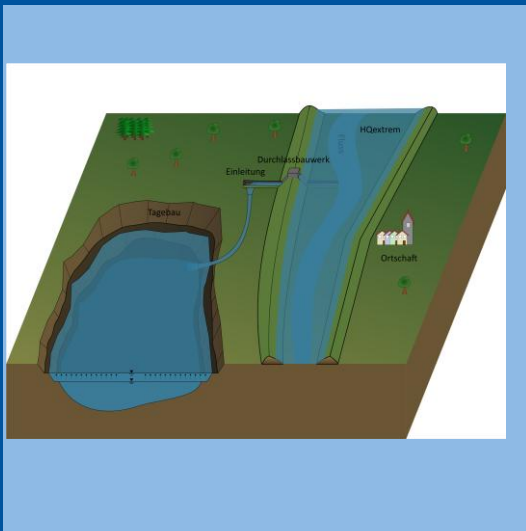


## Endbericht STorAgE - Starkregenvorsorge in Tagebauen; oder eine neue Art des gebietsweisen Hochwasserschutzes zur Entlastung der Gewässer im Zuge des Klimawandels



Patrick Rebholz M.Sc.

Johannes Emontsbotz M.Sc.

Dr.-Ing. Stefanie Wolf

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf

Univ.-Prof. Dr. Bernd Lottermoser

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Projekt 38988/01

Bericht 2025.006 (B2025006)



Bericht 2025.006

# **Bericht für STorAgE - Starkregenvorsorge in Tagebauen; oder eine neue Art des gebietsweisen Hochwasserschutzes zur Entlastung der Gewässer im Zuge des Klimawandels**

Version 2025

Patrick Rebholz M.Sc.<sup>1</sup>

Johannes Emontsbotz M.Sc.<sup>2</sup>

Dr.-Ing. Stefanie Wolf<sup>1</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf<sup>1</sup>

Univ.-Prof. Dr. Bernd Lottermoser<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

RWTH Aachen University

Mies-van-der-Rohe-Str. 17

D-52056 Aachen

<sup>2</sup> Institute of Mineral Resources Engineering

RWTH Aachen University

Wüllnerstraße 2

D-52056 Aachen

Aachen, im August 2025

## Zusammenfassung

Infolge des Klimawandels werden extreme Hochwasserereignisse häufiger auftreten und somit die Schäden zunehmen, die durch solche Hochwasser angerichtet werden. So hat das Hochwasser des Jahres 2021 in Mittel- und Westeuropa zu weitreichenden Schäden und vielen Todesopfern geführt. Im Zuge dessen wurden in Nordrhein-Westfalen zwei Tagebaue überflutet, was zwar zu Schäden und Toten geführt, jedoch auch einen deutlichen Retentionseffekt aufgezeigt. In "STorAgE" werden Tagebaue in Nordrhein-Westfalen systematisch auf ihre Eignung als Hochwasserrückhaltebecken für Extremhochwasser geprüft und dabei geeignete Pilotstandorte identifiziert.

Zunächst wurden die Tagebaue erfasst und für diese ein mehrstufiger, integrativer Ansatz entwickelt und angewendet. Dabei wurden die 558 erfassten Tagebaue anhand selbst definierter Kriterien bewertet und ungeeignete Tagebaue entfernt. Jeder Tagebau hat standortspezifische Faktoren, die quantifizierbar gemacht wurden, um a) eine wissenschaftliche Bewertung dieser Faktoren vorzunehmen und b) sie in generalisierte Kriterien zu überführen. Die Kriterien umfassten standortspezifischen Faktoren; wie beispielsweise Abbauverfahren, Abbauart, Böschungsneigungen oder die Entfernung zu Oberflächengewässern. Auf dieser Grundlage wurden in AP 2 und AP 3 eine hydraulische und montane Bewertung und daraus folgende Auswahl von Tagebauen als mögliche Retentionsräume ermöglicht. Die gewählten Kriterien sind in der Reihenfolge der Untersuchung "Tagebauart", "Abbauart", "Tagebaufläche", "Gewässerabstand", "Höhenanalyse", "Retentionsvolumen", "Spezifisches Volumen" betrachtet worden. Aus 558 erfassten Tagebauen wurden im Zuge des mehrstufigen, integrativen Ansatzes die vier Pilotstandorte Inden, Walheim, Grevenbrück und Blaue Lagune ausgewählt.

Des Weiteren wurden die Möglichkeiten und Grenzen generalisierter Ansätze untersucht. Ziel ist es, den Einfluss standortspezifischer Faktoren – wie bodenphysikalische Eigenschaften, Böschungsneigungen, Entfernungen zu Oberflächengewässern oder das Oberflächenrelief – zu analysieren und zu bewerten. Dabei wird geprüft, inwieweit sich diese standortspezifischen Eigenheiten in allgemeine Konzepte integrieren und übertragbar machen lassen. Das Arbeitspaket steht in enger Verbindung mit AP 2 und AP 3 und dient der Ableitung von Kriterien, die eine robuste Anwendung auf unterschiedliche Standorte ermöglichen.

Für jeden Pilotstandort wurden die Wirkungsgrade des Hochwasserrückhalts berechnet. Dabei werden die vier Szenarien  $HQ_{extrem}$ ,  $HQ_{1000}$ ,  $HQ_{(2021)}$  und  $HQ_{5000}$  untersucht. Darüber hinaus wurde ein hydrologisches Modell für Folgeuntersuchungen entworfen und Untersuchungsszenarien definiert.

Anschließend wurde die Analyse relevanter rechtlicher Rahmenbedingungen für die Nutzung von Tagebauen als Retentionsflächen durchgeführt. Dabei wurden einschlägige Gesetze (u. a. BBergG, WHG, BNatSchG, UVPG, KrWG) untersucht und deren Anforderungen an Planung, Genehmigung und Betrieb systematisch geprüft.

Die schrittweise Methodik zur Identifikation potenziell zum Hochwasserschutz nutzbarer Tagebaue wurde objektiv entwickelt. Dazu wurden technisch-physikalische Kriterien herangezogen und erarbeitet, ohne die Entscheidungsmerkmale NRW-spezifisch auszulegen. Die Methodik ist daher generalisiert und somit landesübergreifend übertragbar, um Tagebaue in einem beliebigen Betrachtungsraum hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit systematisch untersuchen zu können.

Die Ergebnisse von AP5 sind die berechneten Retentionswirkungsgrade und das Konzept für das hydrologische Modell. Hierbei erreichten die Pilotstandorte Inden und Blaue Lagune bei  $HQ_{5000}$  stets 100% Retentionswirkungsgrad. Grevenbrück erzielte beim größten Ereignis 98,34%. Walheim wird in allen untersuchten Szenarien vollgefüllt und erzielt bei  $HQ_{extrem}$  den maximalen Wirkungsgrad von 15,74%.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Nutzung von Tagebauen als Retentionsräume rechtlich möglich wäre, jedoch mit erheblichen Genehmigungs- und Prüfpflichten verbunden ist. Neben wasser- und bergrechtlichen Vorgaben entstehen zusätzliche Anforderungen im Natur- und Abfallrecht, wodurch Betreiber vor ökonomische und technische Herausforderungen gestellt werden.

# Inhalt

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	2
2.1	Hydrologische Grundlagen	2
2.2	Hochwasserrückhaltebecken	4
2.3	Tagebaue als Hochwasserrückhaltebecken	8
3	Auswahl geeigneter Standorte (AP2 und AP3)	10
3.1	Ausgangssituation in Nordrhein-Westfalen	10
3.2	Vorgehen zur Standortauswahl	12
3.3	Tagebauart, Abbauart und Tagebaufläche	14
3.3.1	Tagebauart / Abbauart	14
3.3.2	Tagebaufläche	15
3.4	Auswertung des Gewässerabstandes	18
3.5	Höhenanalyse	20
3.6	Volumenberechnung	22
3.7	Spezifisches Volumen	27
3.8	Zwischenergebnis und finale Auswahl der Pilotstandorte	30
3.9	Ausgewählter Tagebau 1 - Braunkohletagebau Inden	31
3.10	Ausgewählter Tagebau 2 - Tagebau Walheim	32
3.11	Ausgewählter Tagebau 3 – Grevenbrück	32
3.12	Ausgewählter Tagebau 4 - Asbeck	33
4	Generalisierung und Übertragbarkeit	34
5	Vorbereitungen für hydro-numerische Simulationen	36
5.1	Hydrologische Daten für Tagebaustandorte	36
5.2	Berechnung der Wirkungsgrade des Hochwasserrückhalts an Tagebaustandorten	38
5.3	Konzeptionierung des hydro-numerischen Modells	48
5.4	Konzeptionierung und Vordimensionierung der Tagebau-HWRB	50
6	Rechtliche Rahmenbedingungen	52
7	Literaturverzeichnis	54

## 1 Einleitung

Im Zuge des Klimawandels treten in Zukunft extreme Hochwasserereignisse häufiger auf und werden öfters weitreichende Schäden anrichten (Bronstert et al., 2017). So hat auch das Hochwasser 2021 in West- und Mitteleuropa zu weitreichenden Verwüstungen und zu zahlreichen Todesopfern geführt. In Deutschland waren besonders die Bundesländer Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen betroffen (Schäfer et al., 2021). Während dieses Extremhochwasserereignisses kam es zu Überschwemmungen der Tagebaue Inden und Erftstadt-Blessem (Keßels et al., 2024; Lehmkuhl & Stauch, 2023). Infolge der Überschwemmungen der Tagebaue kam es zu einem deutlichen Retentionseffekt und Unterstrom zu deutlich geringeren Hochwasserabflüssen. Es stellt somit eine Möglichkeit dar, Tagebaue in Nordrhein-Westfalen systematisch auf ihre Eignung als Hochwasserrückhalteräume zu prüfen und hierbei hydraulische, montane und auch rechtliche Randbedingungen zu erfassen.

Das Projekt "STorAgE" ist eine Pilotstudie über die Tagebaue im Bundesland Nordrhein-Westfalen. Dazu sollen anhand einer begründeten Auswahl im Rahmen eines neuen Ansatzes geeignete Pilotstandorte (AP2) identifiziert werden. Hierbei soll eine Rangfolge entwickelt und mit dieser die Auswahl begründet werden. Für die Tagebaue soll das Potential zur Wasserspeicherung (AP3) untersucht werden. Darauffolgend sollen die Möglichkeiten und Grenzen (AP4) des neuen Ansatzes geprüft werden. Im Fokus steht die Generalisierbarkeit von standortspezifischen Eigenschaften. Für die identifizierten Pilotstandorte wird der Wirkungsgrad des Hochwasserrückhalts (AP5) abgeschätzt. Zudem sollen die Voraussetzungen für umfangreiche hydro-numerische Betrachtungen geschaffen werden. Für eine erfolgreiche Umsetzung dieser Konzeptidee ist eine Prüfung der rechtlichen Rahmenbedingungen (AP6) erforderlich. Zum Ende des Projekts wurde der Kontakt zu Tagebaubetreibern, Wasser-/Umweltverbänden und Behörden gesucht und deren Perspektive in die Bewertung miteinbezogen. Bei positiver Bewertung wird die Beantragung eines Folgeprojekts (AP7) angestrebt.

## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen dargestellt, die für das Verständnis von Tagebauen als mögliche Retentionsräume für extreme Hochwasser erforderlich sind. Dazu gehören zentrale Aspekte der Hydrologie, die Funktionsweise und Bedeutung von Hochwasserrückhaltebecken sowie die Rolle von Tagebauen in der Hochwasserrückhaltung.

### 2.1 Hydrologische Grundlagen

Die Hydrologie bildet die Basis für die Untersuchung von Hochwasserrückhaltebecken. Sie dient zur Feststellung der relevanten Zuflüsse, was sich von Niedrigwasser bis hin zu extremem Hochwasser erstreckt. Es ist daher nötig, ausgewählte hydrologische Grundlagen zu betrachten.

In der Hydrologie werden Hauptwerte zur quantitativen Darstellung verschiedener Abflussszenarien gebildet. Diese werden anhand einer entsprechenden Nomenklatur gebildet (DIN4049-1:1992). Dabei haben Wasserstände das Zeichen "W" und Abflüsse das Zeichen "Q" inne (Maniak, 2010). In Tabelle 1 sind die wichtigsten Abflusskennwerte zusammengestellt. Im Rahmen des Projektes sind die Werte für die Hochwasserereignisse besonders relevant. Eine besondere Bedeutung kommt dem  $HQ_{100}$  nach dem Vergleich mit (DIN19712:2013) zu. Dieses stellt das Mindestschutzniveau für Siedlungen und Industrieanlagen gegenüber Hochwasserereignissen dar; der anzusetzende Abfluss hat ein statistisches Wiederkehrintervall von 100 Jahren ( $HQ_{100}$ ). Es wird daher das  $HQ_{100}$  als Schutzniveau für die Vorbereitung der hydro-numerischen Simulationen in Arbeitspaket 5 gewählt. **Das bedeutet, dass alle Abflussvolumina, die über dem  $HQ_{100}$  liegen, in den Tagebauen zurückgehalten werden sollen.**

Tabelle 1: Zusammenstellung und Erläuterung von Abflusskennwerten (Eigene Darstellung)

Abkürzung	Statistische Bedeutung	Quelle
$NNQ$	Niedrigster jemals gemessener Abfluss an dem Gewässer	(DIN4049-1:1992; Maniak, 2010)
$NQ$	Niedrigster gemessener Abfluss innerhalb einer Zeitreihe	
$MNQ$	Mittelwert der niedrigen Abflusswerte	
$MQ$	Arithmetisches Mittel aller Abflüsse innerhalb der Zeitreihe	
$MHQ$	Mittelwert der hohen Abflusswerte	
$HQ$	Höchster gemessener Hochwasser	
$HHQ$	Höchster jemals gemessener Hochwasserabfluss	
$HQ_{100}$	Hochwasserabfluss, der statistisch alle 100 Jahre auftreten wird	(MLV NRW, o.J.)
$HQ_{Extrem}$	Hochwasserabfluss, der statistisch zwischen 100 und 1000 Jahren auftreten wird	
$HQ_{1000}$	Hochwasserabfluss, der statistisch alle 1000 Jahre auftreten wird	

Die Retention von Hochwasserabflüssen in einem exemplarischen Rückhalteraum ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Graphen, die den Verlauf des Abflusses in Abhängigkeit der Zeit zeigen, werden Zu- bzw. Abflussganglinien genannt. Hierbei ist die Kurve für den Zufluss größer als für den Abfluss. Die eingeschlossene Fläche zwischen den Kurven entspricht dem Volumen, das zurückgehalten wird. Mathematisch kann das Volumen mit der Speichergleichung berechnet werden. Dabei werden die Funktionen für den Zu- und Abfluss ( $Q_z$  und  $Q_a$ ) hinsichtlich der Füllzeit pro Zeitschritt integriert. Falls keine differenzierbaren Funktionen vorliegen, können die Volumina mit den drei Formeln (1), (2), (3) approximiert werden. Wichtig ist hierbei, dass die beiden Funktionen die gleiche zeitliche Auflösung haben.

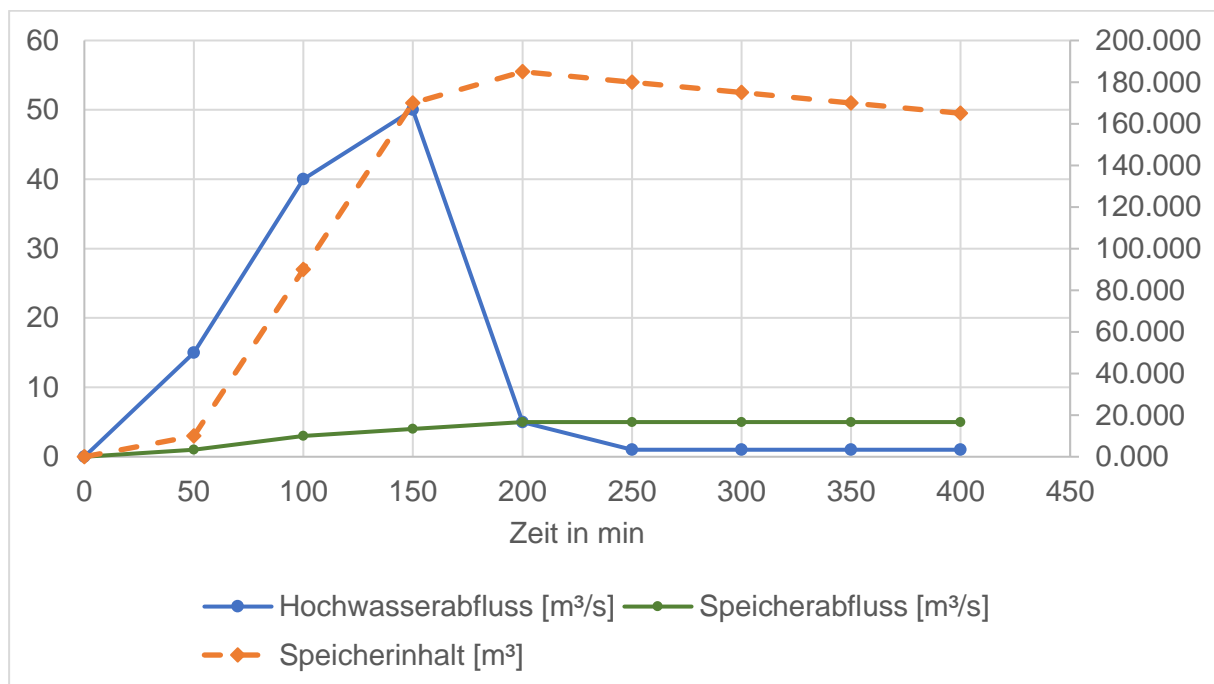


Abbildung 1: Retentionswirkung am Beispiel einer kurzen Hochwasserwelle (Basierend auf: Heinemann & Feldhaus, 2003)

Mittlerer Zufluss (Heinemann & Feldhaus, 2003)

$$Q_z = \frac{Q_z(t) + Q_z(t+\Delta t)}{2} \quad (1)$$

Mittlerer Abfluss (Heinemann & Feldhaus, 2003)

$$Q_a = \frac{Q_a(t) + Q_a(t+\Delta t)}{2} \quad (2)$$

Speichergleichung (Heinemann & Feldhaus, 2003)

$$\Delta V = (Q_z - Q_a) \cdot \Delta t \quad (3)$$

mit

$\Delta V$ : Volumendifferenz [m<sup>3</sup>]

$Q_z(t)$ : Zuflussfunktion [m<sup>3</sup>/s]

$\Delta t$ : Zeitschritt [s]

$Q_a(t)$ : Abflussfunktion [m<sup>3</sup>/s]

Im Kontext von Hochwasserrückhalteräumen ist das Rückhaltevolumen wichtig, jedoch ist es allein kein Indikator für die Wirksamkeit des Rückhalteriums. Ein Rückhalteraum ist in Bezug auf das zugehörige Flusseinzugsgebiet zu betrachten. Beispielsweise kann ein Rückhalteraum von 20.000 m<sup>3</sup> an einem kleinen Fließgewässer sehr effektiv sein, jedoch an einem großen Fließgewässer nur minimale Wirkung erzielen. Es erscheint somit sinnvoll, das Volumen des Rückhalteriums mit der Fläche des Flusseinzugsgebiets ins Verhältnis zu setzen. Die Größe des spezifischen Volumens  $sV$  (siehe Formel (4)) beschreibt dieses Verhältnis. Das spezifische Volumen beschreibt das Gebietspotential und wird analog zu Niederschlagshöhen in Millimeter angegeben (Kreiter, 2007):

$$sV = \frac{V_B}{A_E} \cdot 10^3 \quad (4)$$

mit

$sV$ : Spezifisches Volumen [mm]

$A_E$ : Fläche des Flusseinzugsgebiets [m<sup>2</sup>]

$V_B$ : Volumen des Rückhalteriums [m<sup>3</sup>]

## 2.2 Hochwasserrückhaltebecken

Hochwasserrückhaltebecken (HWRB) sind Stauanlagen, die Hochwasser zurückhalten und damit stromabwärts liegende Gebiete schützen (DIN19700-12:2004). Wesentliche Unterschiede zu Talsperren sind zum einen die Tatsache, dass HWRB nur temporär während eines Hochwasserereignisses eingestaut werden. Zum anderen haben HWRB in Bezug auf den Hochwasserrückhalteraum nur kleine Betriebsräume. HWRB ohne Betriebsraum werden Trockenbecken oder Grünbecken genannt. HWRB in denen permanent ein Teil des Beckenvolumens mit Wasser gefüllt ist, werden als HWRB mit Dauerstau bezeichnet (DWA-M522:2015). (DIN19700-12:2004; Küchler et al., 2014). In Abbildung 2 sind Bilder zu HWRB an der Erft dargestellt.



Abbildung 2: (a) HWRB Eicherscheid mit Dauerstau, (b) HWRB Weilerswist als Trockenbecken (Eigene Aufnahme, 2025)

Das maximal zulässige Stauziel eines HWRB ist das Hochwasserstauziel  $z_H$  (DIN19700-10:2004). Die Höhe oberhalb davon ist als Freibord vorzusehen, um ein Überströmen der Stauanlage infolge von Wellen, Wind- und Eisstau zu verhindern (DVWK-246:1997). Ein klassisches HWRB wird durch einen Dammkörper und das umgebende natürliche Gelände begrenzt (DWA-M522:2015). Das gilt auch für einen Tagebau.

Hochwasserrückhaltebecken haben Betriebseinrichtungen, die den sicheren Rückhalt von Hochwasser und die Standsicherheit der Anlage garantieren. Dazu zählen der Grundablass, Betriebsauslass, die Hochwasserentlastung und Anlagen zur Energieumwandlung. Die Funktionsfähigkeit dieser Betriebseinrichtungen muss dauerhaft gewährleistet sein. Grundablässe dienen dazu, den Dauerstauraum zu entleeren. Betriebsauslässe dienen der gezielten, zeitverzögerten Wiedereinleitung des zurückgehaltenen Hochwassers (DIN19700-12:2004). Oftmals wird dieser Abflussanteil als Drosselabfluss bezeichnet. Diese Differenz zwischen einströmenden Abflüssen und dem geringeren Abflussanteil am Betriebsauslass führt im Hochwasserfall zu einem gewünschten Aufstau im HWRB. Das Ziel ist hierbei, das Rückhaltevolumen des HWRB voll auszunutzen. Damit dieser Aufstau gefahrlos abläuft, ist eine Hochwasserentlastungsanlage vorzusehen. Diese springt ab einem bestimmten Hochwasserstauziel an und führt das überschüssige Wasser in das Fließgewässer Unterstrom des HWRB zurück. Damit werden die Einhaltung des Freibords und auch die Standsicherheit der Stauanlage gewährleistet (DIN19700-12:2004). Der Aufstau im HWRB führt zu einer Speicherung von potentieller Energie. Werden nun Betriebsauslässe oder die Hochwasserentlastungsanlagen betrieben, wird das Wasser mit hoher Geschwindigkeit (schießender Abfluss) in das Unterwasser geleitet. In diesem Fall sind entsprechende Energieumwandlungsanlagen, wie z.B. Tosbecken vorzusehen, sodass es zu keiner Gefährdung der Stauanlage durch Auskolkung infolge der Wassereinleitung kommt. Das Wasser wird dadurch gefahrlos in den strömenden Zustand überführt (Aigner & Bollrich, 2021).

HWRB, die permanent von einem Fluss durchflossen werden, werden als HWRB im Hauptschluss bezeichnet. HWRB, die in der Nähe eines Flusses liegen und nur im Hochwasserfall beschickt werden,

sind HWRB im Nebenschluss. Bei Tagebauen im Trockenabbau ist eine trockene Grube für den Abbaubetrieb notwendig, sodass diese dann als HWRB im Nebenschluss zu betrachten sind. Nassabbau-Betriebe sind in der Regel dauerhaft (direkt oder indirekt) an ein Fließgewässer angebunden und berücksichtigen Hochwasserereignisse als integralen, unvermeidbaren Bestandteil ihrer Abbaubetriebes. Aufgrund dieser kontinuierlichen hydraulischen Verbindung verfügen sie jedoch in der Regel über kein zusätzliches Retentionspotenzial zur Aufnahme von Hochwassermengen.

Die Beaufschlagung von HWRB im Nebenschluss erfolgt über ein Ausleitungsbauwerk. Wie ein HWRB im Nebenschluss aussieht, ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Hierbei wird im Hochwasserfall Wasser über das Ausleitungsbauwerk in das Becken geleitet und dort gespeichert. Dieses kann entweder als geschlossene Freispiegel- oder Druckrohrleitung oder als offenes Freispiegelgerinne (z.B. Kanal) errichtet werden. Ferner kann je nach Nutzung das Ausleitungsbauwerk so angeordnet werden, dass bei verschiedenen Abflussszenarien der Abfluss sichergestellt ist. Das gilt sowohl für Hochwasser- als auch Niedrigwasserereignisse (DWA-M522:2015). Für klassische HWRB ist ein Einleitungsbauwerk vorgesehen, welches das Wiedereinleiten des Wassers in das Hauptgewässer ermöglicht (DWA-M522:2015).

