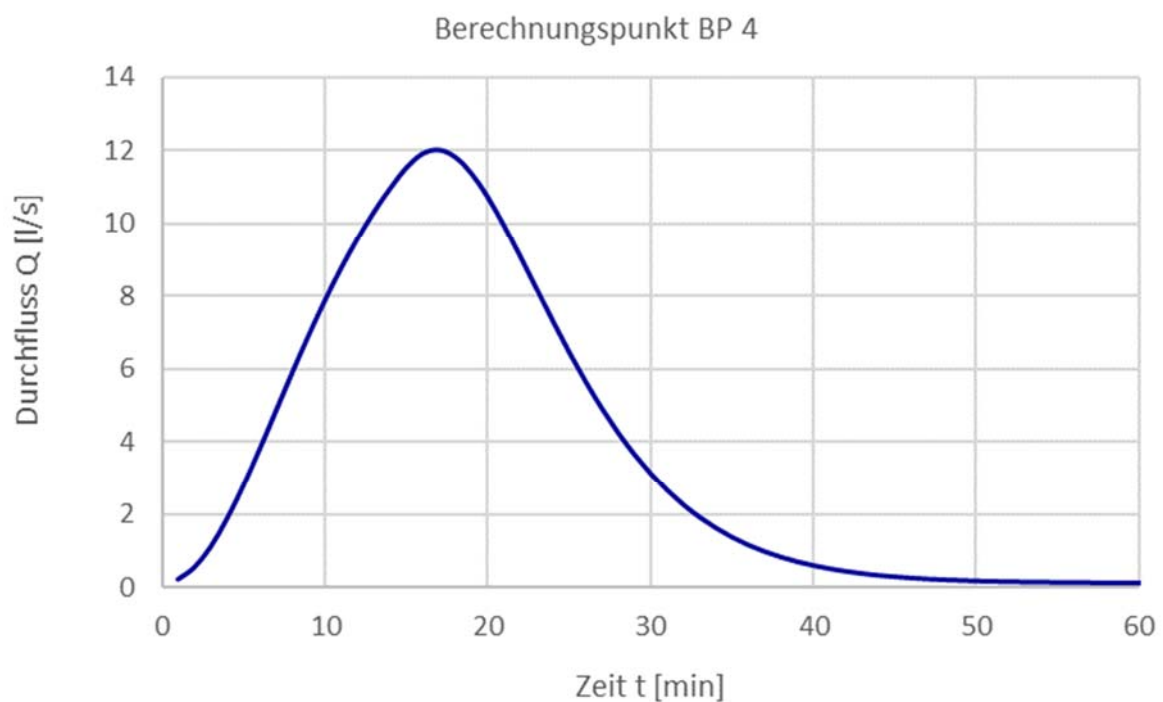
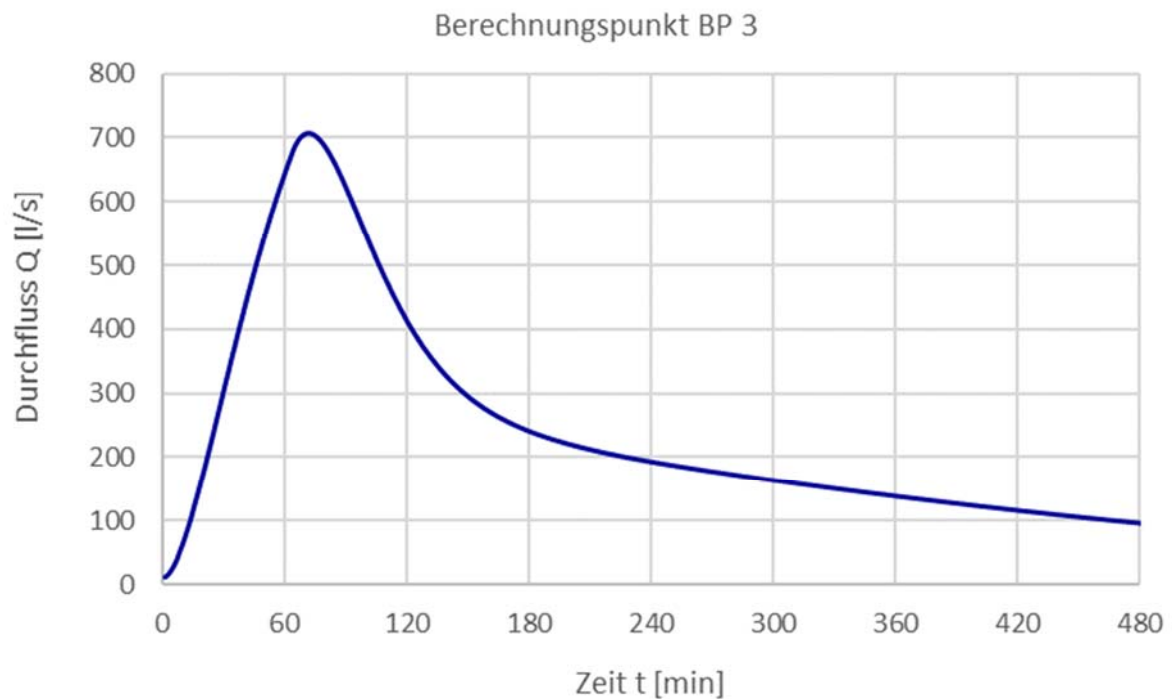
b) Durchflussganglinien:



Fortsetzung Anlage 5:

Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, maßgebende Regendauern, Mid Case, Blockregen

