



Grundwasserströmungsmodell Potsdamer Mitte

Auftraggeber: Sanierungsträger Potsdam GmbH
Treuhänder der Stadt
Pappelallee 4
14469 Potsdam

Auftragnehmer: Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH
Nonnenstraße 9
04229 Leipzig

Projekt Nr.: 2021/0049

Bearbeiter: M.Sc. A. Kramer
M.Sc. M. Vollrodt
Dipl.-Ing. A. Thom
Prof. Dr. Ing. H. Mansel

Leipzig, 07.09. 2022

Prof. Dr. Ing. H. Mansel
Geschäftsführer

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Anlagenverzeichnis	III
Literaturverzeichnis	IV
Datenquellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Veranlassung und Zielstellung	1
2 Methodik	2
2.1 Aufbau GWM	2
2.2 Technologisches Teilmodell	4
2.3 Überprüfung GW-Beeinflussung	4
3 Allgemeine Beschreibung	6
3.1 Räumliche Einordnung	6
3.2 Naturräumliche Einordnung	8
3.3 Klima	8
3.4 Hydrologie	10
3.5 Grundwasser	10
3.6 Geologische Verhältnisse	11
3.7 Hydrogeologische Verhältnisse	12
4 Grundwasserströmungsmodell	14
4.1 Hydrogeologisches Strukturmodell	14
4.2 Räumliche Abgrenzung des Modellgebietes	16
4.3 Randbedingungen	17
4.4 Wasserhaushaltsgrößen und Grundwassereingangsdaten	18
4.5 Aufbau technologisches Teilmodell	22
4.6 Modellkalibrierung	24
4.7 Modellgüte	25
5 Ergebnisse	29
5.1 Vergleich der berechneten Grundwasserverhältnisse	29
5.2 Grundwasserabsenkung Block 5	32
6 Zusammenfassung	34
7 Ausblick	35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema zur Umsetzung der Grundwasserströmungsmodellierung.	2
Abbildung 2: Zeitliche Diskretisierung des GWM anhand der Ganglinie eines Pegels	3
Abbildung 3: Lage der Beobachtungspegel zur Analyse einer GW-Beeinflussung des Blocks V	5
Abbildung 4: Übersichtskarte vom Untersuchungsgebiet mit Kerngebiet	6
Abbildung 5: Geländestruktur des Modellraumes	7
Abbildung 6: Korrigierter Niederschlag und potenzielle Verdunstung in der Klimanormalreihe	9
Abbildung 7: Klimatische Wasserbilanz der Klimastation Potsdam in der Klimanormalreihe	9
Abbildung 8: Vergleich Grundwasserganglinien und Pegel Havel	11
Abbildung 9: Beispiel einer gitterbasierten Gliederung nach Gitterhöhe/Mächtigkeit	14
Abbildung 10: Beispielschnitt gitterbasiertes hydrogeologisches Modell im Untersuchungsgebiet.	15
Abbildung 11: Horizontale Auflösung des Modellgitters.	16
Abbildung 12: Schwankungsverhalten des Pegels Potsdam und des Pegels Seestraße (Heiliger See)	18
Abbildung 13: Übersichtskarte Grundwasserpegel und Oberflächenwassermessstellen	20
Abbildung 14: Umrisse und Einbindetiefen der im Modell berücksichtigten Kellergeschosse und Dichtwände.	23
Abbildung 15: Schnitt des hydrogeologischen Strukturmodells mit der Erweiterung zum technologischen Modell unter mittleren Grundwasserverhältnissen.	24
Abbildung 16: Verlauf der Summe der quadratischen Residuen während der Parameteroptimierung	25
Abbildung 17: Ganglinien (gemessen und berechnet) für den Pegel 36442206	27
Abbildung 18: Ganglinien (gemessen und berechnet) für den Heiligen See	27
Abbildung 19: Vergleich GW-Verhältnisse mit Block V und ohne Block V unter mittleren Verhältnissen	29
Abbildung 20: Vergleich GW-Verhältnisse mit Block V und ohne Block V während des HW-Ereignisses der Havel	30
Abbildung 21: Vergleich der Ganglinien am Beobachtungspegel 1 und 6 mit und ohne Block V mit Relation zur Hochwasserwelle der Havel.	31
Abbildung 22: Vergleich GW-Verhältnisse mit Block V und ohne Block V während des Hochwassers im Grundwasser.	32
Abbildung 23: Absenkrichter einer Wasserhaltung für die Bauphase des Blockes V mit einem Absenkziel von +26 m NHN.	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Hydrogeologisches Normalprofil der im Untersuchungsgebiet verbreiteten Schichten	12
Tabelle 2: Statistische Kennwerte des Pegels Potsdam und des Pegels Seestraße (Heiliger See)	19
Tabelle 3: Mittelwerte der verwendeten Grundwasserpegel	20
Tabelle 4: RMSE aller Messstellen und einzeln für den Pegel 36442206	26

Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Lage des Untersuchungsgebietes	1:20000
Anlage 2	Lage des Grundwassermodells „Potsdam“ mit Randbedingung	1:20000
Anlage 3	Grundwassergleichen-Stichtagsmessung 04/2011	1:20000
Anlage 4	Berechnete Grundwasserganglinien ausgewählter Grundwassermessstellen	



Literaturverzeichnis

AQUAVEO, 2012. *GMS User Manual (v8.3)* - <http://www.aquaveo.com>, Provo: AQUAVEO.

ATV-DVWK-M-504, M., 2002. *Korrekturverfahren nach Richter in Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden*. Hennef: GFA - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V..

BAH, 2022. *ArcEgmo Modelldokumentation*. Berlin: Büro für Angewandte hydrologie.

BfN, 2021. *Landschaftssteckbrief 81200: Brandenburg-Potsdamer Havelgebiet*. Bonn: Bundesamt für Naturschutz (BfN).

BGR, 2005. *Bodenkundliche Kartieranleitung*. AD-HOC Boden Arbeitsgruppe, 5. Auflage Hrsg. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Staatliche Geologische Dienste Bundesrepublik Deutschland.

Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2020. *Hydrologischer Atlas Deutschland*. Koblenz: s.n.

Deutscher Wetterdienst, 2020. *Bereitstellung meteorologischer Daten*. Berlin: s.n.

DGJ, 1996. *Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Elbegebiet Teil II, Havel mit deutschem Odergebiet*. Potsdam, 2004: Landesumweltamt Brandenburg.

DGJ, 1999. *Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Elbegebiet Teil II, Havel mit deutschem Odergebiet*. Potsdam, 2015: Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg.

DIN18130-1, 1998. *Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1: Laborversuche*. s.l.:Beuth.

Doherty, J. H. R., 2010. *Approaches to Highly Parameterized Inversion*. Middleton, WI: U.S.: Geological Survey Scientific Investigations Report.

DWA Regelwerk, 2018. *Merkblatt DWA-M 504-1 Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen*, s.l.: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft .

DWD, 2021. *Klimatologische Referenzperiode*. [Online]

Available at:

<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101334&lv3=101456>

[Zugriff am 09 02 2022].

Glugla, G., 1969. Berechnungsverfahren zur Ermittlung des aktuellen Wassergehaltes und Gravitationswasserabflusses im Boden. *Albrecht-Thaer-Archiv* 13, pp. 371-376.

Hohenstein, E., 2004. Wiedergeburt der Schwanenbrücke. *Potsdamer Neueste Nachrichten*, Issue Potsdam, 02.07.2004, 02:00 Uhr.

Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH, 2003. *PCGEOfIM - Anwenderdokumentation, Version 8.4*, Leipzig: s.n.

Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg, 2002. *Atlas zur Geologie von Brandenburg*, Kleinmachnow: Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg.

LFU, B., 2022. *BÜK300. Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:300000*. Potsdam: Landesamt für Umwelt Brandenburg.

Mattheß, G. & Ubell, K., 1983. *Lehrbuch der Hydrogeologie Band 1: Allgemeine Hydrogeologie-Grundwasserhaushalt*. Berlin-Stuttgart: Gebrüder Borntraeger.

Neill, S. P. H. M. R., 2018. Chapter 8 - Ocean Modelling for Resource Characterization. *Fundamentals of Ocean Renewable Energy*, pp. 193-235.

ReKIS, 2022. *Regionales Klimainformationssystem für Sachsen, Sachsen Anhalt und Thüringen*. [Online]

Available at: <https://rekisviewer.hydro.tu-dresden.de/fdm/ReKISExpert.jsp#menu-112>
[Zugriff am 05 01 2022].

Richter, D., 1995. *Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen*. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194. Hrsg. Offenbach: DWD.

Scholz, E., 1962. *Naturräumliche Gliederung Brandenburgs*. Potsdam: s.n.

TUD, 2022. *Regionales Klimainformationssystem für Sachsen Sachsen-Anhalt und Thüringen: Bereitstellung von Tageswerten hydrometeorologischer und meteorologischer Mess- und Berechnungsgrößen für die Station Potsdam*. [Online]

Available at: <https://rekisviewer.hydro.tu-dresden.de/fdm/ReKISExpert.jsp#menu-112>
[Zugriff am 10 01 2022].

Wiehle, I. K. T., 2017. Erstnachweis der Wasserschraube (*Vallisneria spiralis* L.) für Brandenburg im Heiligen See in Potsdam. *Verh. Bot. Ver. Berlin Brandenburg* 149: 39-46,.



Datenquellenverzeichnis

- D1. **LGB:** Digitales Geländemodell 1m, Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg (GeoBroker), Stand: 27.12.2017
- D2. **bfg:** Wasserstandsdaten der Oberflächenwassermessstelle Potsdam, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bestellung unter Datenstelle-M1@bafg.de, 15.12.2021
- D3. **LfU:** Wasserstands- und Durchflussdaten der Oberflächengewässer im Untersuchungsgebiet, Landesamt für Umwelt Brandenburg, Bestellung unter Hydrologiedaten@LfU.Brandenburg.de, 15.12.2021
- D4. **LfU:** Wasserstände der Grundwasserpegel im Untersuchungsgebiet, Landesamt für Umwelt Brandenburg, Bestellung unter Hydrologiedaten@LfU.Brandenburg.de, 15.12.2021
- D5. **LfU:** Sohldaten der Havel im Untersuchungsgebiet, Bestellung unter Hydrologiedaten@LfU.Brandenburg.de, 15.12.2021
- D6. **DWD:** Klimadaten der Klimastation Potsdam, Climate Data Center des Deutschen Wetterdienstes, 15.12.2021
- D7. **ReKIS:** Potenzielle Verdunstung und korrigierte Niederschläge der Klimastation Potsdam, Regionales Klimainformationssystem der Technischen Universität Dresden, 15.12.2021
- D8. **LUGV Dokumentation:** Hydroisohypsen des oberen genutzten Grundwasserleiters des Landes Brandenburg für das Frühjahr 2011 – GW_Isolinien_04_2011; Stand 11.09.2012
- D9. **LGBR:** Lithofazieskarten Quartär, Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg, Bestellung unter lbgr@lbgr.brandenburg.de, 03.01.2022
- D10. **UBA:** CORINE Land Cover – CLC, Umweltbundesamt, 15.12.2021
- D11. **LGB:** Hydrogeologische Übersichtskarten HYK50-1 und HYK50-2, Landesamt für Umwelt Brandenburg, WMS: https://inspire.brandenburg.de/services/hgk_wms
- D12. **LGB:** Bodenübersichtskarte BÜK300, Landesamt für Umwelt Brandenburg, WFS: https://inspire.brandenburg.de/services/bokarten_wfs
- D13. **LGB:** Allgemeines Liegenschaftskataster (ALKIS), Landesamt für Umwelt Brandenburg, WFS: https://isk.geobasis-bb.de/ows/alkis_vereinf_wfs

Abkürzungsverzeichnis

AG	Auftraggeber
AN	Auftragnehmer
BWHM	Bodenwasserhaushaltsmodell
DW	Dichtwand
DWD	Deutscher Wetterdienst
FFH	Flora-Fauna-Habitat
GOK	Geländeoberkante
GWFA	Grundwasserflurabstand
GWGL	Grundwassergleichen
GWGLP	Grundwassergleichenplan
GWL	Grundwasserleiter
GWM	Grundwassermodell
GMS	Programm zur Erstellung Hydrogeologischer Strukturmodelle
GWN	Grundwasserneubildung
HAD	Hydrologischer Atlas Deutschland
HW	Hochwasser
KWB	Klimatische Wasserbilanz
MW	Mittelwasserstand
NHN	Normalhöhen Null
OL	Ortslage
PCGEOFIM	Simulationsprogramm für Geofiltration und Geomigration
PEST	Software zur Parameteroptimierung (Parameter Estimation)
RB	Randbedingung
ReKIS	Regionales Klimainformationssystem Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen
RMSE	Root Mean Squared Error
uGOK	unter Geländeoberkante

1 Veranlassung und Zielstellung

Im Rahmen der geplanten städtebaulichen Entwicklung des Areals „Staudenhof und Umfeld Bildungsforum“ in Potsdam ist der Bau mehrerer Tiefgaragen vorgesehen. Auf Grund der geringen Entfernung zur Havel (ca. 300 m) und der besonderen Lage des Baustandortes innerhalb der Havelniederung stellt sich die Frage, inwieweit die Tiefbauten und der aktuelle Baubestand das lokale Grundwasserfließgeschehen beeinflussen können. Der Fokus liegt auf der geplanten Bebauung im Block V. Dort ist eine Tiefgarage mit bis zu zwei Stockwerken geplant.

Für die geplante Maßnahme wird ein Variantenvergleich mit und ohne Tiefgarage im Block V durchgeführt. Der umliegende Baubestand wird recherchiert und fließt in die Betrachtung ein.

Die Abschätzung möglicher grundwasserseitiger Auswirkungen durch das Bauvorhaben erfolgt modellgestützt. Hierfür wird ein Grundwasserströmungsmodell (GWM) erstellt. Die Berechnung erfolgt instationär unter Berücksichtigung variabler klimatischer Bedingungen. Der Variantenvergleich erfolgt unter Betrachtung verschiedener Abflussszenarien der Havel (MW, HW).

Folgende Fragen sind zu klären:

- Inwieweit beeinflusst das geplante Bauvorhaben Block V im Zusammenspiel mit dem Baubestand das Grundwasserfließgeschehen?
- Wird die Grundwasserfließrichtung beeinflusst?
- Gibt es einen relevanten Grundwasseraufstau im Anstrom?
- Welche Auswirkungen haben verschiedene Abflussszenarien der Havel sowie Witterungsverhältnisse auf den Grundwasserhaushalt sowie die Grundwasserdynamik im Kontext des Bauvorhabens?

2 Methodik

2.1 Aufbau GWM

Die Ermittlung der Grundwasserströmungsverhältnisse unter Berücksichtigung der einzelnen Baumaßnahmen erfolgt mit Hilfe eines dreidimensionalen Grundwasserströmungsmodells (GWM). Zu diesem Zweck wird die Software PCGEOFIM (Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH, 2003) angewandt, dessen Lösungsalgorithmus auf der Finiten-Volumen-Methode basiert.

Durch Einführung zeitabhängiger Parameter ist es möglich, die hydraulischen Eigenschaften der Modellgrundwasserleiter lokal zu verändern und um somit die Baumaßnahmen im Untergrund in ihrer zeitlichen Abfolge nachzubilden. Zudem können prognostische Aussagen zu geplanten Maßnahmen in unterschiedlichen Varianten erstellt werden.

Mit dem Programmsystem PCGEOFIM können durch spezielle Randbedingungen die Wechselwirkungen zwischen Oberflächen- bzw. Fließgewässern und Grundwasser abgebildet werden. Mit der Seerandbedingung wird in PCGEOFIM die hydraulische Kopplung zwischen Grundwasser und Standgewässern beschrieben. Die Vorgabe der Randbedingung Grundwasserneubildung kann orts-, zeit- und flurstandsabhängig erfolgen. Die Flussrandbedingung beschreibt durch Vorgabe von Durchflussganglinien die hydraulische Interaktion zwischen Fließgewässer und Grundwasser.

Soll in einem bestimmten Bereich des Modellgebiets eine sehr genaue Betrachtung erfolgen – zur Erfassung einer geologischen Struktur oder für die detaillierte Abbildung einer Randbedingung – kann mit der Option einer Modelllupe eine Verfeinerung der Diskretisierung realisiert werden, während im restlichen Untersuchungsgebiet das Grundraster erhalten bleibt. Somit kann das Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit der Abbildungsgenauigkeit gezielt in Bereiche höherer Auflösung verfeinert werden. Durch Festlegung von Bilanzgebieten besteht die Möglichkeit zur Auswertung der Wasserbilanz.

In Abbildung 1 ist das methodische Vorgehen schematisch skizziert.