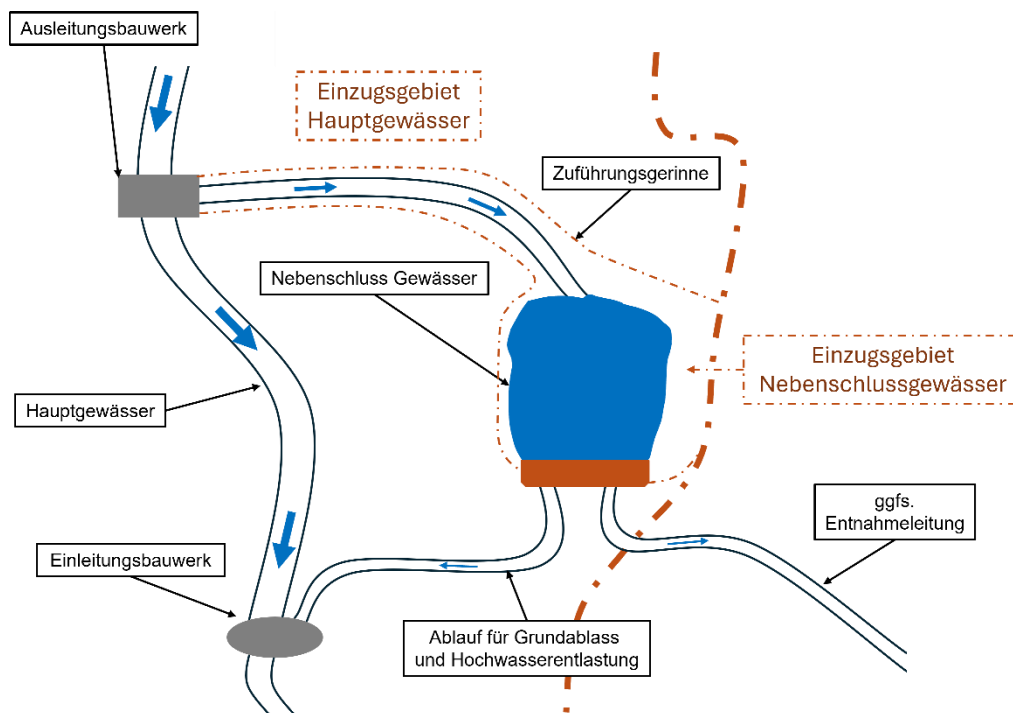


Abbildung 3: Hochwasserrückhaltebecken im Nebenschluss (Basierend auf: DWA-M522:2015)

HWRB werden in verschiedene Größenklassen unterteilt. Diese sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Unterteilung bemisst sich dabei an der Höhe des Absperrbauwerks in [m] und dem Gesamtstauraum in [m<sup>3</sup>]. Hierbei treten die Klassen der „kleinsten Becken“, „sehr kleinen Becken“, „kleinen Becken“, „mittleren Becken“ und „großen Becken“ auf. Es gibt bei Stauanlagen keine Größenbeschränkungen.

Diese können auch winzige Volumina von z.B. 500 m<sup>3</sup> innehaben (DWA-M522:2015). Die Größenklasse ist in der Hinsicht dienlich, da sie Hinweise für empfohlene Bemessungsregeln gibt. In Tabelle 3 sind für jede Größenklasse diese Hinweise aufgetragen.

Tabelle 2: Klassifizierung von Hochwasserrückhaltebecken (Basierend auf: DIN19700-12:2004; DWA-M522:2015)

Größenklasse	Kleinste Becken	Sehr kleine Becken	Kleine Becken	Mittlere Becken	Große Becken
Untere Grenze Gesamtstauraum [m <sup>3</sup> ]	0	10.000	50.000	100.000	1.000.000
Obere Grenze Gesamtstauraum [m <sup>3</sup> ]	10.000	50.000	100.000	1.000.000	-
Untere Grenze Höhe Absperrbauwerk [m]	0	0	0	0	0
Obere Grenze Höhe Absperrbauwerk [m]	2	4	6	15	-

Tabelle 3: Übersicht zur Klassifizierung von Stauanlagen (Basierend auf: DWA-M522:2015)

Stauanlagenklasse	Kleinste Stauanlagen	Sehr kleine Stauanlagen	Kleine Stauanlagen	Mittlere und große Stauanlagen
Norm	DIN 19700	DIN 19700	DIN 19700	DIN 19700
Anwendung des Merkblattes DWA-M 522?	DWA-M 522, Anhang A empfohlen	DWA-M 522 empfohlen	DWA-M 522 empfohlen	nein

HWRB werden nach den Bemessungsregeln nach DIN19700-12:2004 , DIN19700-10:2004 und bei kleinen Anlagen zusätzlich nach DWA-M522:2015 geplant. HWRB in Tagebauen unterliegen ebenfalls diesen Vorschriften. Weitere Rechtsbereiche, die im Zuge eines solchen Vorhabens zu beachten sind, werden in Kapitel 6 betrachtet.

## 2.3 Tagebaue als Hochwasserrückhaltebecken

Bei dem Hochwasser 2021 in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen wurden die beiden Tagebaue Inden und Erftstadt-Blessem unkontrolliert überflutet, was weitreichende Zerstörungen zur Folge hatte (Keßels et al., 2024; Lehmkuhl & Stauch, 2023). Konträr dazu führte die Überschwemmung der Tagebaue zu einer deutlichen Retentionswirkung, sodass die Unterlieger weniger stark von den Hochwasserereignissen betroffen waren.

In Deutschland wurden bereits der Restsee (Zwenkauer See), der Tagebaue Zwenkau/Böhlen und Cospuden (Cospudener See) erfolgreich in das Hochwasserschutzkonzept der Stadt Leipzig integriert und dienen als HWRB. Dazu wurden an dem Gewässer Weiße Elster Betriebseinrichtungen zum Ein- und Ausleiten von Hochwasser in die Tagebaue errichtet. In Abbildung 4 ist ein Lageplan der Tagebaue an der Weißen Elster und der Betriebseinrichtungen dargestellt. In Abbildung 5 ist ein Luftbild der Hochwasserentlastungsanlage dargestellt. Die Hochwasserentlastungsanlage schlägt maximal 130 m<sup>3</sup>/s in den Hochwasserrückhalteraum mit einem Volumen von 18,5 Mio. m<sup>3</sup> ab. Der Baubeginn war Anfang des Jahres 2013.

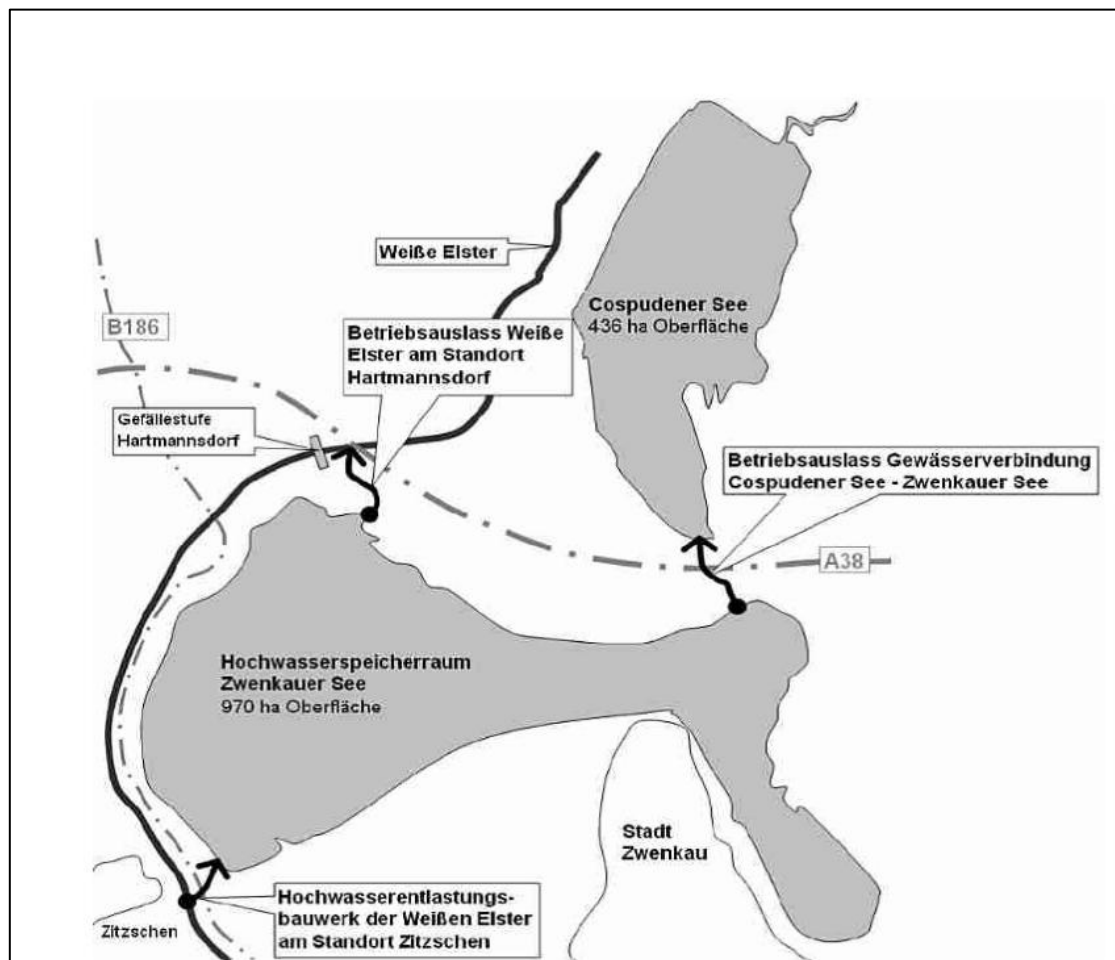


Abbildung 4: Zwenkauer See und zugehörige Betriebseinrichtungen (Schöne, Schlottmann & Pinar, 2013)

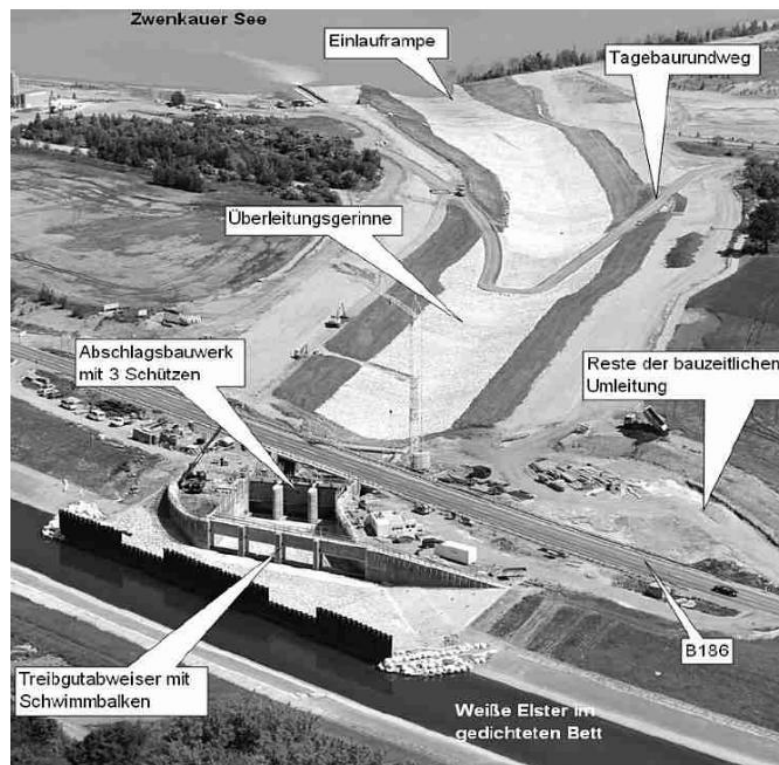


Abbildung 5: Hochwasserentlastungsbauwerk an der Weißen Elster mit Überleitung in den Zwenkauer See  
(Schöne et al., 2013)

Ebenso wurden von Szafarczyk und Gawalkiewicz (2023) in Polen Fallstudien zur Nachnutzung von Tagebauseen zur Verbesserung des Wasserhaushalts in der Nähe der Tagebaustandorte erstellt. Dabei sollen Tagebaue nicht nur für den Hochwasserschutz herangezogen werden, sondern sie sollen als Wasserspeicher dienen, um damit Dürren zu begegnen. Betrachtet wurden dabei der Plaszów Pond und Bagry Lake in Krakau sowie der See Piaseczno zwischen Lublin und Krakau. Der Bagry Lake ist der größere Tagebau und hat eine Länge von ca. 1.000 m. Ferner zeigt sich, dass beide Tagebaue im Stadtgebiet der Stadt Krakau liegen.

Alle drei Seen sind stillgelegte Tagebaue, die sich nach Ende des Betriebs mit Grund- und Regenwasser gefüllt haben. Das Ergebnis war, dass eine Nutzung der Tagebauseen speziell für urbane Räume sowohl für den Hochwasserrückhalt als auch für das Mikroklima gut geeignet ist. Ferner wird empfohlen, auch andere, nicht untersuchte Tagebaue hierfür umfangreich zu untersuchen und zu vermessen sind. Dazu ist geplant, in Polen über die Vermessung hinaus eine Datenbank über alle Wasserkörper anthropogenen Ursprungs zu erstellen und in dieser auch Charakteristika über Umweltauswirkungen und Gefahren zu hinterlegen. Hier sollen u.a. Aspekte wie Dürren, Erdbeben an den Böschungen, aber auch der Zustand der Biodiversität erfasst und fortlaufend dokumentiert werden. Der Fokus soll darauf liegen, inwieweit die Gefahren oder auch zukünftige anthropogene Eingriffe das Volumen der Wasserkörper verringern (Szafarczyk & Gawalkiewicz, 2023).

### 3 Auswahl geeigneter Standorte (AP2 und AP3)

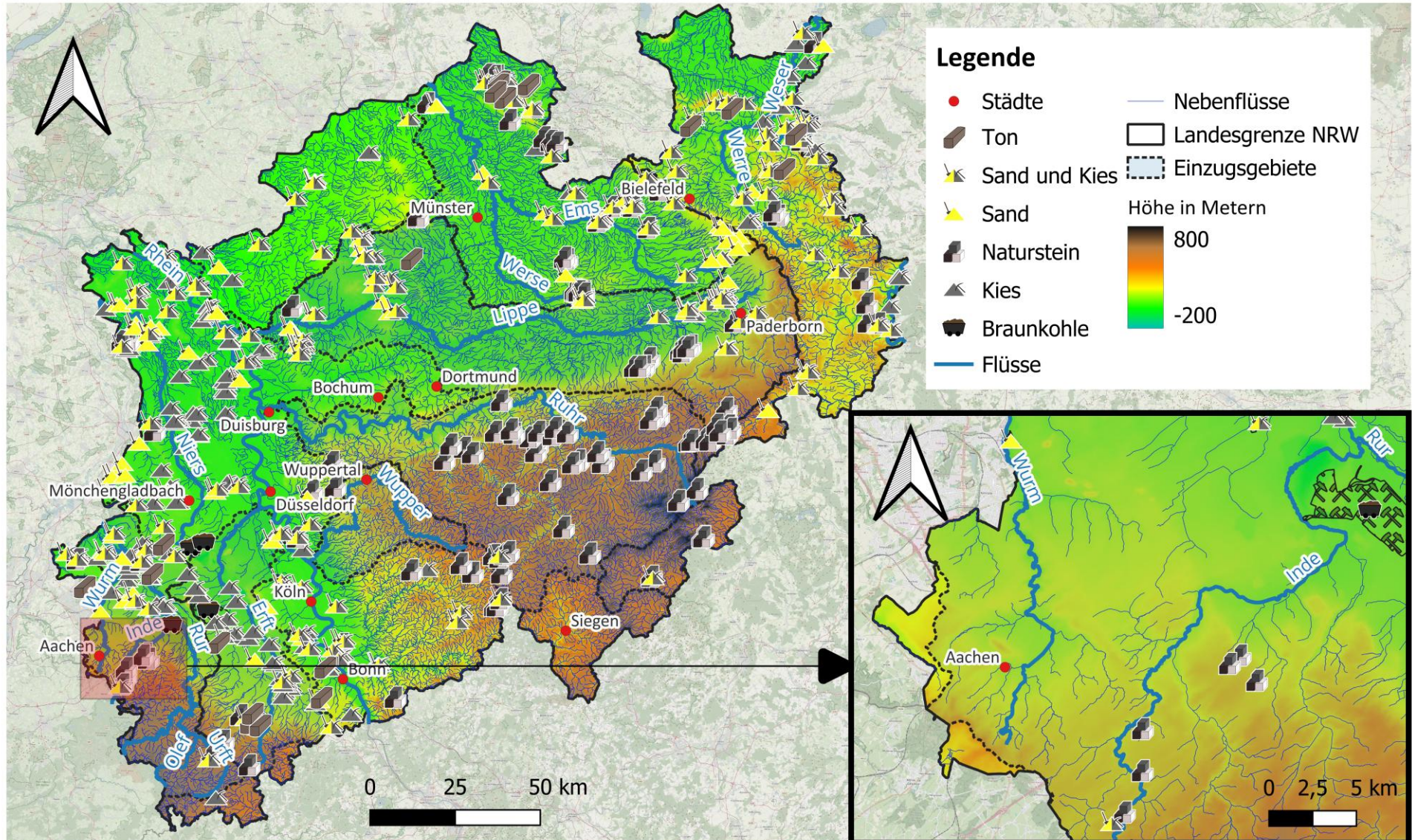
In diesem Kapitel wird das methodische Vorgehen zur Auswahl geeigneter Standorte für die Hochwasserrückhaltung dargestellt. Ausgangspunkt bildet die Analyse der aktuellen Situation in Nordrhein-Westfalen. Darauf aufbauend wird das Vorgehen zur Standortauswahl beschrieben, das verschiedene Kriterien berücksichtigt. Ein zentraler Schwerpunkt liegt auf den Eigenschaften der betrachteten Tagebaue. Hierzu werden zunächst die Tagebauart und Abbauart unterschieden, anschließend die spezifische Tagebaufläche untersucht. Ergänzend erfolgen die Auswertung des Gewässerabstandes sowie eine Höhenanalyse, die für die Standortbewertung von besonderer Bedeutung sind. Darüber hinaus werden Berechnungen zum Volumen sowie zum spezifischen Volumen durchgeführt, um die Rückhaltevolumen der einzelnen Tagebaue quantifizierbar zu machen. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengeführt und eine finale Auswahl der Pilotstandorte vorgenommen.

#### 3.1 Ausgangssituation in Nordrhein-Westfalen

Die bekanntesten Tagebaue in Nordrhein-Westfalen sind die Braunkohletagebaue im Rheinischen Revier. Diese umfassen die drei Tagebaue Garzweiler II, Hambach und Inden, die im Jahr 2020 mit 51,4 Millionen Tonnen geförderter Braunkohle 47,86% der Braunkohleförderung in Deutschland ausgemacht haben (MWIKE NRW, 2025). Neben den großen Braunkohletagebauen existieren auch viele kleinere Tagebaue, in denen Rohstoffe zur nicht-energetischen Verwendung gefördert werden, unter anderem Tongruben, Sandgruben und Natursteinbrüche. Bundesweit werden in ungefähr 3.400 Betrieben solche Rohstoffe gewonnen (Bundesverband Baustoffe, 2021). Die im Rahmen dieses Projektes verwendete Datengrundlage ist das Digitale Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM) bezogen von (Geobasis NRW, 2024). In diesem sind verschiedenste Landnutzungen wie Siedlungsflächen, Straßen, usw. aber auch Tagebaue enthalten. Bei den Daten liegt keine Unterteilung bzw. Klassierung der Tagebaue vor. Das heißt, dass in diesem Datensatz zwar 630 Vektorpolygone für die Tagebaustandorte enthalten sind, jedoch über Attribute wie z.B. Rohstoffart, Volumen, usw. keine Informationen vorliegen. Des Weiteren kann es sein, dass ein Tagebau sich in dem Datensatz aus z.B. fünf verschiedenen Vektorpolygone zusammensetzt. In einem ersten Schritt sind diese 630 Vektorpolygone auf räumliche Überschneidungen geprüft, teilweise zusammengefügt und nach Rohstoffarten klassiert worden.

Im Einklang mit der Karte in Abbildung 6 sind hier in Tabelle 4 die Tagebaue in ihrer Anzahl abgebildet. Es zeigt sich, dass Sand und Kies jeweils einzeln oder gemeinsam den größten Anteil ausmachen. Es sind auch viele Natursteinbrüche in NRW vorhanden. In dem kleinen Kartenausschnitt ist der Umkreis der Stadt Aachen dargestellt. In dem Umkreis befinden sich hauptsächlich Natursteintagebaue. Vereinzelt sind dort Tagebaue für Sand und Kies abgebildet. Zuletzt liegt auch der Braunkohletagebau Inden in der Nähe der Stadt Aachen.

# Tagebaue in Nordrhein-Westfalen



## Quellen

Modifiziert nach: Geobasis NRW (Hrsg.) (2024): Digitales Basis-Landschaftsmodell NW. [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/lm/akt/basis-dlm/basis-dlm\\_EPSG25832\\_Shape.zip](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/lm/akt/basis-dlm/basis-dlm_EPSG25832_Shape.zip) abgerufen am 18.07.24.  
 Modifiziert nach: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2019): Gewässerstationierungskarte 3E NRW. [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt\\_klima/wasser/oberflaechengewaesser/gsk3e/gsk3e\\_EPSG25832\\_Shape.zip](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/oberflaechengewaesser/gsk3e/gsk3e_EPSG25832_Shape.zip) abgerufen am 19.07.24.  
 Modifiziert nach: Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2024): Digitale Verwaltungsgrenzen - hohe Stützpunktdichte (Shape) - Paketierung: gesamt NRW. [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/vkg/dvg/dvg1/dvg1\\_EPSG25832\\_Shape.zip](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/vkg/dvg/dvg1/dvg1_EPSG25832_Shape.zip) abgerufen am 20.07.2024.  
 European Environment Agency (Hrsg.) (2016): European Digital Elevation Model (EU-DEM). <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem> abgerufen am 19.10.2020.

Abbildung 6: Karte über alle erfassten Tagebaue in Nordrhein-Westfalen (Eigene Darstellung)

Tabelle 4: Anzahl an Tagebauen in NRW klassiert nach Rohstoffarten

Layer	Tagebaue
Kies	130
Braunkohle	3
Ton	22
Sand	68
Sand und Kies	181
Naturstein	154
<b>Summe</b>	<b>558</b>

Die 558 Tagebaue bilden die Basis für die weiteren Untersuchungen. Die Identifikation dieser Tagebaue basiert auf behördlichen Planungsdaten. Der Datensatz umfasst zu Projektbeginn alle Tagebaue, die vom Bundesberg-, Bundesimmissionsschutz- und Wasserhaushaltsgesetz geführt werden. Diese Datenbasis ist aufgrund der föderalen Struktur der Bundesrepublik bei gleichzeitig aufgeteilter Verantwortung und Genehmigungsgrundsätzen nicht vollumfassend abbildbar. Von den 558 Tagebauen könnte zunächst jeder Tagebau als HWRB infrage kommen. Es ist daher notwendig, ein Vorgehen zu entwickeln und zu applizieren, um die Tagebaue zu identifizieren, die am besten für den Hochwasserrückhalt geeignet sind.

### 3.2 Vorgehen zur Standortauswahl

Für die Wahl von geeigneten Standorten werden alle 558 Tagebaue betrachtet, jedoch ist es nicht zielführend alle einzelfallspezifisch zu untersuchen; es ist zu erwarten, dass viele Tagebaue ausscheiden werden. Vielmehr soll ein generalistischer Ansatz entwickelt werden, der auch auf andere Bundesländer oder auch Staaten übertragbar ist. Das Vorgehen zur Standortauswahl besteht daher aus einem mehrstufigen Prozess, in welchem pro Stufe Tagebaue nach definierten Kriterien entfernt werden. Am Ende wird eine Auswahl an geeigneten Tagebauen identifiziert sein, die im Zuge der weiteren Analyse individuell betrachtet werden. Die Identifikation geeigneter Standorte erfordert einen integrativen Ansatz, der sowohl bergbauliche als auch wasserwirtschaftliche Kriterien einbezieht. Dies stellt sicher, dass offensichtliche Ausschlusskriterien verlässlich identifiziert und die Qualität der Ergebnisse sichergestellt werden. Die einzelnen Stufen sind in dem Fließbild in Abbildung 7 zusammengestellt. Die Stufen werden dort sukzessive durchlaufen, sodass am Ende die ausgewählten Tagebaue identifiziert werden können.