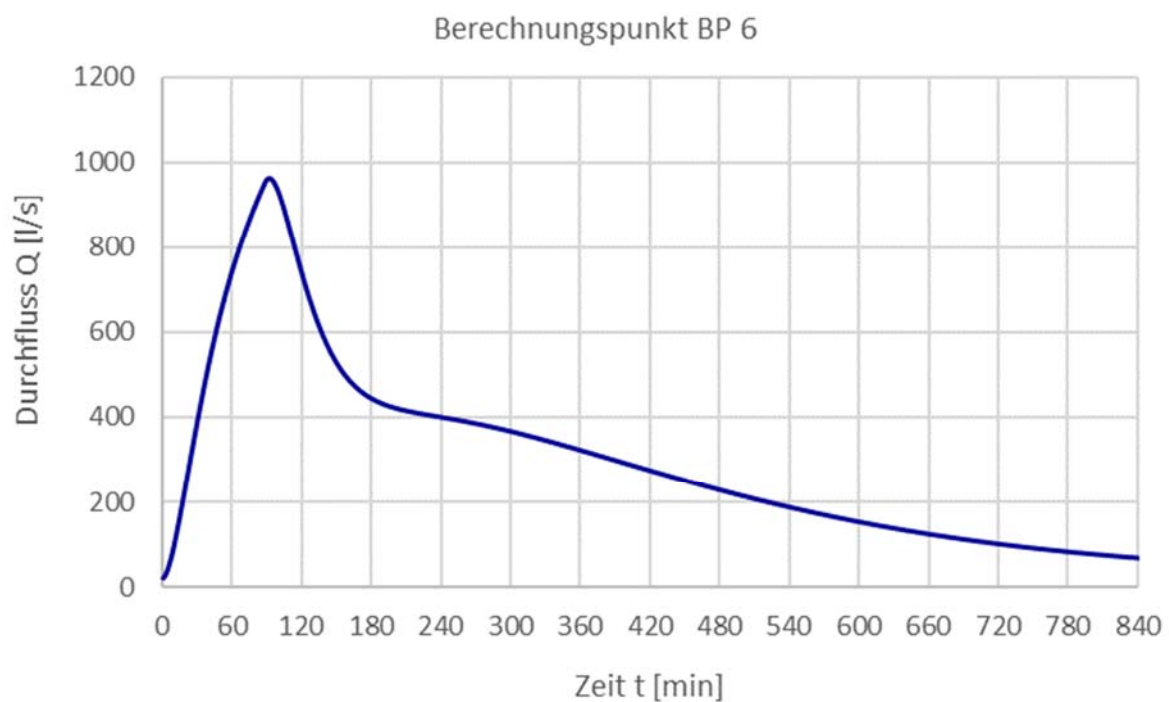
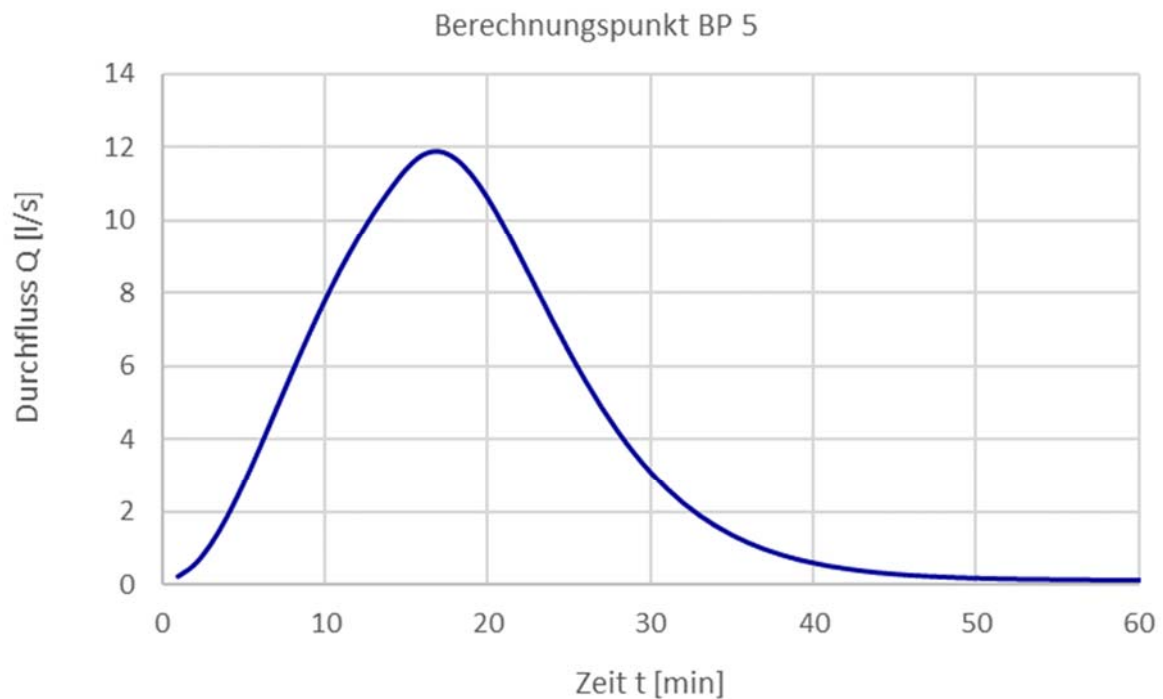
b) Durchflussganglinien:



Fortsetzung Anlage 5:

Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, maßgebende Regendauern, Mid Case, Blockregen