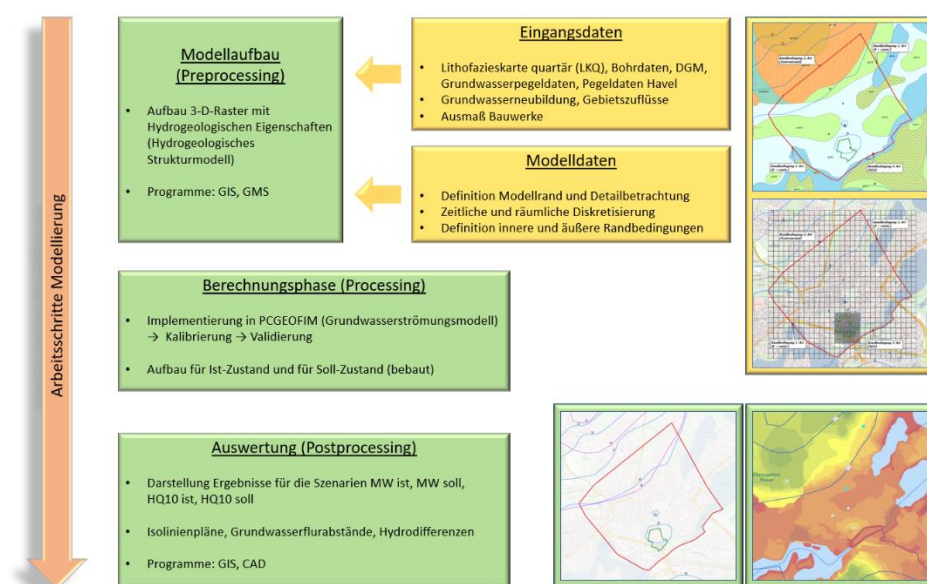


Abbildung 1: Schema zur Umsetzung der Grundwasserströmungsmodellierung.

Das **Preprocessing** beinhaltet die vorbereitenden Arbeiten der Grundwassermodellierung. Hierunter zählen die Erhebung der wesentlichen Eingangsdaten im Rahmen der Datenrecherche. Darüber hinaus erfolgt hier die Festlegung der räumlichen und zeitlichen Abgrenzung sowie die Definition der wirksamen hydraulischen und technologischen Randbedingungen.

Die Modellierung der Grundwasserströmung erfolgt auf Basis eines dreidimensionalen Strömungsmodells mit PCGEOFIM, dessen Lösungsalgorithmus auf der Finiten-Volumen-Methode basiert. Die Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse (Schichtgrenzen, Mächtigkeiten, Verbreitung erfolgt durch das 3D-Struktummodell.

Die **Kalibrierung** des GWM dient der Anpassung der geohydraulischen Parameter, deren Anfangsverteilung anhand der vorliegenden Erkundungsergebnisse abgeschätzt wurde. Dabei sollen die simulierten Ergebnisse mit den gemessenen Werten in eine bestmögliche Übereinstimmung gebracht werden. Die instationäre Kalibrierung erfolgt unter Verwendung der Daten aus dem bestehenden Grundwassermessnetz. Zielstellung ist die hinreichend genaue Abbildung der Grundwasserdynamik im Gesamtgebiet (einschl. Erfassung der Zuflüsse zum Modellgebiet, Erfassung des Grundwasserneubildungsgangs und Erfassung der förderungsbedingten Grundwasserabsenkungen) sowie die detaillierte Abbildung der Wechselwirkungen zwischen den Baumaßnahmen und den Grundwasserleitern.

Die Kalibrierung und die anschließende Validierung des Modells bilden die Grundvoraussetzung für die Prognose- bzw. Variantenrechnungen. Abbildung 2 zeigt exemplarisch das zeitliche Berechnungsschema anhand der des Grundwasserpegels 3644 2206 an der St. Nikolaikirche.

- **langjährige instationäre Kalibrierung des Gesamtmodellraums (2000-2010):**
 - Berücksichtigung der Havelwasserstände, der zeitabhängigen Grundwasserneubildung und des zeitabhängigen Förderregimes
- **Validierung/ Prüfung der Prognosefähigkeit (2010-2020)**
 - Unter Verwendung der geohydraulischen Parameter (hydraulische Durchlässigkeit, Leakagefaktor der Havelsohle, Speichergrößen etc.) wird das Modell anhand eines vom Kalibrierungszeitraum unabhängigen Zeitabschnitts auf Plausibilität geprüft.

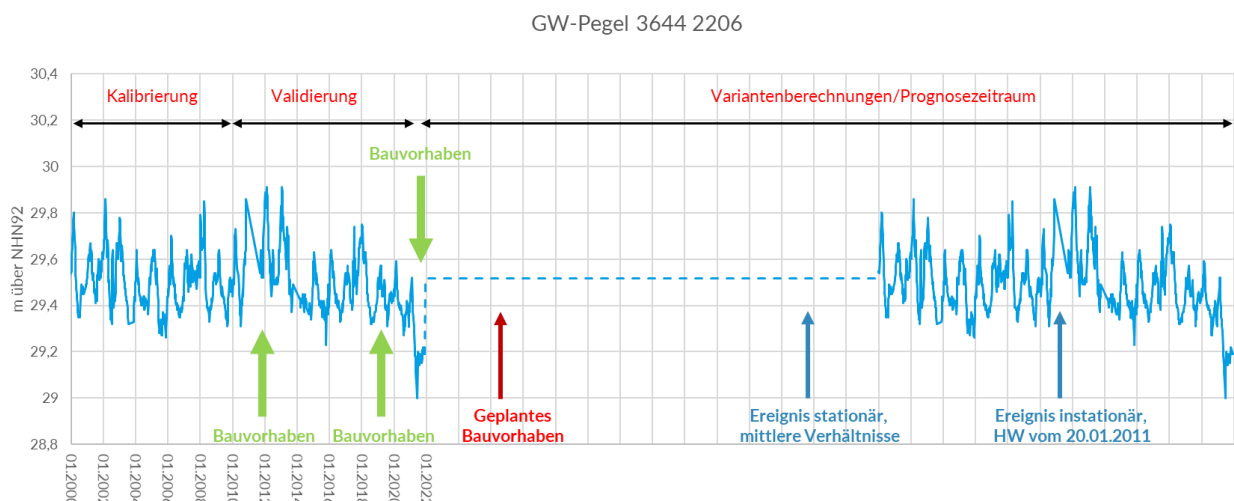


Abbildung 2: Zeitliche Diskretisierung des GWM anhand der Ganglinie des Grundwasserpegels 3644 2206.

Die Kalibrierung erfolgt unter Berücksichtigung gemessener wasserhaushaltlicher Größen für den Zeitraum 2000-2010 instationär, d.h. Wasserhaushaltgrößen, geohydraulische



Randbedingungen und geotechnische Maßnahmen werden zeitabhängig im GWM entsprechend ihrer Wirkung und Betriebszeiten berücksichtigt. Die Validierung erfolgt im Zeitraum von 2010-2020.

Die Variantenberechnung erfolgt im Anschluss an die Zeitreihe von 2000-2020. Dieser Teil gliedert sich in einen stationären und einen instationären Teil.

Der stationäre Teil beinhaltet die mittleren Verhältnisse der Eingangsdaten. Die instationäre Betrachtung des Hochwasserszenarios beruht auf der Bestrebung die einzelnen Phasen der Hochwasserwelle zu berücksichtigen. Diese Phasen (Hochwasseranstieg, Hochwasserscheitel und Hochwasserabfall) können in einer stationären Berechnung nicht adäquat nachgebildet werden. Zudem kann der Effekt einer Grundwasserströmungsumkehr von der Havel Richtung Stadt betrachtet werden. Aus diesem Grund wird ein tatsächliches Hochwasserereignis und dessen Wirkung auf die potenziellen Tiefbauwerke untersucht. Dabei wird das Grundwassergeschehen während des Hochwasserscheitels in der Havel betrachtet sowie während des zeitverzögerten Höchstwasserstands im Grundwasser.

2.2 Technologisches Teilmodell

Das technologische Modell beinhaltet die Tiefbaumaßnahmen des Areals „Staudenhof und Umfeld Bildungsforum“. Berücksichtigung finden Tiefgaragen, Spundwände und Bohrpfehlwände nach der Lage und dem Zeitpunkt der Errichtung bzw. hydraulischen Wirksamkeit. In zwei technologischen Teilmodellen erfolgt die Betrachtung mit und ohne Block V.

2.3 Überprüfung GW-Beeinflussung

Es sind sowohl mittlere als auch Höchstwasserstände in der Havel zu untersuchen. Das größte Hochwasserereignis im betrachteten Zeitraum umfasst die Verhältnisse während des Havelhochwassers vom 20.01.2011. Zu diesem Zeitpunkt lag der Havelwasserstand am Pegel Potsdam bei 184 cm. Laut der aktuellen veröffentlichten Ausgaben des Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuchs ((DGJ, 1996) und (DGJ, 1999)) wurde im Zeitraum von 1987 bis 1999 nur einmal dieser Wasserstand erreicht. Daher kann davon ausgegangen werden, dass dieses Ereignis ein adäquates Szenario für die hier vorzunehmende Bewertung darstellt.

Die mittleren Abflussverhältnisse und Hochwasserstände werden sowohl mit als auch ohne Block V berechnet. Aus dem Vergleich der Varianten lässt sich somit eine mögliche Grundwasserbeeinflussung quantifizieren. Mit Hilfe von virtuellen Grundwassermessstellen kann der hydraulische Einfluss des Blocks V unter verschiedenen Abflussverhältnissen der Havel ermittelt werden.

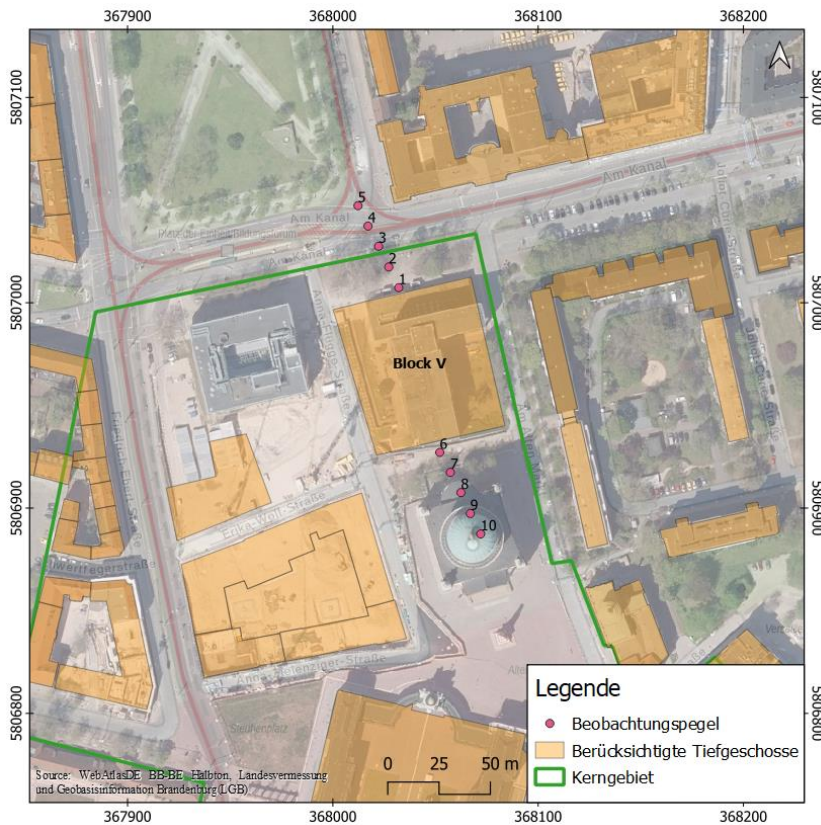


Abbildung 3: Lage der modelltechnischen Beobachtungspegel zur Analyse einer GW-Beeinflussung des Blocks V

Die Auswertung der Grundwasserbeeinflussung erfolgt über die Sichtung der Grundwassergleichnenpläne an den entsprechenden Auswertezeitpunkten und anhand der maximalen Differenz der Ganglinien an den Beobachtungspegeln. Dabei werden die nächstgelegenen Pegel zuerst ausgewertet. Die Auswertung der weiteren Pegel erfolgt nach Bedarf bei hohen Differenzen der nähergelegenen Messstellen.

3 Allgemeine Beschreibung

3.1 Räumliche Einordnung

Das Untersuchungsgebiet liegt im Innenstadtbereich der Landeshauptstadt Potsdam. Im Umfeld des Potsdamer Stadtschlusses erfolgten im Laufe der Jahre große städtebauliche Neuordnungsmaßnahmen, um sich dem Bild des historischen Stadtgrundriss wieder anzunähern. Das Untersuchungsgebiet wird im Süden durch den Nebenarm Alte Fähr (Havel) begrenzt. Die nördliche Grenze bildet der Platz der Einheit. Im Westen wird das Gebiet durch den Lustgarten und den neuen Markt begrenzt und im Osten durch den Straßenverlauf „Am Alten Markt“ (Abbildung 4). Ein detaillierter bzw. erweiterter Ausschnitt ist der Anlage 1 zu entnehmen.

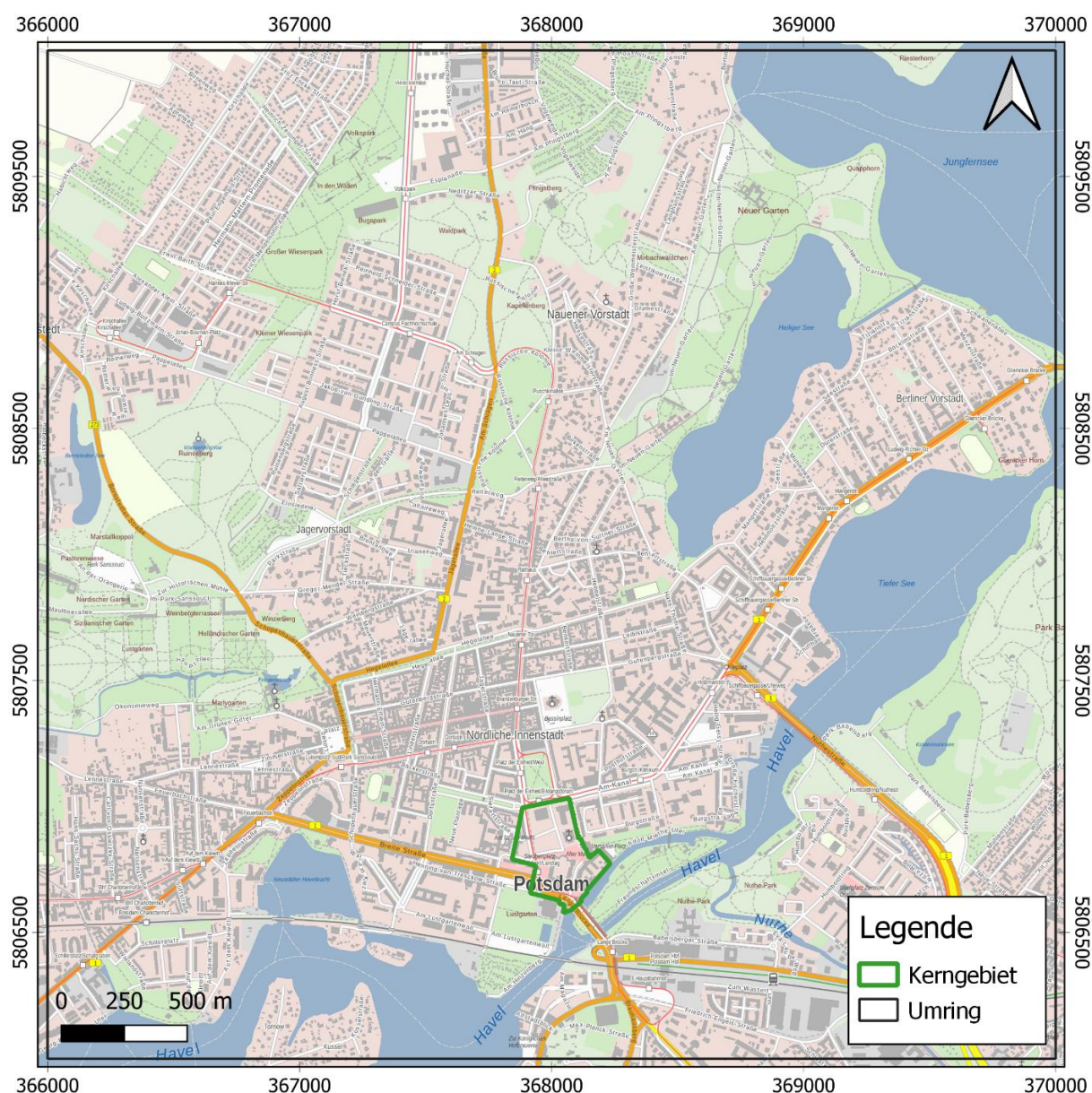


Abbildung 4: Übersichtskarte vom Untersuchungsgebiet mit Kerngebiet

Die Geomorphologie des Untersuchungsgebietes ist durch glaziale rinnenbildende Prozesse während der letzten Eiszeiten angelegt worden. Die Ausprägung des Gewässerbildes wird in großen Teilen auf diese Prozesse zurückgeführt.

Die Geländestruktur ist stark durch die Havel und deren Seen geprägt. Das umgebende reliefarme Gelände mit einem durchschnittlichen Höhenniveau zwischen + 30 und +33 m NHN steigt Richtung Nordwesten sprunghaft an. Der Kapellenberg sowie Schloss Sanssouci im nordwestlich der Innenstadt liegen bereits auf einem Niveau zwischen + 40 bis + 50 m NHN.

Sowohl der Ruinenberg (im Westen) als auch der Pfingstberg (im Norden) liegen über + 70 m NHN. Deutlich wird das in der orographischen Karte unter Abbildung 5.

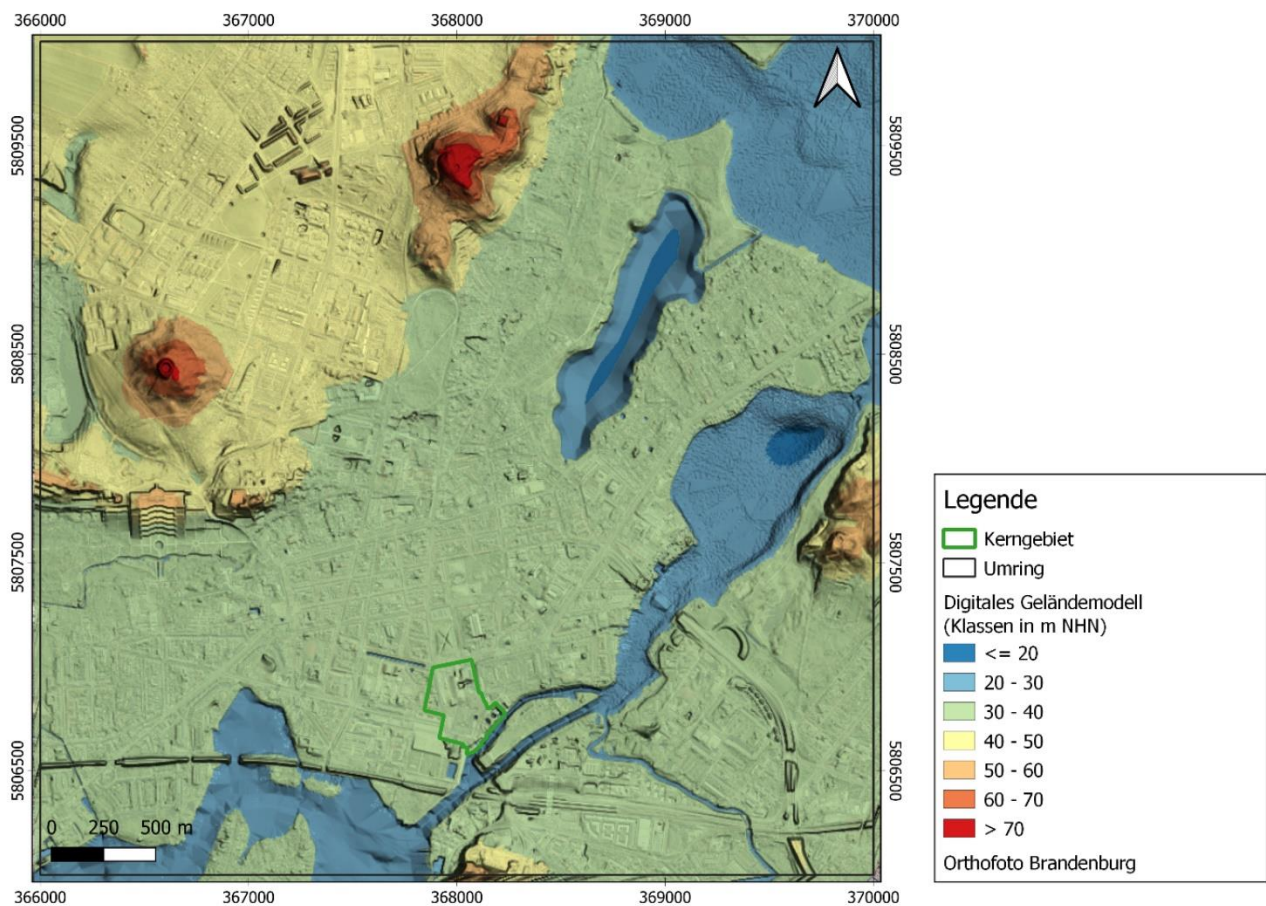


Abbildung 5: Geländestruktur des Modellraumes



3.2 Naturräumliche Einordnung

Der Hauptnaturraum des Modellgebietes ist den Mittelbrandenburgischen Platten und Niederungen zuzuordnen. Das komplette Untersuchungsgebiet gehört zu der naturräumlichen Untereinheit Brandenburg-Potsdamer Havelgebiet. Südwestlich grenzen die drei Untereinheiten Beelitzer Heide, Nuthe-Notte-Niederung und die Teltowplatte an (Scholz, 1962).

Das Brandenburg-Potsdamer Havelgebiet hat die Charakteristik eines Niedergürtels, welcher durch kleine Grundmoräneninseln durchsetzt ist. Die Niederungen sind zumeist mit Talsanden gefüllt und in Gewässernähe haben sich typische Niedermoorböden innerhalb des Urstromtales gebildet. Anhand der starken Prägung der Landschaft durch die Havel mit dessen Seen und Altarmen, wird vom Landschaftstyp Gewässerlandschaft (gewässerreiche Kulturlandschaft) gesprochen (BfN, 2021).

3.3 Klima

Das Bearbeitungsgebiet liegt im Übergangsbereich zwischen maritim und kontinental geprägtem Klima. Laut effektiver Klimaklassifikation liegt Potsdam in der Warmgemäßigten Klimazone mit feuchttemperiertem Klima und warmen Sommern (Klasse: Cfb – nach Köppen). Der maritime Einfluss führt meist zu milden Wintern.

Langjährige Klimanormalreihen stehen von der Klimastation Potsdam des DWD zur Verfügung. Als meteorologischer Bezugszeitraum für die Berechnung des Wasserhaushaltes dient die klimatische Reihe 1991-2020 (DWD, 2021), welche auch als Grundlage zur Berechnung der langjährigen mittleren Wasserhaushaltsgrößen in der Prognoserechnung ab 2021 dient.

Als klimatische Grundlage werden folgende Daten der Klimastation Potsdam (DWD) verwendet:

<i>Mittlere Jahresdurchschnittstemperatur:</i>	9,8 °C
<i>Mittlere jährliche potenzielle Verdunstungshöhe:</i>	717 mm/a (nach Turc-Wendling)
<i>Mittlere Klimatische Wasserbilanz:</i>	-74 mm/a
<i>Mittlere Jahresniederschlagshöhe:</i>	643 mm/a (korrigiert nach Richter)

Sowohl die potenzielle Verdunstungshöhe als auch die korrigierten Niederschlagswerte stammen aus dem regionalen Klimainformationssystem ReKIS (ReKIS, 2022).

In Abbildung 6 ist der langfristige jährliche Gang des korrigierten Niederschlages (Richter, 1995) und der potenziellen Verdunstung der Station Potsdam dargestellt. Sowohl an den mittleren Werten als auch an folgender Grafik ist deutlich zu erkennen, dass die potenzielle Verdunstung den Niederschlag übersteigt.

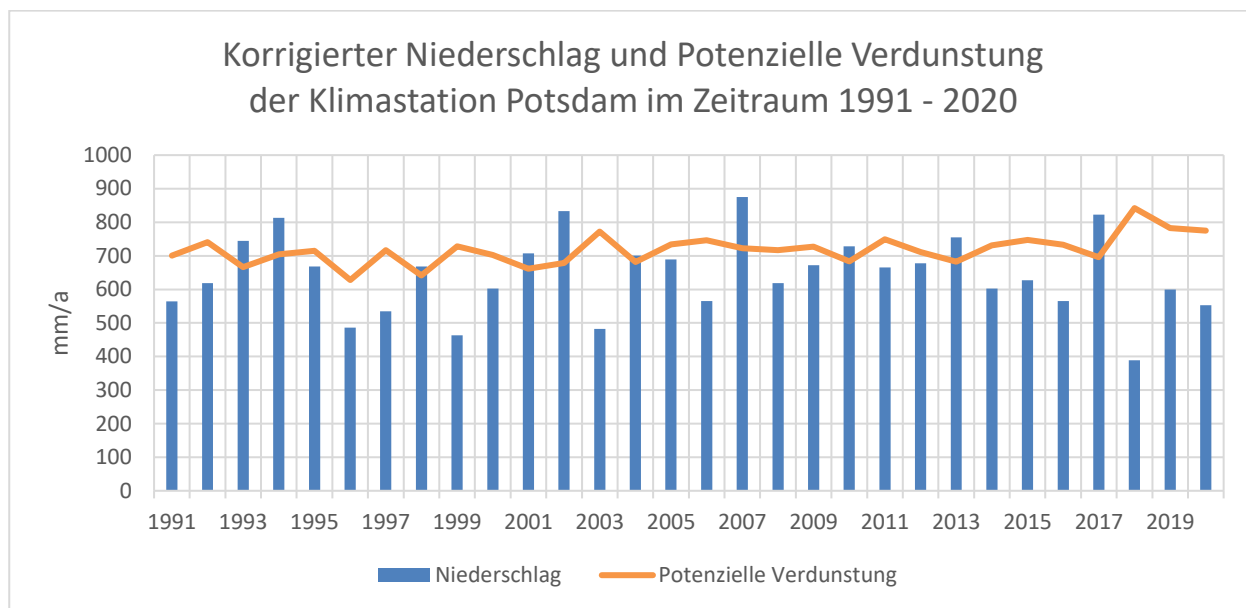


Abbildung 6: Korrigierter Niederschlag und potenzielle Verdunstung in der Klimanormalreihe von 1991 - 2020

Für die Beurteilung des Gebietswasserhaushaltes unter rein klimatischen Gesichtspunkten kann die klimatische Wasserbilanz (KWB) als Differenz von Niederschlag und potenzieller Verdunstung herangezogen werden. Für den Beobachtungszeitraum ergibt sich im langjährigen Mittel ein klimatisch bedingtes Wasserdefizit. Die Abbildung 7 zeigt die Jahresmittelwerte der Zeitreihe (1991 - 2020). Die mittlere klimatische Wasserbilanz liegt bei -74 mm/a.

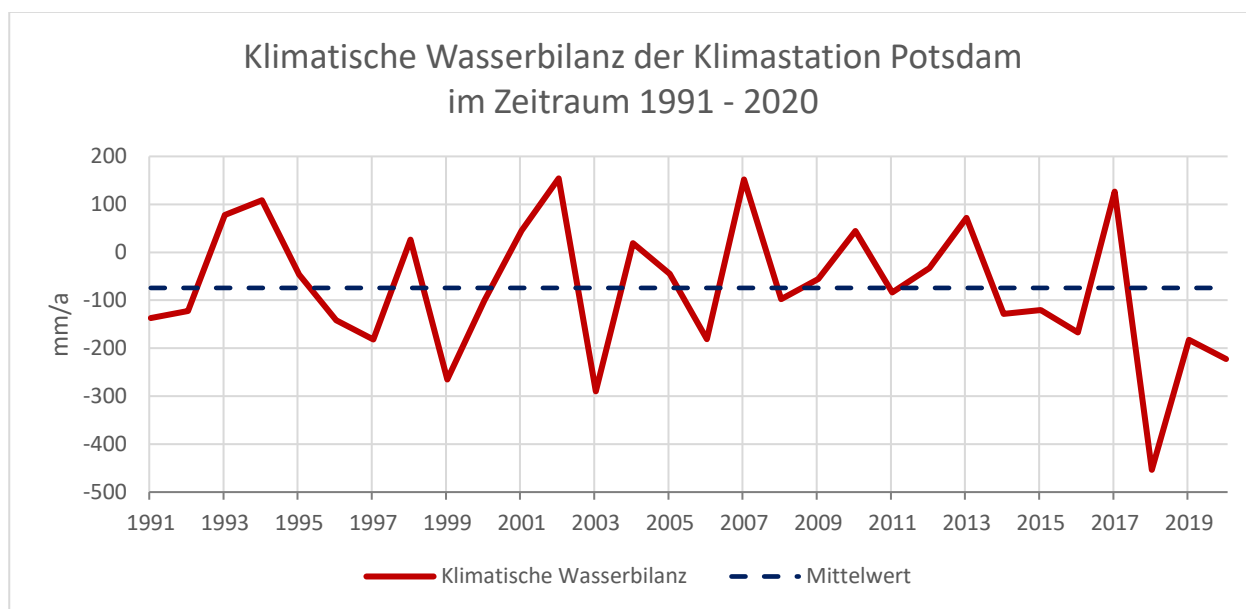


Abbildung 7: Klimatische Wasserbilanz der Klimastation Potsdam in der Klimanormalreihe von 1991 - 2020

3.4 Hydrologie

Das Modellgebiet liegt im oberirdischen Einzugsgebiet der Potsdamer Havel. Vom Jungfernsee bis zum Templiner See weist die Havel eine Fließrichtung von Nordosten nach Südwesten auf.

Mit dem Jungfernsee und dem Tiefen See im Nordosten wird die typische Seecharakteristik der Havel unterstrichen. Im Bereich der Potsdamer Mitte verengt sich der Havellauf und umschließt die Freundschaftsinsel mit der Alten Fahrt nördlich und der neuen Fahrt südlich der Insel. Zudem strömt aus Südosten kommend die Nuthe der Havel im Bereich des Nutheparks zu.

Der Lauf der Havel weitet sich stromabwärts der Potsdamer Mitte von ca. 70 m Breite auf ca. 300 bis 600 m wieder stark auf. Nach einer leichten Einengung während des Passierens der Verbindung zur Potsdamer Havelbucht erreicht die Havel den Templiner See.

Durch die eingebundenen Seen und die breiten Flussarme der Havel kann von einer ausgeprägten Standgewässercharakteristik gesprochen werden.

Ein weiterer charakteristischer Gewässerkörper ist der Heilige See zwischen Berliner Vorstadt und Nauener Vorstadt. Der Heilige See wird durch das Grundwasser gespeist. Er besitzt einen Überlauf über den Hasengraben in den Jungfernsee. Dieser Übergang ist einseitig, um das nährstoffreichen Havelwasser abzuhalten (Wiehle, 2017). Zudem stabilisiert der See den Grundwasserstand, was die hölzernen Gründungspfähle des Marmorpalais schützt (Hohenstein, 2004).

Weiterhin beinhaltet das Untersuchungsgebiet kleinere Gewässereinheiten, wie den Bornstedter See, den Kindermannsee und den Friedensteich mit Ablauf. Dabei wird davon ausgegangen, dass diese Gewässer eher einen Teichcharakter aufweisen und nicht maßgebend mit dem Grundwasser gekoppelt sind.

3.5 Grundwasser

Das allgemeine Grundwasserregime kann aus dem großräumigen Grundwassergleichenplan des Landes Brandenburg (D8) abgeleitet werden. Dieser ist in Anlage 1 dargestellt. Dabei handelt es sich um den aus der Stichtagsmessung vom April 2011 konstruierten landesweiten Plan.

Deutlich ist die Fließrichtung vom Nordwesten des Modellgebietes Richtung Havel zu erkennen. Entlang der Fließrichtung ist auch eine Abnahme des Gradienten zu beobachten. Das entspricht auch in etwa der orographischen Ausprägung des Gebietes mit dem höheren Gelände rund um den Ruinenberg, Kapellenberg und Pfingstberg im Nordwesten und der Rinnenstruktur der Havelniederung. Die Havel als Vorfluter führt in Teilen zu dieser charakteristischen Abflachung des Grundwassergefälles.

In Abbildung 8 sind die Ganglinien havelnaher und havelferner Grundwassermessstellen der Ganglinie des Pegels Potsdam gegenübergestellt. Hierbei wird deutlich, dass die Schwankungen im Grundwasser für nahe und ferne Grundwassermessstellen stark mit den Schwankungen der Havel korrelieren. Die absoluten Höhen der Grundwassermessstellen steigen mit größerem Abstand zur Havel. Daraus kann wiederum eine direkte Kopplung des Grundwassers mit der Havel abgeleitet werden.

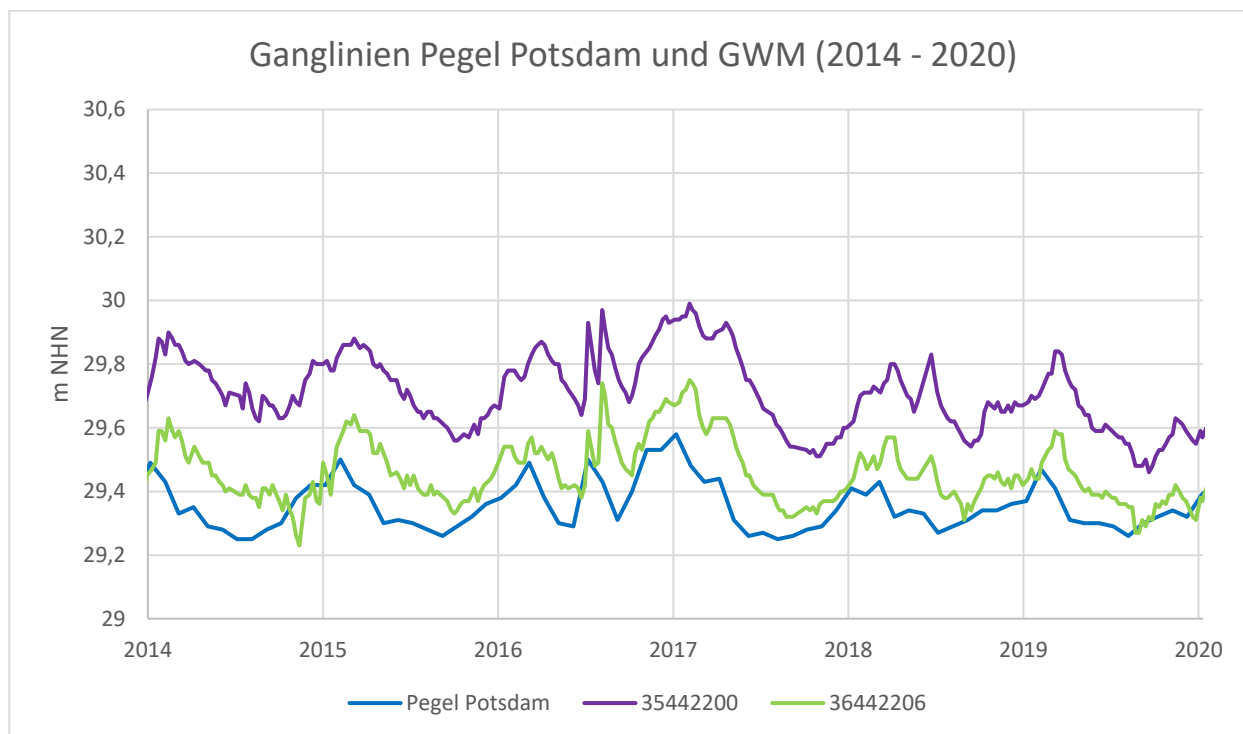


Abbildung 8: Vergleich Grundwasserganglinien und Pegel Havel

Hinsichtlich der Grundwasserdynamik werden bei einem hohem Havelwasserstand influente Verhältnisse in den Grundwasserleiter erwartet. Damit ist ein Anstieg des Grundwassers im havelnahen Stadtbereich verbunden.

3.6 Geologische Verhältnisse

Norddeutschland wurde bis zum Rand der deutschen Mittelgebirge während der vergangenen 350.000 Jahre stark durch die skandinavischen Inlandvereisungen beeinflusst. Das zum Norddeutschen Tiefland gehörende Potsdam und damit der betrachtete Modellraum zählen zu den klassischen durch Quartärgeologie und -stratigraphie geprägten Regionen. Die tertiären Sedimente spielen im Untersuchungsgebiet keine Rolle.

Im Pleistozän, durch den periodischen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten, wurden die heute landschaftsprägenden Oberflächenformen angelegt. Während der drei aufeinanderfolgenden Eiszeiten Elster, Saale und Weichsel war das Gebiet durch mächtige Inlandeisgletscher bedeckt, was die Ablagerung mächtiger Grund- und Endmoränen (Geschiebemergelkomplexe) zur Folge hatte. Infolge der wärmeren klimatischen Verhältnisse während der zwischengeschalteten Interstadiale (Warmzeiten) setzte das großräumige Abschmelzen des Gletschereises ein. Die daraus resultierende abfließenden Schmelzwässer schufen neben den Urstromtälern tiefe Erosionsrinnen in denen die älteren glazialen Ablagerungen ausgeräumt und durch mächtige Sand- und Schotterbildungen ersetzt wurden.

Ergebnisse dieser glazialen und interglazialen Prozesse sind unter anderem die Endmoränen des Bornstedter Feldes sowie die ebenen Sanderflächen des Nuthetales und des Stadtgebietes von Potsdam, welche während der Weichsel-Kaltzeit im Brandenburger Stadium angelegt wurden.

Am Ende der Weichsel-Kaltzeit erfolgte der Übergang vom Pleistozän zum Holozän, dem jüngsten und bis heute andauernden Abschnitt des Quartärs. Zu den charakteristischen holozänen Bildungen gehören neben Auelehmen und Auekiesen, die im Bereich ehemaliger Flussläufe abgelagert wurden, auch anthropogene Ablagerungen, die fast im gesamten Modellgebiet anzutreffen sind. Tabelle 1 zeigt das aus den Lithofazieskarten Quartär abgeleitete hydrogeologische Normalprofil.

Tabelle 1: Hydrogeologisches Normalprofil der im Untersuchungsgebiet verbreiteten Schichten

System	Serie	Lithostratigraphie	Schichtenfolge
QUARTÄR	Holozän		Anthropogene Auffüllung/Mutterboden
			Auelehme
			Auekiese
	Pleistozän	Weichsel-Kaltzeit	sandige Nachschüttungen gW (gWn)
			Weichsel-Grundmoräne gW (Geschiebemergel)
			sandige Vor- und Nachschüttungen gW/gS3
		Saale-3-Kaltzeit	Saale-3-Grundmoräne – gS3 (Geschiebemergel)
			sandige Vor- und Nachschüttungen gS2/gS3
		Saale-2-Kaltzeit	Saale-3-Grundmoräne – gS2 (Geschiebemergel)
			sandige Vor- und Nachschüttungen gS1/gS2
		Saale-1-Kaltzeit	Saale-3-Grundmoräne – gS1 (Geschiebemergel)
			sandige Vorschüttungen gS1 (gS1v)
		Elster-Kaltzeit	Ungegliederte glazifluviale-glazilimnische Bildungen

3.7 Hydrogeologische Verhältnisse

Aufgrund der rinnenartigen Struktur im zentralen Bereich des Modellgebietes bestehen großflächige Kopplungen zwischen den Grundwasserleitern. Obwohl sie unterschiedlichen geologischen Horizonten angehören, können sie aufgrund ihrer petrographischen Ausbildung nicht eindeutig voneinander unterschieden werden. Unter hydraulischen Gesichtspunkten bilden sie eine Einheit.

Die ungegliederten rolligen und bindigen Ablagerungen der Elster-Kaltzeit (Schmelzwassersand und Grundmoränen) spielen aufgrund ihrer Tiefenlage und der erheblichen Mächtigkeit jüngerer rolliger und bindiger quartärer Sedimente im Hinblick auf die Auswirkungen der Baugruben nur eine untergeordnete Rolle und werden daher nicht näher betrachtet.

Die grundwasserleitenden Horizonte bestehen überwiegend aus gut sortierten sandigen Kiesen mit wechselndem Feinsand- und Schluffgehalten. Die hydrogeologische Durchlässigkeit kann nach (DIN18130-1, 1998) mit 10^{-2} bis 10^{-4} m/s angenommen werden.

Die Mächtigkeit des saale- und weichselkaltzeitlichen Grundwasserleiterkomplexes variiert dabei in Abhängigkeit vom Verlauf und Ausbildung der Rinnenstruktur zwischen 20 m an den Rinnenflanken und 40 m in der Rinnenachse. Die Rinnenbasis liegt im Zentralen Bereich bei -10 m NHN.

Im Bereich des Bornstedter Feldes trennt der mächtige Geschiebemergelkomplex den Grundwasserleiterkomplex in ein Stockwerk. Der obere GWL weist Basishöhen zwischen + 30 und + 35 m NHN auf und besitzt eine mittlere Mächtigkeit von 5 m. Der untere GWL besitzt eine Liegendhöhe von + 3 m NHN und Mächtigkeiten von 3 bis 17 m. Eine Verbindung wird über die Rinnenstruktur gewährleistet. Somit können die Grundwasserleiter im Modellgebiet als ein Grundwasserleiterkomplex betrachtet werden.

4 Grundwasserströmungsmodell

Das vorliegende Grundwasserströmungsmodell Potsdamer Mitte beschreibt die großräumigen Grundwasserströmungsverhältnisse als 3D-Mehrschichtmodell mit Fokussierung auf den Kernbereich mittels mehrerer Netzverfeinerungen. Dabei findet das Programmsystem PCGEOFIM Verwendung.

4.1 Hydrogeologisches Strukturmodell

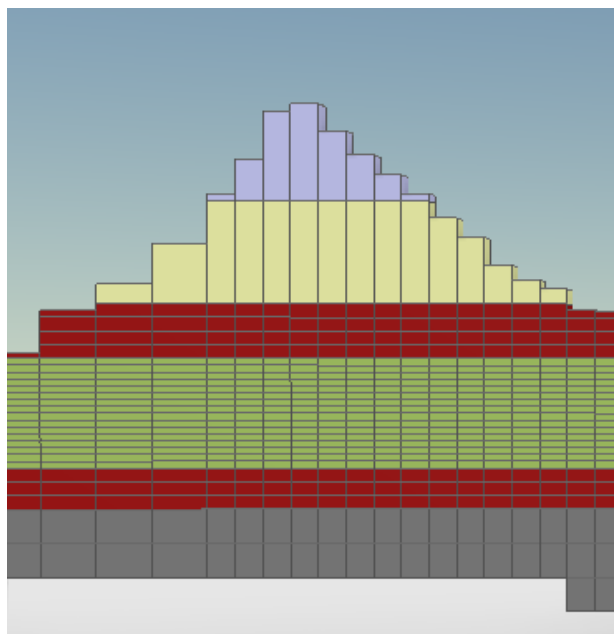
Die Erstellung des hydrogeologischen Strukturmodells erfolgte mit dem Programmsystem GMS (Groundwater Modeling System) von AQUAVEOTM (AQUAVEO, 2012).

Im Rahmen der Grundlagenermittlung wurden folgende Daten ausgewertet:

- Lithofazieskarten des Quartärs (LBGR, Blatt 2066 – Potsdam)
- Bohrungen
- Digitales Geländemodell

Die Aufbereitung der Daten beinhaltete neben der Georeferenzierung der Karten, das Übernehmen der dargestellten Verbreitungsgrenzen sowie die Ausweisung von Liegendhöhen anhand dargestellter Bohrungen und Isolinien. Die daraus abgeleiteten regionalisierten Höheninformation werden anschließend auf das Modellraster übertragen. Im GMS erfolgt die Zusammenführung aller hydrogeologischer Informationen. Die vertikale Modellstruktur orientiert sich an der lithofaziellen Gliederung des Gebietes (Tabelle 1). Es werden fünf Grundwasserleiter berücksichtigt, die im zentralen Bereich der Rinnen hydraulisch miteinander gekoppelt sind.

Aufgrund der variablen Mächtigkeiten insbesondere im Aussagebereich ist eine feine vertikale Diskretisierung des Strukturmodells notwendig. Dazu wird das Strukturmodell in einen gitterbasierten Ansatz überführt. Abbildung 9 zeigt exemplarische die vertikale Gliederung des hydrogeologischen Strukturmodells im Bereich des Ruinenbergs.



Äquivalent-schichten	Mächtigkeit [m]	Klassenfarbe
1	20	Blauviolett
2	15	Sandgelb
3 - 6	2	Rot
7 - 22	1	Grün
23 - 25	2	Rot
26 - 30	5	Grau

Abbildung 9: Beispiel einer gitterbasierten Gliederung nach Gitterhöhe/Mächtigkeit

Im Ergebnis besitzt das Hydrogeologische Strukturmodell insbesondere im Aussagebereich eine vertikale Auflösung von 1 bis 2 m. Die Kombination des schichtenbasierten Ansatzes und der festgelegten Gitterstruktur (Abbildung 9) führt zu folgendem hydrogeologischen Strukturmodell (Abbildung 10).

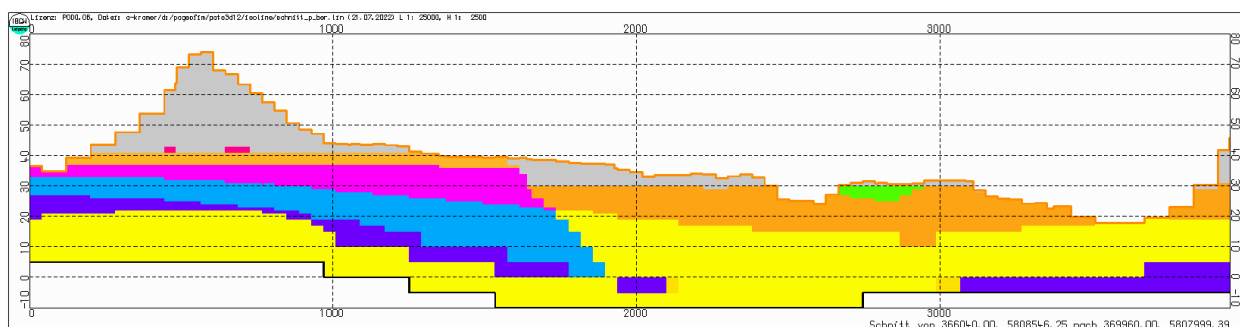


Abbildung 10: Beispielschnitt gitterbasiertes hydrogeologisches Modell im Untersuchungsgebiet.

Folgende hydrogeologische Schichten sind enthalten:

- Grau: Auffüllung
- Grün: Auelehm
- Orange: sandige Nachschüttung (Weichsel)
- Magenta: Grundmoränenkomplex (Weichsel und Saale)
- Gelb: Grundwasserleiterkomplex: sandige Nachschüttung (Saale)
- Blau: Grundmoräne (Saale)
- Violett: Grundmoräne (Saale)

4.2 Räumliche Abgrenzung des Modellgebietes

Als Untersuchungsrahmen wird folgender Koordinatenausschnitt betrachtet:

- **RW 366000...370000**
- **HW 5806000...5810000 (ETRS89 / UTM zone 33N (EPSG:25833))**

Der Modellraum (Abbildung 11) orientiert sich an den geologischen und hydrologischen Rändern (vgl. Anlage 2). Das Grundraster besitzt eine Auflösung von 80 m. In den Lupebereichen wird die Auflösung sukzessive erhöht. Im Aussagebereich liegt die Auflösung bei 5 x 5 m Kantenlänge. Somit ist die modellseitige Abbildung der realisierten und geplanten Baumaßnahmen im Areal „Staudenhof und Umfeld Bildungsforum“ räumlich sowie in ihrer hydraulischen Wirkung gewährleistet.

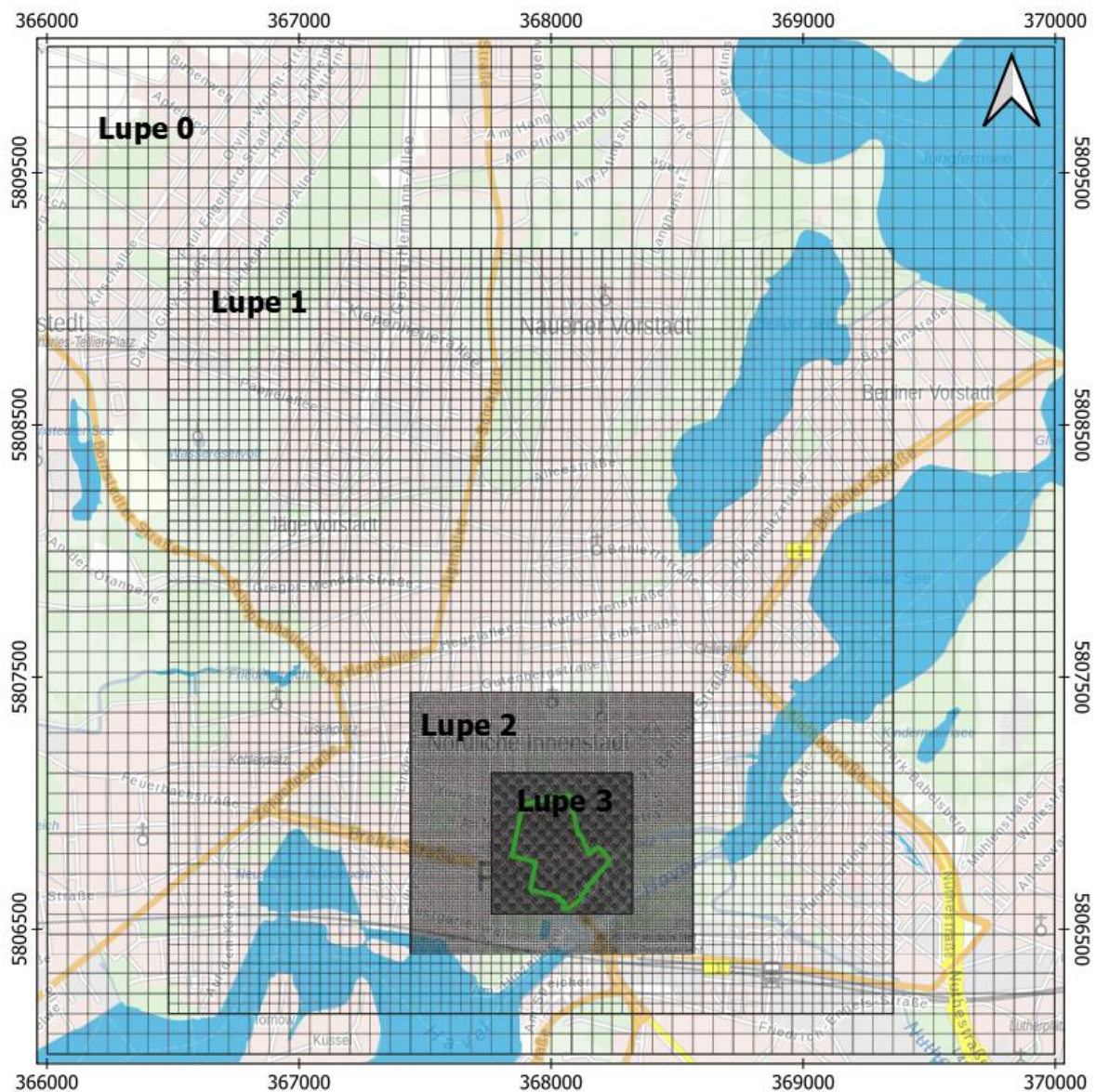


Abbildung 11: Horizontale Auflösung des Modellgitters.

4.3 Randbedingungen

Die Festlegung der Randbedingungen erfolgt entsprechend den hydrologischen und hydrogeologischen Verhältnissen. Hierbei können beispielsweise Einzugsgebietsgrenzen, Verbreitungsgrenzen, Vorfluter etc. als natürliche Randbedingung betrachtet werden. Die hydraulischen Randbedingungen wurden auf Basis der zur Verfügung stehenden klimatologischen und hydrologischen Daten fachgerecht nach dem Stand der Technik aufgebaut.

Der Nordrand des Modellgebietes wird durch die unterirdische Wasserscheide gebildet (vgl. GWGL LFU). Im Westen befindet sich ein sogenannter „no-flow“-Rand, hier ist davon auszugehen, dass es keine Grundwasserbewegungen über die Modellgrenze stattfindet. Der Bilanzraum im Südosten bei Babelsberg wird hauptsächlich durch die Nuthe geprägt. Die Randbedingung wird durch Vorgabe eines Volumenstroms Q -gesteuert.

Die Randbedingung Standgewässer beschreibt die Interaktion zwischen Grundwasser und Oberflächengewässer in Abhängigkeit vom jeweiligen Wasserstand im Grundwasser und Standgewässer. Die Gewässersohle kann mit einem Kolmationsterm versehen modellseitig berücksichtigt werden.

Die Anlage 2 zeigt eine Übersicht der im Modell implementierten Randbedingungen. Die Klassifizierung orientiert sich an der Art der Modellimplementierung auf Basis der Eigenschaften. Diese Gliederung ist nicht mit der behördlichen Definition der Gewässer gleichzusetzen.

Wesentliche innere Randbedingungen sind:

- Fließgewässer:
 - Nuthe
- Standgewässer:
 - Heiliger See mit Hasengraben
 - Jungfernsee
 - Tiefer See
 - Nebenarm Alte Fahrt und Neue Fahrt
 - Havel mit Neustädter Havelbucht
 - Bornstedter See
 - Friedensteich mit Ablauf
 - Kindermannsee

4.4 Wasserhaushaltsgrößen und Grundwassereingangsdaten

Eingang Oberflächenwassergrößen

Das Untersuchungsgebiet ist stark durch ihre umgebenden Oberflächengewässer geprägt. Wie in Abbildung 13 dargestellt besteht die Havel in dem Bereich aus einer Seenkette. Diese beginnt mit dem Jungfernsee im Nordosten des Modellgebietes. Der Heilige See entwässert über einen Überlauf direkt in den Jungfernsee. Im Anschluss folgt der Tiefe See an dessen Ende die Nuthe mündet. An diesem Punkt teil sich die Havel vor der Freundschaftsinsel in den Hauptarm und die Alte Fahrt auf. Nach deren Vereinigung weitet sich die Havel in der Nähe der Planitzinseln und dem Neustädter Hafenbecken wieder auf. Unter den kleineren Oberflächengewässern sind der Bornstedter See und der Kindermannsee zu nennen.

Das vorherrschende Oberflächenwasserregime kann mit 4 Pegeln wiedergegeben werden (siehe Abbildung 13 unter Kapitel 3.5). Dabei sind die modellrelevanten Messstellen der Pegel Potsdam (Havel, Tiefer See) und der Pegel Potsdam, Seestraße (Heiliger See). Für die Fragestellung spielen die Pegel Bornstedter See und Nuthe eine untergeordnete Rolle.

Für den Jungfernsee, den Tiefen See, der Alten Fähre und der Havel unterhalb der alten Fähre wird der Wasserstand des Pegels Potsdam verwendet. Die modellseitige Kopplung der Seen erfolgt abgesehen vom Heiligen See beidseitig, womit der die Havel ausgespiegelt ist. Die Annahme des ausgespiegelten Wasserstandes beruht auf der Secharakteristik der Havel. Diese Charakteristik wird aus der Struktur der Havel und aus dem Schwankungsverhalten der Pegelganglinie selbst abgeleitet.

Der Wasserstand des Heiligen Sees liegt ca. 20 cm über dem Spiegel der Messstelle Potsdam. Das saisonale Schwankungsverhalten der beiden Seeganglinien ähnelt sich in großen Teilen (siehe Abbildung 12).

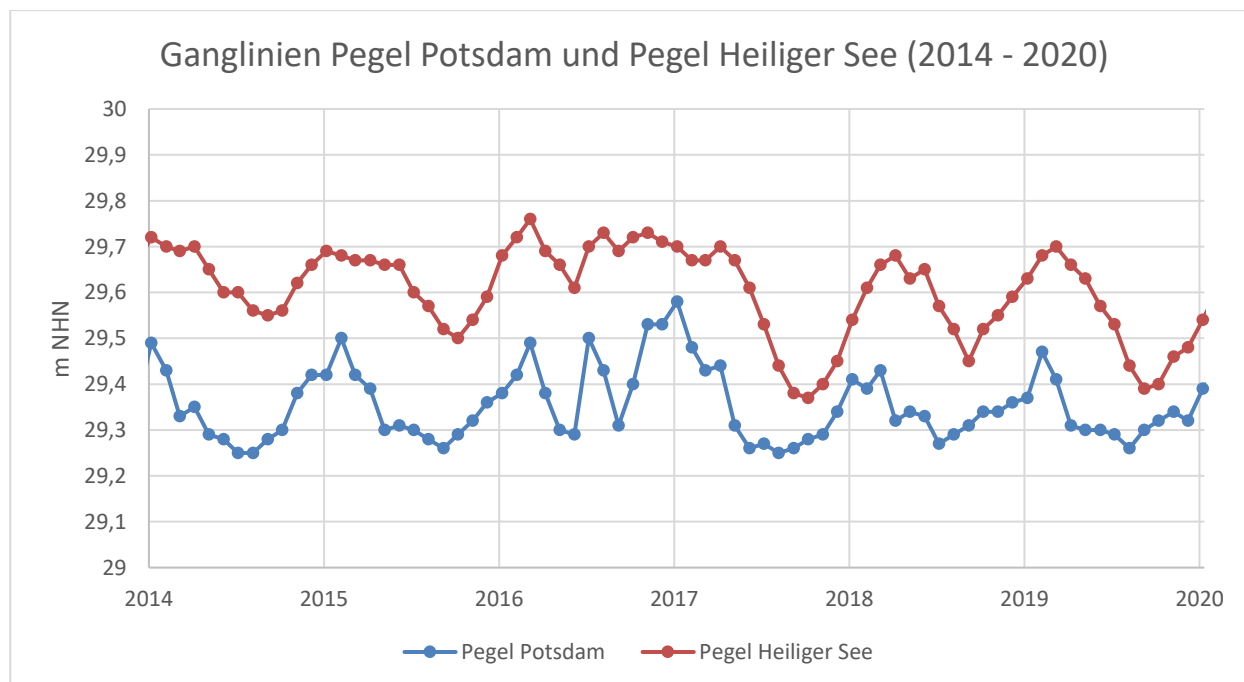


Abbildung 12: Schwankungsverhalten des Pegels Potsdam und des Pegels Seestraße (Heiliger See)

In der Tabelle 2 sind die statistischen Kennwerte des Pegels Potsdam und des Pegels Seestraße (Heiliger See) aufgeführt.

Tabelle 2: Statistische Kennwerte des Pegels Potsdam und des Pegels Seestraße (Heiliger See)

	Pegel Potsdam (1995-2021)		Pegel Seestraße (1990-2021)	
	[cm]	[m NHN]	[cm]	[m NHN]
Minimum	72	+ 29,15	92,5	+ 29,36
Maximum	184	+ 30,27	178	+ 30,22
Mittelwert	95,28	+ 29,38	121	+ 29,65

Die Havel besitzt ein großes Speichervermögen und hält den Wasserstand auch bei längeren Trockenperioden oder Fechtperioden. Somit ist die für ein Fließgewässer relativ geringe Schwankungsbreite ergeben von 1,12 m (Zeitraum 1995-2021) erklärbar.

Der Pegel Seestraße hat eine maximale Schwankung von 0,88 m. Der Wasserstand des Heiligen Sees wird durch einen Überlauf geregelt.

Eingang Grundwassergrößen

Es stehen insgesamt 7 Grundwasserpegel für die Ableitung des Grundwasserregimes zur Verfügung (siehe Abbildung 13).

Es werden 3 zusätzliche Stützstellen im Nordwesten des Modellgebietes eingeführt. Damit wird eine bessere Datengrundlage für die Kalibrierung des Modells erreicht (siehe Kapitel 4.6).

Im Zuge der Bearbeitung wurden zwei verschiedene Wege zur Erzeugung der Stützstellen genutzt. Zum einen erfolgte eine Verschiebung der Pegel 35442254 (Stützstelle 1) und 35442250 (Stützstelle 2) entlang der Isolinien der Stichtagsmessung 04/2011.

Zum anderen wurden Schwankungen umliegender Pegel auf einen virtuellen Pegel aufgeprägt (Stützstelle 3). Diese Herangehensweise beruht auf der Annahme, dass das Schwankungsverhalten benachbarter Pegel ähnlich ausfällt. Zu diesem Zweck wurde eine Grundhöhe aus der Stichtagsmessung 04/2011 übernommen und über Wichtungsfaktoren das Schwankungsverhalten mittels multipler linearer Regression übertragen. Mit der Verdichtung der Messpunkt und damit der Datenlage kann in den entsprechenden Modellbereich die Ergebnisse der Kalibrierung des Grundwassermodells plausibilisiert werden.

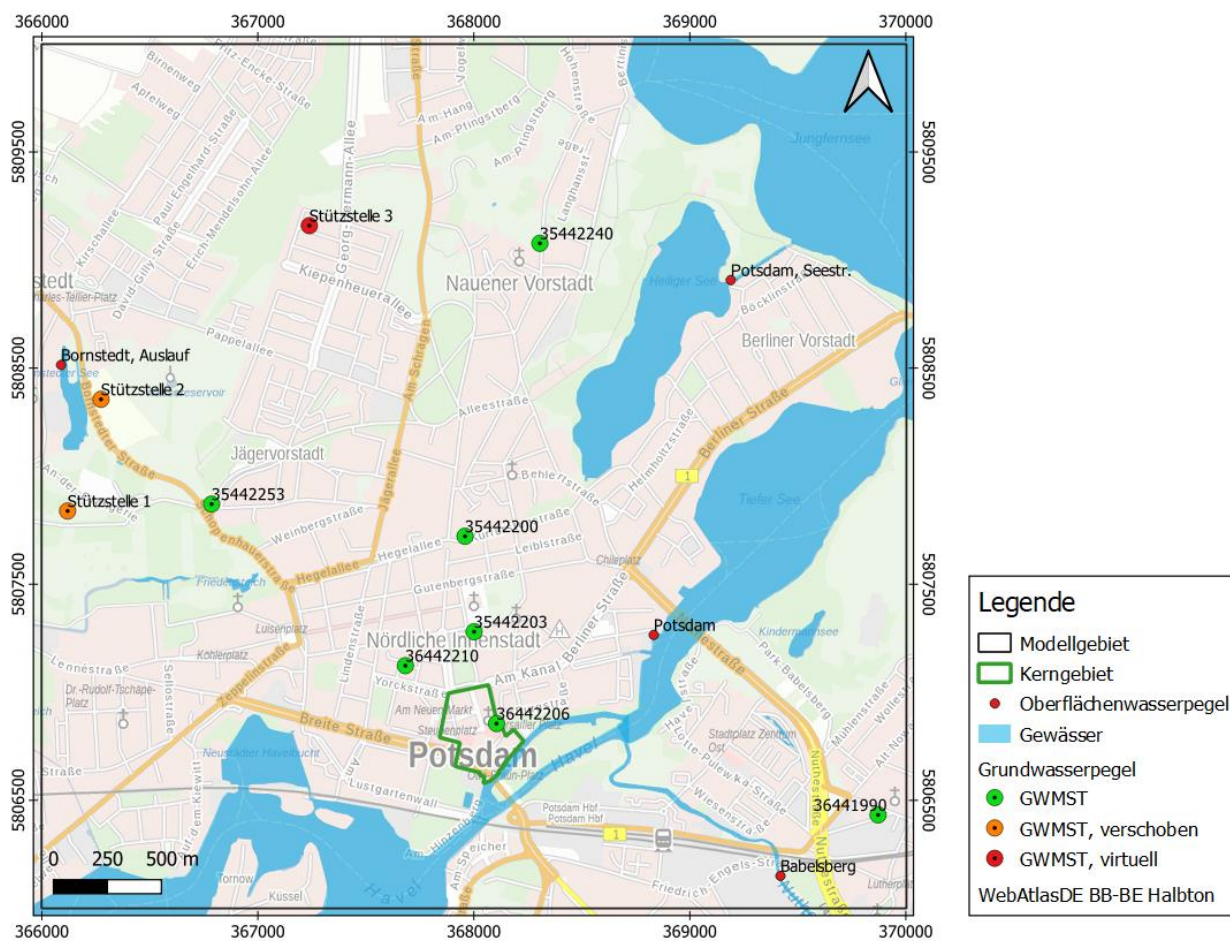


Abbildung 13: Übersichtskarte Grundwasserpegel und Oberflächenwassermessstellen

Die Tabelle 3 zeigt einen Überblick der mittleren Grundwasserstände.

Tabelle 3: Mittelwerte der verwendeten Grundwasserpegel

Name	mittl. Wasserstand [m NHN]
36442206	+ 29,52
36442210	+ 29,59
36441990	+ 30,08
35442200	+ 29,78
35442240	+ 30,09
35442203	+ 30,01
35442253	+ 30,58
Stützstelle 1	+ 31,15
Stützstelle 2	+ 31,6
Stützstelle 3	+ 32,54

Grundwasserneubildung

Als Grundwasserneubildung bezeichnet man die Wassermenge, die das Grundwasser aus Oberflächengewässern oder aufgrund der Versickerung von Niederschlagswasser erreicht. Sie stellt die Randbedingung am oberen Modellrand des Grundwasserströmungsmodells dar.

Diese Randbedingung ist direkt abhängig vom Grundwasserflurabstand. Je kleiner dieser ausfällt, desto größer kann der kapillare Aufstieg und die damit verbundene Verdunstung sein. Somit werden modelltechnisch verschiedene Flurabstandsklassen nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (BGR, 2005) berücksichtigt.

Grundlage der Ermittlung der Grundwasserneubildung bilden die Wasserhaushaltsgleichung sowie die Simulation des Gravitationswasserabflusses nach Glugla (1969). Dieser Ansatz wurde daher für die Berechnung gewählt, um so die räumlich differenzierte tiefen- und zeitvariabel darzustellen.

Für ein abgeschlossenes System ohne oberirdischen oder unterirdischen Zufluss kann die Wasserhaushaltsgleichung wie folgt dargestellt werden.

$$P = ETR + RO + RU$$

mit: P - Niederschlag
ETR - reale Verdunstung
RO - oberirdischer Abfluss
RU - unterirdischer Abfluss

Der Ansatz nach Glugla bilanziert die Versickerung in Abhängigkeit von der Vorneuchte des Bodens und der Tiefe des Bodenkörpers. Die mit einem Kapillaraufstieg erweiterte Gleichung wird im Folgenden dargestellt.

$$G = \lambda * (W - FK)^2 - K$$

mit: λ - Sickerparameter nach Glugla
W - Wassergehalt oberhalb der Feldkapazität
FK - Feldkapazität
K - Kapillaraufstieg

Neben dem Grundwasserflurabstand werden hierbei zudem Einflussfaktoren wie Witterung, Landnutzung und bodenphysikalische Eigenschaften berücksichtigt.

Das Verfahren erlaubt die tageweise Ermittlung der Sickerwasserrate, welche vereinfachend der Grundwasserneubildung gleichgesetzt werden kann. Benötigte Daten sind:

- korrigierte Tagesniederschlagshöhe
- potenzielle Tagesverdunstungshöhe
- Informationen zur Landnutzung
- Bodenkennwerte

Die klimatischen Eingangsdaten sammelt die Klimastation Potsdam (TUD, 2022), während Informationen zur Landnutzung dem CORINE-Datensatz entnommen werden. Angaben zu den vorliegenden Bodenarten (überwiegend sandige Böden, zu geringen Teilen lehmige Sande) finden sich in der Bodenübersichtskarte (LFU, 2022). Mithilfe der bodenkundlichen Kartieranleitung (BGR, 2005) werden die Bodenleitfähigkeiten ermittelt.



Die tägliche Sickerwasserrate für das Modellgebiet wurde für den Zeitraum von 1990 bis 2020 bestimmt. Niederschlag, landnutzungsabhängige Verdunstung, Wasserspeichereigenschaften des Bodens und Bodenmächtigkeit wurden einbezogen.

Das Modellgebiet wurde in insgesamt 18 Hydrotopen gegliedert, welche durch gleichen Bodentyp und gleiche Landnutzungsklasse gekennzeichnet sind. Für das Modellgebiet wurden folgende Landnutzungsklassen definiert: Waldflächen, Grünflächen bzw. Parkanlagen und Siedlungsflächen mit Klassifizierung in die Versiegelungsgrade 10, 30, 60 und 90 %.

Für jede Zone und jeden Monat wird die Grundwasserneubildung in Abhängigkeit des Grundwasserflurabstandes vorgegeben. Auf diese Art kann die Zehrung aus dem Grundwasservorrat bei einem Anstieg des Grundwassers bis in die verdunstungsbeeinflusste Bodenzone berücksichtigt werden.

4.5 Aufbau technologisches Teilmodell

Die Umsetzung des Baufeldes erfolgt mit Hilfe der Bestandsdaten der Stadt Potsdam und der Planunterlagen der Sanierungsträger Potsdam GmbH in einem technologischen Teilmodell.

Zu diesem Zweck wurden die tabellarisch ausgehändigten Daten der Stadt Potsdam erweitert, gruppiert und mit den entsprechenden öffentlich zugänglichen ALKIS-Daten abgeglichen und verknüpft.

Die Unterlagen der geplanten Bauwerke wurden durch die Sanierungsträger Potsdam GmbH als CAD-Dateien übergeben. Diese wurden zur Übertragung in das GIS-Format georeferenziert.

In dieser Form konnten die Informationen in einer GIS-Datei zusammengefasst und in das Modellraster überführt werden. Die angenommene Tiefe der doppelstöckigen Tiefgarage von Block V beträgt +27 m NHN. Die entwickelte GIS-Datei ist in Abbildung 14 dargestellt.

Alle grundwasserrelevanten Bauwerke werden zeitabhängig in die Modellrechnung berücksichtigt. Auf diese Weise ist eine feinere Darstellung der Situation im Kerngebiet erreichbar und ermöglicht die Beantwortung der Fragestellung des AG hinsichtlich der Auswirkungen des Baubestandes im Zusammenspiel mit den Neubauten auf das Grundwasserfließgeschehen.

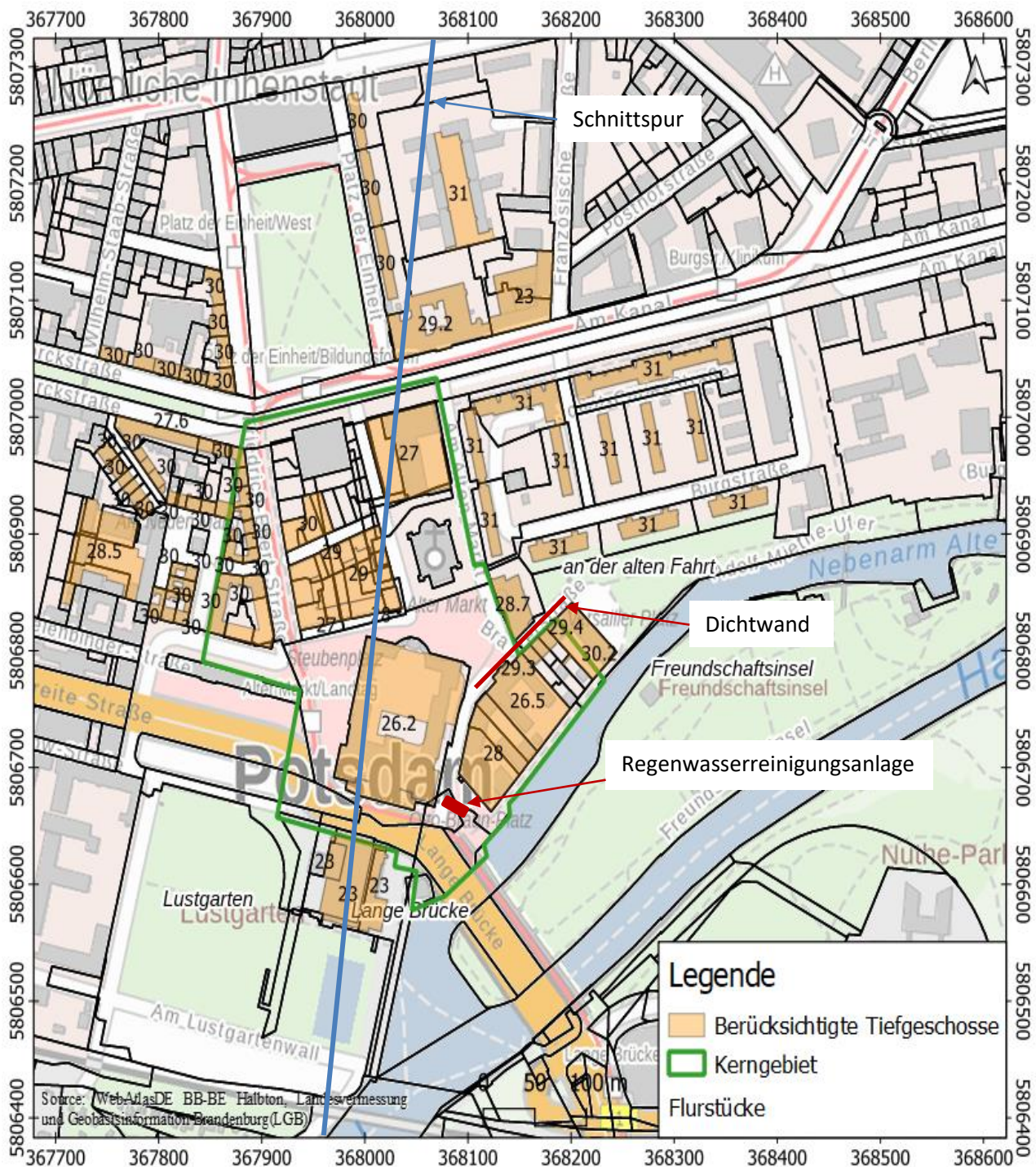


Abbildung 14: Umrisse und Einbindetiefen in + m NHN der im Modell berücksichtigten Kellergeschosse und Dichtwände.

Die modelltechnische Umsetzung der Tiefgeschosse erfolgt über die Entfernung der Modellelemente aus dem Strömungsraum und somit strömungsunwirksam. In Abbildung 15 ist ein Beispielschnitt dargestellt. Dieser zeigt die Umsetzung der Kellergeschosse im Modell für die Post, den Block V, den Block III, den Landtag und das Hotel Mercure sowie der Havel unter mittleren Grundwasserverhältnissen. Die Schnittspur ist der Abbildung 14 zu entnehmen. Die Darstellung beruht auf der theoretischen Lage des Wasserspiegels unter ungespannten Verhältnissen. Da es sich im Bereich des Areals „Staudenhof und Umfeld Bildungsforum“ um gespannte Grundwasserverhältnisse handelt, liegt die Grundwasserdruckfläche über der Kellersohle.

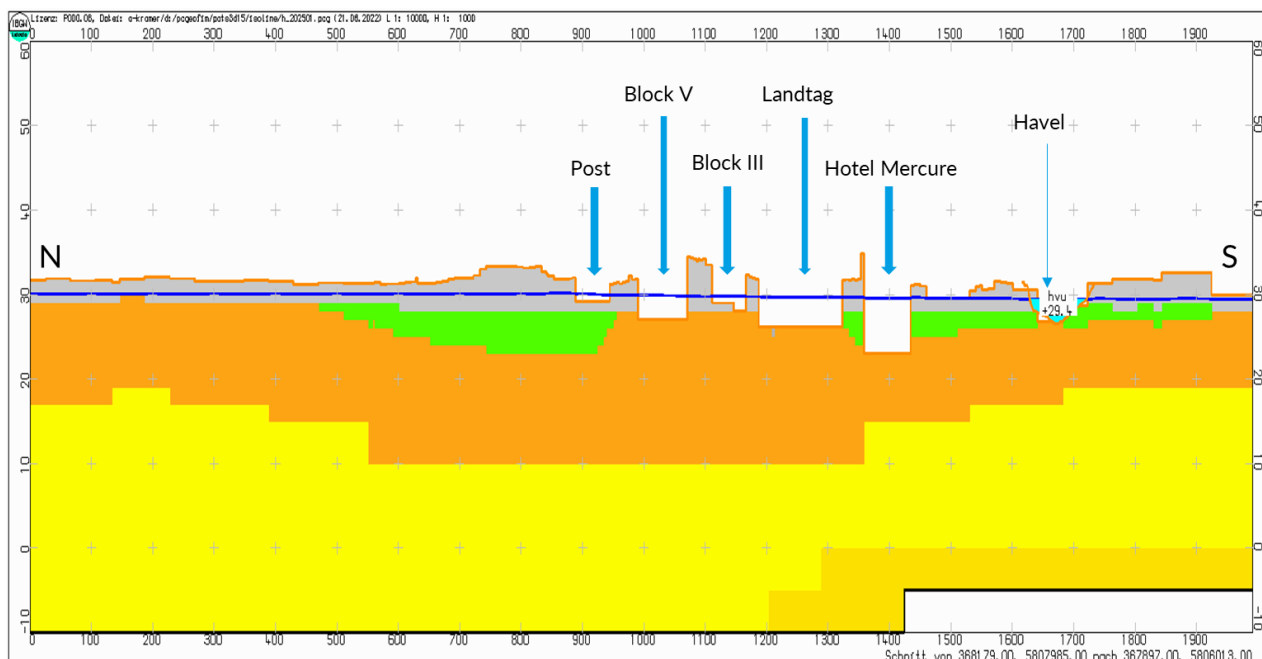


Abbildung 15: Schnitt des hydrogeologischen Strukturmodells mit der Erweiterung zum technologischen Modell unter mittleren Grundwasserverhältnissen.

Neben den Tiefgeschossen sind auch die hydrogeologischen Schichten im Schnitt abgebildet. Folgende Typen sind enthalten:

- Grau: Auffüllung
- Grün: Auelehm
- Orange: sandige Nachschüttung (Weichsel)
- Gelb: sandige Nachschüttung (Saale)

4.6 Modellkalibrierung

Die Modellkalibrierung/-validierung erfolgt auf Basis von gemessenen Wasserständen, im Zeitraum 01/2000 bis 01/2020 (siehe Abbildung 2).

Durch eine gezielte Anpassung der hydraulischen Durchlässigkeiten sowie Anbindung der Gewässer an den Grundwasserleiter anschließend die Modellkalibrierung. Als Kriterium dienen dazu die entsprechenden Messreihen der Grundwassermessstellen sowie der Havel am Pegel Potsdam und den Wasserständen des Heiligen Sees. Zudem wird die Gesamtwirkung der resultierenden Grundwassergleichen auf Plausibilität hinsichtlich Grundwasserdynamik geprüft.

Um die Anzahl der Grundwassermessstellen zu erhöhen und damit das Grundwasserströmungsmodell besser anpassen zu können, wurden zwei Pegel aus dem westlichen Rand in das Modellgebiet projiziert und ein virtueller Pegel im Nordwesten gesetzt. Damit wird eine Gesamtmenge von 10 Grundwassermessstellen erreicht, was die Kalibrierung unterstützt.

Die Kalibrierung erfolgte mit dem Modul PEST. PEST ist ein weitverbreitetes, international anerkanntes Werkzeug und verfolgt einen modellunabhängigen Ansatz. Dadurch wird mit feinen Variationen in mehreren Modellläufen eine automatische Annäherung an die im Modellgebiet vorliegenden Messwerte angetrieben (Doherty, 2010).

Die Parameteroptimierung wird mit 11662 Beobachtungswerten (Wasserstandsdaten) durchgeführt. Ein Maß für die Anpassungsqualität der berechneten Werte ist die Summe der quadratischen Abweichung zu den Beobachtungswerten. Die Bezeichnung dazu lautet ϕ .

Die Abbildung 16 zeigt den Verlauf des ϕ während der Parameteroptimierung. Hinter dem Optimierungsprozess stecken insgesamt 562 Modelldurchläufe. Damit konnte die Kalibrierung des GWM unter Zuhilfenahme des PEST-Moduls deutlich verbessert werden.

Im Anschluss der automatischen Kalibrierung die Ergebnisse geprüft und im Detailbereich manuell optimiert.

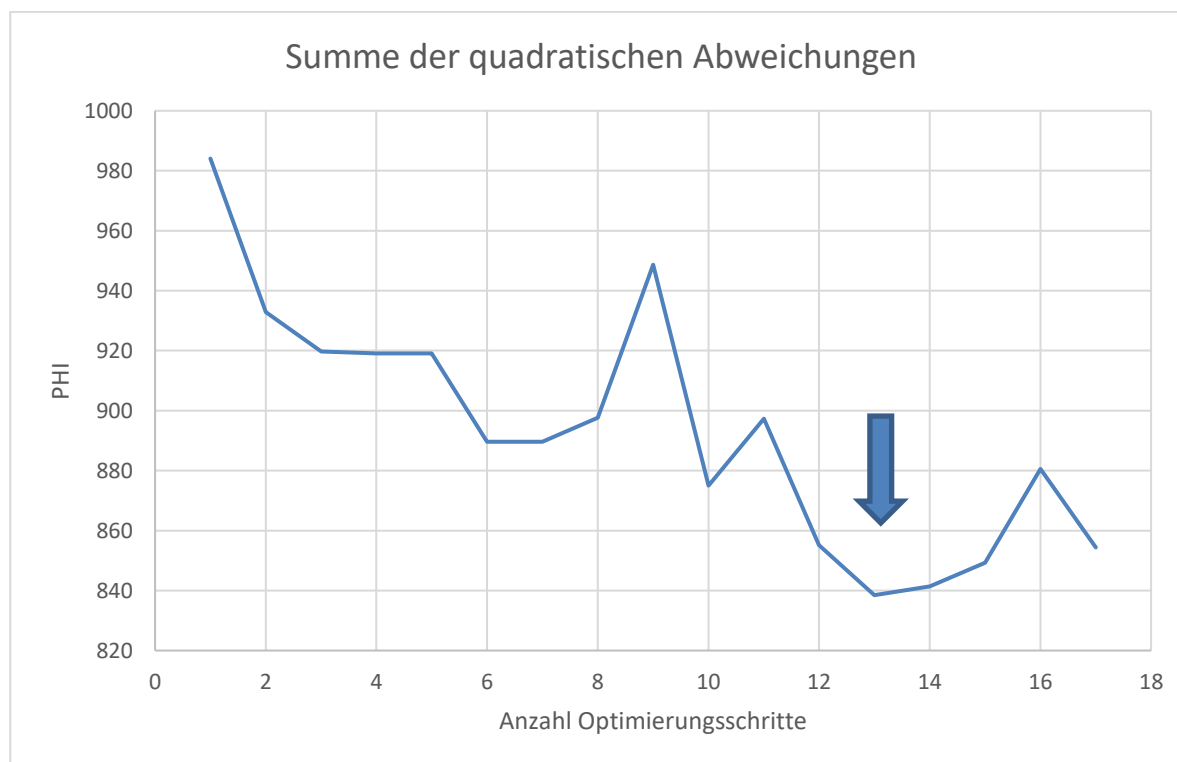


Abbildung 16: Verlauf der Summe der quadratischen Residuen während der Parameteroptimierung

4.7 Modellgüte

Zur Bewertung der Güte werden die berechneten Ganglinien (siehe Anlage 4) mit den gemessenen über die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (RMSE, Root Mean Squared Error) miteinander verglichen. Dabei handelt es sich um eine Aussage zur durchschnittlichen Abweichung zweier Datenreihen. Folgendermaßen setzt sich die Formel zusammen:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2}$$

mit n = Anzahl der Messwerte, y_j = Modellergebnisse, \hat{y}_j = Messwerte.

Der RMSE ist ein gängiges Bewertungskriterium, welches vor allem zur Anwendung kommt, wenn große Abweichungen reduziert werden sollen (Neill, 2018).

In dieser Ergebniszusammenstellung wird zum einen der Gesamtbereich aller Messwerte betrachtet, sowie die einzelne Grundwassermessstelle 36442206 im Kernbereich.

Die Ergebnisse der Berechnung des RMSE der Basisvariante wird in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: RMSE aller Messstellen und einzeln für den Pegel 36442206

	RMSE 2000 – 2020 je Pegel [m]
Gesamt	0,30
Pegel 36442206	0,14

Für den kompletten Zeitraum treten im gesamten Betrachtungsgebiet mittlere Fehler von 30 cm auf. Wird der Fokus auf das Kerngebiet gelegt, reduzieren sich die Unsicherheiten auf 14 cm im gesamten Zeitraum.

Das mit den Tiefbauten erweiterte Modell führt großräumig zu keiner und am Pegel 36442206 zu keiner merklichen Veränderung hinsichtlich der Modellgüte. Somit kann von einem ähnlichen Verhalten hinsichtlich der Unsicherheiten ausgegangen werden.

Mit Hilfe des kalibrierten Modells wurde ein Grundwassergleichenplan für den Zustand am 01.01.2020 erstellt (siehe Anlage 3). Damit können die Grundwasserverhältnisse im Untersuchungsgebiet dargestellt werden.

Die Grundwasserdynamik verhält sich im großen Maßstab wie die der Stichtagsmessung aus dem Jahr 2011. Das Wasser fließt ebenso von den Anhöhen im Nordwesten Richtung Havel. Damit erfolgt eine erste Plausibilisierung der Ergebnisse.

Eine konkrete Betrachtung der Anpassung kann ebenso über eine graphische Gegenüberstellung der Messwerte und der berechneten Grundwasserhöhen für die jeweiligen Pegel erfolgen. Abbildung 17 zeigt den Verlauf des Pegels 36442206 im Kernbereich bei der St. Nikolaikirche. Die Abbildung 18 zeigt den Verlauf der Ganglinien für den Heiligen See.

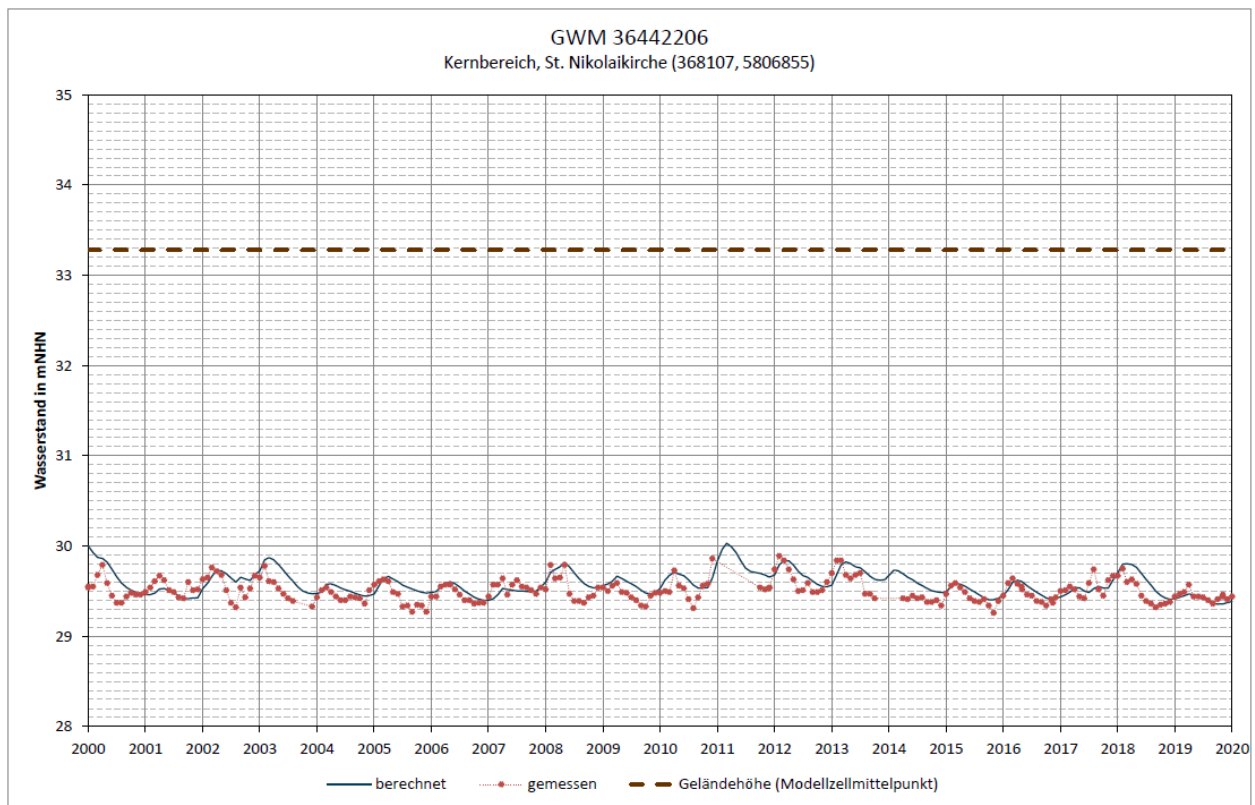


Abbildung 17: Ganglinien (gemessen und berechnet) für den Pegel 36442206

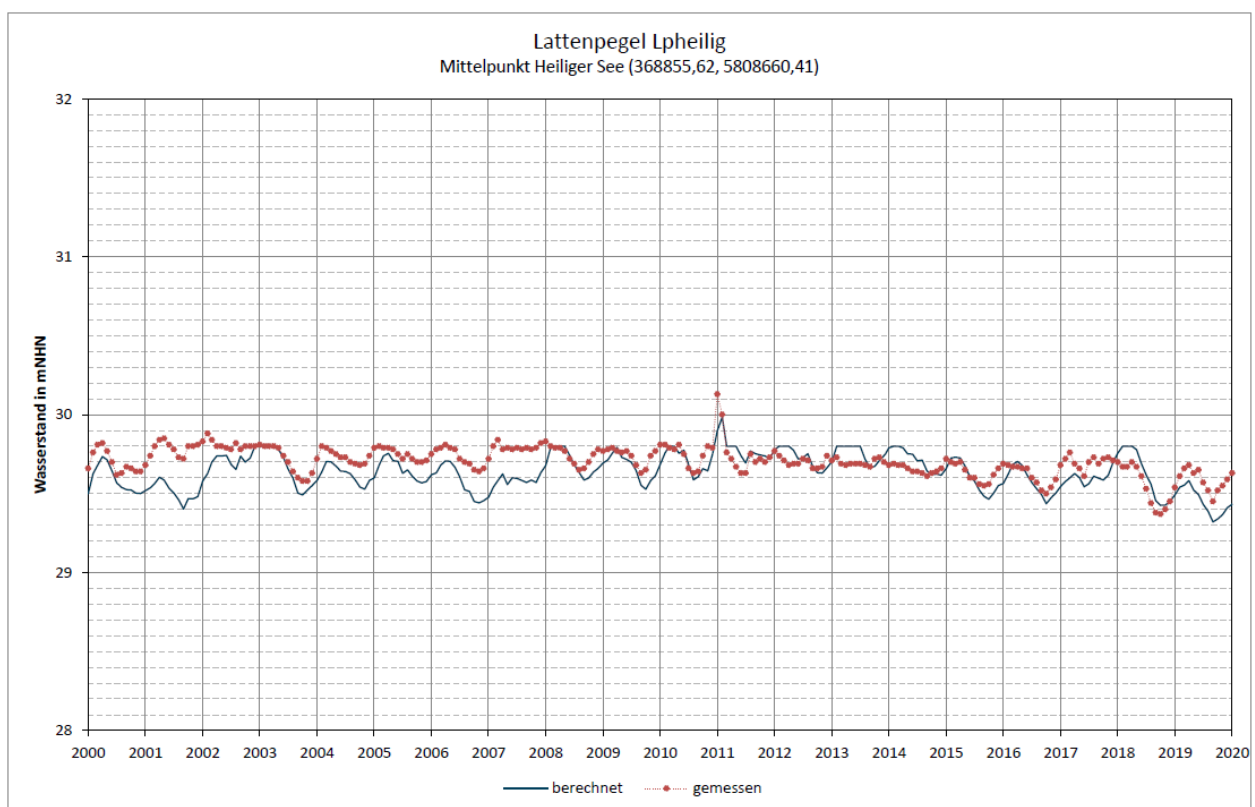


Abbildung 18: Ganglinien (gemessen und berechnet) für den Heiligen See

Der Ganglinienvergleich in Abbildung 17 zeigt, dass die beobachteten Grundwasserverhältnisse mit dem Grundwasserströmungsmodell sehr gut nachgebildet werden können. Sowohl die inner-jährlichen Schwankungen als auch die absoluten Höhen werden adäquat berechnet. Damit ist eine hohe Aussagekraft des Modells im Kernbereich gewährleistet.

Die Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten Werten des Heiligen Sees (Abbildung 18) liegen größtenteils unter 10 cm. Das spricht für eine sehr gute Anpassung des Modells an die tatsächlichen Gegebenheiten.

In Anlage 4 sind die Vergleiche aller Modellpegel aufgeführt.

5 Ergebnisse

5.1 Vergleich der berechneten Grundwasserverhältnisse

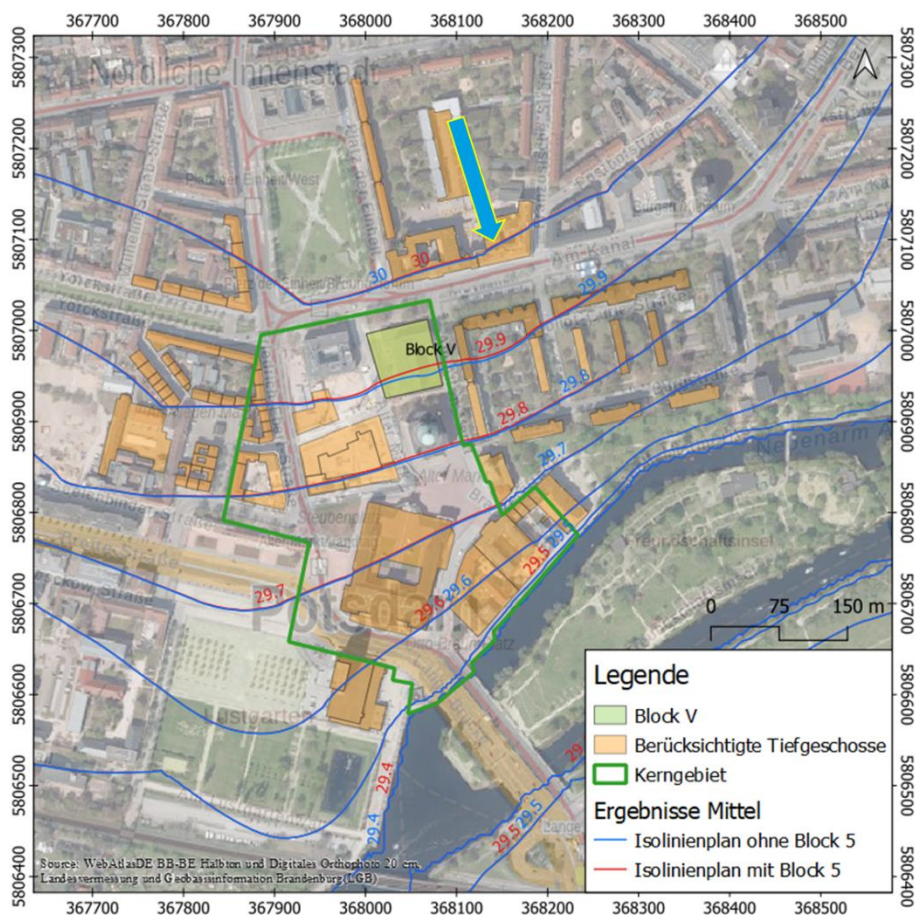
In den folgenden Darstellungen werden die Grundwasserverhältnisse der Modellvarianten mit und ohne Block V als Grundwassergleichen bzw. Ganglinien der Beobachtungspegeln verglichen. In der Prognoserechnung werden die wasserhaushaltlichen Verhältnisse der Zeitreihe 2000 bis 2022 angesetzt. Ziel ist es, die Hochwassersituation der Havel und im Grundwasserleiter adäquat abzubilden. Somit stellen die Zeitpunkte der abgebildeten Grundwasserganglinien keinen zeitlichen Realbezug dar.

In den folgenden Abbildungen werden die Grundwasserverhältnisse für folgende Gebietszustände:

- *Mittlere Grundwasserhältnisse mit/ohne Block V*
- *Hochwasserabfluss der Havel mit/ohne Block V*
- *Hohe Grundwasserstände nach Havelhochwasser mit/ohne Block V*

Variantenvergleich unter mittleren Verhältnissen

In Abbildung 19 sind die Modellergebnisse unter mittleren Verhältnissen dargestellt.



Eine Veränderung der Grundwasserverhältnisse ist nur unmittelbar im Bereich der geplanten Baumaßnahme zu erkennen. Die berechnete Hydrodifferenz liegt im Dezimeterbereich. Eine signifikante Beeinflussung konnte anhand der Modellrechnung nicht nachgewiesen werden.

Variantenvergleich unter Hochwasserverhältnissen

Für die Bewertung des Einflusses der Tiefgarage im Block V unter extremen Bedingungen wurde das Hochwasserereignis der Havel vom 20.01.2011 untersucht. In Abbildung 20 sind die Grundwassergleichen und die virtuellen Pegel dargestellt.

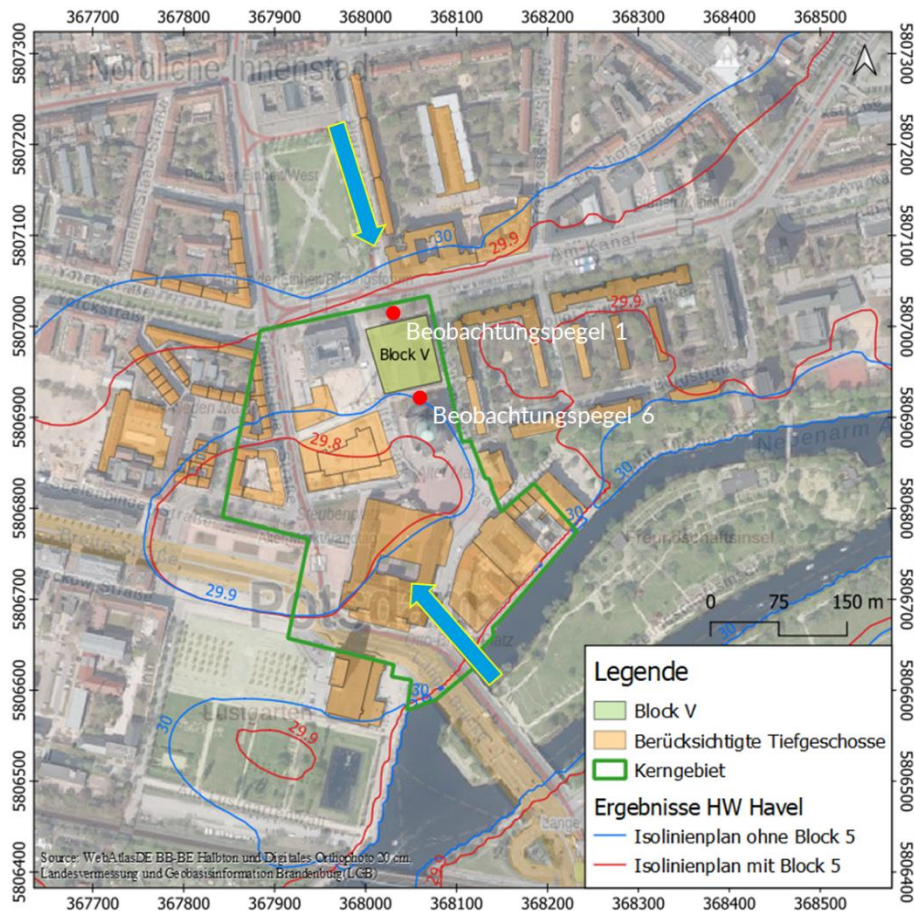


Abbildung 20: Vergleich GW-Verhältnisse mit Block V und ohne Block V während des HW-Ereignisses der Havel (GW-Fließrichtung: blau-gelber Pfeil).

Gut erkennbar ist die von der Havel induzierten Strömungsumkehr Richtung Alten Markt. Die Isolinien zeigen keinen signifikanten Grundwasseraufstau. Die Grundwassergleichen unter Berücksichtigung des Block V liegen geringfügig tiefer. Es lässt sich daraus schließen, dass der Eintrag aus der Havel im Hochwasserfall leicht verringert wird.

Deutlicher lässt sich die Grundwasserbeeinflussung im Ganglinienvergleich der virtuellen Pegel 1 und 6 ablesen (Abbildung 21). Für den Pegel 1 wird ersichtlich, dass am 20.01.2011 keine deutliche Differenz der Grundwasserstände vorzufinden ist. Laut Datenreihe liegen die Unterschiede im Zentimeterbereich. Damit kann von keiner nennenswerten Beeinflussung der Grundwasserverhältnisse gesprochen werden.

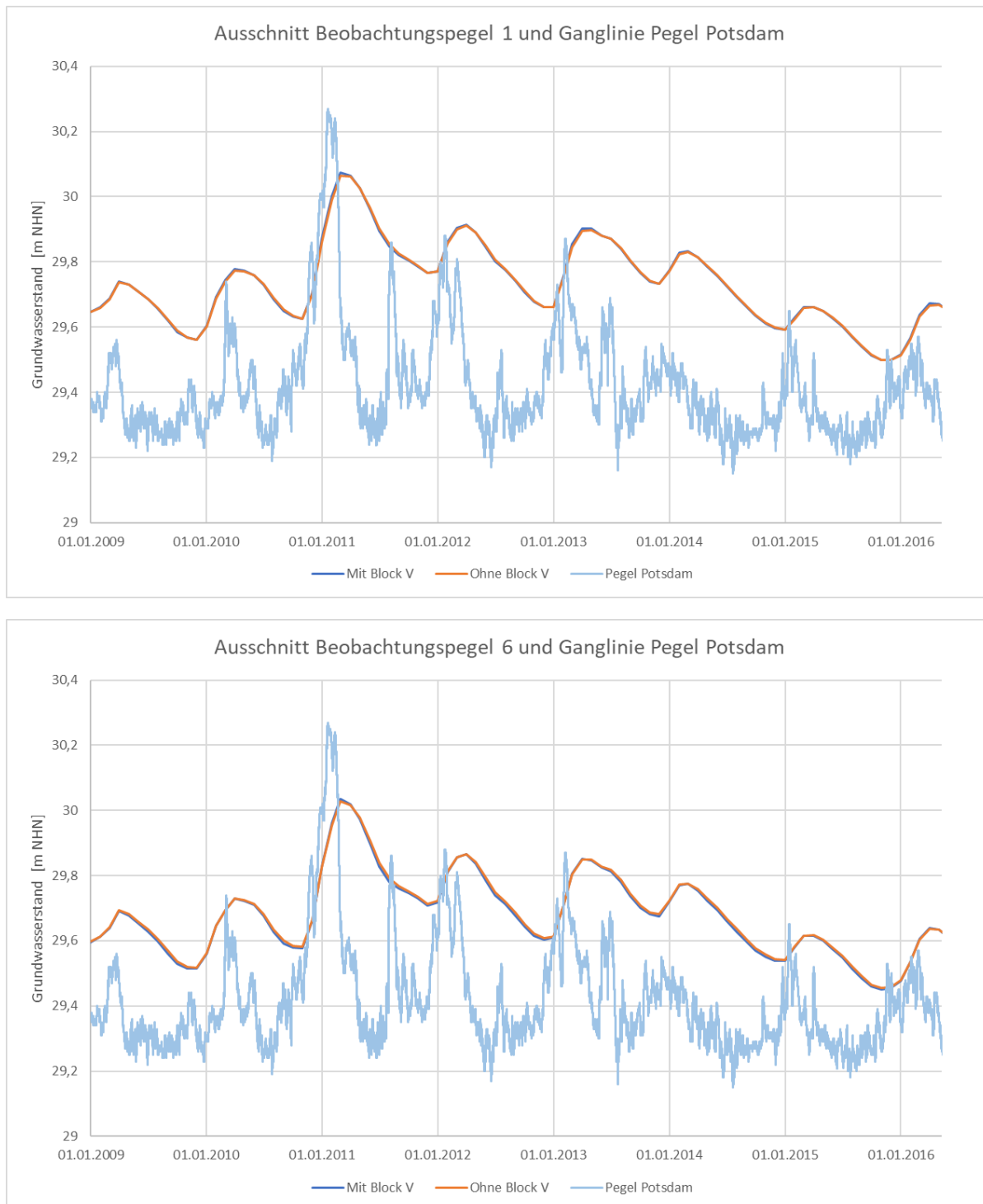


Abbildung 21: Vergleich der Ganglinien am Beobachtungspegel 1 und 6 mit und ohne Block V mit Relation zur Hochwasserwelle der Havel.

Darüber hinaus wird der zeitliche Versatz zwischen dem Hochwasser in der Havel und im Grundwasser verdeutlicht. Die Grundwasserströmung im Bereich des Areals „Staudenhof und Umfeld Bildungsforum“ wird sowohl durch die Wasserführung der Havel als auch durch die Dynamik des zuströmenden Grundwassers bestimmt. Somit kann es gegenüber der Hochwasserwelle in der Havel zu einem zeitlichen Versatz des Grundwassermaximums kommen. Aus diesem Grund lässt

sich für das Grundwasser aus den berechneten Ganglinien das Maximum für den 20.02.2011 ableiten (vgl. Abbildung 21).

In Abbildung 22 sind die Grundwassergleichen während des zeitversetzten Grundwassermaximums dargestellt. In dieser Abbildung ist zudem deutlich zu erkennen, dass die Strömungsverhältnisse durch den Block V kaum beeinflusst werden.

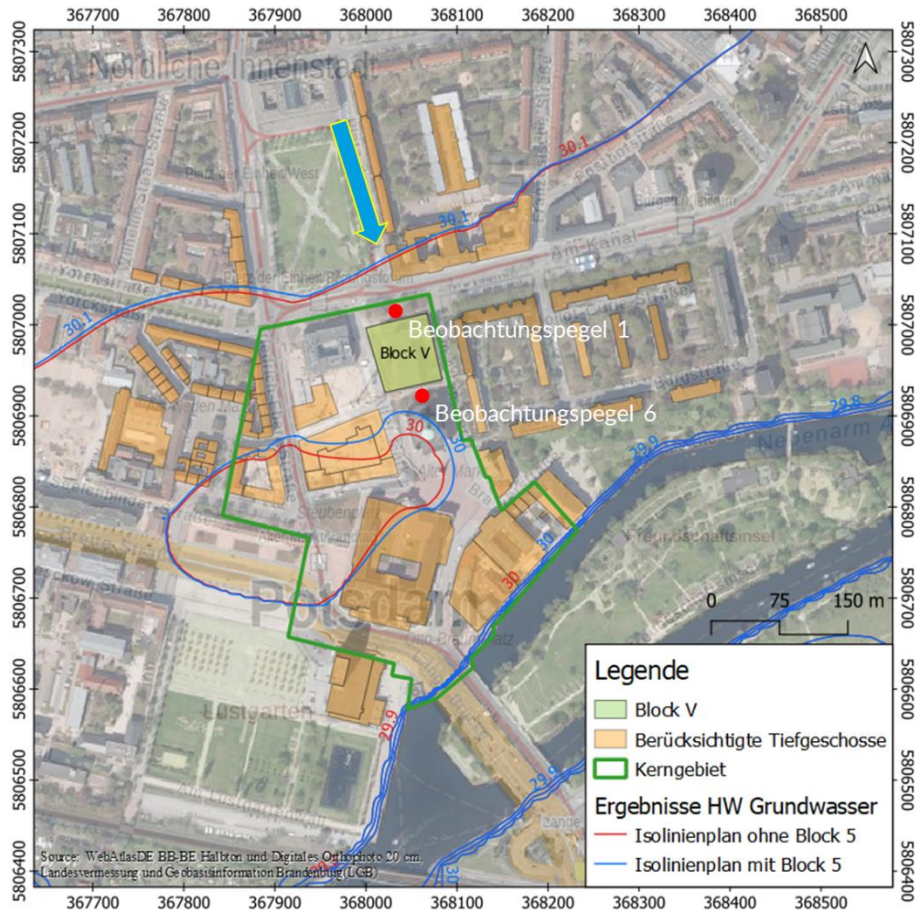


Abbildung 22: Vergleich GW-Verhältnisse mit Block V und ohne Block V während des Hochwassers im Grundwasser.

5.2 Grundwasserabsenkung Block 5

Aus gutachterlicher Sicht ergab sich während des Bearbeitungsprozesses die Fragestellung, wie weitreichend eine Grundwasserhaltung während der Bauphase des Block V wirkt.

Um dafür einen Nachweis zu führen, wurde eine zusätzliche Modellvariante mit einer geschlossenen Wasserhaltung ohne zusätzlicher hydraulischer Sicherung der Baugrube betrachtet. Folgende Kennzahlen beinhaltet die Betrachtung:

- Baugrubenhaltung bei mittleren Grundwasserverhältnissen
- Absenkziel 1 m unter Baugrubensohle (+26 m NHN)
- 5 Vertikalfilterbrunnen
- $Q_{\text{gesamt}} = 45 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow 9 \text{ m}^3/\text{h je Brunnen}$

Unter diesen Verhältnissen bildet sich ein Absenktichter mit einem Wirkradius von über 200 m aus (Abbildung 23). Bei einer angenommenen Laufzeit von ca. 200d ist eine Gesamtwasserhebung von 215.000 m³ Grundwasser notwendig.

Es wird darauf hingewiesen, dass in der weiteren Planung dieser bauzeitliche Wirkradius beachtet werden sollte, um entsprechende Maßnahmen zur Verringerung der Absenkungsreichweite treffen zu können.

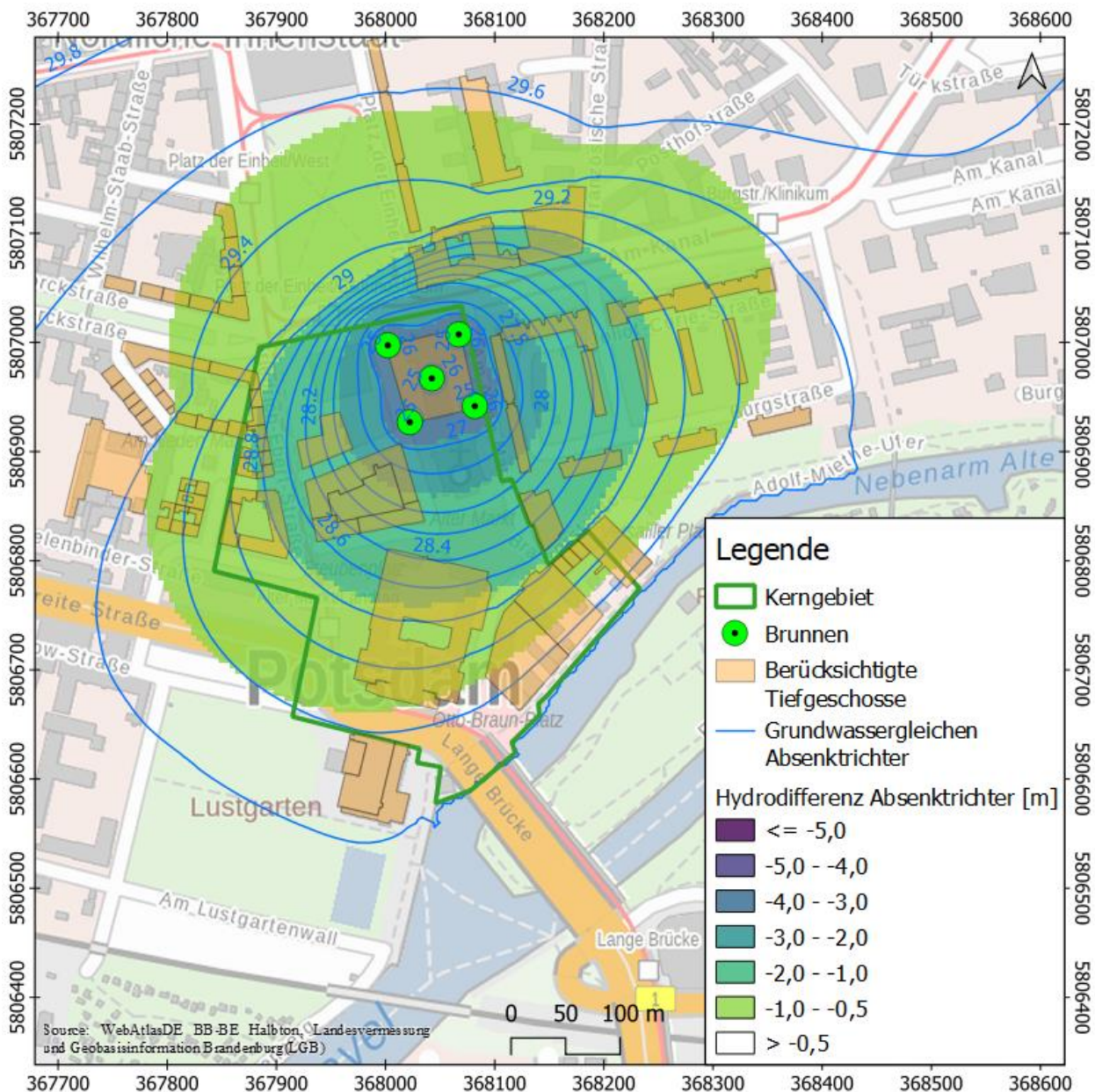


Abbildung 23: Absenktichter einer Wasserhaltung für die Bauphase des Blockes V mit einem Absenkziel von +26 m NHN.



6 Zusammenfassung

Im Rahmen der geplanten städtebaulichen Entwicklung des Areals „Staudenhof und Umfeld Bildungsforum“ im Zentrum Potsdams erfolgt für den geplanten Bauabschnitt Block V eine hydrogeologische und hydrodynamische Betrachtung. Die Untersuchung der hydraulischen Wirkung der mit der Baumaßnahme verbundenen Errichtung einer Tiefgarage erfolgt hierbei modellgestützt.

Die Erstellung des Grundwasserströmungsmodells wurde mit dem Programmsystem PCGEOFIM realisiert. Das Grundwasserströmungsmodell beschreibt die großräumigen Grundwasserströmungsverhältnisse fokussiert auf den im Bereich des Areals „Staudenhof und Umfeld Bildungsforum“. Die umfangreichen Datenquellen der Sanierungsträger Potsdam GmbH, der Stadt Potsdam und des Land Brandenburgs liefern die hydrologischen, hydrogeologischen sowie bautechnische Standortinformationen. Diese Datenbasis wurde der IBGW GmbH uneingeschränkt zur Verfügung gestellt.

Durch die Einführung von Modelllupen ist das Grundraster von 80x80 m Kantenlänge auf 5 m im Fokusbereich verfeinert worden. Aufgrund der variablen Mächtigkeiten insbesondere im Bereich des Areals „Staudenhof und Umfeld Bildungsforum“ wird das Grundwassermodell in der vertikalen Struktur deutlich verfeinert. Somit ist für den Fokusbereich eine hohe Modellauflösung gegeben.

Das Areal „Staudenhof und Umfeld Bildungsforum“ wird in Form eines technologische Teilmodells in des Grundwassermodell integriert. Hier finden Tiefgaragen, Spundwände und Bohrpfahlwände nach der Lage und dem Zeitpunkt der Errichtung Berücksichtigung. Für den geplanten Bauabschnitt Block V erfolgt eine Variantenbetrachtung unter Berücksichtigung verschiedener Abflussverhältnisse der Havel.

In den Varianten wird vor allem der Aspekt berücksichtigt, dass der Hochwasserscheitelpunkt im Grundwasser zeitversetzt zum Hochwasser in der Havel auftritt.

Die Berechnungsergebnisse weisen eine hohe Anpassungsgüte auf. Im Fokusbereich beträgt die mittlere Fehlerabweichung 14 cm. Die Reaktion des technologischen Modells auf das Grundwassergeschehen mit und ohne Block V konnte für mittlere Verhältnisse und für ein reales Hochwasserverhältnis unter Berücksichtigung der verschiedenen Phasen der Hochwasserwelle bestimmt und bewertet werden. Zu diesem Zweck wurden im Anstrom und im Abstrom des Blocks V Grundwassermessstellen im Modell eingebaut. Die entsprechenden Ganglinien der Messstellen legen nahe, dass die Beeinflussung des Grundwasserregimes im Hochwasserfall bis zu 1 cm direkt am Gebäuderand ausfallen. Unter mittleren Verhältnissen ist die Änderung der Grundwasserhöhe noch geringer. Damit liegt die Hydrodifferenz deutlich unter der natürlichen Schwankung des Grundwasserspiegels. Auf Basis dieser Ergebnisse wird somit keine relevante Veränderung der Grundwasserverhältnisse bei einem Einbau einer zweistöckigen Tiefgarage mit einer Basis von +27 m NHN erwartet.

7 Ausblick

Für die geplante Baumaßnahme „Block V“ wurde in einer Variantenbetrachtung eine baubedingten klassische Grundwasserabsenkung mit 5 Vertikalfilterbrunnen betrachtet. Die Baugrube wurde in dieser Betrachtung nicht durch Dichtwände gesichert. Das Absenkziel lag 1 m unterhalb der geplanten Baugrubensohle bei +26 m NHN.

Es konnte in dieser Modellvariante ein bis zu 200 m großer Wirkradius ermittelt werden. Dieses Ergebnis legt nahe, dass im weiteren Planungsverlauf der Grundwasserabsenkung während der Bauphase ein Konzept zugrunde gelegt wird, welches negative Auswirkungen auf Untergrund und Gebäude im Umfeld ausschließt.

Mit dem im Zuge dieser Arbeit erstellten Grundwasserströmungsmodell können verschiedene Sicherungsmaßnahmen bei der Grundwasserhaltung hinsichtlich ihrer Wirkung und Effizienz bewertet werden. Zudem können Prognosen der zu hebenden Gesamtwassermenge für die Genehmigungsverfahren erstellt werden.

Des Weiteren wird eine Bestandsaufnahme der vorhandenen Schäden im Umfeld und ein Konzept zur Beweissicherung von eventuellen Schäden während der Bauphase empfohlen.