Der Prozess beginnt mit der Auswahl nach geeigneten Rohstoffarten. Dabei wurden die Tagebauarten Sand, Kies kategorisch ausgeschlossen. Im Anschluss wird der Abstand des Tagebaus zum Gewässer geprüft. Damit sollen Tagebaue entfernt werden, die beispielsweise 5 Kilometer von dem nächsten

Gewässer entfernt sind. Darauf folgt die Höhenanalyse, die feststellt welche Tagebaue topographisch für die Einleitung von Hochwasser geeignet sind. Das Kriterium ist hierbei, dass das Wasser im freien Gefälle in den Tagebau strömen kann. Danach wird für alle Tagebaue das Beckenvolumen berechnet und dabei alle Tagebaue mit einem Volumen kleiner 50.000 m<sup>3</sup> entfernt. Wegen den extremen Abflüssen und den damit verbundenen Folgen bei einer Einleitung in die Tagebaue wurde die Annahme getroffen, dass Volumina kleiner 50.000 m<sup>3</sup> dafür nicht lohnenswert für die Hochwasserretention erscheinen. Zuletzt wird für die verbleibenden Tagebaue das spezifische Volumen nach Kreiter (2007) berechnet. Je höher dessen Wert ist, umso besser ist die Wirkung des Hochwasserrückhalteraums. Die Tagebaue mit den höchsten spezifischen Volumina erzielen das beste Ergebnis.

Zur Auswertung wurde die Geoinformationssoftware QGIS (Version 3.34) und Python-Skripte in PyCharm verwendet. Die Ausgangsdaten bestehen aus Polygonen aller Tagebaue in Nordrhein-Westfalen, die unter das Bundes-Immissionsschutzgesetz, das Wasserhaushaltsgesetz oder das Bergrecht fallen. Die Daten wurden als digitale Basis-Landschaftsmodelle (Basis-DLM) bezogen (NRW, 2025). Ein Basis-DLM bildet topografische Objekte, Landschaftselemente und Geländeformen in Vektorstruktur ab (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2025).

### Vorgehen für Standortwahl – AP 2

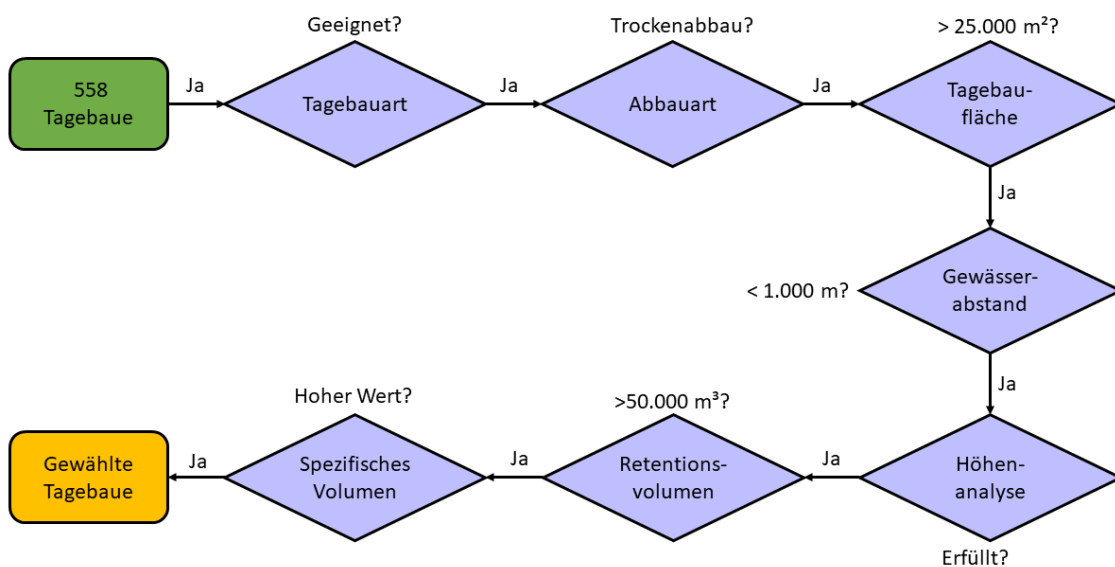


Abbildung 7: Fließbild über Vorgehen zur Auswahl (Eigene Darstellung)

### 3.3 Tagebauart, Abbauart und Tagebaufläche

#### 3.3.1 Tagebauart / Abbauart

Ein wesentliches Kriterium bei der Beurteilung der Eignung von Tagebauen als potenzieller Hochwasserrückhalteraum ist das eingesetzte Abbauverfahren. Grundsätzlich wird zwischen Rohstoffgewinnung oberhalb oder unterhalb des Grundwasserspiegels unterschieden; im Folgenden Nass- und Trockenabbau genannt. Beim Nassabbau erfolgt die Rohstoffgewinnung unterhalb des Grundwasserspiegels. Das potenzielle Rückhaltevolumen für Oberflächenwasser wird dadurch stark eingeschränkt, da der Tagebau bereits mit Wasser gefüllt ist und so begrenzter Stauraum für Oberflächenwasser besteht. Im Gegensatz dazu bietet der Trockenabbau bessere Voraussetzungen für eine temporäre Speicherung von Wasser. Das Volumen des bereits durchgeführten Abbaus steht hier in Gänze zur Verfügung (Hillebrand, 2016). Aus diesem Grund ist der Trockenabbau deutlich besser für eine spätere Nutzung als Rückhalteraum geeignet. Geometrisch unterscheiden sich Nass- und Trockenabbau zudem durch Böschungswinkel und Teufenentwicklung, was auch sicherheitsrelevante und technische Anforderungen an die Nutzung als Retentionsraum beeinflusst (Goergen, 1987).

Auch Tagebaue im Hang- und Hügelabbau wurden untersucht. Diese weisen aufgrund ihrer topografischen Lage häufig eine ungünstige Rückhaltegeometrie auf. Eine kontrollierte Stauung sowie die Ableitung des Wassers sind in solchen Fällen erschwert. Die betroffenen Tagebaue wurden im Einzelfall überprüft. Standorte ohne eine natürliche Senke am Fuß des Abbaufeldes wurden ausgeschlossen. (Prinz & Strauß, 2018)

Zur Unterscheidung der Abbauverfahren wurde dem GIS-Datensatz das Attribut „Abbauart“ hinzugefügt. Jeder Tagebau wurde visuell überprüft und auf Basis öffentlich verfügbarer Informationen mit „TAB“ (Trockenabbau) oder „NAB“ (Nassabbau) klassifiziert. Alle mit „NAB“ gekennzeichneten Datensätze wurden aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Im ersten Schritt werden die Tagebaue kategorisch auf ihre Eignung untersucht. Dies wurde in erster Linie anhand der abgebauten Rohstoffart durchgeführt. Sande und Kiese liegen meist in Lockergesteinslagerstätten vor. Bei Flutung bieten diese Arten der Lagerstätten keine Böschungsstabilität und resultieren in unkontrollierbarem Böschungsversagen. Dieses Böschungsversagen und die daraus resultierende Vermischung von Wert- und Gangmineralen kann eine anschließende bergbauliche Nutzung erheblich erschweren oder gar verhindern, sodass diese Rohstoffkategorie kategorisch ausgeschlossen wurde. Hierbei handelt es sich um eine Annahme, die im Rahmen des Projektvorhabens getroffen wurde.

### 3.3.2 Tagebaufläche

Die Flächengröße eines Tagebaus ist kein direktes Eignungskriterium, dient aber als pragmatischer Indikator zur Abschätzung des potenziellen Rückhaltevolumens. (Pannicke-Prochnow et al., 2021) Im Rahmen dieser Studie wurde ein Schwellenwert von 25.000 m<sup>2</sup> definiert. Flächen unterhalb dieses Werts wurden als ungeeignet klassifiziert. Diese Festlegung beruht auf hydrologischen und wirtschaftlichen Überlegungen: Kleine Abbauflächen bieten in der Regel kein ausreichendes Rückhaltevolumen im Verhältnis zum erforderlichen Planungs- und Infrastrukturaufwand.

Laut (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 2022) sollen Rückhalteräume so ausgelegt sein, dass sie die Hochwasserspitze spürbar entlasten und mit vertretbarem Aufwand erschlossen werden können. Bei sehr kleinen Abbauflächen ist dieses Verhältnis in der Regel nicht gegeben. (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 2022)

Zur Veranschaulichung wurde ein Beispiel mit einer Abbaufläche von 25.000 m<sup>2</sup> und einer maximalen Tiefe von 10 m herangezogen, typische Abmessungen für Sand- und Kiesgruben im Trockenabbau (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, 2023). Das daraus resultierende maximale Rückhaltevolumen beträgt 250.000 m<sup>3</sup>. Dieses Volumen könnte bei einer vollständigen Einleitung von extremen Hochwasserabflüssen ( $HQ_{Extrem}$ ) wie beispielhaft an den Pegeln Selhausen (Rur) oder Lamersdorf (Inde) innerhalb einer Stunde vollständig gefüllt werden. Selbst bei geringeren Abflüssen, wie an der Inde bei Kornelimünster, würde die Füllung mehr als eine Stunde in Anspruch nehmen (vgl. Abbildung 8). Kleinere Flächen, die zu kleineren Volumina führen würden dann in wenigen Minuten vollgefüllt werden.

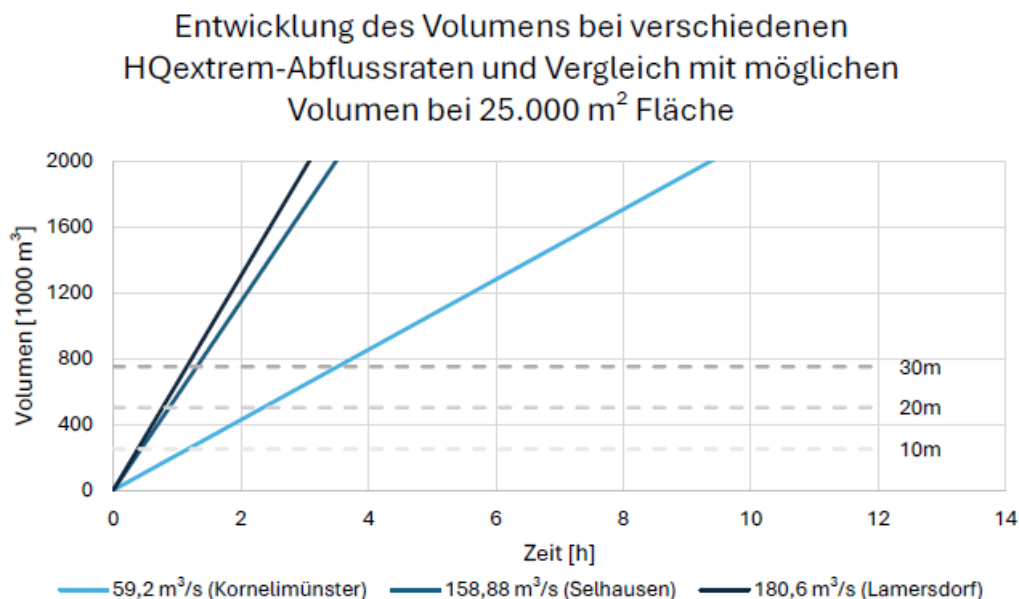


Abbildung 8: Füllzeiten eines Tagebaus mit einer Oberfläche von 25.000 m<sup>2</sup> bei verschiedenen Teufen, bezogen auf die  $HQ_{Extrem}$  Abflüsse der Pegel Kornelimünster (Inde), Selhausen (Rur) und Lamersdorf (Inde)

Diese Maximalbetrachtung zeigt, dass Abbaufächen kleiner als 25.000 m<sup>2</sup> nur für Gewässer mit geringem Einzugsgebiet sinnvoll einsetzbar sind – Stichwort spezifisches Volumen. Um wirkungsvolle Retentionsräume zu identifizieren, wurde die Mindestfläche bewusst so gewählt, dass nur Standorte mit signifikantem Rückhaltepotenzial in die weitere Analyse einbezogen wurden. In Realität wird nicht der gesamte Hochwasserabfluss in HWRB eingeleitet. Es werden wie oben beschrieben die Differenz zwischen dem Hochwasserabfluss und dem gefahrlosen Schwellenabfluss (Beispiel  $HQ_{100}$ ) zurückgehalten.

Die angenommene Rückhaltmenge von 750.000 m<sup>3</sup> stellt einen Maximalwert dar. Viele kleinere Tagebaue erreichen keine konstante Tiefe von 30 m und verfügen daher über ein entsprechend geringeres Rückhaltevolumen (Institut für Wirtschaft und Umwelt e. V. [Hrsg.], o. D)

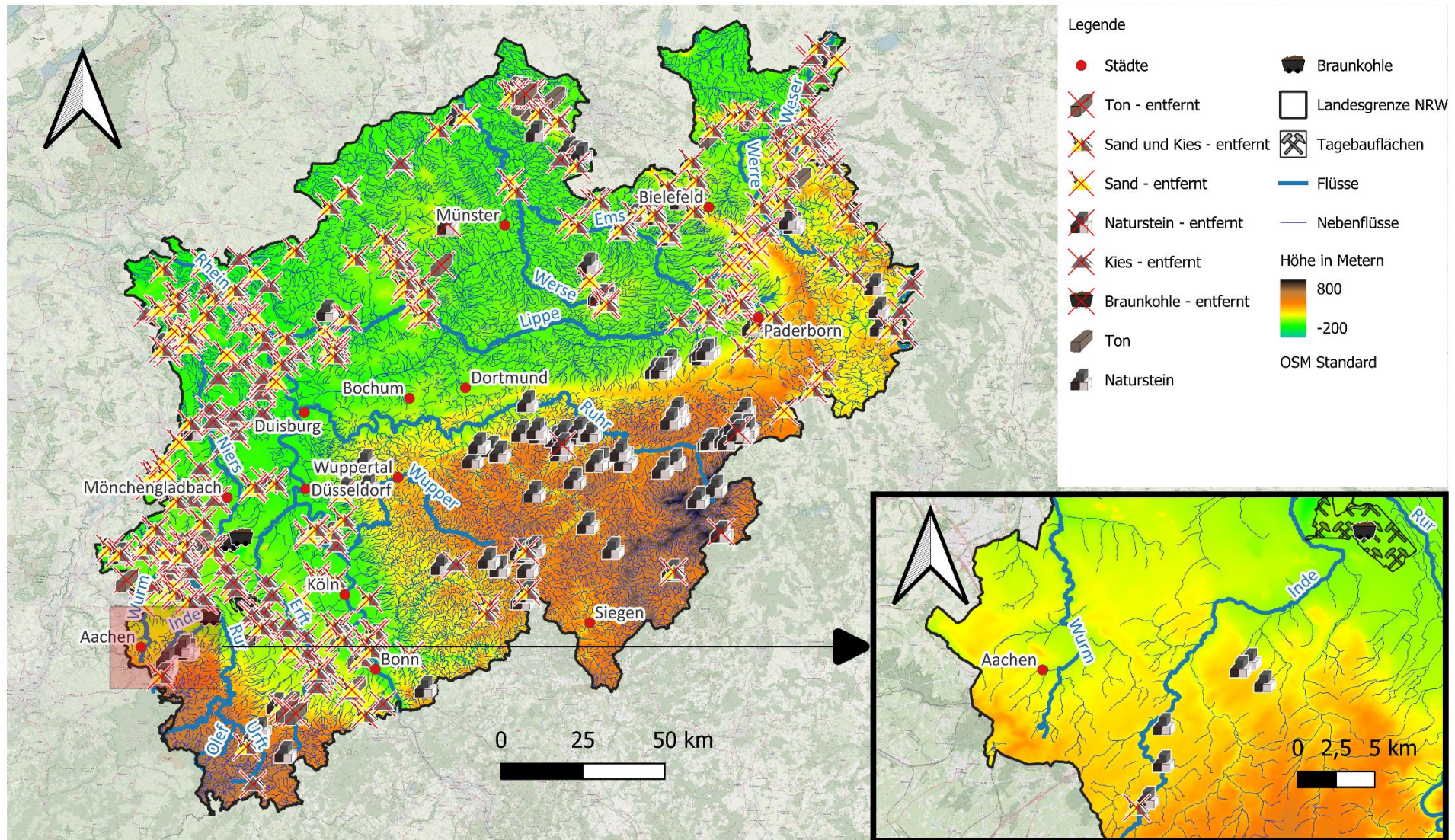
Für die Anwendung des Flächenkriteriums wurde der GIS-Datensatz um das Attribut „Fläche“ erweitert. In die weitere Auswertung wurden ausschließlich Tagebaue aufgenommen, deren Fläche mehr als 25.000 m<sup>2</sup> beträgt.

Die ausgewählten Tagebaue sind in der Karte in Abbildung 9 abgebildet. Diese Karte beschreibt den Status nach der Auswertung der Tagebauart/Abbauart und der Tagebaufläche. Es zeigt sich zusammen mit den Zahlenangaben in Tabelle 5, dass die Mehrzahl der Tagebaue entfernt werden. Sand und Kies werden kategorisch entfernt. Insgesamt werden 426 Tagebaue ausgeschlossen und 132 Tagebaue verbleiben für die weitere Analyse.

Tabelle 5: Selektierte Trockenabbau-Tagebaue mit einer Fläche > 25.000 m<sup>2</sup> klassiert nach Rohstoffarten

Layer	Entfernte Tagebaue	Gewählte Tagebaue
Kies	130	0
Braunkohle	0	3
Ton	6	16
Sand	68	0
Sand und Kies	181	0
Naturstein	41	113
<b>Summe</b>	<b>426</b>	<b>132</b>

# Untersuchung der Abbauart für Tagebaue in Nordrhein-Westfalen



## Quellen

Modifiziert nach: Geobasis NRW (Hrsg.) (2024): Digitales Basis-Landschaftsmodell NW. [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/lm/akt/basis-dlm/basis-dlm\\_EPSG25832\\_Shape.zip](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/lm/akt/basis-dlm/basis-dlm_EPSG25832_Shape.zip) abgerufen am 18.07.2024.  
 Modifiziert nach: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2019): Gewässerstationierungskarte 3E NRW. [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt\\_klima/wasser/oberflaechengewaesser/gsk3e/gsk3e\\_EPSG25832\\_Shape.zip](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/oberflaechengewaesser/gsk3e/gsk3e_EPSG25832_Shape.zip) abgerufen am 19.07.2024.  
 Modifiziert nach: Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2024): Digitale Verwaltungsgrenzen - hohe Stützpunktdichte (Shape) - Paketierung: gesamt NRW. [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/vkg/dvg/dvg1/dvg1\\_EPSG25832\\_Shape.zip](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/vkg/dvg/dvg1/dvg1_EPSG25832_Shape.zip) abgerufen am 20.07.2024.  
 European Environment Agency (Hrsg.) (2016): European Digital Elevation Model (EU-DEM). <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem> abgerufen am 19.10.2020.

Abbildung 9: Karte über Auswahl der Trockenabbau-Tagebaue mit einer Fläche > 25.000 m<sup>2</sup> (Eigene Darstellung)

### 3.4 Auswertung des Gewässerabstandes

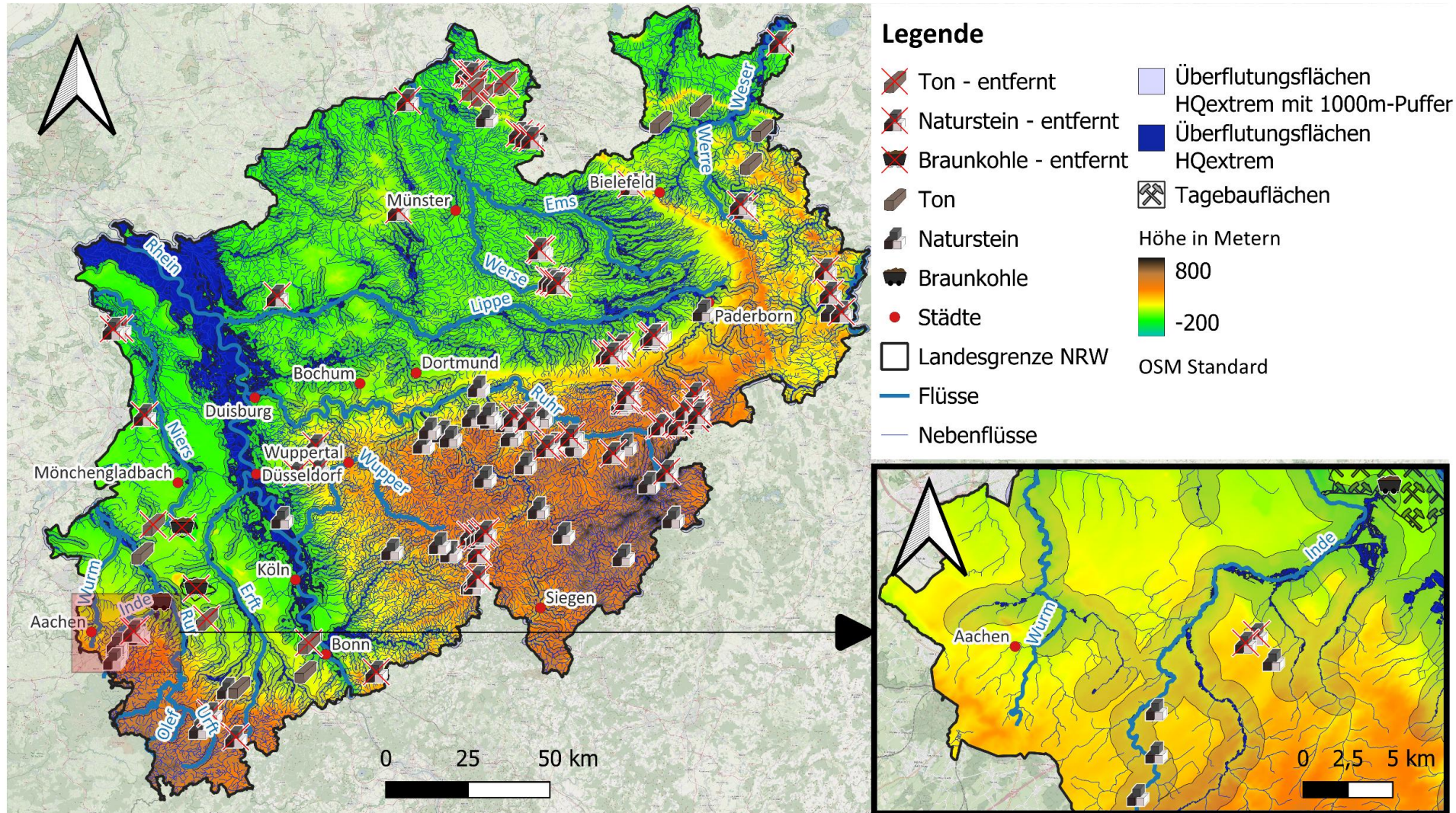
Aus hydrologischer bzw. hydraulischer Sicht ist zunächst der Abstand des Tagebaus zum jeweiligen hochwasserführenden Gewässer zu betrachten. Dazu wurden die Überflutungsflächen der Hochwassergefahrenkarten für das  $HQ_{extrem}$  mit 2.000 m, 1.500 m, 1.000 m und 500 m Abstand in QGIS gepuffert und räumlich mit den Tagebaupolygonen aus der vorherigen Untersuchung verschnitten. Dabei wurde der Abstand von 1000 m als Grenzwert festgelegt. Das bedeutet, dass alle Tagebaue entfernt wurden, die einen größeren Abstand zum Gewässer als der definierte Grenzwert aufweisen. Der Hintergrund ist, dass für einen Hochwasserrückhalt Wasser aus dem jeweiligen Fluss in den Tagebau abgeschlagen wird (DWA-M522:2015). Eine Ausleitung mit mehreren Kilometern Länge erscheint aus Gründen der Genehmigungsfähigkeit und dem planerischen Aufwand als unrealistisch. Ein genauer Grenzwert lag den Projektarbeitenden jedoch nicht vor, sodass an dieser Stelle eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt wurde. In Tabelle 6 ist das Ergebnis dargestellt. Es zeigt sich eine Bandbreite von 58% bis hin zu 28% bei den zu wählenden Tagebauen. Das Ziel war eine deutliche, jedoch nicht zu starke Reduktion der ursprünglichen Anzahl an Tagebauen zu erreichen. Daher wurden 1000 m Gewässerabstand mit einem verbleibenden Anteil von 39% der ursprünglichen Tagebaue nach der Bewertung in Kapitel 3.3 ausgewählt.

Tabelle 6: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse (Eigene Darstellung)

Gewässerabstand	Anzahl Tagebau, die innerhalb des Abstandes liegen	Anteil gewählter Tagebaue
2.000 m	77	58%
1.500 m	64	48%
1.000 m	52	39%
500 m	38	29%

Mit dieser Annahme wird in QGIS die Auswertung durchgeführt. Hierzu werden zunächst die Überflutungsflächen der Hochwassergefahrenkarten für das  $HQ_{extrem}$  vom Landesbetrieb IT.NRW (2024) bezogen. Im Anschluss werden diese gemäß des gewählten Gewässerabstandes um den Perimeter von 1000 m gepuffert. Abschließend werden die Tagebaupolygone mit den gepufferten Überflutungsflächen räumlich verschnitten. Alle schneidenden Tagebaue werden ausgewählt, alle nicht schneidenden entfernt. Das Ergebnis der Untersuchung des Gewässerabstandes ist in der Karte in Abbildung 10 dargestellt. In der großen Karte zeigt sich, dass eine Vielzahl an Natursteintagebauen entfernt wurden. In dem präsentierten kleinen Kartenausschnitt ist der Bereich der Städteregion Aachen abgebildet. Hier sind die gepufferten Überflutungsflächen und damit das Auswahlvorgehen ersichtlich. Im Bereich der Städteregion Aachen werden zwei Natursteinbrüche entfernt.

# Untersuchung des Gewässerabstandes für Tagebaue in Nordrhein-Westfalen



## Quellen

Modifiziert nach: Geobasis NRW (Hrsg.) (2024): Digitales Basis-Landschaftsmodell NW. [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/lm/akt/basis-dlm/basis-dlm\\_EPSG25832\\_Shape.zip](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/lm/akt/basis-dlm/basis-dlm_EPSG25832_Shape.zip) abgerufen am 18.07.24.  
 Modifiziert nach: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2019): Gewässerstationierungskarte 3E NRW. [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt\\_klima/wasser/oberflaechengewaesser/gsk3e/gsk3e\\_EPSG25832\\_Shape.zip](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/oberflaechengewaesser/gsk3e/gsk3e_EPSG25832_Shape.zip) abgerufen am 19.07.24.  
 Modifiziert nach: Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2024): Digitale Verwaltungsgrenzen - hohe Stützpunktdichte (Shape) - Paketierung: gesamt NRW. [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/vkg/dvg/dvg1/dvg1\\_EPSG25832\\_Shape.zip](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/vkg/dvg/dvg1/dvg1_EPSG25832_Shape.zip) abgerufen am 20.07.2024.  
 European Environment Agency (Hrsg.) (2016): European Digital Elevation Model (EU-DEM). <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem> abgerufen am 19.10.2020.  
 Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2024): Fachdaten extremer Hochwasserereignisse (niedrige Wahrscheinlichkeit, > HQ250) als Shape. [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt\\_klima/wasser/hochwasser/hwrm/HQextrem-Ueberschwemmungsgrenzen\\_EPSG25832\\_Shape.zip](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/hochwasser/hwrm/HQextrem-Ueberschwemmungsgrenzen_EPSG25832_Shape.zip) abgerufen am 14.10.24.

Abbildung 10: Untersuchung des Gewässerabstandes für Tagebaue in NRW (Eigene Darstellung)

Beim Vergleich mit den Zahlen in Tabelle 7 bestätigt sich diese Einschätzung. Der Tagebau Inden ist der einzige ausgewählte Braunkohletagebau. Von 113 Natursteintagebauen verbleiben 43. Von 16 Tongruben werden 8 ausgewählt. Mit den hier ausgewählten Tagebauen wird im Anschluss die Höhenanalyse durchgeführt.

Tabelle 7: Selektierte Tagebaue nach der Analyse des Gewässerabstands (Eigene Darstellung)

Layer	Entfernte Tagebaue	Gewählte Tagebaue
Braunkohle	2	1
Ton	8	8
Naturstein	70	43
<b>Summe</b>	<b>80</b>	<b>52</b>

### 3.5 Höhenanalyse

Direkt auf die Auswertung des Gewässerabstandes folgt nun die Höhenanalyse. Bei dieser wird untersucht, ob im Fall von  $HQ_{extrem}$  das Wasser aus dem Fluss rein topographisch im freien Gefälle in den jeweiligen Tagebau strömen kann. Es werden daher für jeden Tagebau zwei Höhen miteinander verglichen. Die erste Höhe ist der Minimalwert der Tagebausohle, dagegen ist der zweite Wert die Wasserspiegellage im Fluss bei  $HQ_{extrem}$ . Die Wasserspiegellage setzt sich hierbei aus der Wassertiefe und der geodätischen Höhe an der jeweiligen Stelle zusammen. Wenn die Sohle eines Tagebaus niedriger als die Wasserspiegellage bei Hochwasser ist, so wäre es möglich, in diesen Wasser einzuleiten. In Realität sind viele Tagebaue so angelegt worden, dass diese nicht in direktem Kontakt mit dem nächstgelegenen Fluss stehen und durch Schutzsysteme vor Hochwasser gesichert werden (Schinker, 2022). In diesen Fällen könnten aber entsprechende Kanäle oder Durchlässe errichtet werden, sodass das Wasser in die Tagebaue fließen kann.

Die Höhenanalyse wird aus einem Zusammenspiel von QGIS, Python und OSGeo4WSHELL durchgeführt. Wegen der großen Anzahl an Tagebauen ist eine manuelle Untersuchung nicht sinnvoll. Es werden daher in PyCharm mittels Python-Code und OSGeo4WSHELL die Rasterbearbeitung und die spätere Analyse teilautomatisiert durchgeführt. In QGIS werden die aus der Untersuchung des Gewässerabstands stammenden Vektorpolygone dafür entsprechend aufbereitet.

Die Höhenanalyse beginnt mit der Beschaffung geeigneter Daten zu digitalen Geländemodellen (DGM) und zu den Überflutungstiefen der Hochwassergefahrenkarten bei  $HQ_{extrem}$  mit hoher räumlicher Auflösung. Als geeignete Auflösung wird die Kantenlänge  $1\text{ m} \cdot 1\text{ m}$  und deswegen das DGM1 gewählt.

Über das Geoportal NRW<sup>1</sup> wurden die gepufferten Tagebaupolygone hochgeladen und für diese die zugehörigen Rasterkacheln bezogen. Aus dieser Vielzahl an einzelnen Kacheln wurde eine große Rasterdatei erstellt. Die Überflutungstiefen für  $HQ_{extrem}$  liegen in einzelnen Rasterkacheln, bei denen die Mehrheit die Auflösung  $1\text{ m} \cdot 1\text{ m}$  hat. Wenige Kacheln haben andere Auflösungen  $10\text{ m} \cdot 10\text{ m}$  oder  $20\text{ m} \cdot 20\text{ m}$ . Die Rasterkacheln werden somit zu einer großen Rasterdatei zusammengefügt und auf die Auflösung  $1\text{ m} \cdot 1\text{ m}$  projiziert. An wenigen Stellen waren unrealistische Wassertiefen an kleineren Seen von 99 m vorhanden, welche entfernt worden sind.

Das Vorgehen bei der Kernanalyse ist in Abbildung 11 dargestellt. Letztlich werden für jeden Tagebau zwei Höhen miteinander verglichen. Der erste Wert ist der Minimalwert der Tagebausohle, der zweite ist die maximale Wasserspiegellage bei  $HQ_{extrem}$  im Fluss. Hierzu wird ein Perimeter für jeden Tagebau von 1000 m definiert, diese Zahl entspricht dem Gewässerabstand aus Kapitel 3.4. Für die Untersuchung der Tagebaue wird Formel (5) verwendet. Dabei wird für jeden Tagebau geprüft, ob der Minimalwert der Tagebausohle zuzüglich 1 m zusätzlicher Höhe tiefer als der Maximalwert der Wasserspiegellage liegt. Die 1 m zusätzliche Höhe sind als Annahme für die zu erwartenden hydraulischen Verluste bei der Einleitung des Wassers in den Tagebau gewählt worden.

$$\text{Maximalwert Wasserspiegellage} > \text{Minimalwert Tagebausohle} + 1 \quad (5)$$

mit:

*Maximalwert Wasserspiegellage:* Höhe [m ü. NN.]

*Minimalwert Tagebausohle:* Höhe [m ü. NN.]

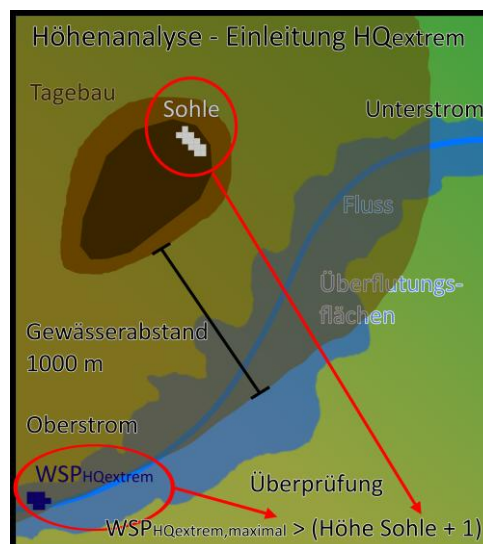


Abbildung 11: Skizze des Grundprinzips der Höhenanalyse (Eigene Darstellung)

<sup>1</sup> <https://www.geoportal.nrw/?activetab=map>

Hierzu werden in PyCharm die Rasterdatensätze für die Tagebausohlen und die Wasserspiegellagen auf- und vorbereitet. Es werden für die beiden Rasterdatensätze für jeden Tagebau automatisch die Minima der Tagebausohle und die Maxima der Wasserspiegellage berechnet. Bei den Minima wird nicht nur das niedrigste Rasterpixel, sondern ausgehend davon alle Rasterpixel erfasst, die um bis zu 1 m höher liegen. Aus diesem Bereich wird ein arithmetisches Mittel gebildet. Dieses Vorgehen reduziert die Wahrscheinlichkeit der Verfälschung durch Ausreißer. Das gleiche Vorgehen wird ebenfalls für die Maxima durchgeführt, hier werden alle Pixel erfasst, die um bis zu 1 m tiefer liegen. Abschließend erfolgt der Vergleich der gemittelten Werte auf Basis der Formel (5), bei welchem die Tagebaue nach ausgewählten und entfernten Tagebauen selektiert werden.

In Tabelle 8 ist das Ergebnis der Höhenanalyse dargestellt. Ein Braunkohletagebau wird ausgewählt. Dagegen werden drei Tongruben entfernt, sodass fünf Gruben verbleiben. 19 Natursteintagebaue werden entfernt und 24 Tagebaue selektiert. Insgesamt verbleiben 30 Tagebaue für die weiteren Analysen.

*Tabelle 8: Selektierte Tagebaue nach der Höhenanalyse (Eigene Darstellung)*

Layer	Entfernte Tagebaue	Gewählte Tagebaue
Braunkohle	0	1
Ton	3	5
Naturstein	19	24
<b>Summe</b>	<b>22</b>	<b>30</b>

Die Höhenanalyse ist damit nun beendet. Wichtig ist hierbei jedoch, dass lediglich die Topografie untersucht worden ist. Aussagen über die Beckenvolumina können damit nicht getroffen werden. Die Beckenvolumina werden in Kapitel 3.6 mit einem anderen Ansatz berechnet und untersucht.

### 3.6 Volumenberechnung

Nachdem sichergestellt ist, dass die bisher ausgewählten Tagebaue das Kriterium der Höhenanalyse erfüllen, wird nun für jeden der 30 Tagebaue das jeweilige Volumen berechnet. Das Volumen ist insofern wichtig, weil es Aufschluss über die zurückhaltbare Menge an Wasser für jeden Tagebau gibt. Im Kontext des Volumens ist es wichtig, eine sinnvolle Unter- bzw. Mindestgrenze festzulegen. Alle Tagebaue, die kleiner als diese Mindestgrenze sind, werden entfernt. Wie zuvor in Kapitel 2.2 beschrieben, gibt es zwar keine Mindestgrenze seitens der Bemessungsregelwerke. Jedoch ist es im Kontext des Projekts sinnvoll, eine Mindestgrenze festzulegen, da die Umwandlung eines Tagesbaues in ein HWRB mit Aufwand verbunden ist und für sehr kleine Volumina nicht sinnvoll erscheint. Die folgende Volumenberechnung ermittelt für jeden Tagebau zunächst ein Bruttovolumen. Dieses kann jedoch nicht vollständig für den Hochwasserrückhalt angesetzt werden. Erstens müssen bei Stauanlagen und insbesondere bei HWRB ein Freibord  $\geq 0,5$  m eingehalten werden (DIN19700-

12:2004). Zweitens bemisst sich das spätere Stauziel an geotechnischen Randbedingungen, wie der Standsicherheit von Tagebauböschungen (Goergen, 1987; Wagner, 2022). Drittens findet bei vielen Tagebauen ein Deponiebetrieb (Böden, Aushub, Bauschutt o.Ä.) statt, sodass sich das nutzbare Volumen im Laufe der Zeit verkleinert. Gemäß der Tabelle 9 werden 50.000 m<sup>3</sup> als Grenze zwischen kleinen und sehr kleinen Stauanlagen definiert. Daher werden 50.000 m<sup>3</sup> als untere Grenze für das zu berechnende Brutto-Volumen angenommen. Das bedeutet, dass alle Tagebaue mit einem kleineren Brutto-Volumen entfernt werden.

Damit diese Unterscheidung erfolgen kann, muss zunächst aber für alle in der Höhenanalyse selektierten Tagebaue das Brutto-Volumen berechnet werden. Dieses wird in einer Kombination aus QGIS und PyCharm mit Python-Code ermittelt. Die Grundlage bilden die Vektorpolygone der Tagebaue und das DGM1 für jeden Standort. In einem ersten Schritt werden in QGIS für jeden Tagebau die Höhenlinien im Abstand von 1 m ausgehend von dem Minimalwert der Sohle gezeichnet und dabei jeweils manuell die maßgebliche Höhenlinie identifiziert und selektiert. Diese maßgebliche Höhenlinie soll genau den Geländesprung markieren, an dem der Tagebau endet. Dabei sind folgende Kriterien zugrunde gelegt worden.

1. Finden der letzten Höhenlinie, die geschlossen ist.
2. Beginn bei der Höhenlinie mit dem niedrigsten Wert.
3. Die Fläche der Höhenlinie muss im Vergleich zur vorherigen größer werden.
4. Die Höhenlinie darf bis 1 m unterhalb des berechneten Maximalwerts der Wasserspiegellage liegen.  
→ Wenn dieser eine Dezimalzahl ist, wird abgerundet.  
  
→ Beispiel: Maximaler Wasserspiegel 145,34 m → gewählt 144 m
5. Die Höhenlinie muss ungefähr in dem Bereich des zugrundeliegenden Vektorpolygons liegen.

Bei manchen Tagebauen wurden mehrere maßgebliche Höhenlinien erfasst, da dort mehrere Gruben vorlagen. Die maßgeblichen Höhenlinien werden mit dem zugehörigen Höhenwert abgespeichert und in Vektorpolygone transformiert. Für jede einzelne Grube wird später das Volumen berechnet und aufaddiert.

Die Vektorpolygone und die enthaltenen Höhenwerte sind für die Volumenberechnung entscheidend. Einerseits wird jedes so generierte Vektorpolygon für das Zuschneiden der DGM1 zur Volumenberechnung benötigt. Andererseits trägt jedes Vektorpolygon wegen des Bezugs zur Höhenlinie den Höhenwert in sich. Diese Höhe ist für die Volumenberechnung entscheidend. Die Volumenberechnung selbst wird in Python auf Basis der Formel (6) ausgeführt.

$$Volumen = \sum (h_{Höhenlinie} - h_{Rasterpixel,i}) \cdot l_{Rasterpixel} \cdot b_{Rasterpixel} \quad (6)$$

mit

$h_{Höhenlinie}$ : Höhenwert der Höhenlinie

$l_{Rasterpixel}$ : Länge eines Rasterpixels

$h_{Rasterpixel,i}$ : Höhenwert eines Rasterpixels

$b_{Rasterpixel}$ : Breite eines Rasterpixels

Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 dargestellt. Die Tagebaue, bei denen das Volumen mehrerer Teilgruben berechnet wurde, sind bereits zusammengefasst. Alle Tagebaue mit einem Brutto-Volumen kleiner als 50.000 m<sup>3</sup> sind rot markiert und werden entfernt. Alle Tagebaue mit einem Brutto-Volumen zwischen 50.000 m<sup>3</sup> und 100.000 m<sup>3</sup> sind als kleine Becken weiß hinterlegt. Alle Volumina von Tagebauen, die über 100.000 m<sup>3</sup> liegen, sind hellgrün und alle Tagebaue mit einem Volumen über 1.000.000 m<sup>3</sup> sind dunkelgrün eingefärbt. Hierbei zeigt sich, dass der Großteil der Tagebaue ein größeres Volumen als 50.000 m<sup>3</sup> aufweist und damit für die weitere Untersuchung infragekommen. Besonders groß ist das Volumen des Tagebaus mit der Nummer 42 mit 712.184.787 m<sup>3</sup>; es handelt sich dabei um den Tagebau Inden. Die Tagebaue "Kieswerk Kerpen-Blatzheim" und "Tontagebau Schenkenbusch" wurden im Rahmen der Volumenberechnung zusätzlich entfernt. Tagebau\_43 überschneidet sich mit dem Tagebau\_50, wobei letzterer die größere Fläche hat. Daher wurde Tagebau\_43 entfernt und Tagebau\_50 beibehalten.

In Abbildung 12 sind die Ergebnisse der Volumenberechnung in einer Karte dargestellt. Es zeigt sich, dass die Vielzahl der Tagebaue mit den größten Volumina (Klasse III und IV) im Bereich des Sauerlandes zu finden sind. Im Umkreis der Stadt Aachen geht eindeutig der Braunkohletagebau Inden mit dem größten Volumen hervor.

Tabelle 9: Ergebnisse der Volumenberechnung (Eigene Darstellung)

Tagebau	Name / Betreiber	Berechnetes Volumen [m <sup>3</sup> ]	Gewählte Höhe [m]
Tagebau_24	n.a.	66,08	190
Tagebau_47	J&E Horst GmbH & Co. KG	3.831,92	54
Tagebau_27	Lanwehr Naturstein GmbH & Co KG	8.708,68	190
Tagebau_13	Werk Sötenich	8.869,14	401
Tagebau_10	Steinbruch Talbecke	9.702,40	246
Tagebau_38	BGS Bergische Grauwacke Steinbruchbetriebsgesellschaft	10.575,40	253
Tagebau_21	Mineral Baustoff GmbH	16.791,49	264
Tagebau_17	Steinbruch Hoven	44.913,04	208
Tagebau_14	Firmengruppe Davids	48.108,75	225
Tagebau_16	Steinbruch Kornelimünster	54.813,11	238
Tagebau_52	Steinbruch Walheim	55.724,64	255,8
Tagebau_15	Steinbruch Gressenich	57.114,12	224
Tagebau_49	Ziegelwerke Otto Bergmann	65.749,54	178
Tagebau_34	n.a.	73.885,79	339
Tagebau_48	SIBELCO Deutschland GmbH Betrieb Carolus	155.226,25	196
Tagebau_12	Steinbruch Wildbergerhütte	217.377,48	308
Tagebau_40	Steinbruch Hohe Lieth	268.665,29	335
Tagebau_43	Tontagebau Schenkenbusch	281.906,30	150
Tagebau_7	Steinbruch Wocklum	359.007,37	230
Tagebau_50	Tontagebau Schenkenbusch	463.273,41	153
Tagebau_30	Steinbruch Viktoria	864.782,79	133
Tagebau_4	Steinbruch Griesenbrauck	882.667,17	191
Tagebau_25	Heinrich Ebel GmbH & Co KG	1.071.949,46	186
Tagebau_11	G. Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH	1.087.380,90	305
Tagebau_19	Steinbruch Grevenbrück	2.309.042,51	255
Tagebau_28	Steinbruch Milke	2.748.351,88	143
Tagebau_29	Steinbruch Elsa	5.854.392,41	125
Tagebau_3	Donnerkuhle	7.523.037,82	114
Tagebau_22	Steinbruch Asbeck	10.524.619,04	200
Tagebau_42	Tagebau Inden	712.184.787,47	91

# Klassifizierung von Tagebauen in Nordrhein-Westfalen anhand ihres Volumens

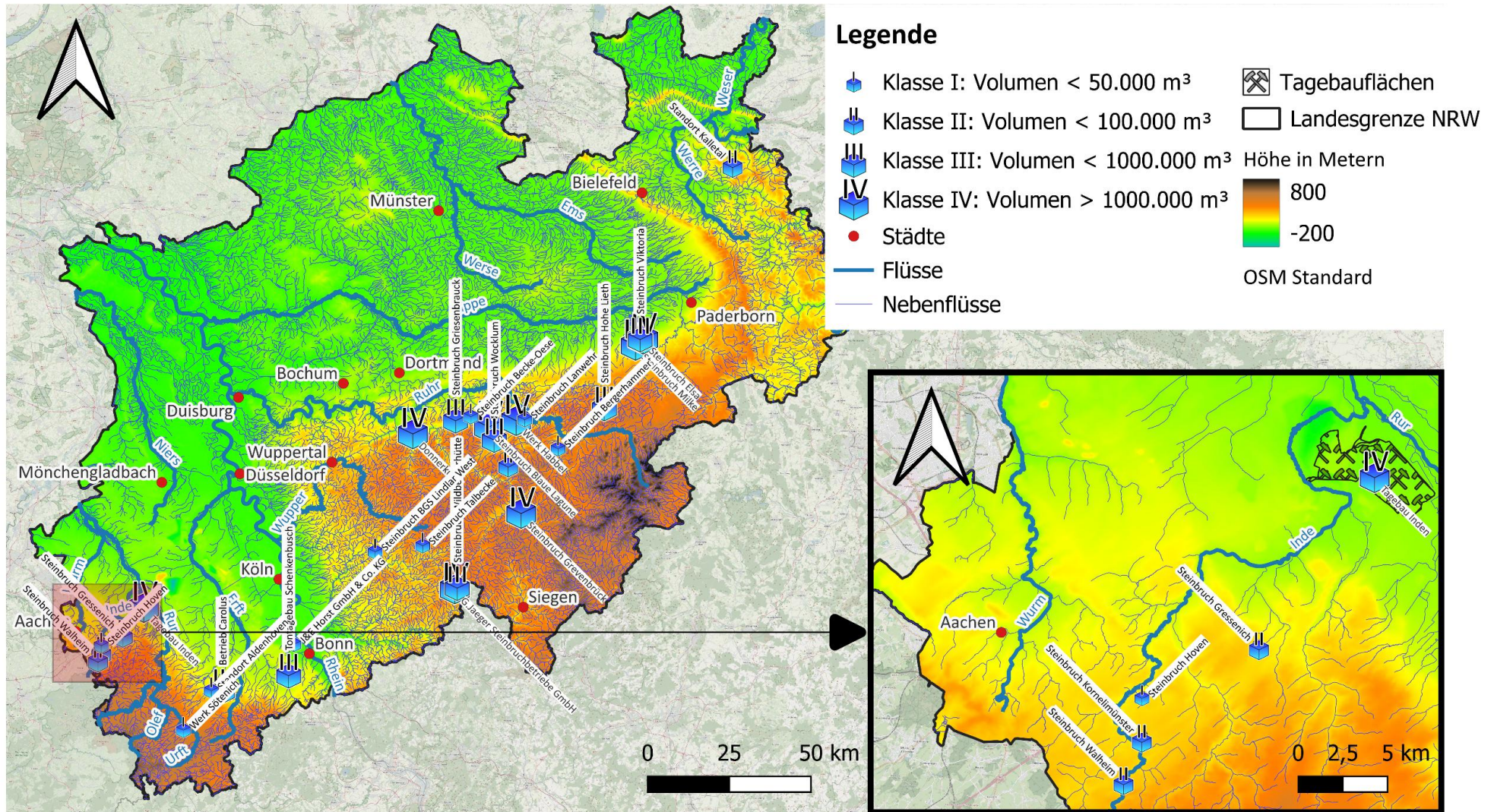


Abbildung 12: Volumina der Tagebaue in NRW (Eigene Darstellung)

### 3.7 Spezifisches Volumen

Mit der Berechnung des Volumens in Kapitel 3.6 ist die Grundlage für die Untersuchung des spezifischen Volumens gegeben. Es fehlen an dieser Stelle noch die Flächen der jeweiligen Teileinzugsgebiete der durch die Tagebau-HWRB zu entlastenden Fließgewässer. Dadurch, dass die Tagebaue zufällig verteilt in den Flusseinzugsgebieten liegen, ist eine Fließweganalyse in QGIS nötig. Die Grundlage für die Fließweganalyse bilden zum einen die Tagebaue, die bei der Volumenberechnung selektiert wurden. Zum anderen wird erneut ein DGM benötigt. Das DGM1 konnte jedoch nicht verwendet werden, da dies die Rechenkapazität der institutseigenen Rechner überschritten hätte; manche Tagebaue liegen an Fließgewässern wie Rur und Lenne mit mittelgroßen Einzugsgebieten und für diese ist eine Fließweganalyse mit DGM1 nur schwer machbar. Stattdessen wurde das DGM25 verwendet. Das DGM25 wurde zuerst auf das Koordinatenbezugssystem des Projektes transformiert. Im Anschluss wurde mittels den Flusseinzugsgebieten der Gewässerstationierungskarte das DGM25 grob auf die mittelgroßen Flusseinzugsgebiete zugeschnitten. Es erfolgte dann die Auffüllung von Senken, um Fehler durch Senken zu reduzieren. Im Anschluss wurden dann die Wasserscheiden, Gewässerabschnitte, Entwässerungsrichtungen und Kleinst-einzugsgebiete berechnet.

Im letzten Schritt werden für die Gebietsauslässe und die Entwässerungsrichtungen die Teileinzugsgebiete der Tagebaue ermittelt. Dazu mussten zuerst die Punkte für die Gebietsauslässe in QGIS bestimmt werden. Jeder Punkt entspricht dem Standort eines Tagebaus, bzw. der Lage des Ausleitungsbauwerks für jeden Tagebau. Dazu wurden die Layer der maximalen Wasserspiegellage der Höhenanalyse in Kapitel 3.5 betrachtet und mit den darin markierten Rasterpixeln die Punkte für die Ausleitungsbauwerke bestimmt. Mit den ausgewählten Punkten wurden die TEZG für jeden Tagebaustandort als Rasterdatei erhalten. Abschließend wurden die Rasterdateien vektorisiert und dann in QGIS die Fläche ausgerechnet. Die berechneten Einzugsgebiete sind in Tabelle 10 dargestellt. Bei dem Tagebau\_42 (Inden) wurden die zwei Flusseinzugsgebiete von Inde und Rur betrachtet.

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse der Fließweganalyse in der Spalte Einzugsgebiet zu finden. Darüber hinaus sind auch die in Kapitel 3.6 berechneten Volumina der Tagebaue aufgetragen. Auf Basis der Formel (4) wird für jeden Tagebau das spezifische Volumen berechnet. Die Tabelle ist aufsteigend nach den spezifischen Volumina sortiert. Beim Vergleich mit der Dissertation von Kreiter (2007) zeigten sich in den von ihm untersuchten Einzugsgebieten keine Scheitelminderungen bei einem spezifischen Volumen von 3 mm. Erst bei spezifischen Volumina von 7 mm zeigten sich Minderungseffekte. (Kreiter, 2007). Somit werden für das spezifische Volumen 3 mm als untere Grenze gewählt. Alle Tagebaue mit einem kleineren spezifischen Volumen werden entfernt, alle Tagebaue darüber kommen als Pilotstandort infrage. Besonders interessant sind die Standorte, deren spezifische Volumina über dem Wert von 11 mm liegen. Ab diesem Wert stellt sich die optimale Wirkung ein bzw. bei einer weiteren Steigerung wird das Wasser vollständig zurückgehalten (Kreiter, 2007). Nach Kreiter (2007) sind HWRB ab diesem Punkt überdimensioniert, jedoch ist unklar wie sich die Scheitelabflüsse im Zuge des

Klimawandels steigern können, sodass Tagebaue mit sehr hohem spezifischen Volumen als besonders geeignet zu bezeichnen sind. In der Tabelle 10 ist diese Klassierung der spezifischen Volumina farblich markiert. Die rot markierten Bereiche scheiden wegen eines spezifischen Volumens kleiner als 3 mm aus. Tagebaue mit spezifischen Volumina zwischen 3 mm und 11 mm sind gelb eingefärbt. Tagebaue zwischen 11 mm und 100 mm sind hellgrün, Tagebaue über 100 mm sind dunkelgrün markiert. Das höchste spezifische Volumen hat der Tagebau Inden mit einem Wert von ca. 560 mm.

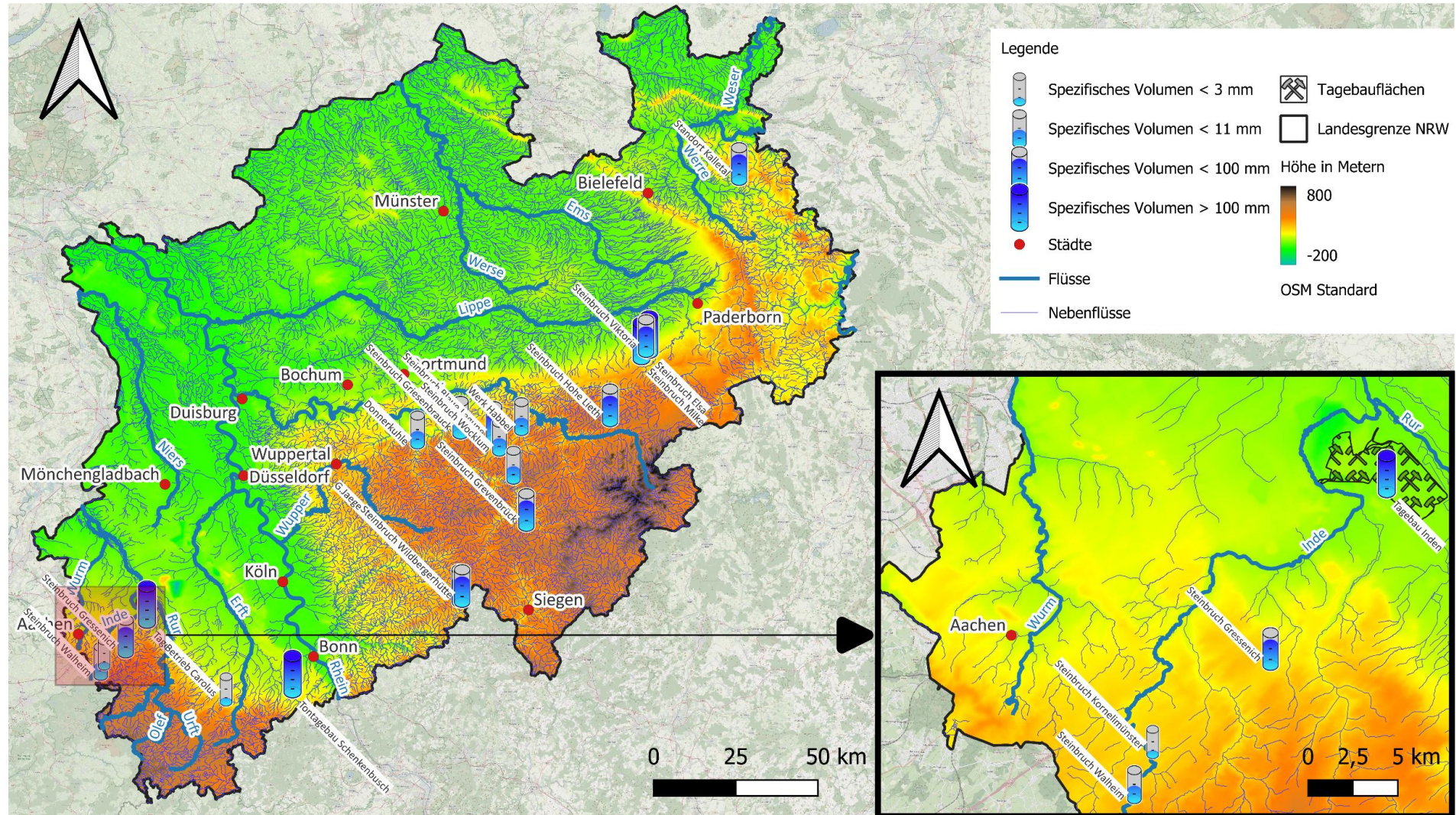
Tabelle 10: Ergebnisse der Berechnung des spezifischen Volumens (Eigene Darstellung)

Tagebau	Name / Betreiber	Berechnetes Volumen [m³]	Einzugsgebiet [m²]	Spezifisches Volumen [mm]
Tagebau_48	SIBELCO Deutschland GmbH Betrieb Carolus	155.226,25	60.563.419,00	2,56
Tagebau_16	Steinbruch Kornelimünster	54.813,11	21.275.707,00	2,58
Tagebau_52	Steinbruch Walheim	55.724,64	12.599.574,00	4,42
Tagebau_25	Heinrich Ebel GmbH & Co KG	1.071.949,46	192.075.226,00	5,58
Tagebau_3	Donnerkuhle	7.523.037,82	1.321.095.180,00	5,70
Tagebau_7	Steinbruch Wocklum	359.007,37	41.201.081,00	8,71
Tagebau_34	n.a.	73.885,79	7.233.637,00	10,21
Tagebau_15	Steinbruch Gressenich	57.114,12	4.101.512,00	13,93
Tagebau_12	Steinbruch Wildbergerhütte	217.377,48	12.392.612,00	17,54
Tagebau_40	Steinbruch Hohe Lieth	268.665,29	11.574.913,00	23,21
Tagebau_30	Steinbruch Viktoria	864.782,79	20.044.877,00	43,14
Tagebau_49	Ziegelwerke Otto Bergmann	65.749,54	1.331.689,00	49,37
Tagebau_11	G. Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH	1.087.380,90	21.984.092,00	49,46
Tagebau_19	Steinbruch Grevenbrück	2.309.042,51	36.525.658,00	63,22
Tagebau_4	Steinbruch Griesenbrauck	882.667,17	9.262.490,00	95,30
Tagebau_22	Steinbruch Asbeck	10.524.619,04	109.982.757,00	95,69
Tagebau_28	Steinbruch Milke	2.748.351,88	12.799.895,00	214,72
Tagebau_50	Tontagebau Schenkenbusch	463.273,41	1.809.312,00	256,05
Tagebau_29	Steinbruch Elsa	5.854.392,41	20.488.971,00	285,73
Tagebau_42**	Tagebau Inden	712.184.787,47	1.272.451.284,00	559,70

\*\*Addition der Einzugsgebiete von Inde und Rur an dem Standort des Tagebaus Inden

In Abbildung 13 sind die Tagebaue klassifiziert nach den spezifischen Volumina aufgetragen. Konträr zu dem Ergebnis der Volumenberechnung sind die Tagebaue mit hohen spezifischen Volumina gleichverteilt. Auffällig ist, dass einige Tagebaue im Sauerland spezifische Volumina zwischen 3 mm und 11 mm haben. Im Umkreis der Stadt Aachen sind vier Tagebaue enthalten. Hier ist wie zuvor beschrieben der Tagebau Inden zu sehen, der das größte spezifische Volumen innehat.

# Klassifizierung von Tagebauen in NRW anhand ihres spezifischen Volumens



## Quellen

Modifiziert nach: Geobasis NRW (Hrsg.) (2024): Digitales Basis-Landschaftsmodell NW. [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/lm/akt/basis-dlm/basis-dlm\\_EPSG25832\\_Shape.zip](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/lm/akt/basis-dlm/basis-dlm_EPSG25832_Shape.zip) abgerufen am 18.07.24.  
 Modifiziert nach: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2019): Gewässerstationierungskarte 3E NRW. [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt\\_klima/wasser/oberflaechengewaesser/gsk3e/gsk3e\\_EPSG25832\\_Shape.zip](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/oberflaechengewaesser/gsk3e/gsk3e_EPSG25832_Shape.zip) abgerufen am 19.07.24.  
 Modifiziert nach: Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2024): Digitale Verwaltungsgrenzen - hohe Stützpunktdichte (Shape) - Paketierung: gesamt NRW. [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/vkg/dvg/dvg1/dvg1\\_EPSG25832\\_Shape.zip](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/vkg/dvg/dvg1/dvg1_EPSG25832_Shape.zip) abgerufen am 20.07.2024.  
 European Environment Agency (Hrsg.) (2016): European Digital Elevation Model (EU-DEM). <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem> abgerufen am 19.10.2020.  
 Modifiziert nach: Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2024): Digitales Geländemodell - Rasterweite 1 m (GeoTIFF) - Paketierung: Einzelkacheln. [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/hm/dgm1\\_tiff/dgm1\\_tiff/](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/hm/dgm1_tiff/dgm1_tiff/) abgerufen am 01.09.2024.

Abbildung 13: Spezifische Volumina der Tagebaue in NRW (Eigene Darstellung)

### **3.8 Zwischenergebnis und finale Auswahl der Pilotstandorte**

Das Zwischenergebnis sind nun 18 Standorte, die den mehrstufigen Bewertungsprozess durchlaufen haben und prinzipiell für den Rückhalt von Extremhochwasser geeignet sind. In Tabelle 10 sind das alle gelb und grün markierten Tagebaue. Im Zuge des Projektes können jedoch nicht alle 18 Standorte als Pilotstandort ausgewählt werden. Stattdessen wird eine Auswahl getroffen, um den besten Projektfortschritt zu ermöglichen. Dabei wird ein integrativer Ansatz gewählt, bei welchem die 18 Standorte im Rahmen eines Workshops der Projektpartner anhand hydraulischer und montaner Kriterien bewertet und vier geeignete Pilotstandorte festgelegt werden. Die folgenden Kriterien sind dabei für jeden Standort untersucht worden.

- **Möglichst hohes spezifisches Volumen**
- **Die Verfügbarkeit von hydrologischen Daten eines nahegelegenen Gewässerpegels**
- **Keine Beeinträchtigung von kritischer Infrastruktur wie z.B. Eisenbahnschienen und Talsperren**
- **Kein Überfluten von Deponiematerial (Keine höhere Einstufung als Deponieklasse 0)**

Im Rahmen der Evaluierung wurde besonderes Augenmerk auf die bestehende Nutzung der Tagebaue und angehängte aktive Deponiebetriebe gelegt. Tagebaue, die als Deponiestandorte genehmigt sind und in denen Material unterhalb des zu erwartenden maximalen Wasserstands deponiert wird, wurden von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Das gezielte Fluten solcher Tagebaue birgt erhebliche Risiken für Umwelt und Wasserqualität, insbesondere durch das potenzielle Freisetzen von Schadstoffen infolge von Auswaschung oder Umlagerung kontaminierter Materialien (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2014). Die mögliche Mobilisierung von Schwermetallen, organischen Schadstoffen oder salzhaltigen Stoffen gefährdet nicht nur Grund- und Oberflächengewässer, sondern stellt auch die Eignung des Standorts als Retentionsraum grundsätzlich infrage.

Die Bewertung erfolgte auf Grundlage des Vorsorgeprinzips (§ 6 Abs. 1 WHG) sowie unter Berücksichtigung abfall- und wasserrechtlicher Anforderungen an den langfristigen Schutz von Boden und Wasser. In die weitere Analyse wurden ausschließlich Tagebaue einbezogen, die keine Deponieanteile oberhalb von DK0 aufweisen.

- **Standorte mit hohem öffentlichem Interesse**
- **Hang- und Hügelabbau werden ausgeschlossen**

Tagebaue, die im Hang- und Hügellabbau betrieben werden, wurden aus der Betrachtung ausgeschlossen, da sie aufgrund ihrer topografischen Lage in der Regel eine unzureichende Rückhaltegeometrie aufweisen. Eine kontrollierte Stauung des Wassers ist unter diesen Bedingungen nicht zuverlässig möglich. Die betroffenen Tagebaue wurden im Einzelfall überprüft. Alle Standorte ohne eine Senke am Fuß des Abbaufeldes wurden von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. (Prinz & Strauß, 2018)

**- Sonderfälle vermeiden wie z.B. Stauregelung**

**- Spezifisches Volumen größer als 40 mm (Höchste Starkregenklasse (DWD, o.J.))**

Diese Kriterien wurden via Satellitendaten und bisherigen erhobenen Daten betrachtet und dann entsprechend geeignete Tagebaue identifiziert. Als Ergebnis resultieren hier der Tagebau Inden im Rheinischen Braunkohlerevier, Steinbruch Grevenbrück im südlichen Sauerland, Steinbruch Blaue Lagune im nördlichen Sauerland und der Steinbruch Walheim nördlich der Eifel.

### 3.9 Ausgewählter Tagebau 1 - Braunkohletagebau Inden



Abbildung 14: Luftaufnahme Tagebau Inden (Quelle: GEOPortal.NRW)

Der Tagebau Inden liegt im Rheinischen Braunkohlerevier zwischen den Autobahnen A44 (N) und A4 (S) im Kreis Düren/Städteregion Aachen und wird von RWE Power betrieben. Abgebaut wird Braunkohle im Schaufelradbagger–Band–Absetzer–Verbund; die Flöze sind bis zu etwa 45 m mächtig und liegen bis rund 230 m unter Deckgebirge. Die Jahresförderung beträgt rund 15 Mio. t und dient primär der Versorgung des Kraftwerks Weisweiler.

Der Aufschluss des heutigen Tagebaus erfolgte 1957. Nachdem der Abbau 2005 den alten Flusslauf der Inde erreichte, erhielt der Fluss nördlich von Lamersdorf ein neues, etwa 12 km langes, naturnahes Bett. Im Zuge des gesetzlichen Kohleausstiegs endet die Kohlegewinnung 2029; ab 2030 beginnt die

Flutung des Tagebaus zum „Indesee“. Für den Indesee sind eine Seefläche von rund 13 km<sup>2</sup>, ein Volumen von etwa 750 Mio. m<sup>3</sup> und eine Füllzeit von ca. 25–30 Jahren geplant. Angaben zur maximalen Tiefe liegen bei rund 120 m bis etwa 140 m.

### 3.10 Ausgewählter Tagebau 2 - Tagebau Walheim



Abbildung 15: Luftaufnahme Tagebau Walheim (Quelle: GEOPortal.NRW)

Der Steinbruch Walheim („Walheimer Kalkwerke“) liegt im Indetal südöstlich von Aachen. Abgebaut wurde Kalkstein im Tagebau, dieser wurde unmittelbar vor Ort zu Branntkalk verarbeitet. Die Gewinnung diente der regionalen Versorgung der Bau-, Zement-/Kalksandstein- und Chemieindustrie sowie der Stahlherstellung. Heute ist der Tagebau stillgelegt und rekultiviert; es finden sich Felswände, teils wassergefüllte Restgruben und ein öffentliches Freizeitgelände im Inneren, während mehrere Ofenanlagen als Industriedenkmal gesichert und über den „Kalkofenweg“ entlang der Inde erschlossen sind. Teile des Areals sind als Natur- bzw. Landschaftsschutzgebiet ausgewiesen.

### 3.11 Ausgewählter Tagebau 3 – Grevenbrück



Abbildung 16: Luftaufnahme Tagebau Grevenbrück (Quelle: GEOPortal.NRW)

Der Steinbruch Grevenbrück liegt am Nordweststrand von Grevenbrück (Lennestadt) und wird von Rheinkalk (Lhoist-Gruppe) betrieben. Vor Ort entstehen aus dem im Bohr- und Sprengbetrieb gewonnenen Dolomitmalk sowohl gebrannte Produkte als auch Gesteinskörnungen. 2018 lag die Förderung bei rund 284.000 t Kalkstein; im Zuge einer beantragten Erweiterung sollte sie perspektivisch auf etwa 1,2 Mio. t pro Jahr steigen. Dafür war eine deutliche Ausweitung der Grundwasserhaltung vorgesehen.

Im April 2025 kündigte die Lhoist-Gruppe an, das Kalkwerk Grevenbrück zum Jahresende außer Betrieb zu nehmen; Steinbruch und Werksgelände bleiben im Eigentum des Unternehmens, eine Versorgung der Kunden soll über andere Standorte erfolgen.

### 3.12 Ausgewählter Tagebau 4 - Asbeck



Abbildung 17: Luftaufnahme Tagebau Blaue Lagune (Quelle: GEOPortal.NRW)

Der Steinbruch Asbeck der Lhoist-Gruppe liegt im Hönnetal bei Menden/Balve und ist ein aktiver Kalkstein-Tagebau, in dem seit über 100 Jahren Kalk gewonnen wird. Der Betrieb erfolgt mit Bohren und Sprengen. Das Gestein gebrochen und per Förderbandanlage zur Verarbeitungsanlage in Oberrödinghausen transportiert, wo der Standort Hönnetal Kalkprodukte (u. a. Branntkalk) in großem Umfang herstellt. Aktuell erscheint „Blaue Lagune“ als großflächiger, terrassierter Tagebau; zur langfristigen Rohstoffsicherung sind eine Vertiefung im Ostteil (bis zu ca. 60 m Teufe) und die Erweiterung im Areal „Beil“ in Planung. Im weiteren Projektverlauf wird der Name *Blaue Lagune* für diesen Tagebau verwendet.

---

## 4 Generalisierung und Übertragbarkeit

STorAgE hat den geographischen Rahmen des Projekts auf das Land NRW gelegt und dessen diverse Gesamtheit an Tagebauen als repräsentative Betrachtungsmenge für die Forschung herangezogen. Trivialerweise treten ausgedehnte Stark- und Dauerregenereignisse, wie beispielsweise im Sommer des Jahres 2021, durchaus grenzübergreifend auf. In der Gegenwart menschlicher Aktivitäten gilt dies aufgrund des Primärrohstoffbedarfs auch für die Verteilung von Gewinnungsstellen mineralischer Rohstoffe – sowohl in der Bundesrepublik als auch darüber hinaus. Insofern ist die Generalisierung der Methodik und deren Übertragung auf das Bundesgebiet nur eine logische Konsequenz. So kann ein signifikanter Beitrag dazu geleistet werden, den Hochwasserschutz langfristig zur strategischen Anpassung an die Folgen des menschengemachten Klimawandels auszubauen und zu verbessern.

Das Vorgehen zur Standortauswahl von potenziell als HWRB nutzbaren Tagebauen, wie es in Unterkapitel 3.2 beschrieben ist, wurde bereits gezielt vor dem Hintergrund der landesübergreifenden Anwendung entwickelt. Die wissenschaftliche Methodik fokussiert sich daher ausschließlich auf technisch-physikalische Aspekte des Bergbaus und der Wasserwirtschaft (vgl. Abbildung 7). NRW-spezifische Eigenschaften, Bedingungen oder Regelungen wurden dabei bewusst nicht in die Methodik aufgenommen. Die Methodik ist somit von Beginn an mit einem wissenschaftlichen Fokus zur Identifikation von potenziellen Tagebau-HWRB allgemein gehalten worden. Dadurch ist eine direkte und objektive Übertragbarkeit auf andere Bundesländer gegeben.

Im Grundsatz ist anzumerken, dass die Entscheidungen, die zur Festlegung der einzelnen methodischen Schritte geführt haben, objektiv getroffen wurden. Als Grundlage dienten (i) physikalisch-praktische Überlegungen, (ii) Forschungsergebnisse Dritter sowie (iii) eigene Untersuchungen anhand der Gesamtheit der Tagebaue und der in relativer Lage zu diesen befindlichen Flüssen in NRW. Es ist wichtig zu betonen, dass hierbei ein unvoreingenommener „Bottom up“-Ansatz für die ergebnisoffene Anwendung in NRW verfolgt wurde. Die schrittweise Methodik überprüft faktenbasiert die einzelnen, aufeinander aufbauenden Bedingungen, die zur finalen Standortauswahl führen. Wie der Vergleich der Karten aus Abbildung 6 und Abbildung 13 verdeutlicht, hat sich die verbleibende Zahl der potenziell in NRW als HWRB nutzbaren Tagebau gegenüber der ursprünglichen Gesamtheit deutlich reduziert. Die Entscheidungskriterien (vgl. Abbildung 7) sind unabhängig von räumlichen und zeitlichen Gegebenheiten von Nordrhein-Westfalen und auf andere Bundesländer übertragbar. Es sind jedoch für jedes Bundesland unterschiedliche Ergebnisse zu erwarten.

Der Vergleich verdeutlicht dabei auch die Abhängigkeit des Untersuchungsergebnisses von der Geologie und Topografie des Betrachtungsraums. So unterscheiden sich die Bundesländer mitunter erheblich in der Anzahl und Verteilung von Tagebauen der verschiedenen aufgeschlossenen Rohstoffe – Sand, Kies, Naturstein etc. Dadurch kann das Untersuchungsergebnis unter Umständen in den Bundesländern aber auch zwischen einzelnen Regionen signifikant variieren. Grund dafür ist die

---

Lagerstättenogenese der abgebauten Rohstoffe, die das Auftreten und die Verteilung ebendieser Lagerstätten beeinflusst hat. In Folge der Glazialen Serie treten innerhalb Deutschlands in Richtung Norden entsprechend mehr Sandlagerstätten und weniger oberflächennahes Festgestein auf. Dies hat wiederum Auswirkungen auf die anthropogene Nutzung der Lagerstätten inklusive der Abbauart und Tagebaugröße und somit auf das Vorhandensein bzw. den Anteil HWRB-geeigneter Tagebaue. (Unternehmerverband Mineralische Baustoffe (UVMB) e.V., 2016)

## 5 Vorbereitungen für hydro-numerische Simulationen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für die Durchführung hydro-numerischer Simulationen geschaffen. Dafür werden zunächst die hydrologischen Daten der betrachteten Tagebaustandorte zusammengestellt und aufbereitet. Darauf aufbauend erfolgt die Berechnung der Wirkungsgrade des Hochwasserrückhalts, um die Wirkungsgrade der HWRB für die Pilotstandorte abschätzen zu können. Im nächsten Schritt wird das hydro-numerische Modell konzeptioniert, das die Grundlage für die anschließenden Simulationen bildet. Abschließend erfolgt die beispielhafte Konzeptionierung und Vordimensionierung der Tagebau-Hochwasserrückhaltebecken für zwei Pilotstandorte, um deren Einbindung in die Modellierung vorzubereiten.

### 5.1 Hydrologische Daten für Tagebaustandorte

Der erste Schritt für die Vorbereitungen der hydro-numerischen Simulationen ist das Erfassen von hydrologischen Daten für die Tagebaustandorte. Diese sind dadurch gegeben, da sich in der Nähe jedes Pilotstandorts Pegelstationen des Landesamts für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (LANUK) befinden. Es ist somit möglich, auf aufgezeichnete Abflussdaten zuzugreifen. Die Abflusskennwerte für die vier Standorte sind in Tabelle 11 dargestellt. Darunter befinden sich neben den hydrologischen und ingenieurtechnischen Abflusswerten auch Werte für das Hochwasser 2021, gekennzeichnet als  $HQ_{(2021)}$ . Bei dem Pegel Elspe an dem Pilotstandort 3 liegen für das Jahr 2021 keine Abflusswerte vor. Der Aufzeichnungszeitraum erstreckt sich von 2004 bis 2020 (Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen, persönl. Mitteilung, 02.05.2025). Bei dem Pegel Menden\_Oberrödinghausen kommt es im Juli 2021 zu einem lokalen Maximum der Abflusswerte und zu einer Lücke der Aufzeichnung von 7h gegen Abend des 14.07.2021. Jedoch liegt der maximal gemessene Wert mit 33,502 m<sup>3</sup>/s deutlich unter dem  $HQ_{100}$ . Daher wird für diesen Pilotstandort das  $HQ_{(2021)}$  nicht verwendet.

Neben den Abflusskennwerten werden auch die Zeitreihen der Abflüsse für die Pegelstandorte erfasst. Dazu wurden über von Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (2024) geprüfte Zeitreihen der Abflüsse an den Pegelstationen bezogen. Diese Zeitreihen erstrecken sich dabei auf den gesamten Zeitraum, in welchem jede Pegelstation in Betrieb ist. Die zeitliche Auflösung dieser Abflussdaten beträgt 15 Minuten. Für den Pegel Lamersdorf wurden Werte vom Pegel Eschweiler, der Oberstrom des Pegels Lamersdorf liegt, entnommen. Die Abflusszeitreihe des Pegels Eschweiler wurde für den Pegel Lamersdorf angenommen, da zu diesem keine Zeitreihen vorliegen. Für die Pegel Elspe und Menden\_Oberrödinghausen wurden in Kommunikation mit Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (Persönl. Mitteilung, 02.05.2025) Zeitreihen erhalten.

Die vollständigen Zeitreihen können aufgrund ihrer Größe für die weiteren Betrachtungen nicht verwendet werden; teilweise erstrecken sich diese über Zeiträume von 50 Jahren. Der Fokus der

Untersuchung liegt auf den extremen Hochwasserereignissen. Daher wird die Zeitreihe jedes Pegels nach möglichst großen und vollständig aufgezeichneten Hochwasserereignissen gesichtet. Daraus leitet sich die für jeden Pegel relevante Abflussganglinie ab, die in der weiteren Untersuchung verwendet wird.

Tabelle 11: Hydrologische Abflusskennwerte der vier Pilotstandorte (Bezirksregierung Arnsberg, persönl. Mitteilung, 30.04.2025; Bezirksregierung Köln, persönl. Mitteilung, 14.04.2025; Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen, persönl. Mitteilung, 07.04.2025; Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr NRW, 2025)

Aspekt	Pilotstandort 1	Pilotstandort 1	Pilotstandort 2	Pilotstandort 3	Pilotstandort 4
Tagebau	Inden		Walheim	Grevenbrück	Blaue Lagune
Berechnetes Tagebauvolumen	712.184.787 m <sup>3</sup>		55.725 m <sup>3</sup>	2.309.043 m <sup>3</sup>	10.524.619 m <sup>3</sup>
Gewässer	Rur	Inde	Inde	Elspe	Hönne
Pegel	Selhausen	Lamersdorf	Kornel- münster	Elspe	Menden_ Oberröding- hausen
Einzugsgebiet	934,75 km <sup>2</sup>	300,00 km <sup>2</sup> *	65,02 km <sup>2</sup>	29,66 km <sup>2</sup>	128,30 km <sup>2</sup>
NQ	3,510 m <sup>3</sup> /s	0,223 m <sup>3</sup> /s	0,030 m <sup>3</sup> /s	0,020 m <sup>3</sup> /s	0,340 m <sup>3</sup> /s
MNQ	6,090 m <sup>3</sup> /s	1,960 m <sup>3</sup> /s	0,080 m <sup>3</sup> /s	0,042 m <sup>3</sup> /s	0,440 m <sup>3</sup> /s
MQ	12,000 m <sup>3</sup> /s	4,650 m <sup>3</sup> /s	0,720 m <sup>3</sup> /s	0,463 m <sup>3</sup> /s	1,580 m <sup>3</sup> /s
MHQ	50,040 m <sup>3</sup> /s	69,600 m <sup>3</sup> /s	17,130 m <sup>3</sup> /s	6,980 m <sup>3</sup> /s	12,300 m <sup>3</sup> /s
HQ	129,620 m <sup>3</sup> /s	317,000 m <sup>3</sup> /s	38,250 m <sup>3</sup> /s	16,900 m <sup>3</sup> /s	17,770 m <sup>3</sup> /s
HQ <sub>100</sub>	107,57 m <sup>3</sup> /s	131,10 m <sup>3</sup> /s	42,10 m <sup>3</sup> /s	36,60 m <sup>3</sup> /s	59,00 m <sup>3</sup> /s
HQ <sub>Extrem</sub>	158,88 m <sup>3</sup> /s	180,60 m <sup>3</sup> /s	59,20 m <sup>3</sup> /s	48,70 m <sup>3</sup> /s	80,00 m <sup>3</sup> /s
HQ <sub>(2021)</sub>	157,41 m <sup>3</sup> /s	317,00 m <sup>3</sup> /s	95,00 m <sup>3</sup> /s	keine Werte	max. Wert 33,502 m <sup>3</sup> /s

\*Für den Pegel Lamersdorf lagen keine Einzugsgebietsdaten (EZG) vor, stattdessen wurden die EZG der nahegelegenen Pegel Eschweiler und Luchem addiert und auf 300 km<sup>2</sup> gerundet.

In Tabelle 12 sind dazu Charakteristika enthalten. Für den Pegel Selhausen an der Rur wurde die Abflussganglinie des Hochwassers 2021 gewählt. Bei den Pegeln Lamersdorf bzw. Eschweiler und Kornelimünster an der Inde war das nicht möglich. Ab dem Juli 2021 haben die Messdaten der beiden Stationen Lücken, was auf Schäden infolge des Hochwassers zurückzuführen ist. Stattdessen wurde das nächstbeste messtechnisch erfasste Hochwasserereignis gewählt. Das ist jeweils ein Hochwasser

im Jahr 2014. Für den Pegel Elspe wurde eine Abflussganglinie aus dem Jahr 2007, für Menden\_Oberrödinghausen eine aus dem Jahr 1986 verwendet.

Tabelle 12. Charakteristika der gewählten Abflussganglinien für die vier Pilotstandorte (Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen, 2024; Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr NRW, 2025)

Aspekt	Pilotstandort 1	Pilotstandort 1	Pilotstandort 2	Pilotstandort 3	Pilotstandort 4
Gewässer	Rur	Inde	Inde	Elspe	Hönne
Pegel	Selhausen	Lamersdorf	Kornelimünster	Elspe	Menden_Oberrödinghausen
Jahr der gewählten Ganglinie	2021	2014	2014	2007	1986
Maximalwert der Ganglinie	157,410 m <sup>3</sup> /s	89,476 m <sup>3</sup> /s	33,398 m <sup>3</sup> /s	16,746 m <sup>3</sup> /s	41,399 m <sup>3</sup> /s
Zeitschritte Messdaten	15 min	15 min	15 min	15 min	15 min
Anmerkungen		Daten von Pegel Eschweiler 2014			

## 5.2 Berechnung der Wirkungsgrade des Hochwasserrückhalts an Tagebaustandorten

Mit den erhobenen Eingangsdaten beginnt nun die Berechnung der Wirkungsgrade. Mittels der erhobenen Abflusskennwerte werden für jeden Pegel drei extreme Abflussszenarien aufgestellt. Diese sind in Tabelle 13 skizziert. Das  $HQ_{Extrem}$  wird in Variante 1,  $HQ_{1000}$  in Variante 2 und  $HQ_{(2021)}$  bzw.  $HQ_{5000}$  in Variante 3 untersucht. Für die Pegel wird alternativ zu dem  $HQ_{(2021)}$  das  $HQ_{5000}$  verwendet. Dieses beschreibt ein selteneres bzw. extremeres Hochwasserereignis als das  $HQ_{1000}$ . Die Varianten schaffen eine bessere Vergleichbarkeit und ermöglichen eine bessere Einordnung der Ergebnisse für jeden Pilotstandort. Für die Pilotstandorte 3 und 4 wird anstatt des  $HQ_{(2021)}$  das  $HQ_{5000}$  gewählt. Beim Pilotstandort 3 existieren keine Abflussdaten für das Jahr 2021 und beim Pilotstandort 4 sind die Werte des  $HQ_{(2021)}$  zu gering.

Die Werte für das  $HQ_{Extrem}$  und  $HQ_{(2021)}$  sind bereits bekannt (siehe Tabelle 11), dagegen sind die Werte der gewählten  $HQ_{1000}$  und des  $HQ_{5000}$  zu berechnen.

Tabelle 13. Untersuchte Abflusszenarien (Eigene Darstellung)

Kriterium	Pilotstandort 1	Pilotstandort 1	Pilotstandort 2	Pilotstandort 3	Pilotstandort 4
<b>Tagebau</b>	Inden	Inden	Walheim	Grevenbrück	Blaue Lagune
<b>Pegel</b>	Selhausen	Lamersdorf	Kornelimünster	Elspe	Menden_Oberrödinghausen
<b>Variante 1</b>	$HQ_{Extrem}$	$HQ_{Extrem}$	$HQ_{Extrem}$	$HQ_{Extrem}$	$HQ_{Extrem}$
<b>Variante 2</b>	$HQ_{1000}$	$HQ_{1000}$	$HQ_{1000}$	$HQ_{1000}$	$HQ_{1000}$
<b>Variante 3</b>	$HQ_{(2021)}$	$HQ_{(2021)}$	$HQ_{(2021)}$	$HQ_{5000}$	$HQ_{5000}$

Für das  $HQ_{1000}$  und  $HQ_{5000}$  werden die Formel (7) und die Tabelle 14 benutzt.

$$HQ_n = MHQ + (HQ_{100} - MHQ) \cdot c_n \quad (\text{DWA-M522:2015}) \tag{7}$$

mit:

$HQ_n$ : Zu berechnender Hochwasserabfluss [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]       $HQ_{100}$ : Hundertjähriger Hochwasserabfluss [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]  
 $MHQ$ : Mittlerer Hochwasserabfluss [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]       $c_n$ : Faktor [-]

Tabelle 14: Faktoren nach Kleeberg & Schumann (DWA-M522:2015)

$n$	100	200	500	1.000	5.000
$c_n$	1,0	1,3	1,6	1,9	2,5
ANMERKUNGEN					
$c_n$ Faktor nach KLEEBERG & SCHUMANN (2001)					
$n$ Jährlichkeit					

Die verwendeten Scheitelabflüsse sind in Tabelle 15 dokumentiert. Auffällig ist, dass alle drei Abflusswerte an der Rur nahe beieinander liegen.

Diese ermittelten Abflusskennwerte werden jedoch nicht als konstant angenommen. Diese stellen jeweils den Maximalwert einer zugrundeliegenden unbekannteren Abflussganglinie dar. Die Idee ist nun, mittels der selektierten relevanten Abflussganglinien für jede Variante eine synthetische Ganglinie zu erzeugen. Dazu wird mit der Formel (8) ein Inter- bzw. Extrapolationsfaktor berechnet. Dieser setzt sich aus dem jeweiligen Abflusskennwert (Tabelle 15) und dem Maximalwert einer relevanten Ganglinie (Tabelle 12) zusammen. Die Abflusswerte der ursprünglichen Pegelganglinien werden mit dem jeweils

berechneten Faktor multipliziert, um damit die synthetische Ganglinie zu berechnen. Die verwendeten Inter- und Extrapolationsfaktoren sind in Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 15: Verwendete Abflusskennwerte (Eigene Darstellung)

Aspekt	Pilotstandort 1	Pilotstandort 1	Pilotstandort 2	Pilotstandort 3	Pilotstandort 4
Gewässer	Rur	Inde	Inde	Elspe	Hönne
Pegel	Selhausen	Lamersdorf	Kornelimünster	Elspe	Menden_Oberrödinghausen
$HQ_{100}$	107,57 m³/s	131,10 m³/s	42,10 m³/s	36,60 m³/s	59,00 m³/s
$HQ_{Extrem}$	158,88 m³/s	180,60 m³/s	59,20 m³/s	48,70 m³/s	80,00 m³/s
$HQ_{1000}$ nach Kleeberg & Schumann	159,35 m³/s	186,45 m³/s	64,57 m³/s	63,26 m³/s	101,03 m³/s
$HQ_{(2021)}$	157,41 m³/s	317,00 m³/s	95,00 m³/s	-	nicht verwendet
$HQ_{5000}$ nach Kleeberg & Schumann	-	-	-	81,03 m³/s	129,05 m³/s

$$f = AK / MWG \quad (8)$$

mit:

$f$ : Inter- / Extrapolationsfaktor [-]

$MWG$ : Maximalwert der Ganglinie [m³/s]

$AK$ : Abflusskennwert [m³/s]

Tabelle 16: Inter-/ Extrapolationsfaktoren für jede untersuchte Variante

Aspekt	Pilotstandort 1	Pilotstandort 1	Pilotstandort 2	Pilotstandort 3	Pilotstandort 4
Tagebau	Inden	Inden	Walheim	Grevenbrück	Blaue Lagune
Pegel	Selhausen	Lamersdorf	Kornelimünster	Elspe	Menden_Oberrödinghausen
Variante 1	1,009	2,018	1,773	2,908	1,932
Variante 2	1,012	2,084	1,933	3,777	2,44
Variante 3	1	3,543	2,844	4,839	3,117

Auf Basis dieser Inter- und Extrapolationen sind jeweils drei zusätzliche Ganglinien für jeden Pegelstandort entstanden. Für das  $HQ_{100}$  wird keine synthetische Ganglinie erzeugt. Dieses wird nach Kapitel 2.1 als anvisiertes Schwellenniveau ausgewählt und ist deswegen ein konstanter Schwellenwert. In Abbildung 18 sind die Ganglinien für den Pegel Selhausen an der Rur am Tagebau Inden aufgetragen. Das  $HQ_{100}$  ist konstant, die anderen Ganglinien folgen ihrem individuellen Verlauf. Auffällig ist, dass diese Ganglinien fast identische Werte haben, was sich an den Werten für die Rur in Tabelle 15 zeigt. Ferner ist anzumerken, dass die zugrundeliegende HQ-Ganglinie das  $HQ_{(2021)}$  ist. Alle vier Ganglinien überschreiten den  $HQ_{100}$ -Schwellenwert.

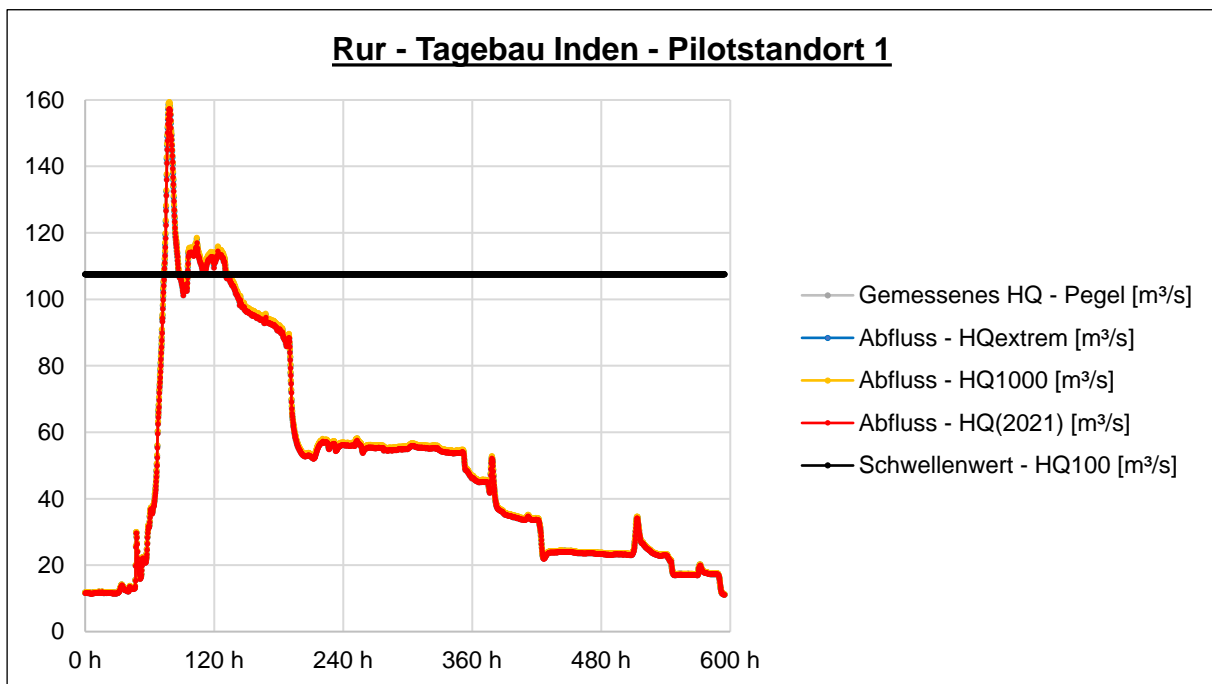


Abbildung 18: Scheitelkappung für verschiedene Abflussszenarien der Rur am Tagebau Inden (Eigene Darstellung)

In Abbildung 19 sind die Ganglinien für den Pegel Lamersdorf an der Inde enthalten. Hier kommt es zu einer Spreizung der Ganglinien. Das gemessene HQ markiert den Graphen mit kleinsten, das  $HQ_{(2021)}$  den Graphen mit den größten Werten. Die Ganglinien für das  $HQ_{Extrem}$  und  $HQ_{1000}$  sind ähnlich zueinander und liegen dazwischen. Die drei synthetischen Ganglinien überschreiten den  $HQ_{100}$ -Schwellenwert einmal. Das gemessene HQ liegt stets darunter.

Abbildung 20 präsentiert die Ganglinien des Pegels Kornelimünster für den Tagebau Walheim. Die Charakterisierung ist ähnlich zu der des Pegels Lamersdorf an der Inde. Auch hier weisen das gemessene HQ die niedrigsten und das  $HQ_{(2021)}$  den größten Verlauf auf. Auch liegen die Ganglinien für das  $HQ_{Extrem}$  und  $HQ_{1000}$  nahe beieinander und nur die drei synthetischen Ganglinien überschreiten einmalig den  $HQ_{100}$ -Schwellenwert.

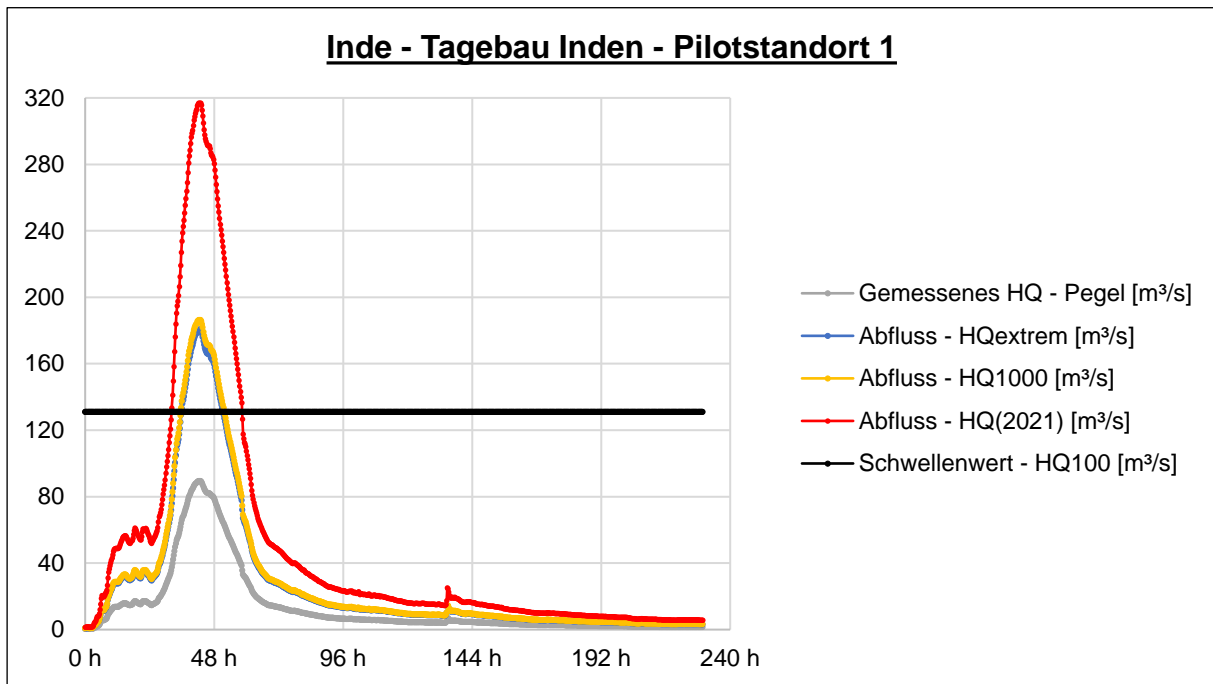


Abbildung 19: Scheitelkappung für verschiedene Abflussszenarien der Inde am Tagebau Inden (Eigene Darstellung)

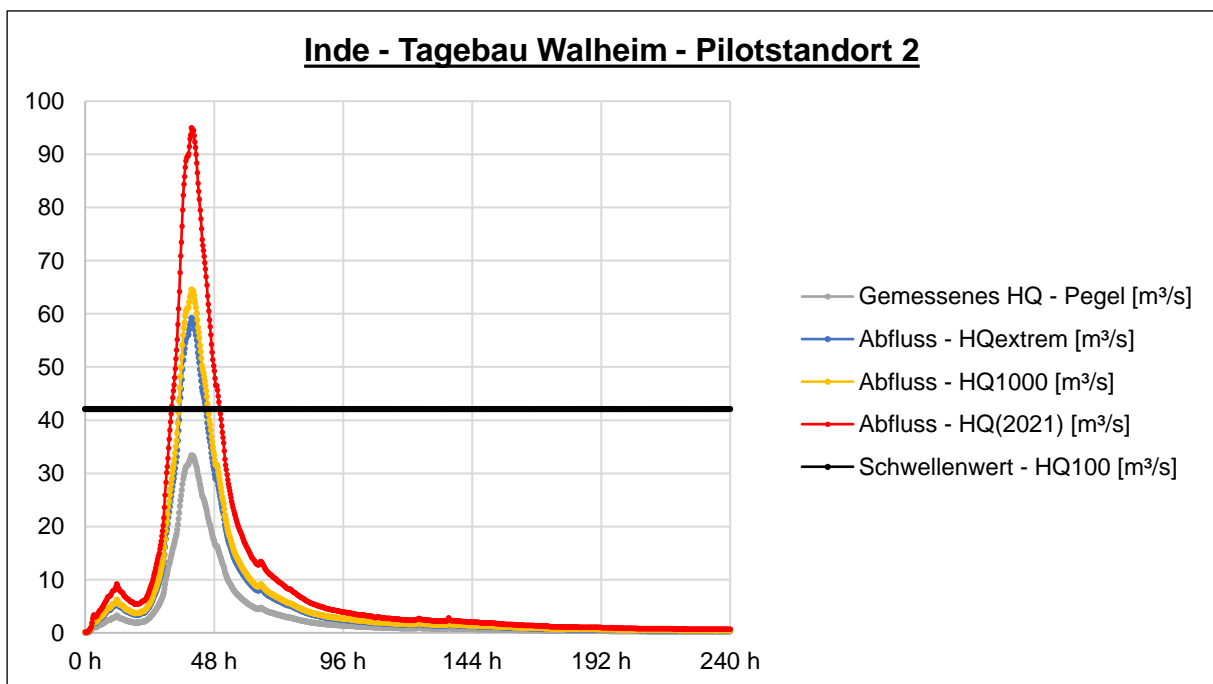


Abbildung 20: Scheitelkappung für verschiedene Abflussszenarien der Inde am Tagebau Walheim (Eigene Darstellung)

Ein anderer Verlauf ergibt sich in Abbildung 21 bei den Ganglinien für die Elspe am Pegel Elspe am Tagebau Grevenbrück. Alle vier Ganglinien sind deutlich gespreizt. Der niedrigste Verlauf hat das

gemessene HQ, den höchsten das  $HQ_{5000}$ . Die drei synthetischen Ganglinien überschreiten den  $HQ_{100}$ -Schwellenwert, aber die beiden Szenarien  $HQ_{1000}$  und  $HQ_{5000}$  erreichen den Schwellenwert früher als das  $HQ_{Extrem}$ . Das ist in den zwei lokalen Maxima der Abflusskurve begründet. Das gemessene HQ liegt mit deutlichem Abstand unterhalb des  $HQ_{100}$ -Schwellenwerts.

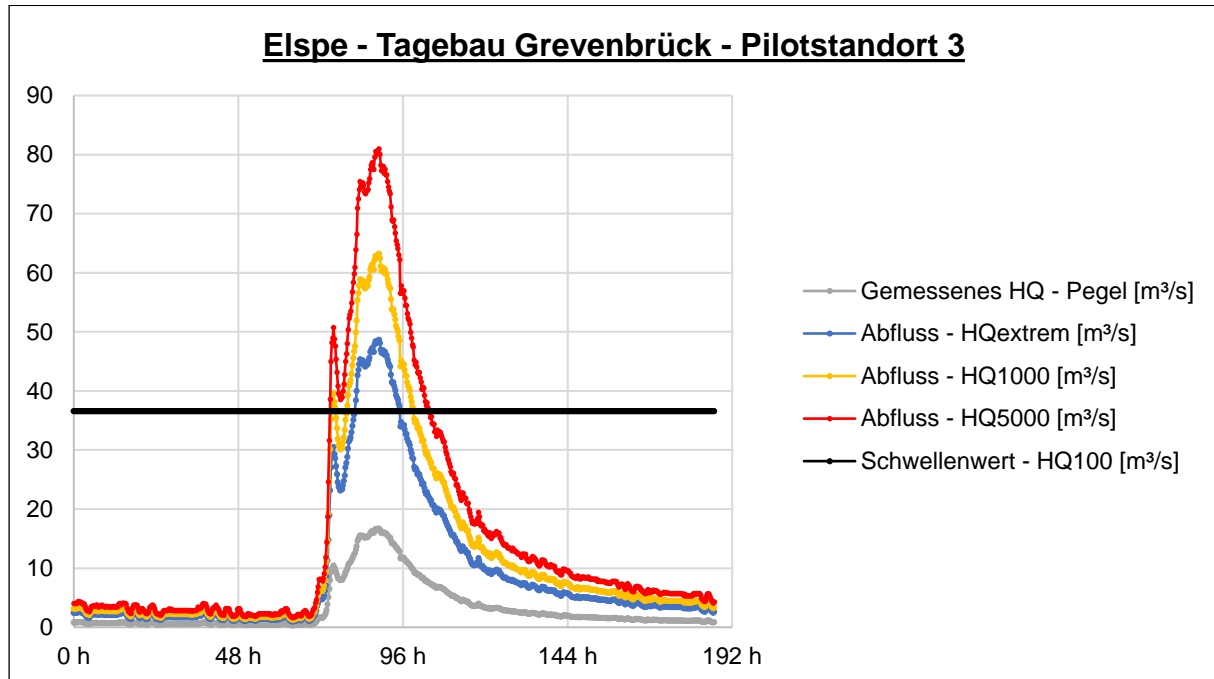


Abbildung 21: Scheitelkappung für verschiedene Abflussszenarien der Elspe am Tagebau Grevenbrück (Eigene Darstellung)

Abbildung 22 zeigt die Ganglinien für den Pegel Menden\_Oberrödinghausen der Hönne am Tagebau Blaue Lagune. Wie zuvor repräsentieren das gemessene HQ den niedrigsten und das  $HQ_{5000}$  den höchsten Verlauf. Die gemessene Abflussganglinie hat insgesamt vier lokale Maxima, besonders bei den drei synthetischen Ganglinien führt dies dazu, dass unterschiedliche Abschnitte der Ganglinien über dem  $HQ_{100}$ -Schwellenwert liegen. Bei der Ganglinie des  $HQ_{Extrem}$  ist nur ein Maximum vorhanden, das den  $HQ_{100}$ -Schwellenwert überschreitet. Bei der Ganglinie des  $HQ_{1000}$  sind es zwei und bei der Ganglinie des  $HQ_{5000}$  sind es alle vier, die darüber liegen.

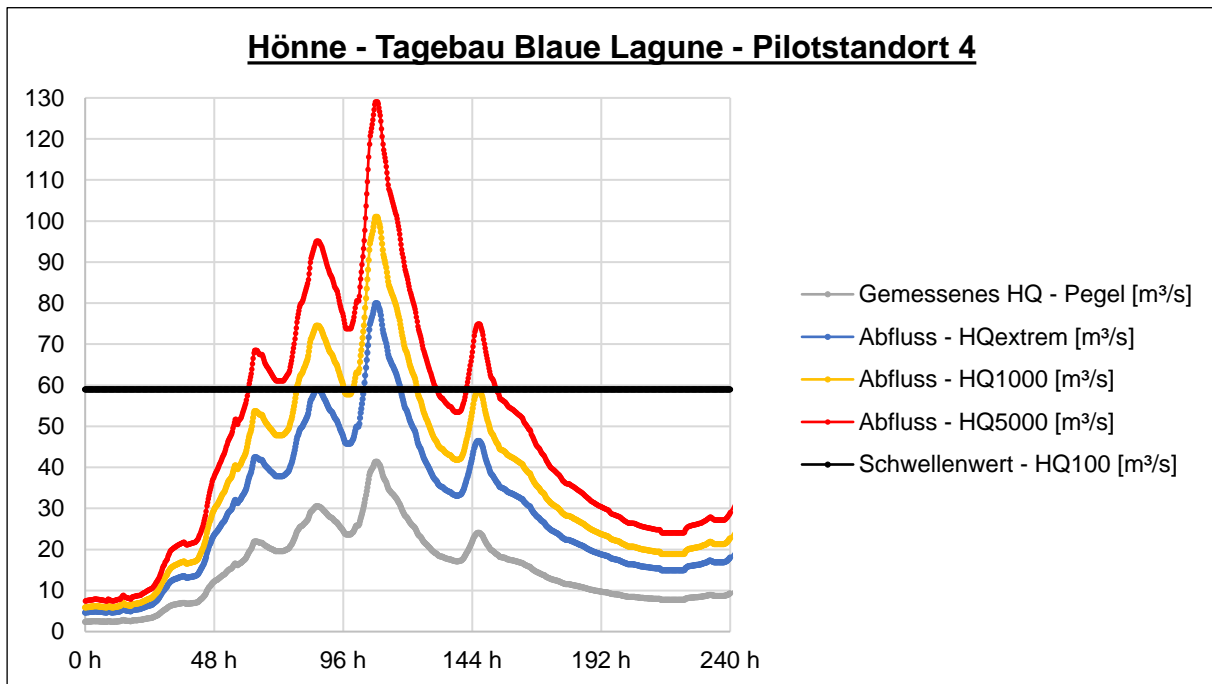


Abbildung 22: Scheitelkappung für verschiedene Abflussszenarien der Hönne am Tagebau Blaue Lagune (Eigene Darstellung)

Wie zuvor beschrieben wird der jeweilige  $HQ_{100}$ - Abfluss als Schutzniveau angenommen. Das bedeutet, dass alle Abflüsse, die über diesem Schwellenwert liegen, zurückgehalten werden müssen. Von den synthetischen Abflusswerten wird der jeweilige  $HQ_{100}$ - Abfluss abgezogen. Alle Abflüsse über  $HQ_{100}$ , die größer als  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  sind, werden erfasst. Mit diesen Spitzenabflüssen und den Formeln (1) und (3) aus Kapitel 2.1 werden die Volumina der Hochwasserspitzen berechnet. Im Gegensatz zu klassischen HWRB entfällt die Formel (2) für den Abfluss, weil angenommen wird, dass der Tagebau wegen der tiefen Sohle keinen Betriebsauslass hat und somit keine Regelabgabe leistet. Die Volumina der Hochwasserspitzen werden mit den in Kapitel 3.6 berechneten Tagebauvolumina ins Verhältnis (siehe Formel (9)) gesetzt. Dadurch können die Auslastung der Tagebau-HWRB bzw. reziprok dazu der Wirkungsgrad des HWRB ermittelt werden. Volumina von bereits an den Fließgewässern existierenden Rückhalteräumen werden in der Berechnung nicht berücksichtigt.

$$\text{Auslastung} = V_{HWS} / V_{TB} \rightarrow \text{Wirkungsgrad} = V_{TB} / V_{HWS} \quad (9)$$

mit:

*Auslastung*: Auslastung des Tagebau-HWRB [%]       $V_{HWS}$ : Volumen der Hochwasserspitze [ $\text{m}^3$ ]  
*Wirkungsgrad*: Wirkungsgrad des Tagebau-HWRB [%]       $V_{TB}$ : Volumen des Tagebaus [ $\text{m}^3$ ]

In der Tabelle 17 sind die Ergebnisse der Wirkungsgradberechnung visualisiert. Die Ergebnisse decken sich gut mit den Erwartungen von der Berechnung der spezifischen Volumina. Der Tagebau Inden wird

bei dem Szenario  $HQ_{Extrem}$  in beiden Flüssen Rur und Inde zu ca. 0,51% gefüllt und ist somit nur sehr gering ausgelastet. Das deckt sich gut mit dem sehr großen spezifischen Volumen von 559,7 mm. Bei den Tagebauen Grevenbrück und Blaue Lagune kommt es zu einer geringen Auslastung infolge des  $HQ_{Extrem}$ . Beim Tagebaue Grevenbrück werden 15,74% des berechneten Tagebauvolumens gefüllt. Beim Tagebau Blaue Lagune sind es 5,23%. Es ist also für die drei Tagebaue mit großer Reserve möglich, das Volumen der Hochwasserspitze, das über dem  $HQ_{100}$  liegt, zurückzuhalten. Die drei Pilotstandorte haben für dieses Szenario einen Wirkungsgrad von 100%. Das bedeutet für Unterlieger, dass ein vollumfänglicher Schutz für dieses Szenario auf dem Niveau eines  $HQ_{100}$  möglich ist. Ferner könnte wegen der vorhandenen Reserven bei den drei Tagebauen für dieses Szenario der Schwellenwert für eine Einleitung von Hochwasser reduziert werden. Beispielsweise kann dieser auf das Niveau eines  $HQ_{50}$  gesetzt werden, um zusätzlichen Hochwasserschutz zu bieten.

Tabelle 17: Wirkungsgrade für die Pilotstandorte bei  $HQ_{Extrem}$  (Eigene Darstellung)

Aspekt	Pilotstandort 1	Pilotstandort 1	Pilotstandort 2	Pilotstandort 3	Pilotstandort 4
<b>Tagebau</b>	Inden	Inden	Walheim	Grevenbrück	Blaue Lagune
<b>Gewässer</b>	Rur	Inde	Inde	Elspe	Hönne
<b>Pegel</b>	Selhausen	Lamersdorf	Kornelimünster	Elspe	Menden_ Oberrödinghau sen
<b>Extrapolation / Interpolation</b>	Extrapolation	Extrapolation	Interpolation	Extrapolation	Extrapolation
<b>Extrapolation auf</b>	$HQ_{Extrem}$	$HQ_{Extrem}$	$HQ_{Extrem}$	$HQ_{Extrem}$	$HQ_{Extrem}$
<b>Volumen Hochwasserspitze</b>	2.004.377 m <sup>3</sup>	1.657.104 m <sup>3</sup>	354.121 m <sup>3</sup>	366.624 m <sup>3</sup>	549.917 m <sup>3</sup>
<b>Auslastung HWRB</b>	0,28%	0,23%	635,48%	15,88%	5,23%
<b>Vollständige Auslastung</b>	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein
<b>Berechnetes Tagebauvolumen</b>	712.184.787 m		55.725 m <sup>3</sup>	2.309.043 m <sup>3</sup>	10.524.619 m <sup>3</sup>
<b>Wirkungsgrad HWRB</b>	100%	100%	15,74%	100,00%	100,00%

Der Pilotstandort 2 wird dagegen infolge des Szenarios  $HQ_{Extrem}$  vollgefüllt. Das ankommende Volumen der Hochwasserspitze würde den Tagebau um das 6,35-fache füllen, was reziprok zu einem Wirkungsgrad zu 15,74% führt. Dieses Ergebnis deckt sich ebenfalls gut mit dem geringen spezifischen Volumen von 4,42 mm. Der Tagebau hat zwar einen positiven Effekt auf die Reduzierung des

Hochwasserabflusses, jedoch ist dieser wegen der vielfachen Vollerfüllung als gering zu bewerten. Dennoch kann der Tagebau im Verbund mit anderen HWRB entlang der Inde ein wirkungsvolles Rückhaltesystem bilden, sodass Schäden eines  $HQ_{Extrem}$  reduziert werden.

In Tabelle 18 sind die Ergebnisse für die Wirkungsgrade der Tagebaue beim Szenario  $HQ_{1000}$  enthalten. Beim Tagebau Inden zeigt sich ein ähnliches Bild gegenüber dem Szenario  $HQ_{Extrem}$ . Die Volumina der Hochwasserspitzen sind um ca. 360.000 m<sup>3</sup> größer. Jedoch ist die Auslastung mit 0,56% ebenfalls als sehr gering zu bewerten. Bei dem Pilotstandort Grevenbrück kommt es zu einer moderaten Auslastung von 48,65%. Besser ist dagegen die Auslastung des Tagebaus Blaue Lagune, der mit 21,40% darunter liegt. Die Reserve der Tagebaue Grevenbrück und Blaue Lagune ist bei diesem Szenario kleiner. Dennoch weisen die beiden Tagebaue und auch der Tagebau Inden einen Wirkungsgrad von 100% auf. Hier ist ein Schutz der Unterlieger auf dem Niveau eines  $HQ_{100}$  möglich. Der Tagebau Walheim wird in diesem Szenario erneut vollgefüllt. Der Faktor beträgt 9,47, woraus ein Wirkungsgrad von 10,56% bezogen auf die Volumina resultiert. Offensichtlich ist, dass der Tagebau das Schutzniveau eines  $HQ_{100}$  nicht bieten kann. Mit dem Rückhalteraum im Tagebau Walheim allein würde es bei diesem Hochwasserszenario zu großen Schäden kommen.

Tabelle 18: Wirkungsgrade für die Pilotstandorte bei  $HQ_{1000}$  (Eigene Darstellung)

Aspekt	Pilotstandort 1	Pilotstandort 1	Pilotstandort 2	Pilotstandort 3	Pilotstandort 4
<b>Tagebau</b>	Inden	Inden	Walheim	Grevenbrück	Blaue Lagune
<b>Gewässer</b>	Rur	Inde	Inde	Elspe	Hönne
<b>Pegel</b>	Selhausen	Lamersdorf	Kornelimünster	Elspe	Menden_ Oberrödinghau sen
<b>Extrapolation / Interpolation</b>	Extrapolation	Extrapolation	Extrapolation	Extrapolation	Extrapolation
<b>Extrapolation auf</b>	$HQ_{1000}$	$HQ_{1000}$	$HQ_{1000}$	$HQ_{1000}$	$HQ_{1000}$
<b>Volumen Hochwasserspitze</b>	2.070.545 m <sup>3</sup>	1.952.474 m <sup>3</sup>	527.915 m <sup>3</sup>	1.123.298 m <sup>3</sup>	2.251.762 m <sup>3</sup>
<b>Auslastung HWRB</b>	0,29%	0,27%	947,36%	48,65%	21,40%
<b>Vollständige Auslastung</b>	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein
<b>Berechnetes Tagebauvolumen</b>	712.184.787 m <sup>3</sup>		55.725 m <sup>3</sup>	2.309.043 m <sup>3</sup>	10.524.619 m <sup>3</sup>
<b>Wirkungsgrad HWRB</b>	100%	100%	10,56%	100,00%	100,00%

Tabelle 19 enthält die Ergebnisse der Wirkungsgrade für das Szenario  $HQ_{(2021)}$  für die Pilotstandorte 1 und 2 sowie das Szenario  $HQ_{2500}$  für die Pilotstandorte 3 und 4. Hier zeigen sich im Vergleich zu den anderen Szenarien die größten Ausschläge, was auf die großen Volumina der Hochwasserspitzen zurückzuführen ist. Bei dem Tagebau Inden kommt es zu einer Füllung um 1,71%, was ein sehr gutes Ergebnis und ein Schutz der Unterlieger auf dem Niveau eines  $HQ_{100}$  bedeutet. Jedoch ist anzumerken, dass das Gesamtvolumen beider Hochwasserspitzen hier ca. 12,2 Mio. m<sup>3</sup> beträgt und damit sehr groß ist. Bei dem Pilotstandort 3 sorgt das Szenario des  $HQ_{5000}$  zu einer Vollerfüllung des Tagebaus, was zu einem Wirkungsgrad von 98,34% führt. Rein nach den Berechnungsergebnissen können die Unterlieger im Falle dieses Szenarios nicht alleine durch den Tagebau geschützt werden. Jedoch ist die Herangehensweise auch mit diversen Unsicherheiten behaftet, sodass dieses Ergebnis dennoch als gut zu bewerten ist. Der Pilotstandort 4 wird zu 60,75% gefüllt und kann somit auch das  $HQ_{5000}$  aufnehmen. Es ist damit für diesen Pilotstandort ein Schutz gegenüber  $HQ_{5000}$  gewährleistet. Der Pilotstandort 2 weist infolge des größeren Volumens der Hochwasserspitze einen Wirkungsgrad von 3,15% auf. Das Volumen der Hochwasserspitze übersteigt das Tagebauvolumen um den Faktor 31,78. Es ist also auf Basis der Ergebnisse nur eine minimale Minderung der Hochwasserschäden möglich.

Tabelle 19: Wirkungsgrade für die Pilotstandorte bei  $HQ_{(2021)}/HQ_{5000}$  (Eigene Darstellung)

Aspekt	Pilotstandort 1	Pilotstandort 1	Pilotstandort 2	Pilotstandort 3	Pilotstandort 4
<b>Tagebau</b>	Inden	Inden	Walheim	Grevenbrück	Blaue Lagune
<b>Gewässer</b>	Rur	Inde	Inde	Elspe	Hönne
<b>Pegel</b>	Selhausen	Lamersdorf	Kornelimünster	Elspe	Menden_ Oberrödinghau sen
<b>Extrapolation / Interpolation</b>	Nein	Extrapolation	Extrapolation	Extrapolation	Extrapolation
<b>Extrapolation auf</b>	-	$HQ_{(2021)}$	$HQ_{(2021)}$	$HQ_{5000}$	$HQ_{5000}$
<b>Volumen Hochwasserspitze</b>	1.807.627 m <sup>3</sup>	10.409.673 m <sup>3</sup>	1.770.909 m <sup>3</sup>	2.347.927 m <sup>3</sup>	6.394.164 m <sup>3</sup>
<b>Auslastung HWRB</b>	0,25%	1,46%	3177,96%	101,68%	60,75%
<b>Vollständige Auslastung</b>	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein
<b>Berechnetes Tagebauvolumen</b>	712.184.787 m <sup>3</sup>		55.725 m <sup>3</sup>	2.309.043 m <sup>3</sup>	10.524.619 m <sup>3</sup>
<b>Wirkungsgrad HWRB</b>	100%	100%	3,15%	98,34%	100,00%

An den Ergebnissen zeigt sich, dass für alle Pilotstandorte außer Walheim ein Schutz der Unterlieger bezogen auf ein Schutzniveau von  $HQ_{100}$  gegeben ist. Es ist anzumerken, dass dieser Berechnungsansatz auf Basis von Annahmen basiert und mit Unsicherheiten behaftet ist. Folgende Annahmen wurden getroffen.

- Abflussganglinie eines historischen Ereignisses gewählt.
  - Inter-/ Extrapolationen der Werte für synthetische Ganglinie.
  - Tagebauvolumen als konstant angenommen.
  - Konstanter Schwellenwert für Wasserabschlag angenommen.
  - Hydraulik bei der Befüllung eines Tagebaus wurde nicht berücksichtigt.
- ➔ Maximaler Zu- und Abfluss, Füllzeit, usw.

Eine genauere Abschätzung erfordert mehr Detailtiefe, was im nächsten Kapitel erörtert wird.

### 5.3 Konzeptionierung des hydro-numerischen Modells

Die bisherigen Ergebnisse stellen eine erste Abschätzung dar und sind wie zuvor erwähnt mit diversen Unsicherheiten behaftet. Diese sind zum einen in der in Kapitel 5.2 gewählten Methode und zum anderen der unklaren Konzeptionierung eines Tagebau-HWRB geschuldet. Es ist beispielsweise für jeden Pilotstandort zu prüfen, ob eine Hochwasserentlastung hinsichtlich der Topografie funktionsfähig wäre. Für eine genauere Abschätzung der Retentionswirkungen der Pilotstandorte sind hydro-numerische Modelle notwendig. Dazu soll ein hydrologisches Modell konzeptioniert werden, das dann im Rahmen eines Folgeprojektes auf einen oder mehrere Pilotstandorte anzuwenden ist. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass mehrere Pilotstandorte untersucht werden sollen.

Für jeden Pilotstandort sollen vier verschiedene Szenarien untersucht werden, die in Tabelle 20 beschrieben sind. Es handelt sich hierbei um die bereits betrachteten Abflusskennwerte  $HQ_{Extrem}$ ,  $HQ_{1000}$  und  $HQ_{(2021)}$  bzw.  $HQ_{5000}$ . Ferner soll auch das  $HQ_{100}$  untersucht werden, da der  $HQ_{100}$ -Schwellenwert nur eine Annahme ist und daher zu prüfen ist. Für alle Szenarien soll das jeweilige Flusseinzugsgebiet abgebildet werden.

Tabelle 20: Szenarien der hydrologischen Untersuchung (Eigene Darstellung)

Aspekt	Pilotstandort 1	Pilotstandort 1	Pilotstandort 2	Pilotstandort 3	Pilotstandort 4
<b>Tagebau</b>	Inden	Inden	Walheim	Grevenbrück	Blaue Lagune
<b>Gewässer</b>	Rur	Inde	Inde	Elspe	Hönne
<b>Szenario 1</b>	$HQ_{100}$	$HQ_{100}$	$HQ_{100}$	$HQ_{100}$	$HQ_{100}$
<b>Szenario 2</b>	$HQ_{Extrem}$	$HQ_{Extrem}$	$HQ_{Extrem}$	$HQ_{Extrem}$	$HQ_{Extrem}$
<b>Szenario 3</b>	$HQ_{1000}$	$HQ_{1000}$	$HQ_{1000}$	$HQ_{1000}$	$HQ_{1000}$
<b>Szenario 4</b>	$HQ_{(2021)}$	$HQ_{(2021)}$	$HQ_{(2021)}$	$HQ_{5000}$	$HQ_{5000}$

Die Untersuchung verfolgt verschiedene Ziele. Diese sind im Folgenden zusammengestellt.

- Ermittlung des Retentionswirkungsgrades des Tagebau-HWRB
- Hydrologische Optimierung der Tagebau-HWRB
- Bestimmung des im Fließgewässer verbleibenden Abflusses

Bevor die Ziele im Rahmen der hydrologischen Modellierung untersucht werden können, sind dazu konzeptionelle hydraulische Vorbetrachtungen erforderlich. Für jedes Tagebau-HWRB ist zu prüfen, welche Betriebseinrichtungen sinnvoll sind. Explizit muss geklärt werden, ob ein Drosselbauwerk und eine Hochwasserentlastungsanlage zweckmäßig und hydraulisch machbar sind. Ferner sind die Ausleitung und die beiden potentiellen Betriebseinrichtungen Drosselbauwerk und die Hochwasserentlastungsanlage hydraulisch vorzudimensionieren. Darüber hinaus ist zu klären, welches maximale Stauziel für jedes Tagebau-HWRB zulässig ist, da dies einen direkten Einfluss auf das Volumen des Rückhalteraums hat. Das maximale Stauziel ist jedoch im Verbund von hydraulischen und montanen Gesichtspunkten zu klären. Hinsichtlich Tagebaue ist die Böschungsstabilität ein zentraler Aspekt, der hier betrachtet werden muss.

Die zentrale Eingangsgröße sind die extremen Abflusskennwerte für alle Pegel des jeweiligen Flusseinzugsgebiets. Es sind daher weitere Datenerhebungen bei den Bezirksregierungen in NRW und beim LANUK erforderlich. Wichtig sind auch die Längen der Einzugsgebiete, sodass damit der Wellenablauf simuliert werden kann. Ferner müssen auch bereits vorhandene HWRB identifiziert und deren Charakteristika erfasst werden. Das umfasst deren Volumina und auch das Maximum des Zuflusses, der Regelabgabe der Drossel und der Hochwasserentlastungsanlage.

Wegen des experimentellen Charakters dieser Pilotstudie ist es nicht zweckmäßig, eine kommerzielle Software zu verwenden. Stattdessen soll eine kostenlos verfügbare Software benutzt werden. Zur Auswahl stehen die beiden Programme HEC-HMS von dem U.S. Army Corps of Engineers und SWAT von United States Department of Agriculture. In der Studie Sempewo, Twite, Nyenje und Mugume (2023) wurden zwei Flusseinzugsgebiete mit SWAT und HEC-HMS modelliert und miteinander verglichen. Beim Vergleich der beiden Programme zeigte sich, dass HEC-HMS einfacher zu handhaben ist. Bei SWAT ist eine umfangreichere Sensitivitätsanalyse nötig und es benötigt längere Rechenzeiten. Für die beiden Untersuchungsgebiete in der Studie benötigte SWAT bis zu vier Stunden für die Kalibrierung, wohingegen HEC-HMS bis zu zehn Minuten erforderte. Zuletzt wurden in der Studie fast durchgehend bessere Ergebnisse mit HEC-HMS erzielt. Daher ist auch für dieses Projektvorhaben das Programm HEC-HMS zu wählen.

#### **5.4 Konzeptionierung und Vordimensionierung der Tagebau-HWRB**

Exemplarisch wurden für die HWRB an den Tagebauen Walheim und Blaue Lagune die wesentlichen hydraulischen Betriebseinrichtungen konzeptioniert und hydraulisch vordimensioniert. In Abbildung 23 ist ein Lageplan dazu enthalten und die Betriebseinrichtungen skizziert. Für den Tagebau Walheim ist eine Beschickung und Entleerung mit unterirdischer Rohrleitung vorgesehen. Dazu sind entsprechende Einlaufbauwerke an der Inde und im Tagebau notwendig. Als Hochwasserentlastungsanlage ist ein Kelchüberfall bzw. Trichter vorgesehen, der das Wasser ebenfalls über eine anschließende Rohrleitung in die Inde zurückleitet. Aufgrund der Fließstrecken und der Topographie werden keine oberirdischen Gerinne vorgesehen. Für die Rohrleitungen sind konkrete Rohrdurchmesser angegeben, diese sind jedoch als eine erste Abschätzung zu betrachten (Höffer, 2025).

Für das HWRB am Tagebau Blaue Lagune wurden ebenfalls wesentliche Anlagenbestandteile ausgewählt und hydraulisch vordimensioniert. Analog zum HWRB Walheim werden unterirdische Rohrleitungen und auch ein Kelchüberfall als Hochwasserentlastungsanlage ausgewählt. Für die Rückführung des Wassers zurück in die Hönne ist ein Grundablass vorgesehen. In Abbildung 24 ist der Lageplan dargestellt. Auch hier sind Rohrdurchmesser für die Rohrleitungen angegeben, diese sind auch eine Abschätzung (Höffer, 2025).

Im Rahmen eines Folgeprojekts sind die Vordimensionierungen zu erweitern und auf konkrete Hochwasserszenarien und auf lokale Gegebenheiten anzupassen. Explizit müssen lokale Entscheidungsträger/innen, Tagebaubetreiber, Wasserverbände mit involviert werden. Ferner sind auch für die Pilotstandorte Inden und Grevenbrück derartige Konzepte zu entwickeln und die Betriebseinrichtungen der HWRB vorzudimensionieren. Damit ist dann eine möglichst realitätsnahe Untersuchung der Retentionswirkung der Tagebau HWRB in einem Folgeprojekt möglich.

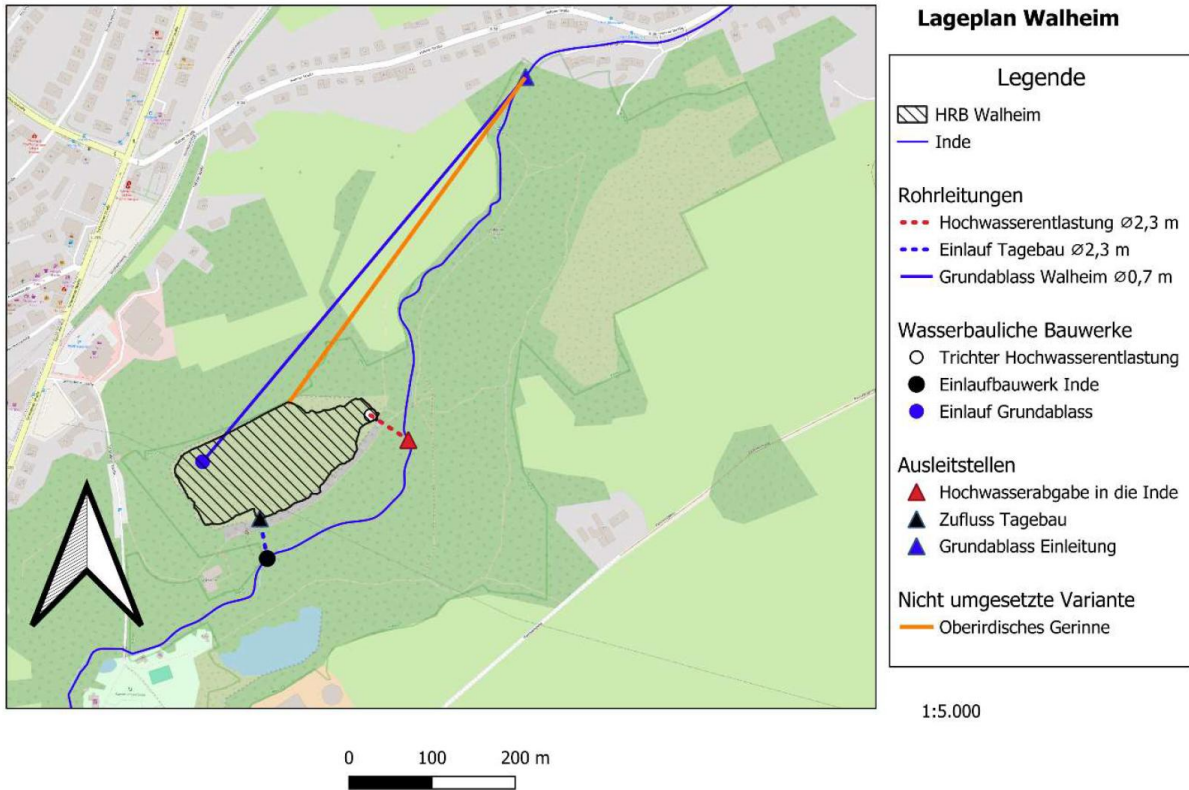


Abbildung 23: Vordimensionierung des HWRB Walheim (Höffer, 2025)

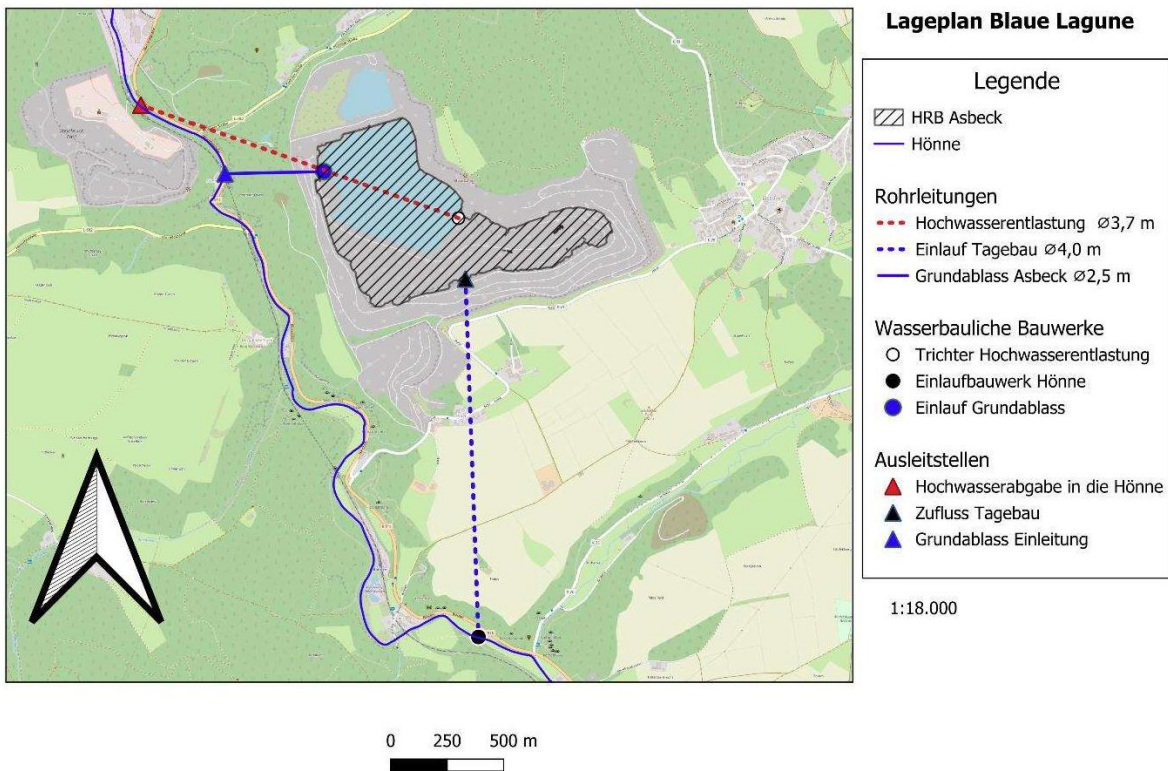


Abbildung 24: Vordimensionierung des HWRB Blaue Lagune (Höffer, 2025)

## 6 Rechtliche Rahmenbedingungen

Für die erfolgreiche Umsetzung des Projekts STorAgE ist die Klärung der rechtlichen Rahmenbedingungen eine zentrale Voraussetzung. Dies gilt insbesondere, da sich die Projektziele in einem Spannungsfeld unterschiedlicher Akteure und Interessengruppen bewegen (z. B. Tagebaubetreiber, Umweltverbände, Wasserverbände, Umwelt- und Wasserbehörden). Arbeitspaket 6 (AP 6) identifiziert die relevanten gesetzlichen Vorgaben und identifiziert die potenziell betroffenen Stakeholder.

Zunächst ist zu bestimmen, unter welche gesetzlichen Regelungen der Betrieb eines Tagebaus fällt. Hierbei sind insbesondere folgende Rechtsgrundlagen einschlägig: Bundesberggesetz (BBergG), Wasserhaushaltsgesetz (WHG), Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG), Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz (UVPg), Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG), Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) sowie das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG).

Nach dem WHG stellt sich etwa die Frage, ob geflutete Tagebaue als künstliche Gewässer einzustufen sind und wie eine nachhaltige Bewirtschaftung unter Berücksichtigung von Hochwasserschutz, Wasserspeicherung und ökologischen Belangen gewährleistet werden kann. Laut § 72 WHG sind die Länder verpflichtet, Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten zu erstellen, wodurch die Notwendigkeit künstlicher Retentionsflächen entsteht. Offene Baugruben und Tagebaue können hierbei eine wichtige Rolle übernehmen. Eine Flutung bedarf gemäß § 8 WHG einer wasserrechtlichen Erlaubnis. Hierbei ist eine Prüfung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt erforderlich. Flutungen gelten als Form der Gewässerbenutzung (§ 9 WHG) und erfordern die Berücksichtigung potenzieller Belastungen durch Sedimente oder Schadstoffe. Nach § 47 WHG sind Gewässer vor nachteiligen Veränderungen zu schützen, wodurch eine Verschmutzung etwa durch Ölrückstände oder Schwermetalle ausgeschlossen werden muss.

Die Nutzung von Tagebauen als Retentionsflächen bringt zudem genehmigungsrechtliche Herausforderungen beispielsweise nach dem BBergG mit sich. Jede wesentliche Änderung des Betriebsablaufs, wie eine Flutung oder die temporäre Nutzung als Hochwasserrückhaltebecken, unterliegt der Betriebsplanpflicht gemäß § 51 BBergG. Entsprechend sind eine Anpassung des Hauptbetriebsplans oder die Erstellung eines Sonderbetriebsplans erforderlich, deren Genehmigung durch die zuständige Bergbehörde erfolgt. Bereits in der Planungsphase muss der Rahmenbetriebsplan (§ 52 BBergG) potenzielle Hochwasserereignisse berücksichtigen. Auch die Sicherungspflichten nach § 55 BBergG, insbesondere im Hinblick auf Infrastruktur, Böschungssicherheit und geotechnische Stabilität, sind einzuhalten.

Kommt es zu einer temporären oder dauerhaften Flutung, so ist diese über einen Sonderbetriebsplan nach § 53 BBergG zu regeln. Dieser hat sämtliche Sicherheitsaspekte (z. B. Böschungsstabilität,

Pumpensysteme, betriebliche Anpassungen) zu berücksichtigen. Zudem können Haftungsfragen nach § 114 BBergG auftreten, falls durch die Maßnahme Schäden an Nachbargrundstücken oder Infrastrukturen entstehen. Ergänzend greifen naturschutzrechtliche Anforderungen nach dem BNatSchG, darunter die Durchführung einer Artenschutzprüfung (ASP) sowie gegebenenfalls einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP, §§ 7 ff. UVPG). Auch der Umgang mit Sedimenten und Betriebsmittelrückständen fällt unter das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), womit Fragen der Abfallklassifikation und Entsorgungsverantwortung (Betreiber oder Staat) geklärt werden müssen.

In Nordrhein-Westfalen ist die Genehmigungslage abhängig von der Klassifikation des Rohstoffs. Braunkohle zählt zu den bergfreien Bodenschätzen und unterliegt dem BBergG. Für Lockergesteine (Kies, Sand, Ton, Naturstein) hingegen ist das Abgrabungsgesetz NRW (AbgrG) maßgeblich. Für Braunkohleabbau besteht zudem eine Pflicht zur UVP sowie die Notwendigkeit von Hauptbetriebsplänen, die im Rahmen der regionalplanerischen Braunkohlenplanung entwickelt werden. Weitere Genehmigungen ergeben sich aus dem WHG (z. B. Grundwasserabsenkungen) und dem BImSchG (z. B. Kraftwerke, Aufbereitungsanlagen). Beim Abbau von Lockergesteinen obliegt die Genehmigung den unteren Abgrabungsbehörden (Kreisverwaltungen, kreisfreie Städte). Auch hier können wasserrechtliche, naturschutzrechtliche und immissionsschutzrechtliche Genehmigungen erforderlich sein. Für Steinbrüche gelten ergänzend immissionsschutzrechtliche Verfahren nach dem BImSchG sowie sprengstoffrechtliche Genehmigungen.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Nutzung von Tagebauen als Retentionsflächen erhebliche rechtliche, technische und ökologische Herausforderungen mit sich bringt. Während der Hochwasserschutz als staatliche Aufgabe gilt, entstehen für Betreiber zusätzliche Belastungen in Form von Lagerstätteneinbußen, Bereitstellung von Restaurationsequipment, Wasserentnahmeentgelten und Betriebsplananpassungen. Daher ist eine umfassende ökonomische Bewertung dieser Maßnahmen unerlässlich, um die Machbarkeit und Nachhaltigkeit des Vorhabens zu sichern. In diesem Kontext sollten in einem nächsten Schritt Juristen und Genehmigungsbehörden involviert werden, um die Interessen der Stakeholder vollumfänglich zu wahren und zu bewerten.

---

## 7 Literaturverzeichnis

Aigner, D. & Bollrich, G. (2021). *Handbuch der Hydraulik. Für Wasserbau und Wasserwirtschaft* (2. Aufl.). DIN Media.

Bezirksregierung Arnsberg (30.04.2025). Bereitstellung Abflusskennwerte für Elspe und Hönne [E-Mail].

Bezirksregierung Köln (14.04.2025). Bereitstellung Abflusskennwerte für Inde und Rur [E-Mail].

Bronstert, A., Bormann, H., Bürger, G., Haberlandt, U., Hattermann, F., Heistermann, M. et al. (2017). Hochwasser und Sturzfluten an Flüssen in Deutschland. In G. P. Bresseur, D. Jacob & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland* (S. 87–101). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3_8)

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (Hrsg.). (2025). *Digitales Basis-Landschaftsmodell (Ebenen) (Basis-DLM)*. <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitales-basis-landschaftsmodell-ebenen-basis-dlm-ebenen.html>

Bundesverband Baustoffe (Hrsg.). (2021). *Zahlenspiegel 2021*. [https://cdn.prod.website-files.com/664355396b105bd9a4e9cadb/66605c27de1a6f09e063bb87\\_2022-05-31\\_BBS\\_ATZ\\_ON-LINE.pdf](https://cdn.prod.website-files.com/664355396b105bd9a4e9cadb/66605c27de1a6f09e063bb87_2022-05-31_BBS_ATZ_ON-LINE.pdf)

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2022). *DWA-M 553: Bemessung von Rückhalteräumen zur Steuerung von Hochwasserscheiteln*. Hennef.

DIN 19700-10:2004 *Stauanlagen – Teil 10: Gemeinsame Festlegungen*.

DIN 19700-12:2004 *Stauanlagen – Teil 12: Hochwasserrückhaltebecken*.

DIN 19712:2013 *Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern*.

DIN 4049-1:1992 *Hydrologie – Grundbegriffe*.

DVWK 246:1997 *Freibordbemessung an Stauanlagen*.

DWA-M 522:2015 *Merkblatt DWA-M 522: Kleine Talsperren und kleine Hochwasserrückhaltebecken*.

DWD (Deutscher Wetterdienst, Hrsg.). (o. J.). *Starkregen*. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Starkregen.html>

Geobasis NRW (Hrsg.). (2024). *Digitales Basis-Landschaftsmodell NW*. [https://www.opengeo-data.nrw.de/produkte/geobasis/lm/akt/basis-dlm/basis-dlm\\_EPSG25832\\_Shape.zip](https://www.opengeo-data.nrw.de/produkte/geobasis/lm/akt/basis-dlm/basis-dlm_EPSG25832_Shape.zip)

Goergen, H. (Hrsg.). (1987). *Festgesteinstagebau*. Trans Tech Publ.

Heinemann, E. & Feldhaus, R. (2003). *Hydraulik für Bauingenieure* (2. Aufl.). B. G. Teubner.

[Abschlussbericht STorAgE – Starkregenvorsorge in Tagebauen](#)

Hillebrand, E. (2016). *Branchenanalyse Rohstoffindustrie* (Studie / Hans-Böckler-Stiftung, Nr. 315). Hans-Böckler-Stiftung. <https://doi.org/129497>

Höffer, D. (2025, 17. Juni). *Fallstudie zur Konzeptionierung von Hochwasserrückhaltebecken in Tagebauen zum Rückhalt von Extremhochwasser* (Bachelorarbeit). RWTH Aachen University.

Institut für Wirtschaft und Umwelt e. V. (o. J.). *Tagebau*. <https://www.umweltdatenbank.de/cms/lexikon/46-lexikon-t/30149-tagebau.html>

Keßels, J., Wolf, S., Römer, W., Dörwald, L., Schulte, P., Lehmkuhl, F. et al. (2024). Enormous headward and gully erosion in a floodplain area reclaimed for open-cast lignite mining during the July 2021 flood in the Inde River valley (Western Germany). *Environmental Sciences Europe*, 36(182). <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00997-4>

Kreiter, T. (2007). *Dezentrale und naturnahe Retentionsmaßnahmen als Beitrag zum Hochwasserschutz in mesoskaligen Einzugsgebieten der Mittelgebirge* (Dissertation). Universität Trier.

Küchler, D., Hintemann, G., Ehrlich, H., Stagneth, G., Beyer, M., Siegert, M. et al. (2014). *Betriebsbedingte Wirkungen in Hochwasserrückhalteräumen. Teil 2 – Auswertung und Ergebnisdiskussion*. [https://www.wasserwirtschaft.sachsen.de/download/ltv/Teil\\_02\\_Auswertung.pdf](https://www.wasserwirtschaft.sachsen.de/download/ltv/Teil_02_Auswertung.pdf)

Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg. (2023). *Kiese, sandig – Rohstoffgeologie Baden-Württemberg*. Regierungspräsidium Freiburg, Abt. Geologie, Rohstoffe und Bergbau. <https://lgrbwissen.lgrb-bw.de/rohstoffgeologie/rohstoffe-des-landes/kiese-sandig>

Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (07.04.2025). Abflusswerte von Pegeln in NRW [E-Mail].

Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (02.05.2025). Anfrage von Abflussganglinien – Pegel NRW [E-Mail].

LANUV NRW (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen). (2014). *Technische Anforderungen und Empfehlungen für Deponieabdichtungssysteme – LANUV-Arbeitsblatt 13*. [https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4\\_arbeitsblaetter/40013.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4_arbeitsblaetter/40013.pdf)

Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (Hrsg.). (2024). *Geprüfte Zeitreihen der Abflüsse*. [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt\\_klima/wasser/oberflaechengewaesser/hydro/q/](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/oberflaechengewaesser/hydro/q/)

Landesbetrieb IT.NRW (Hrsg.). (2024). *Fachdaten extremer Hochwasserereignisse (niedrige Wahrscheinlichkeit, >HQ250) als Shape*. [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt\\_klima/wasser/hochwasser/hwrm/HQextrem-Ueberschwemmungsgrenzen\\_EPSG25832\\_Shape.zip](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/hochwasser/hwrm/HQextrem-Ueberschwemmungsgrenzen_EPSG25832_Shape.zip)

- Lehmkuhl, F. & Stauch, G. (2023). Anthropogenic influence of open pit mining on river floods, an example of the Blessem flood 2021. *Geomorphology*, 421. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108522>
- Maniak, U. (2010). *Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure* (6. Aufl.). Springer.
- Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr NRW (Hrsg.). (2025). *ELWAS-WEB – Wasserdaten NRW*. <https://www.elwasweb.nrw.de/elwas-web/index.xhtml#>
- MLV NRW (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Naturschutz und Verbraucherschutz, Hrsg.). (o. J.). *Hochwassergefahrenkarten / Hochwasserrisikokarten. Erläuterungen und Lesehilfe*. [https://www.flussgebiete.nrw.de/system/files/atoms/files/lesehilfe\\_hwrmrl\\_hwgk.pdf](https://www.flussgebiete.nrw.de/system/files/atoms/files/lesehilfe_hwrmrl_hwgk.pdf)
- MWIKE NRW (Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie, Hrsg.). (2025). *Braunkohlenbergbau*. <https://www.wirtschaft.nrw/braunkohlenbergbau>
- Pannicke-Prochnow, N., Krohn, C., Albrecht, J., Thinius, K., Ferber, U. & Eckert, K. (2021). *Bessere Nutzung von Entsiegelungspotenzialen zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen und zur Klimaanpassung*. Abschlussbericht TEXTE 141/2021. Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte\\_141-2021\\_bessere\\_nutzung\\_von\\_entsiegelungspotenzialen\\_zur\\_wiederherstellung\\_von\\_bodenfunktionen\\_und\\_zur\\_klimaanpassung.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_141-2021_bessere_nutzung_von_entsiegelungspotenzialen_zur_wiederherstellung_von_bodenfunktionen_und_zur_klimaanpassung.pdf)
- Prinz, H. & Strauß, R. (2018). *Ingenieurgeologie* (6. Aufl.). Springer Spektrum. <http://www.springer.com/de/book/9783662547090>
- Schäfer, A., Mühr, B., Daniell, J., Ehret, U., Ehmele, F., Küpfer, K. et al. (2021). *Hochwasser Mitteleuropa, Juli 2021 (Deutschland): 21. Juli 2021 – Bericht Nr. 1 „Nordrhein-Westfalen & Rheinland-Pfalz“*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000135730>
- Schinker, N. (Hrsg.). (2022). *Hochwasserschutzsystem Tagebau*. <https://www.kuladig.de/Objektansicht/BKM-30100112>
- Schöne, J., Schlottmann, R. & Pinar, H. (2013). Hochwasserspeicherraum Zwenkauer See. Ein wesentlicher Bestandteil des zukünftigen Hochwasserschutzes der Stadt Leipzig. In Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hrsg.), *Technischer und organisatorischer Hochwasserschutz – Bauwerke, Anforderungen, Modelle*. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 48. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. (S. 325–337).
- Sempewo, J. I., Twite, D., Nyenje, P. & Mugume, S. N. (2023). Comparison of SWAT and HEC-HMS model performance in simulating catchment runoff. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 11(4), 481–495. <https://doi.org/10.1080/23249676.2022.2156401>

---

Szafarczyk, A. & Gawalkiewicz, R. (2023). An inventory of opencast mining excavations recultivated in the form of water reservoirs as an example of activities increasing the retention potential of the natural environment: a case study from Poland. *Geology, Geophysics and Environment*, 49(4), 401–418. <https://doi.org/10.7494/geol.2023.49.4.401>

Unternehmerverband Mineralische Baustoffe (UVMB) e.V. (2016). *Gestein des Jahres: Sand*.

Wagner, H. (2022). Behandlung von Festgesteinsböschungproblemen im Tagebau unter Berücksichtigung der besonderen Rahmenbedingungen des österreichischen Bergbaus. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 167(4), 158–176. <https://doi.org/10.1007/s00501-022-01215-5>