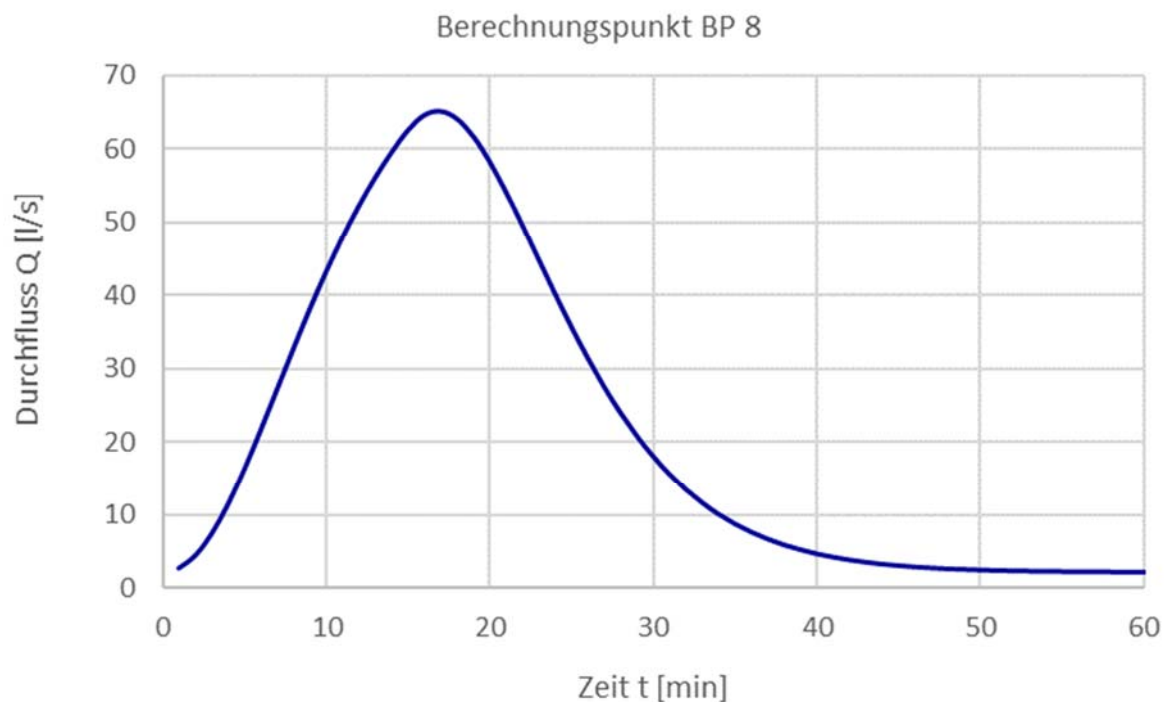
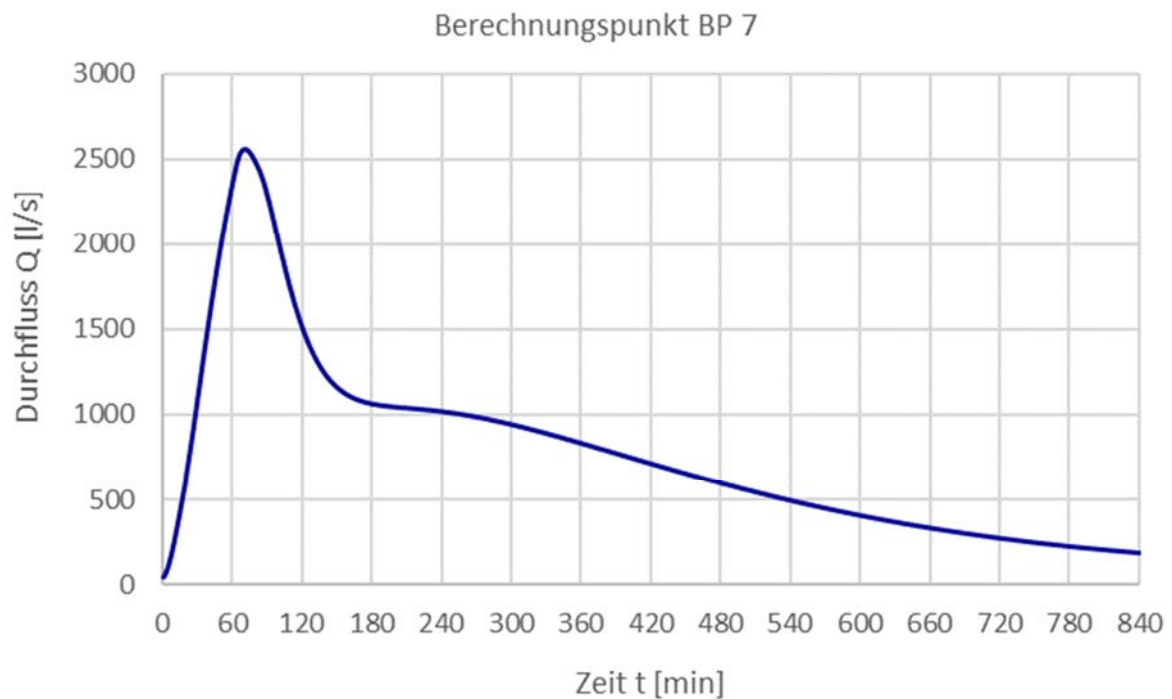
b) Durchflussganglinien:



Fortsetzung Anlage 5:

Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, maßgebende Regendauern, Mid Case, Blockregen

b) Durchflussganglinien:



Anlage 6:

Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, maßgebende Regendauern, Worst Case, Blockregen

a) tabellarische Übersicht:

Festlandseite				
Einzugsgebiet	Regendauer [min]	Abflussbeiwert Ψ [%]	Oberflächenabfluss [mm]	Scheiteldurchfluss [l/s]
EZG FL 1 = BP 1	27	53,5	12,0	2 710
FSQ FL POR	95	70,5	22,8	31
EZG S DVS	95	70,5	22,8	44
GB EN 50	95	62,5	20,2	325
EZG B RRB 3	95	100,0	32,3	40
FSQ FL 2	95	43,4	14,0	105
FSQ FL 3	95	43,4	14,0	58
Berechnungspunkt 2	95			562
FSQ FL POR	60	67,9	19,5	42
EZG S DVS	60	67,9	19,5	60
GB EN 50	60	59,7	17,1	307
EZG B RRB 3	60	100,0	28,7	56
FSQ FL 2	60	40,4	11,6	137
FSQ FL 3	60	40,4	11,6	76
GB EN 5W	60	56,5	16,2	927
Berechnungspunkt BP 3	60			1 466
FSQ FL 1 = BP 4	15	29,8	5,5	49
EZG B RRB 1	15	57,7	10,7	205
EZG B RRB 2	15	57,7	10,7	88
EZG B RRB 4	15	100,0	18,5	181
GB EN 1N = BP 5	15	29,8	5,5	49

Fortsetzung Anlage 6:

Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, maßgebende Regendauern, Worst Case, Blockregen

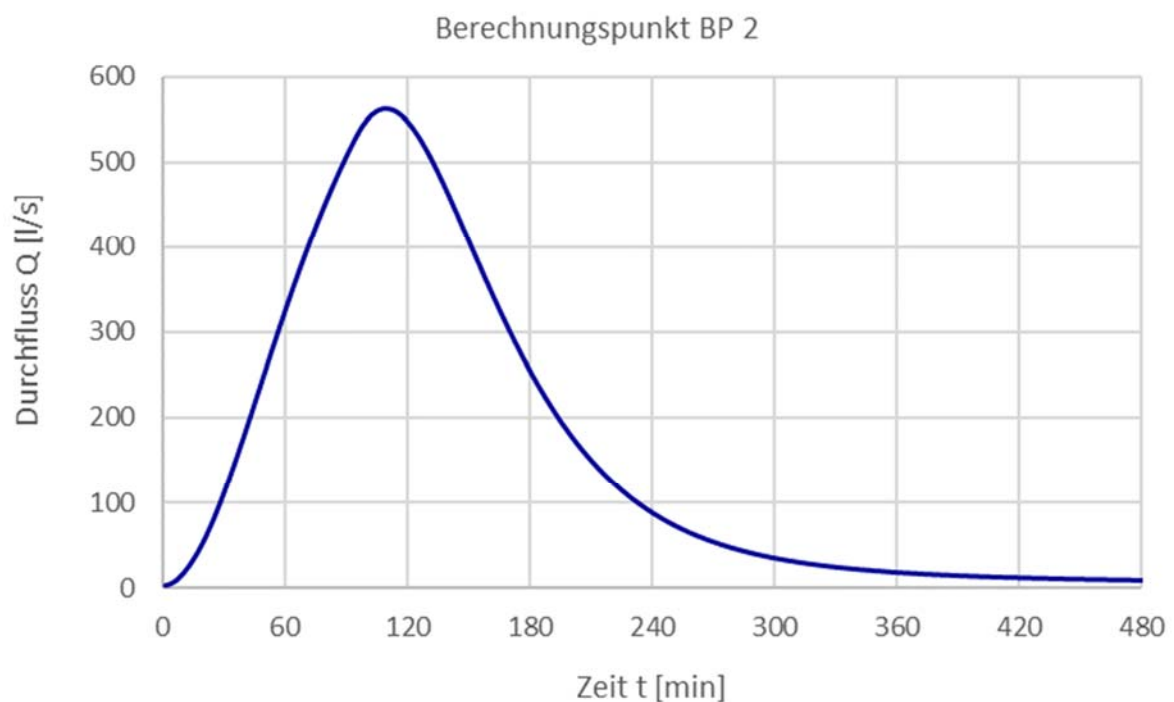
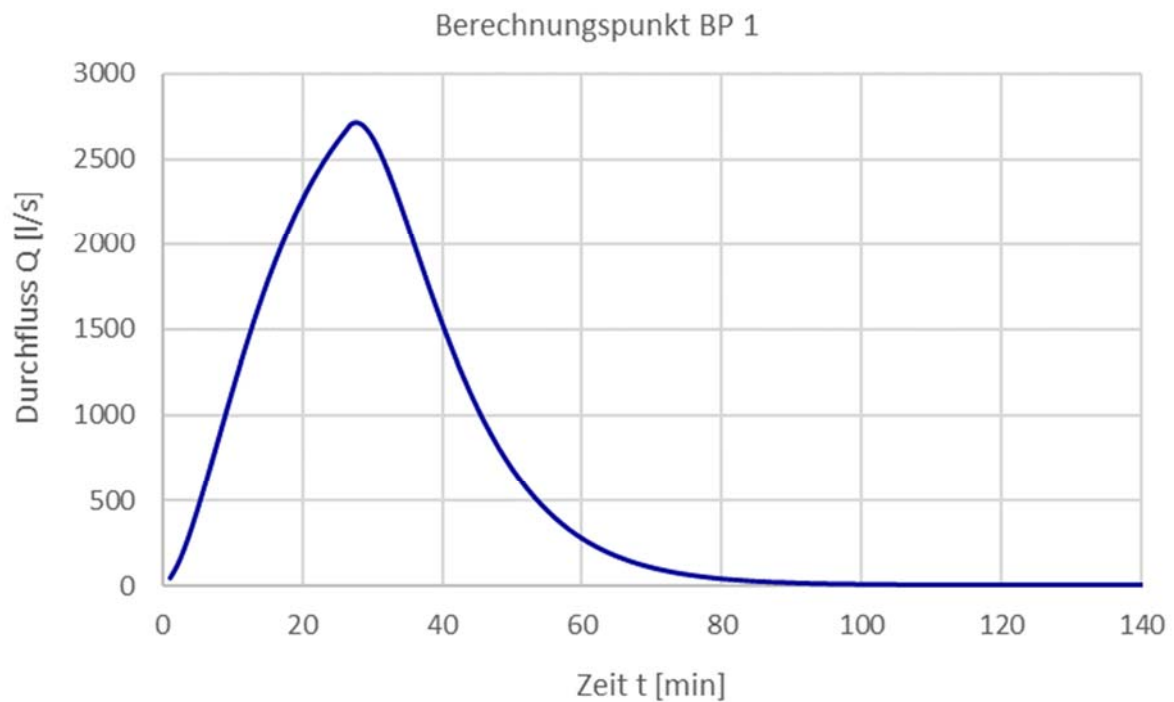
a) tabellarische Übersicht:

Inselseite				
Einzugsgebiet	Regendauer [min]	Abflussbeiwert Ψ [%]	Oberflächenabfluss [mm]	Scheiteldurchfluss [l/s]
AV EN 7N	62	40,5	11,7	162
AV EN 7O	62	59,8	17,3	1 721
EZG B RRB 6	62	100,0	28,9	37
EZG B RRB 7	62	68,1	19,7	91
Berechnungspunkt BP 6	62			1 884
AV EN 7N	60	40,4	11,6	165
AV EN 7O	60	59,7	17,1	1 722
EZG B RRB 6	60	100,0	28,7	38
EZG B RRB 7	60	67,9	19,5	94
AV EN 7W	60	56,5	16,2	3 611
Berechnungspunkt BP 7	60			5 067
FSQ FM 1	15	29,8	5,5	128
FSQ FM POR	15	57,7	10,7	66
EZG B RRB 5	15	100,0	18,5	240
Berechnungspunkt BP 8	15			196

Fortsetzung Anlage 6:

Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, maßgebende Regendauern, Worst Case, Blockregen

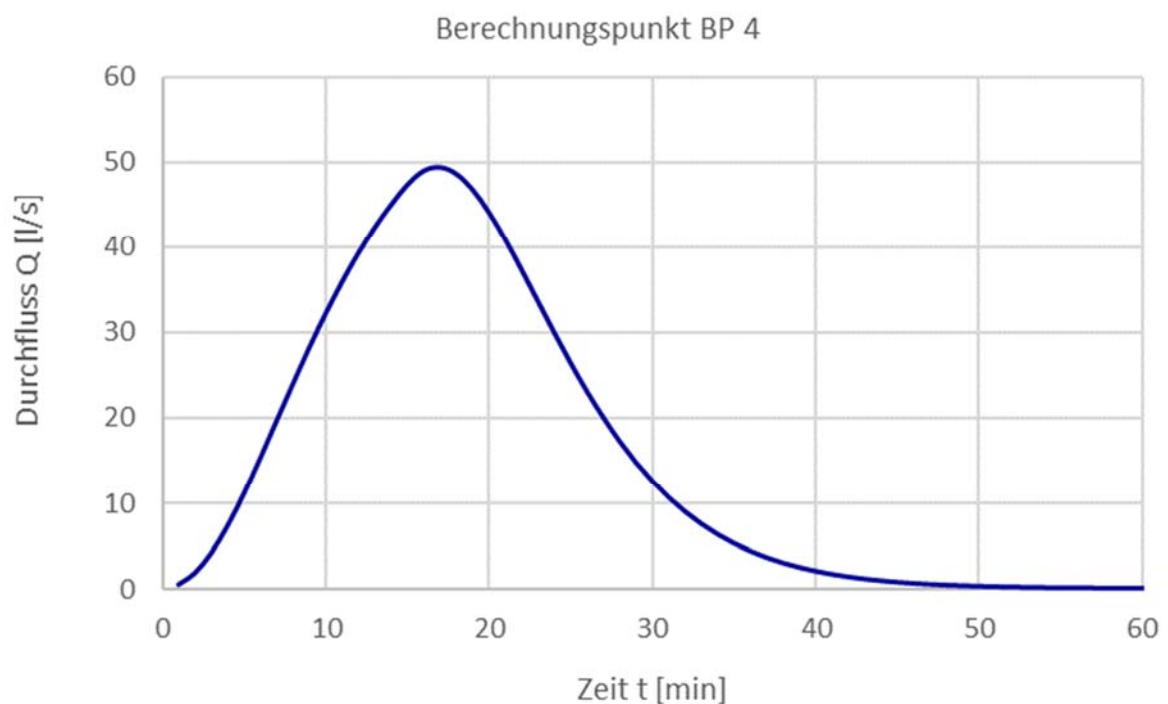
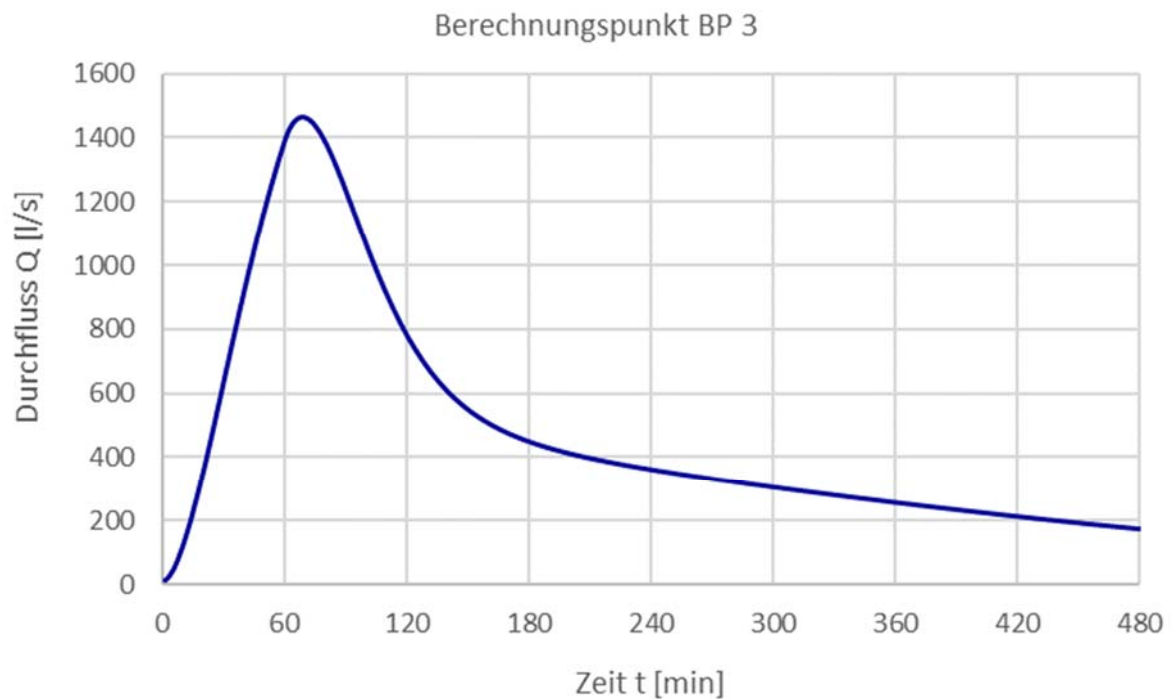
b) Durchflussganglinien:



Fortsetzung Anlage 6:

Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, maßgebende Regendauern, Worst Case, Blockregen

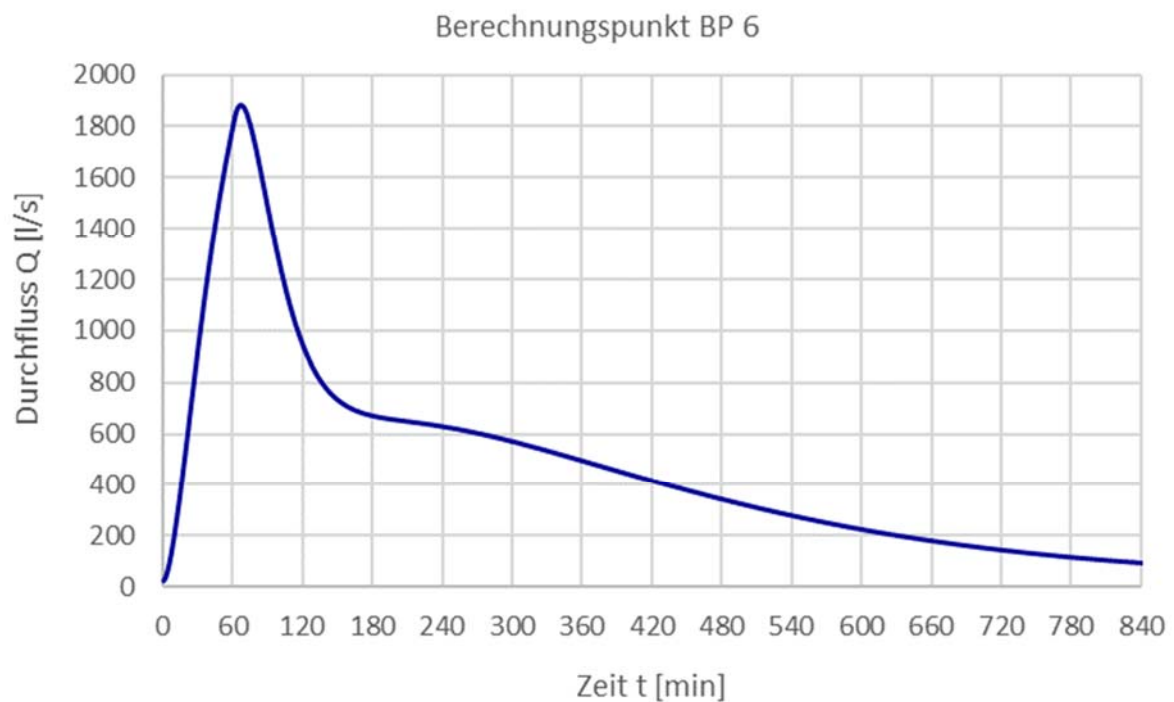
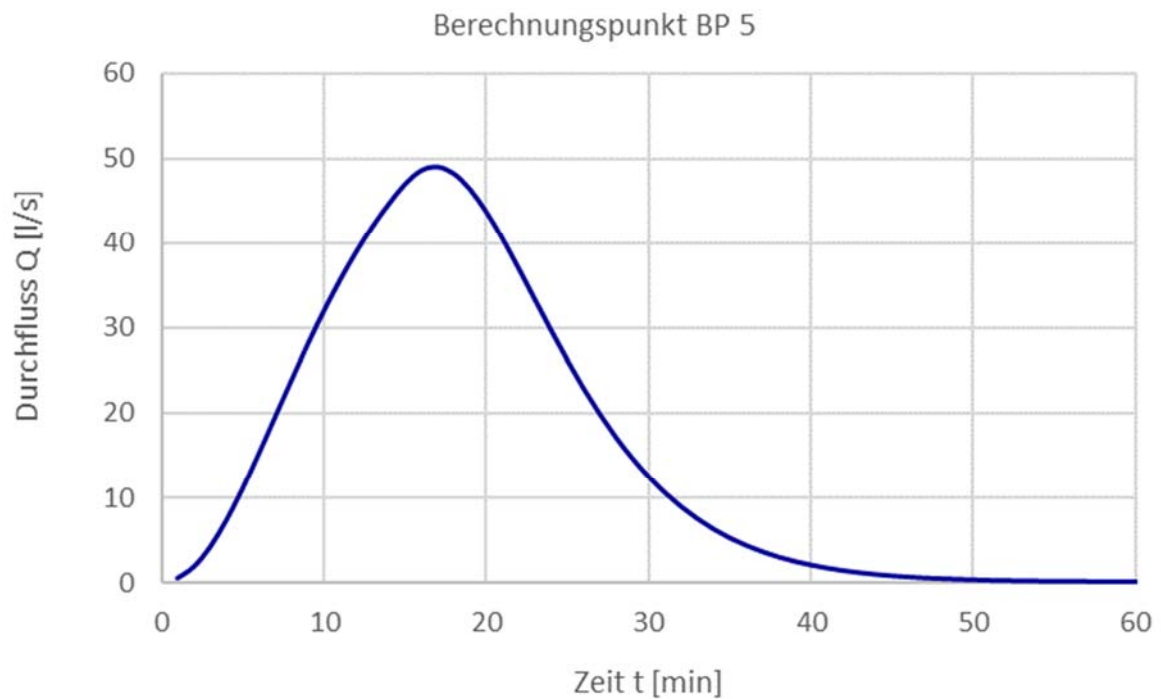
b) Durchflussganglinien:



Fortsetzung Anlage 6:

Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, maßgebende Regendauern, Worst Case, Blockregen

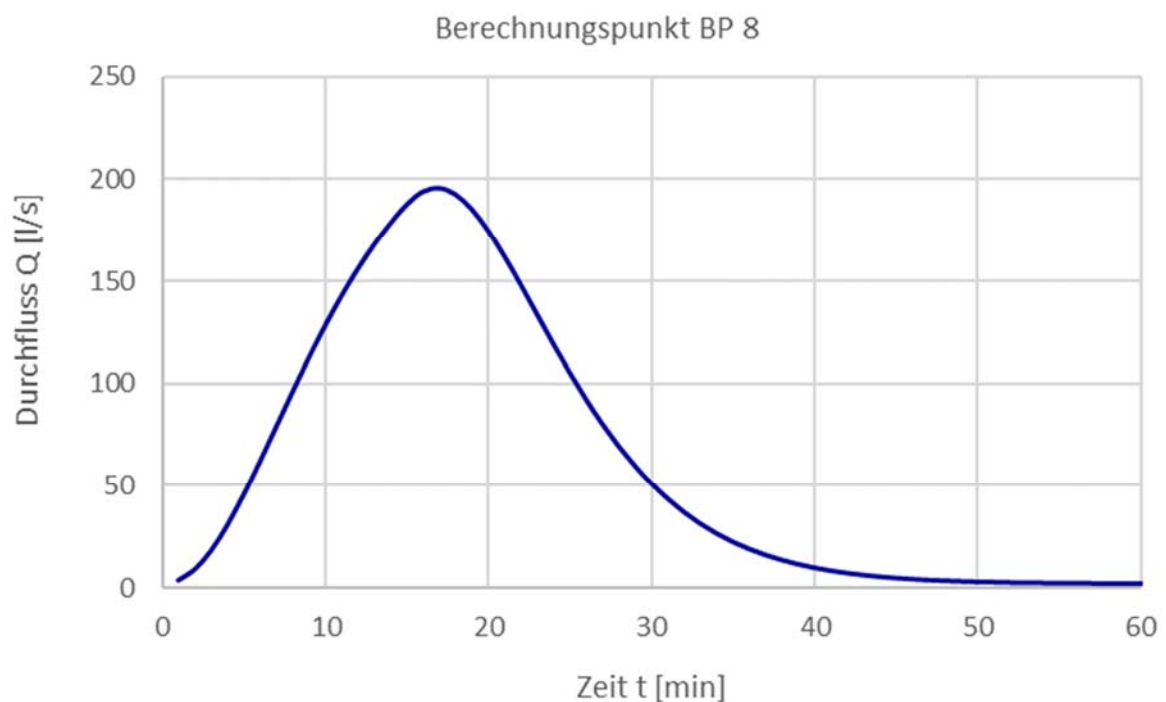
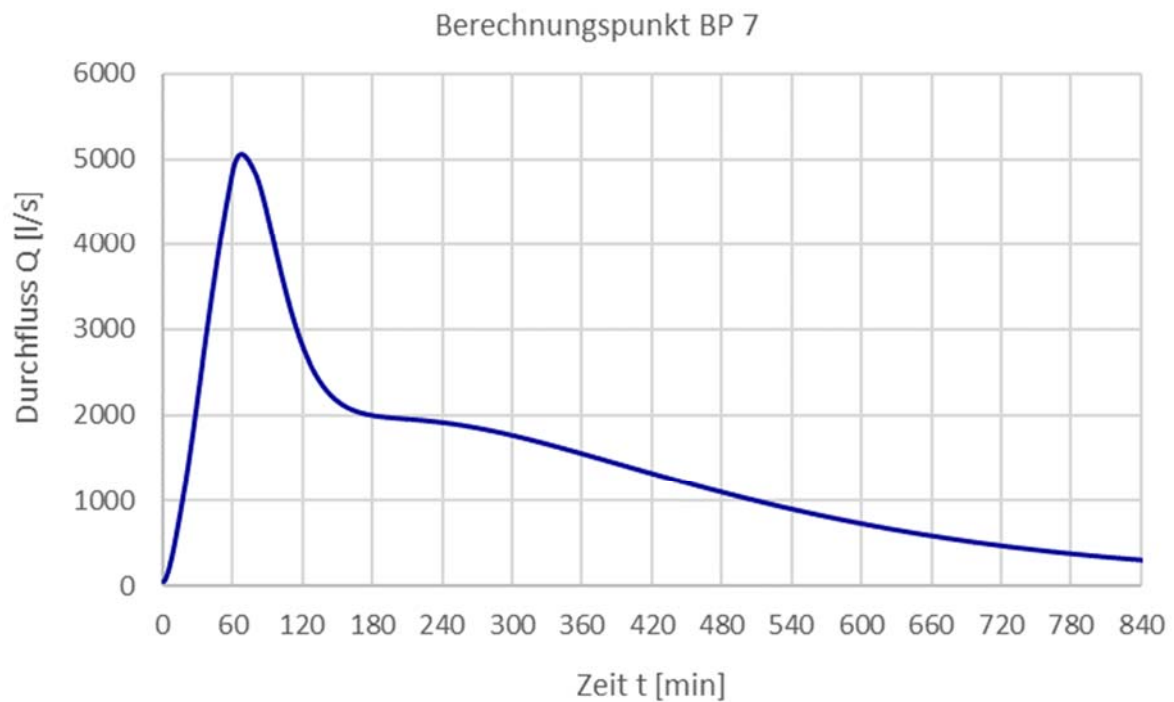
b) Durchflussganglinien:



Fortsetzung Anlage 6:

Modellergebnisse zu den Scheiteldurchflüssen im Starkregenfall, 10 Jahre Wiederkehrintervall, maßgebende Regendauern, Worst Case, Blockregen

b) Durchflussganglinien:



Anlage 7:

Ergebnisse der Laufzeitberechnungen (Isochronen)

Festlandseite			
Einzugsgebiet	Weglänge [m]	Fließzeit [s]	Isochrone [min]
EZG FL 1 = BP 1	0	0	0
FSQ FL POR	530	265	4
EZG S DVS	0	0	0
GB EN 50	0	0	0
EZG B RRB 3	80	40	1
FSQ FL 2	840	420	7
FSQ FL 3	0	0	0
Berechnungs- punkt 2	0	0	0
EZG FL 1 = BP 1	830	415	7
FSQ FL POR	1 360	680	11
EZG S DVS	830	415	7
GB EN 50	830	415	7
EZG B RRB 3	910	455	8
FSQ FL 2	1 670	835	14
FSQ FL 3	830	415	7
GB EN 5W	0	0	0
Berechnungs- punkt BP 3	0	0	0
FSQ FL 1 = BP 4	0	0	0
EZG B RRB 1	0	0	0
EZG B RRB 2	0	0	0
EZG B RRB 4	0	0	0
GB EN 1N = BP 5	0	0	0

Die Isochronen (Verzögerungen) beziehen sich auf die jeweils tiefsten Punkte (= Berechnungspunkte). Angenommen wurde eine Fließgeschwindigkeit im Starkregenfall von 2 m/s.

Fortsetzung Anlage 7:

Ergebnisse der Laufzeitberechnungen (Isochronen)

Inselseite			
Einzugsgebiet	Weglänge [m]	Fließzeit [s]	Isochrone [min]
AV EN 7N	0	0	0
AV EN 7O	0	0	0
EZG B RRB 6	0	0	0
EZG B RRB 7	0	0	0
Berechnungs- punkt BP 6	0	0	0
AV EN 7N	2 390	1 195	20
AV EN 7O	2 390	1 195	20
EZG B RRB 6	2 390	1 195	20
EZG B RRB 7	2 390	1 195	20
AV EN 7W	0	0	0
Berechnungs- punkt BP 7	0	0	0
FSQ FM 1	0	0	0
FSQ FM POR	0	0	0
EZG B RRB 5	0	0	0
Berechnungs- punkt BP 8	0	0	0

Die Isochronen (Verzögerungen) beziehen sich auf die jeweils tiefsten Punkte (= Berechnungspunkte). Angenommen wurde eine Fließgeschwindigkeit im Starkregenfall von 2 m/s.

Anlage 8:

Ergebnisse der Untersuchungen zum minimal notwendigen Speichervolumen des Regenrückhaltebeckens RRB 3

a) tabellarische Übersicht:

Regendauer P _D	Minimal notwendiges Speichervolumen [m ³]	
	Mid Case	Worst Case
5 min	84	98
10 min	112	134
15 min	129	156
20 min	142	173
30 min	160	196
45 min	179	220
60 min	193	235
90 min	213	258
2 h	227	274
3 h	246	295
4 h	259	311
6 h	275	331
9 h	288	345
12 h	294	354
18 h	294	365
24 h	288	358
48 h	238	326
72 h	179	278
96 h	123	229

Infolge der versiegelten Fläche ergeben sich für die 4 Regenverteilungen (Blockregen / DVWK-Regen / PECHER-Regen anfangsbetont / PECHER-Regen endbetont) die gleichen Werte.

Fortsetzung Anlage 8:

Ergebnisse der Untersuchungen zum minimal notwendigen Speichervolumen des Regenrückhaltebeckens RRB 3

b) Zu- und Ausflussganglinien für die maßgebende Regendauer:

