

Bauhaus-Universität Weimar

Fakultät Bauingenieurwesen

Weiterbildendes Studium »Wasser und Umwelt«

Masterarbeit

Reg.-Nr. WU - MA 316 / 20

**Beitrag zum Einfluss bogenförmiger Deichlinien
mit innenliegenden vollkommenen Dichtungssystemen
auf die Grundwasserströmung**

Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Schloth

geb. am 16.12.1981 in Burg

Matrikelnummer: 117183

Erstprüfer: Dipl.-Ing. Roy Holzhey, Bauhaus-Universität Weimar

Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Turczynski, HS Magdeburg-Stendal

Abgabedatum: 02.07.2021

(gekürzte Fassung vom 01.02.2022)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Tabellenverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Nomenklatur.....	XII
Abkürzungen.....	XIX
Kurzzusammenfassung.....	XXI
Abstract.....	XXI
1 Einführung.....	1
1.1 Veranlassung.....	1
1.2 Technische Rahmenbedingungen.....	3
1.3 Rechtliche Rahmenbedingungen.....	5
1.4 Zielsetzung.....	9
2 Vorbetrachtung.....	11
2.1 Hydrologie und Hydrogeologie.....	11
2.2 Grundwasser und Grundwasserströmung.....	12
2.2.1 Grundwasser und Grundwasserleiter.....	12
2.2.2 Grundwasserströmung.....	17
2.2.3 Bestimmung von hydraulischem Gefälle i und Fließrichtung α	20
2.3 Oberflächengewässer (Fließgewässer).....	23
2.3.1 Entstehung und Gestaltungsvorgänge.....	23
2.3.2 Abfluss im Gewässersystem.....	25
2.4 Interaktion zwischen Fließgewässern und Grundwasser.....	28
2.4.1 Niedrige und mittlere Wasserstände.....	29
2.4.2 Hohe Wasserstände.....	30
2.5 Innenliegende Dichtungssysteme im Deichbau.....	31
2.5.1 Wirkungsweise und Anforderungen an die Dichtungssysteme.....	31

2.5.2	Überblick der verschiedenen innenliegenden Dichtungssysteme	33
2.5.3	Abschätzung des Wirkungsgrades von Dichtungssystemen.....	36
2.6	Analytische Berechnungsverfahren.....	38
2.6.1	Überblick der vorhandenen Berechnungsverfahren.....	39
2.6.2	Verfahren von Schneider für langgestreckte rechteckige Bauwerke.....	40
2.6.3	Verfahren von Schneider für Bauwerke mit elliptischem Grundriss	43
3	Auswertung des verzeichneten Flussverlaufes.....	46
3.1	Der Rhein.....	46
3.1.1	Flussgebietseinheit Rhein	46
3.1.2	Der Rhein in Nordrhein-Westfalen.....	47
3.2	Auswertung von Kartenmaterial	49
3.2.1	Empirische und mathematische Grundlagen.....	49
3.2.2	Kartenmaterial und Auswertungsmethode.....	52
3.3	Statistische Analyse der Messwerte und Bewertung	55
3.3.1	Verhältnis von Krümmungsradius zur Flussbreite (R/B)	55
3.3.2	Verhältnis von Radius zur Sehne (r/s).....	61
3.3.3	Korrelation zwischen R/B und r/s	65
3.4	Festlegung möglicher Bogenformen.....	67
4	Numerische Untersuchungen	72
4.1	Grundlagen	72
4.1.1	Strömungsanalyse	72
4.1.2	Aspekte der Modell- und Verfahrensauswahl	79
4.1.3	Verwendetes Programmsystem	83
4.2	Berechnungsmodell	85
4.2.1	Modellgeometrie	85
4.2.2	Diskretisierung.....	89
4.2.3	Strömungsgleichung	93
4.2.4	Rand- und Anfangsbedingungen.....	94

4.2.5	Modellaufbau in GGU-2D-SSFLOW.....	96
4.2.6	Kalibrierung/Validierung	97
4.3	Parameterstudie.....	99
4.3.1	Übersicht möglicher Einflussfaktoren	99
4.3.2	Verhältnis Radius/Sehne (Bogenform r/s)	102
4.3.3	Verhältnis GW-Stand (Modellmitte)/Tiefe Grundwasserleiter (H/T).....	105
4.3.4	Verhältnis Dicke Dichtungssystem/Tiefe Grundwasserleiter (d/T)	108
4.3.5	Verhältnis der Durchlässigkeitsbeiwerte Baugrund/Dichtwand (k_1/k_2)...	111
4.3.6	Hydraulisches Gefälle (i)	114
4.3.7	Strömungsrichtung (Anströmwinkel ϑ).....	117
5	Ergebnisse und Diskussion	121
5.1	Bewertung der Ergebnisse und Ableitung eines Berechnungsansatzes	121
5.1.1	Maßgebende Einflussfaktoren.....	121
5.1.2	Einfluss der Dicke des Dichtungssystems.....	123
5.1.3	Vorschlag für einen Berechnungsansatz.....	126
5.1.4	Verlauf der Grundwasserbeeinflussung (Aufstau-/Absenkungskurven)	131
5.2	Anwendungsbeispiele und Diskussion	132
5.2.1	Anwendung des vorgeschlagenen Berechnungsansatzes.....	132
5.2.2	Anwendung der Diagramme (Aufstau-/Absenkungskurven)	139
6	Zusammenfassung.....	143
	Quellenverzeichnis.....	147
	Selbstständigkeitserklärung.....	156
	Übersicht Dokumentation (Anhang).....	157
	Anhang A – Informationen zum Bauen im Grundwasser	158
	Anhang B – „Flusskurven des Rheins in NRW“ (Urliste).....	162
	Anhang C – Beschreibung des Kolmogorov-Smirnov Test.....	164
	Anhang D – Beschreibung der Schätzung der Parametergüte	167
	Anhang E – Beschreibung der Güteschätzung der Fraktile	170

Anhang F – Ergebnisse der durchgeführten Prüfverfahren (R/B).....	173
Anhang G – Modifikation der Urliste zur Bestimmung von r/s.....	175
Anhang H – Ergebnisse der durchgeführten Prüfverfahren (r/s).....	176
Anhang I – Bestimmung empirischer Korrelationskoeffizienten	178
Anhang J – Berechnungsmodell Nr. 1 (r/s = 0,50).....	179
Anhang K – Berechnungsmodell Nr. 2 (r/s = 0,55)	182
Anhang L – Berechnungsmodell Nr. 3 (r/s = 0,65).....	185
Anhang M – Berechnungsmodell Nr. 4 (r/s = 1,00).....	188
Anhang N – Berechnungsmodell Nr. 5 (r/s = 2,00)	191
Anhang O – Modellaufbau und Diskretisierung am Modell Nr. 1.....	193
Anhang P – Modell „DW1000“ zur Kalibrierung/Validierung.....	201
Anhang Q – Formfaktoren $f_{(r/s)}$ sowie Faktoren $f_{(H/T)}$, $f_{(d/T)}$ und $f_{(k1/k2)}$	203
Anhang R – Aufstau- bzw. Absenkungskurven (Bogenform 1 - 5).....	213
Anhang S – Beispiel 1 - Berechnungsmodell Nr. 6 (r/s = 0,58).....	218
Anhang T – Beispiel 2 - Berechnungsmodell Nr. 7 (r/s = 0,87).....	221
Anhang U – Beispiel 3 - Berechnungsmodell Nr. 8 (r/s = 2,63).....	224
Anhang V – Detaillierte Berechnungen zum Beispiel 1	226
Anhang W – Detaillierte Berechnungen zum Beispiel 2.....	231
Anhang X – Detaillierte Berechnungen zum Beispiel 3.....	235
Anhang Y – Anwendung Aufstau-/Absenkungskurven (Bsp. 1)	243
Anhang Z – Anwendung Aufstau-/Absenkungskurven (Bsp. 2)	248

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1: Auszug Anlage 1 (UVPG): Liste „UVP-pflichtige Vorhaben“ (Quelle: Peters et al., 2019).....	7
Tab. 2-1: Größenordnungen für Gesamtporenanteil, effektiven Porenanteil und Durchlässigkeitsbeiwert verschiedener Lockergesteine (Quelle: Hölting und Coldewey, 2013).....	15
Tab. 2-2: Deichsanierung Duisburg-Homberg - Hydraulische Gefälle i (Quelle: Schloth, 2020)	23
Tab. 2-3: Richtwerte der Systemdicke d und der Permittivität ψ für ausgewählte Dichtwandsysteme (Quelle: DWA, 2012a)	35
Tab. 2-4: Parameter zur Abschätzung des Wirkungsgrades von Dichtungssystemen für ausgewählte Hochwasserschutzkonstruktionen	37
Tab. 3-1: Berechnungsansätze zur Ermittlung der wesentlichen Elemente des Kreisbogens (Quelle: Baumann, 1999)	52
Tab. 3-2: Auflistung der verwendeten statistischen Kenngrößen (Quelle: Plate, 1993).....	58
Tab. 3-3: Auflistung der statistischen Kenngrößen und Berechnungsergebnisse für r/s	63
Tab. 3-4: Festlegung der Bogenformen für die numerischen Untersuchungen	71
Tab. 4-1: Festlegung der Modellgeometrie der einzelnen Bogenformen für die numerischen Untersuchungen	89
Tab. 5-1: Ersatzbauteildicken d_{ers} für einige Spundwandprofile	125
Tab. 5-2: Formfaktoren $f_y(r/s)$ und $f_x(r/s)$ bei konvexer und konkaver Anströmung..	128
Tab. 5-3: Faktoren $f_{y,(H/T)} = f_{x,(H/T)}$ bei konvexer = konkaver Anströmung.....	128
Tab. 5-4: Faktoren $f_{y,(d/T)} = f_{x,(d/T)}$ bei konvexer = konkaver Anströmung	129
Tab. 5-5: Faktoren $f_{y,(k1/k2)}$ bei konvexer = konkaver Anströmung.....	130
Tab. 5-6: Faktoren $f_{x,(k1/k2)}$ bei konvexer = konkaver Anströmung.....	130
Tab. 5-7: Maßgebende Parameter der gewählten Anwendungsbeispiele	134
Tab. 5-8: Vergleich der Berechnungsergebnisse der Beispiele 1 bis 3 für den Aufstau - $\Delta h_{s,um}$	135

Tab. 5-9: Vergleich der Berechnungsergebnisse der Beispiele 1 bis 3 für die Absenkung + $\Delta h_{g,um}$	136
--	-----

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Duisburg-Laar, Ausschnitt Luftbild 1972 [ohne Maßstab] (Datenquelle: WebOffice Stadt Duisburg, 2020).....	1
Abb. 1-2: Entstehung des Querprofils des Rheindeiches in Duisburg-Laar im Verlauf der stufenweisen Deicherhöhung (Quelle: WBD, n. d.)	2
Abb. 1-3: Deichprofil Rheindeich Nordrhein-Westfalen, StUA Krefeld (Quelle: DWA-M 507-1, 2011)	2
Abb. 1-4: Darstellung eines Deichprofils: (a) Ausgangszustand und (b) Vorschlag für angemessene Ertüchtigung (Quelle: Schneider et al., 1997).....	4
Abb. 2-1: Zusammenhänge und Wechselwirkungen der einzelnen Wissensgebiete....	11
Abb. 2-2: Arten der Grundwasserleiter (Quelle: Hölting und Coldewey, 2013).....	12
Abb. 2-3: Grundwasseroberflächen in freien (1), gespannten (2) und artesisch gespannten (3) Grundwasserleitern (Abgewandelt von: Hölting und Coldewey, 2013).....	13
Abb. 2-4: (a) Phasen im Lockergestein und (b) Durchlässigkeitsbeiwert (Abgewandelt von: Hölting und Coldewey, 2013)	13
Abb. 2-5: Grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Durchlässigkeit und Richtung (Quelle: Hölting und Coldewey, 2013).....	16
Abb. 2-6: Gültigkeitsgrenze des Darcyschen Gesetzes nach Sichardt (Quelle: Herth und Arndts, 1995)	19
Abb. 2-7: Konstruktion einer Grundwassergleiche in einem hydrologischen Dreieck (Quelle: Reiss und Harnischmacher, 2016).....	20
Abb. 2-8: Analytische Bestimmung von hydraulischem Gefälle und Strömungsrichtung (Quelle: Chiang et al., 1996)	22
Abb. 2-9: Einflüsse auf die Gerinneform von Fließgewässern (Abgewandelt von: Schröder und Römisch, 2001).....	24
Abb. 2-10: Regellängsprofil und Regelgrundriss, ohne seitliche Zuläufe (Abgewandelt von: Schröder und Römisch, 2001).....	25
Abb. 2-11: Qualitative Darstellung einer Abflusskurve $Q(h)$ eines allgemeinen Querschnitts mit gleichförmiger Gerinneströmung (Quelle: Jirka und Lang, 2009)	26

Abb. 2-12: Exemplarische Abflussdauerlinie mit einigen hydrologischen Kennwerten sowie der Ganglinie eines Jahres (Quelle: Giesecke et al., 2014).....	27
Abb. 2-13: Prinzipskizze eines Flusslängsschnittes zur Darstellung der Veränderungen von Energiehöhengefälle und Sohlenhöhe beim Durchgang einer Hochwasserwelle (Quelle: Schröder und Römisch, 2001).....	28
Abb. 2-14: Systemskizze eines flussnahen Grundwasserleiters und Interaktionsprozesse der Wasserbewegung (Quelle: Becker, 2011)	29
Abb. 2-15: Systemskizze eines flussnahen Grundwasserleiters mit Hochwasserschutzanlage und Interaktionsprozesse der Wasserbewegung bei hohen Wasserständen (Abgewandelt von: Becker, 2011)	31
Abb. 2-16: Verlauf von Sickerlinien in einem Deich mit Innendichtung bei unterschiedlichen Verhältnissen $k_{\text{Deich}}/k_{\text{Dichtung}}$ (Quelle: Haselsteiner, 2007).32	
Abb. 2-17: Aufbau von Dichtwandssystemen (Quelle: Koch, 2018).....	34
Abb. 2-18: Wirkungsgrad eines homogenen Dichtwandsystems (Abgewandelt von: Brauns, 1978)	38
Abb. 2-19: (a) Strömungskomponenten und (b) Einflussgrößen bei ausschließlicher Umströmung eines Bauwerkes nach Schneider (1981) (Abgewandelt von: Könemann, 1995)	41
Abb. 2-20: Deichsanierung Duisburg-Homberg: Dichtwandabschnitt [$L=2T=900\text{ m}/i=0,00053/\vartheta=10^\circ$] am ehemaligen Wasserwerksgelände - Aufstau und Absenkung [m] bei niedrigem Grundwasserstand (NGW) (Abgewandelt von: Schloth, 2020).....	43
Abb. 2-21: Anströmung eines Bauwerkes mit elliptischem Grundriss (Abgewandelt von: Schneider, 1995).....	44
Abb. 3-1: Übersichtskarte der Flussgebietseinheit Rhein (Quelle: MULNV, 2016).....	46
Abb. 3-2: Schematische Darstellung des Rheinverlaufs (Quelle: BfG, 2020).....	48
Abb. 3-3: Zusammenhänge und Begriffe zum Mäander (Quelle: Malcherek, 2019).....	49
Abb. 3-4: Vereinfachter Flussverlauf mit Geraden und Kreisbögen (Quelle: Baumann, 1999)	51
Abb. 3-5: Mathematische Zusammenhänge des Kreisbogens (Quelle: Baumann, 1999)	51
Abb. 3-6: Auswertung des Flussverlaufes im CAD mittels Kreisanpassung (Abgewandelt von: Geobasis NRW, 2018 und LANUV NRW, 2010).....	53

Abb. 3-7: Auswertung des Flussverlaufes im CAD - Kreisbogen (Abgewandelt von: Geobasis NRW, 2018 und LANUV NRW, 2010)	54
Abb. 3-8: Arbeitstabelle zur statistischen Analyse der R/B-Werte (Abgewandelt von: Plate, 1993)	56
Abb. 3-9: Verteilung der relativen Häufigkeiten der R/B-Werte gemäß der Stichprobe in Abbildung 3-8 (Abgewandelt von: Plate, 1993)	57
Abb. 3-10: Arbeitstabelle zur statistischen Analyse der r/s-Werte (Abgewandelt von: Plate, 1993)	62
Abb. 3-11: Verteilung der relativen Häufigkeiten der r/s-Werte gemäß der Stichprobe in Abbildung 3-10 (Abgewandelt von: Plate, 1993)	64
Abb. 3-12: Darstellung der Korrelation zwischen den Werten R/B und r/s	67
Abb. 3-13: Flusskurve mit Hochwasserschutzanlagen am inneren und äußeren Ufer (Abgewandelt von: Jirka und Lang, 2009)	68
Abb. 3-14: Darstellung der Wertepaare s und r/s zur Festlegung der möglichen Bogenformen	69
Abb. 3-15: Mögliche Bogenformen (Kreisbögen mit s = 700 bis 2.100 m und r/s = 0,5 bis 2,0)	70
Abb. 4-1: Linien gleicher Potenziale und Stromlinien (Quelle: Mull und Holländer, 2002)	77
Abb. 4-2: Ein-, zwei- und dreidimensionale Strömung im Rechteckkanal (Quelle: DWA, 2019)	80
Abb. 4-3: Qualitative Darstellung der Genauigkeit und Flexibilität von numerischen Lösungsmethoden (Quelle: Oertel et al., 2009)	81
Abb. 4-4: Berechnungsmodell in der Draufsicht und im Schnitt A-A mit Einflussfaktoren (Abgewandelt von: Ernst, 1999)	86
Abb. 4-5: Darstellung der gewählten Diskretisierung der Berechnungsmodelle in Form von mittlerer Fläche eines Dreieckselementes in Zuordnung zum geometrischen Verhältnis h_p/s	92
Abb. 4-6: Schematische Darstellung zur Berechnung der Transmissivitäten im Programm GGU-2D-SSFLOW (Quelle: Buß, 2019)	93
Abb. 4-7: Berechnungsmodell „DW1000“ - Vergleich von analytischer und numerischer Lösung	98

Abb. 4-8: Einfluss der Bogenform r/s auf die Grundwasserverhältnisse (konvexe Anströmung)	102
Abb. 4-9: Einfluss der Bogenform r/s auf die Grundwasserverhältnisse (konkave Anströmung)	103
Abb. 4-10: Einfluss der Bogenform r/s auf die Grundwasserverhältnisse (Anströmung x-Achse)	104
Abb. 4-11: Einfluss des Verhältnis H/T auf die Grundwasserverhältnisse (konvexe Anströmung)	106
Abb. 4-12: Einfluss des Verhältnis H/T auf die Grundwasserverhältnisse (konkave Anströmung)	107
Abb. 4-13: Einfluss des Verhältnis H/T auf die Grundwasserverhältnisse (Anströmung x-Achse)	108
Abb. 4-14: Einfluss des Verhältnis d/T auf die Grundwasserverhältnisse (konvexe Anströmung)	109
Abb. 4-15: Einfluss des Verhältnis d/T auf die Grundwasserverhältnisse (konkave Anströmung)	110
Abb. 4-16: Einfluss des Verhältnis d/T auf die Grundwasserverhältnisse (Anströmung x-Achse)	111
Abb. 4-17: Einfluss des Verhältnis k_1/k_2 auf die Grundwasserverhältnisse (konvexe Anströmung)	112
Abb. 4-18: Einfluss des Verhältnis k_1/k_2 auf die Grundwasserverhältnisse (konkave Anströmung)	113
Abb. 4-19: Einfluss des Verhältnis k_1/k_2 auf die Grundwasserverhältnisse (Anströmung x-Achse)	114
Abb. 4-20: Einfluss des hydraulischen Gefälles i auf die Grundwasserverhältnisse (konvexe Anströmung)	115
Abb. 4-21: Einfluss des hydraulischen Gefälles i auf die Grundwasserverhältnisse (konkave Anströmung)	116
Abb. 4-22: Einfluss des hydraulischen Gefälles i auf die Grundwasserverhältnisse (Anströmung x-Achse)	117
Abb. 4-23: Einfluss des Anströmwinkels ϑ auf die Grundwasserverhältnisse (konvexe Anströmung)	119

Abb. 4-24: Einfluss des Anströmwinkels ϑ auf die Grundwasserverhältnisse (konkave Anströmung)	120
Abb. 5-1: Ersatzbauteildicke d_{ers} bei Spundwänden (Abgewandelt von: DGGT, 2006)	125
Abb. 5-2: Darstellung der gewählten Diskretisierung der Berechnungs-/Beispielmodelle in Form von mittlerer Fläche eines Dreieckselementes in Zuordnung zum geometrischen Verhältnis h_p/s	133

Nomenklatur

Lateinische Symbole

a	= Proportionalitätskonstante oder Schätzwert (in der Statistik)	[-]
\tilde{a}	= Regressionskoeffizient	[-]
A	= durchflossene Fläche	[m ²]
$A(h)$	= Querschnittsfläche des Gerinnes in Abhängigkeit der Wassertiefe	[m ²]
b	= Schätzwert (in der Statistik)	[-]
	bzw. Bogenlänge oder Bauwerksbreite	[m]
\tilde{b}	= Regressionskoeffizient	[-]
b_i	= Bogenintervall	[m]
b_M	= Breite einer Mäanderschleife (Amplitude)	[m]
$\frac{b}{l}$	= Verhältnis von Bauwerksbreite zu Bauwerkslänge	[-]
B	= Breite der Dammaufstandsfläche (dichtender Damnteil) bzw. des Strömungsgebietes oder Flussbreite/Flussschlauchbreite	[m]
B_M	= Modellbreite	[m]
B_1	= Flussschlauchbreite am Tangentenpunkt 1	[m]
B_2	= Flussschlauchbreite am Tangentenpunkt 2	[m]
$\frac{B}{T}$	= Verhältnis Breite des Stauwerkes/Tiefe des durchlässigen Untergrundes	[-]
c_w	= Strömungswiderstandskoeffizient (Flugzeug- und Fahrzeugbau)	[-]
C_{sx}	= Schiefekoeffizient	[-]
\tilde{C}_{sx}	= angepasster Schiefekoeffizient	[-]
C_{vx}	= Variationskoeffizient	[-]
d	= Dicke des Dichtungssystems oder char. Rohr-/Korndurchmesser oder Grundwasser-erfüllte Mächtigkeit	[m]
d_{ers}	= Ersatzbauteildicke des Dichtungssystems	[m]
d_{ref}	= Referenzdicke im Rahmen der numerischen Berechnungen	[m]
$\frac{d}{T} = \frac{l}{T}$	= Verhältnis von Dicke Dichtungssystem zu Tiefe Grundwasserleiter	[-]

E	= Wirkungsgrad des Dichtungssystems	[-]
f_A	= Anisotropiefaktor (k_{fx}/k_{fy} bzw. k_{fn}/k_{fv})	[-]
f°	= Formbeiwert	[-]
$f_{x,(d/T)}$	= Faktor zur Berücksichtigung des Verhältnis d/T in x-Richtung	[-]
$f_{y,(d/T)}$	= Faktor zur Berücksichtigung des Verhältnis d/T in y-Richtung	[-]
$f_{x,(H/T)}$	= Faktor zur Berücksichtigung des Verhältnis H/T in x-Richtung	[-]
$f_{y,(H/T)}$	= Faktor zur Berücksichtigung des Verhältnis H/T in y-Richtung	[-]
$f_{x,(k_1/k_2)}$	= Faktor zur Berücksichtigung des Verhältnis k_1/k_2 in x-Richtung	[-]
$f_{y,(k_1/k_2)}$	= Faktor zur Berücksichtigung des Verhältnis k_1/k_2 in y-Richtung	[-]
$f_{x,(r/s)}$	= Formfaktor zur Berücksichtigung der Bogenform in x-Richtung	[-]
$f_{y,(r/s)}$	= Formfaktor zur Berücksichtigung der Bogenform in y-Richtung	[-]
$f(\dots)$	= Funktion (von)	[-]
$F(\dots)$	= Funktion (von)	[-]
g	= Erdbeschleunigung ($\sim 9,81$)	[m/s ²]
$h = h_i$	= Druckhöhenunterschied oder Standrohrspiegelhöhe (an der Stelle i) bzw. Wassertiefe oder statische Höhe des Spundwandprofils	[m]
h_1	= Höhe der höheren Grundwassergleiche	[m]
h_2	= Höhe der tieferen Grundwassergleiche	[m]
$\uparrow h$	= steigende Standrohrspiegelhöhe	[m]
$\downarrow h$	= fallende Standrohrspiegelhöhe	[m]
h_M	= Grundwasser-erfüllte Mächtigkeit	[m]
h_P	= Pfeilhöhe	[m]
$\frac{h_p}{s}$	= geometrisches Verhältnis von Pfeilhöhe zu Sehne („Schlankheitsgrad“)	[-]
H	= Höhe des Grundwasserstands in der Modellmitte (Bauwerksbereich)	[m]
$\frac{H}{T}$	= Verhältnis von GW-Stand (Modellmitte) zu Tiefe Grundwasserleiter	[-]
i	= Reihenfolge	[-]
	bzw. Hydraulischer Gradient / Gefälle (h/l)	[-]
i_ϑ	= unter dem Anströmungswinkel fließendes Grundwassergefälle	[-]

i_{\parallel}	= parallel zum Dichtungssystem verlaufende Strömungskomponente	[-]
i_{\perp}	= senkrecht zum Dichtungssystem verlaufende Strömungskomponente	[-]
I_E	= Energiehöhengefälle in Fließrichtung	[-]
I_{st}	= Gefälle, stationär	[-]
k	= Klassenanzahl	[-]
	bzw. Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]
k_f	= Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]
$k_{fx} = k_{fh}$	= Durchlässigkeitsbeiwert in horizontaler schichtungspareller Richtung	[m/s]
$k_{fy} = k_{fv}$	= Durchlässigkeitsbeiwert in vertikaler Richtung/ lotrecht zur Schichtung bzw. in y-Richtung	[m/s]
k_{fz}	= Durchlässigkeitsbeiwert in z-Richtung	[m/s]
k_T	= standardisierte Variable der gewählten Verteilungsfunktion	[-]
k_1	= Durchlässigkeitsbeiwert des anstehenden Untergrundes (Baugrund)	[m/s]
k_2	= Durchlässigkeitsbeiwert des Dichtwandmaterials / der Dichtwand	[m/s]
$\frac{k_1}{k_2}$	= Verhältnis der Durchlässigkeitsbeiwerte Untergrund/Dichtwandmaterial	[-]
K_x	= Kurtosis	[-]
\tilde{K}_x	= angepasste Kurtosis	[-]
l	= Länge des Fließweges oder Dichtwanddicke	[m]
L	= Länge der Dichtwand bzw. des Strömungsgebietes	[m]
L_M	= Länge einer Mäanderschleife (Mäanderlänge)	[m]
m	= Freiheitsgrad (in der Statistik)	[-]
m_{FT}	= Feststofftransportvermögen	[kg/(m·s)]
m_{FZ}	= Feststoffzufuhr	[kg/(m·s)]
M	= Mächtigkeit des Grundwasserleiters	[m]
	bzw. Rechengröße (Hilfsvariable)	[m ²]
M_B	= Modellbreite	[m]
M_L	= Modelllänge	[m]
M_{cxq}	= q-te Zentralmoment	[-]

n	= Anzahl der Werte in der Stichprobe bzw. Freiheitsgrad, der physikalischen Variablen oder der Bogenteile	[-]
n_j	= Besetzungszahl je Klasse j	[-]
$\frac{n_j}{n}$	= relative Häufigkeit	[-]
n_P	= Porenanteil (Porosität)	[-]
$n_{P_{eff}}$	= effektiver (durchflusswirksamer) Porenanteil	[-]
p	= Druck bzw. Potenzprodukt	[kg/(m·s ²)] [-]
P_E	= Überschreitungswahrscheinlichkeit	[%]
$P(h)$	= benetzter Umfang des Gerinnes in Abhängigkeit der Wassertiefe	[m]
q_{o3}	= zugeführtes oder entzogenes Wasservolumen (3D-Modell) (pro Bodenvolumen und pro Zeiteinheit)	[l/s]
q_s	= Durchfluss pro Mächtigkeit des Grundwasserleiters	[m ² /s]
Q	= Durchfluss	[m ³ /s]
$Q(h)$	= Abfluss als Funktion der Wassertiefe h	[m ³ /s]
r	= Radius bzw. Ordnung der Dimensionsmatrix (Rang)	[m] [-]
r_{xy}	= empirischer Korrelationskoeffizient	[-]
r^2_{xy}	= Bestimmtheitsmaß	[-]
$\frac{r}{s} = r/s$	= Verhältnis von Radius zur Sehne	[-]
R	= Radius bzw. Krümmungsradius	[m]
R^2	= Bestimmtheitsmaß	[-]
Re	= Reynoldszahl	[-]
$R_h(h)$	= hydraulischer Radius in Abhängigkeit der Wassertiefe	[m]
R/B	= Verhältnis von Krümmungsradius zur Flussbreite	[-]
s	= Sehne	[m]
s_A	= Sehne (Außenseite des Flusses)	[m]
s_I	= Sehne (Innenseite des Flusses)	[m]

\tilde{s}_x	= Standardabweichung	[-]
\tilde{s}_x^2	= Varianz (Streuung)	[-]
S_p	= der spezifische Speicherkoeffizient	[1/m]
S_{xx}	= empirische Varianz von x	[-]
S_{xy}	= empirische Kovarianz von x und y	[-]
S_{yy}	= empirische Varianz von y	[-]
t	= Abstand vom Mittelpunkt des elliptischen Bauwerkes zu den Brennpunkten d. h. Quelle A (+) bzw. Senke B (-) bzw. Fließzeit	[m] [s]
t bzw. t_y	= Testgröße (in der Statistik)	[-]
$t_{1-\alpha,m}$	= Quantil der t-Verteilung	[-]
T	= Tiefe des durchlässigen Untergrundbereiches (Grundwasserleiters) bzw. halbe Bauwerkslänge	[m]
T_x	= Transmissivität in x-Richtung	[m ² /s]
T_y	= Transmissivität in y-Richtung	[m ² /s]
$v = v_f$	= Strömungs- bzw. Filtergeschwindigkeit	[m/s]
v_a	= Abstandsgeschwindigkeit	[m/s]
v_b	= Bahngeschwindigkeit	[m/s]
$v(h)$	= Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Wassertiefe	[m/s]
V_{Fe}	= Feststoffvolumen	[m ³]
$V_g = V_{ges}$	= Gesamtvolumen	[m ³]
V_{Hw}	= Haftwasservolumen	[m ³]
V_{Lu}	= Luftvolumen	[m ³]
V_P	= Porenvolumen ($V_W + V_{Lu}$)	[m ³]
V_{Peff}	= effektives (durchflusswirksames) Porenvolumen	[m ³]
\dot{V}	= Volumenstrom	[m ³ /s]
V_W	= Wasservolumen	[m ³]
w	= Spannweite der Elemente ($x_{max} - x_{min}$)	[-]

\bar{x}	= Mittelwert	[-]
\tilde{x}	= Median bzw. Zentralwert	[-]
x_i	= Elemente der Stichprobe oder x-Koordinate an der Stelle i	[-]
x_j	= Mitte der j-ten Klasse	[-]
x_{\max}	= größter Wert der Stichprobe	[-]
x_{\min}	= kleinster Wert der Stichprobe	[-]
x_T	= Fraktile (auch Quantil = Lagemaß in der Statistik)	[%]
x_0	= große Halbachse des elliptischen Bauwerkes	[m]
\bar{y}	= Mittelwert	[-]
y'	= Abstand eines Ortes vom Dichtungssystem bei ($x = 0$)	[m]
y_i	= y-Koordinate an der Stelle i	[-]
y_0	= kleine Halbachse des elliptischen Bauwerkes	[m]
z	= z-Koordinate	[-]
	bzw. Ortshöhe	[m]

Griechische Symbole

α	= Grundwasserfließrichtung, Zentriwinkel oder Öffnungswinkel	[°]
	bzw. Irrtumswahrscheinlichkeit	[-]
α_i	= Zentriwinkel des Bogenintervalls	[°]
γ	= Konfidenzzahl (Schätzverfahren in der Statistik)	[-]
Δh	= Änderung der Standrohrspiegelhöhe	[m]
$\frac{\Delta h}{s} \cdot 10^3$	= dimensionsloses Berechnungsergebnis: Änderung des Grundwasserspiegels im Verhältnis zur Sehne	[-]
$-\Delta h$	= Aufstau des Grundwasserspiegels auf der Anstromseite	[m]
$+\Delta h$	= Absenkung des Grundwasserspiegels auf der Abstromseite	[m]
Δh_{um}	= Änderung der Grundwasserverhältnisse bei vollständiger Umströmung	
	v_{ex} = bei konvexer Anströmung und k_{av} = bei konkaver Anströmung	[m]
$\Delta h(x)$	= Änderung des Grundwasserspiegels in x-Richtung	[m]

$\Delta h(y)$	= Änderung des Grundwasserspiegels in y-Richtung	[m]
$\Delta h y'$	= Grundwert der Änderung des Grundwasserspiegels in y'-Richtung	[m]
$\Delta h(x, y)$	= Änderung des Grundwasserspiegels bei Schräganströmung	[m]
$\pm \Delta h_{x, \max}$	= maximale Änderung des Grundwasserspiegels (Aufstau oder Absenkung) in x-Richtung	[m]
$\pm \Delta h_{y, \max}$	= maximale Änderung des Grundwasserspiegels (Aufstau oder Absenkung) in y-Richtung bzw. in y'-Richtung bei $x = 0$	[m]
$\pm \Delta h_{\vartheta, \text{um}}$	= maximale Änderung des Grundwasserspiegels (Aufstau oder Absenkung) bei vollständiger Umströmung unter dem Anströmwinkel	[m]
Δx	= Klassenbreite (w/k)	[-]
Δy	= Stromstreifen	[m]
ϑ	= Anströmwinkel	[°]
μ_x	= unbekannter Mittelwert (Schätzverfahren in der Statistik)	[-]
ν	= kinematische Viskosität	[m ² /s]
Π	= Buckingham'sches Pi-Theorem	[-]
ρ	= Dichte	[kg/m ³]
ρ_{xy}	= Korrelationskoeffizient einer normalverteilten Grundgesamtheit	[-]
σ	= unbekannte Standardabweichung (Schätzverfahren in der Statistik)	[-]
σ^2	= unbekannte Varianz (Schätzverfahren in der Statistik) oder Streuung	[-]
$\sum \frac{n_j}{n}$	= relative Häufigkeitssumme	[-]
Φ	= Potenzial	[m]
χ	= Abminderungsfaktor zur Ermittlung der Ersatzbauteildicke	[-]
ψ	= Permittivität (k/d) bzw. Stromfunktion	[1/s] [m ² /s]

Abkürzungen

ASM	Aquifer-Simulations-Modell (Software/Programmsystem)
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
CAD	Computer Aided Design
DGGT	Deutsche Gesellschaft für Geotechnik
DIN EN	Deutsche Ausgabe einer Europäischen Norm
DOS	Disk Operating System (Betriebssystem)
DPIL	Direct-Push Injektionslog (Verfahren)
DPST	Direct-Push Slugtest (Verfahren)
DSV	Düsenstrahlverfahren
DTK	Digitale Topografische Karte
DVG	Digitale Verwaltungsgrenzen
DW	Dichtwand
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
EANG	Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik
EG-WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FEM	Finite-Elemente-Methode
FH-DGG	Fachsektion Hydrogeologie in der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften
FMI	Fräs-Misch-Injektion
FVM	Finite-Volumen-Methode
GFR	Groundwater Flow Realization (Software/Programmsystem)
GFV	Grundwasser-Fluss-Visualisierungs-Messsystem
GGU	Gesellschaft für Grundbau und Umwelttechnik
GSK	Gewässerstationierungskarte
GWM	Grundwassermessstelle oder Grundwassermodell
HDI	Hochdruckinjektion

HGW	Hoher Grundwasserstand
HNM	Hydrodynamisch-numerisches Modell
HQ	Höchster Abflusswert
HQ _n	Scheitelabfluss mit Angabe der jährlichen statistischen Überschreitungswahrscheinlichkeit
HWS	Hochwasserschutz
KC	Kozeny-Casagrande
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz
MGW	Mittlerer Grundwasserstand
MIP	Mixed-in-Place
MQ	Mittelwasserabfluss
MULNV	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
NGW	Niedriger Grundwasserstand
NQ	Niedrigster Abflusswert
NRW	Nordrhein-Westfalen
n. d.	nicht datiert
PM	Physikalisches Modell
SPM	Galerkin- und Spektral-Methode
StUA	Staatliches Umweltamt
USB	Universal Serial Bus
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVPG	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
VwVfG	Verwaltungsverfahrensgesetz
WBD	Wirtschaftsbetriebe Duisburg – AöR (= Anstalt des öffentlichen Rechts)
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
ZQ	Median bzw. Zentralwert des Abflusses
1D	Eindimensional (z. B. x-Richtung)
2D	Zweidimensional (x- und y-Richtung)
3D	Dreidimensional (x-, y- und z-Richtung)

Kurzzusammenfassung

Bei einigen bogenförmig verlaufenden Deichlinien ist es erforderlich, die Standsicherheit des Deiches mit Hilfe innenliegender vollkommener Dichtungssysteme zu verbessern. Diese Art der Deichsanierung hat jedoch Auswirkungen auf die Grundwasserströmung. Im Rahmen der wasserrechtlichen Genehmigungsverfahren ist der zu erwartende Aufstau bzw. die Absenkung des Grundwassers darzulegen. Die Zielsetzung dieser Masterarbeit ist es, hierzu einen Beitrag herauszuarbeiten. Dazu werden im ersten Schritt die erforderlichen Grundlagen erläutert. In einem zweiten Schritt werden mit wasserbaulichen/wasserwirtschaftlichen Methoden der Flussverlauf des Rheins in Nordrhein-Westfalen anhand von Kartenmaterial ausgewertet und mögliche Bogenformen ermittelt. Im dritten Schritt werden für diese Bogenformen unter Variation verschiedener Parameter numerische Berechnungen durchgeführt. Die erhaltenen Ergebnisse werden unter Berücksichtigung der vorhandenen analytischen Berechnungsverfahren, mit dem Ziel der Ableitung eines Berechnungsansatzes bzw. von Anwendungsdiagrammen, bewertet.

Schlüsselwörter: Deich, Grundwasser, Grundwasserströmung, Fließgewässer, Wechselwirkungsprozesse, Dichtungssysteme, Berechnungsverfahren, Flussverlauf, Numerische Berechnungen, Grundwasseraufstau, Grundwasserabsenkung

Abstract

For some arched dyke lines, it is necessary to improve the stability of the dyke using internal perfect sealing systems. However, this type of dike rehabilitation has an impact on groundwater flow. The expected impoundment or lowering of the groundwater must be explained in the context of the water law approval procedure. The objective of this Master's thesis is to make a contribution to this. To this end, the first step is to explain the necessary basics. In a second step, hydraulic engineering/water management methods are used to evaluate the course of the Rhine in North Rhine-Westphalia on the basis of map material and to determine possible bend shapes. In the third step, numerical calculations are carried out for these arc shapes by varying various parameters. The results obtained are evaluated taking into account the existing analytical calculation methods, with the aim of deriving a calculation approach or application diagrams.

Keywords: dyke, groundwater, groundwater flow, flowing water, interaction processes, sealing systems, calculation methods, river course, numerical calculations, groundwater impoundment, groundwater lowering

1 Einführung

1.1 Veranlassung

In den 20er und 30er Jahren des 20. Jahrhunderts wurden in Nordrhein-Westfalen viele Deiche entlang der unmittelbar an den Fließgewässern errichteten Industrie- und Wohnanlagen zum Schutz vor Hochwasser gebaut. Ein Beispiel dafür ist der in Abbildung 1-1 dargestellte rechtsrheinisch liegende Stadtteil Laar in Duisburg (Stadt Duisburg).



Abb. 1-1: Duisburg-Laar, Ausschnitt Luftbild 1972 [ohne Maßstab]

(Datenquelle: WebOffice Stadt Duisburg, 2020)

Wie der vorstehenden Abbildung zu entnehmen ist, wurden die Wohnbebauungen und die dahinterliegenden Industrieanlagen direkt am rechten Ufer des Rheins errichtet. Durch den untertägigen Steinkohlebergbau kam es in den betroffenen Gebieten (auch in Duisburg-Laar) teils zu erheblichen Bergsenkungen, die im Laufe der Zeit nachträgliche Deicherhöhungen erforderlich machten. Die Entwicklung solcher Deicherhöhungen ist am Querprofil des Rheindeiches Duisburg-Laar in der nachfolgenden Abbildung (s. Abb. 1-2) exemplarisch dargestellt (WBD n. d.). Darüber hinaus ist die Lage des entsprechenden Querprofils in Zuordnung zum Stadtteil Duisburg-Laar in Abb. 1-1 eingezeichnet.

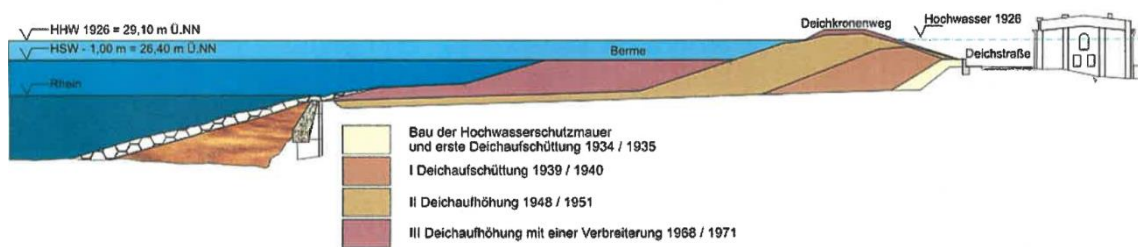


Abb. 1-2: Entstehung des Querprofils des Rheindeiches in Duisburg-Laar im Verlauf der stufenweisen Deicherhöhung (Quelle: WBD, n. d.)

Häufig wurden zur Errichtung bzw. zur nachträglichen Erhöhung der Deiche die in der Montanindustrie anfallenden Industriereststoffe (z. B. Waschbergematerial, Aschen und Schlacken) als Deichbaumaterial für einen homogenen Deich verwendet. Viele dieser Deiche sind nach fast 100 Jahren nun am Ende ihrer Nutzungsdauer angelangt und bedürfen einer Sanierung. Hierauf wird im Unterkapitel 1.2 noch genauer eingegangen. Den regionalen Anforderungen entsprechend hat sich hierfür in Nordrhein-Westfalen das Deichprofil Rheindeich (Drei-Zonen-Deich) als „Regelprofil“ bewährt (s. Abb. 1-3). Der Querschnitt dieses Deichprofils besteht aus dem Stützkörper, dem landseitig angeordneten Dränkörper und der wasserseitigen Dichtung, die möglichst an den gering durchlässigen Untergrund (z.B. Auelehmschicht) anschließt.

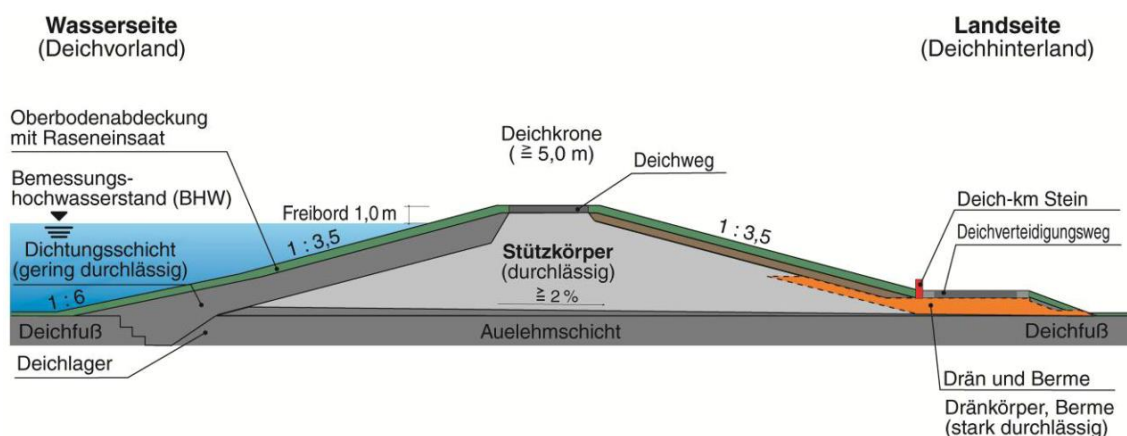


Abb. 1-3: Deichprofil Rheindeich Nordrhein-Westfalen, StUA Krefeld (Quelle: DWA-M 507-1, 2011)

Aufgrund von örtlichen Gegebenheiten kann es vorkommen, dass eine Auelehmschicht zur Einbindung der wasserseitigen Dichtung nicht vorhanden ist oder Vorgaben aus dem Bereich der Landschaftsplanung (Artenschutz, Naturschutz, Biotop etc.) eine Sanierung der wasserseitigen Böschung verbieten. In diesen und ggf. weiteren Fällen muss die wasserseitige Dichtung mit einer Untergrundabdichtung bis in die tiefer anstehenden, gering durchlässigen Bodenschichten (sog. vollkommenes Dichtungs-

system) erfolgen. Daraus ergibt sich eine Einflussnahme auf die Grundwasserströmung im quartären Grundwasserleiter, die sich in Form eines Aufstaus des Grundwasserspiegels vor und einer Absenkung hinter dem vertikalen Dichtungssystem (Untergrundabdichtung) darstellt. Die betreffenden Rechtsgebiete des Umweltrechts werden im Unterkapitel 1.3 erläutert.

1.2 Technische Rahmenbedingungen

Ausgehend von den Hochwasserereignissen 1993 und 1995 am Rhein wurde vom Land Nordrhein-Westfalen, vertreten durch das damals zuständige Staatliche Umweltamt (StUA) Krefeld, eine Studie in Auftrag gegeben, die sich zum einen mit der Bewertung der geotechnischen Sicherheit der vorhandenen Deichanlagen befasst und zum anderen die Grundlagen zur Beurteilung von Sanierungserfordernissen und Sanierungsmaßnahmen liefern sollte (Schneider et al. 1997). Die Untersuchungsergebnisse dieser Studie wurden in den Mitteilungen, Heft 7 aus 1997, des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe veröffentlicht.

Die Untersuchungsergebnisse gliedern sich in die nachfolgenden beiden Teile:

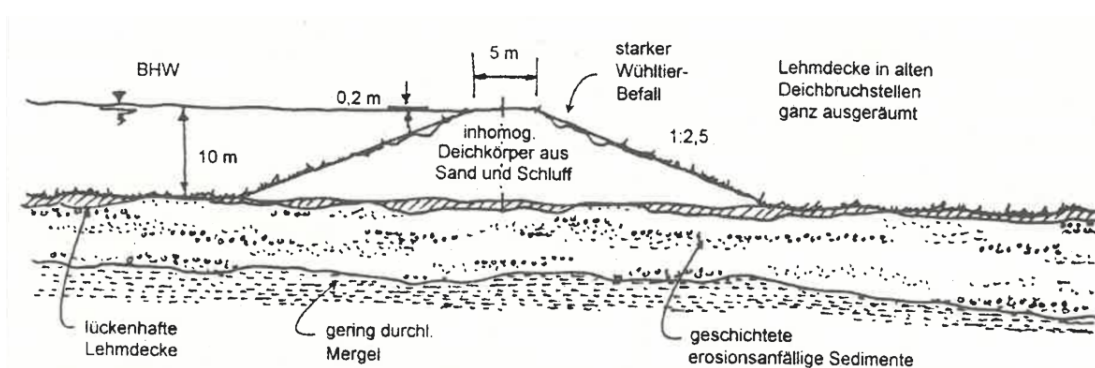
- Teil I: Grundlagen zur Bewertung der geotechnischen Sicherheit von Hochwasserschutzdeichen
- Teil II: Beurteilung der geotechnischen Sicherheit von Hochwasserschutzdeichen: Vorgehen / Maßnahmen / Sanierungskonzepte

Auf die Grundlagen zur Bewertung der geotechnischen Sicherheit von Hochwasserschutzdeichen des Teil I wird hier nicht weiter eingegangen. Von besonderer Bedeutung sind jedoch die Untersuchungsergebnisse im Teil II. Danach weisen die vorhandenen Deiche im Bereich des unteren Rheins in Nordrhein-Westfalen, gemessen am Maßstab des in Abbildung 1-3 vorgestellten „Regelprofils“, Unzulänglichkeiten auf. Ausgehend von den geordneten Verhältnissen im Sinne des vorgenannten Regelprofils sind die untersuchten Deichquerschnitte in unterschiedlichem Maße weit von den nachfolgend aufgeführten Mindestkriterien, die bei Hochwasserschutzdeichen hinsichtlich der geotechnischen Sicherheit erfüllt sein sollten, entfernt und bedürfen daher einer Sanierung (Schneider et al. 1997):

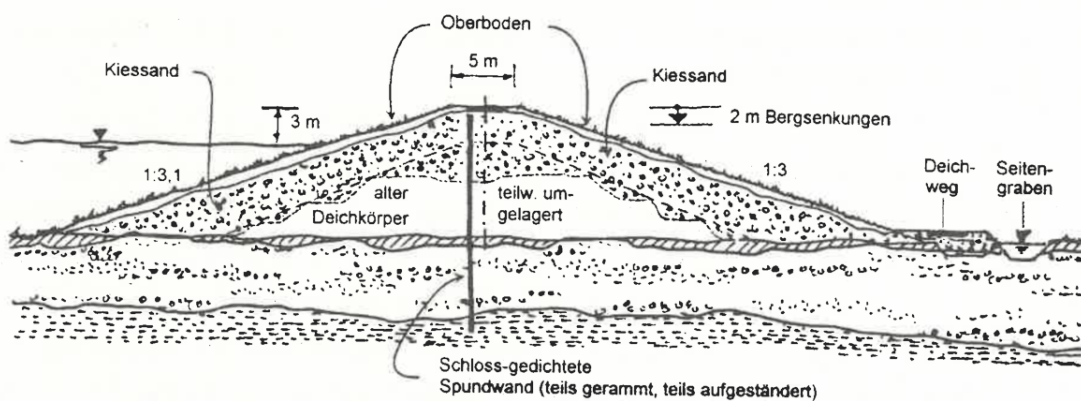
- Deichgeometrie
- Deichaufbau und Zustand der vorhandenen Materialien
- Verlässlichkeit des Deichlagers und des Deichuntergrundes gegen Durchströmung
- Vorhandensein und Zustand des Schutzes der Deichoberflächen

- Stauempfindlichkeit wegen vorhandener, ggf. querender Einbauten
- Zugänglichkeit und Belastbarkeit für die Deichverteidigung im Gefahrenfalle

Ausgehend von dieser Bewertung wurden von Schneider et al. mit Blick auf die in NRW angetroffene Situation einige Vorschläge für mögliche Umgestaltungen bestehender Deichquerschnitte (Teilneubau) ausgearbeitet, wiewohl aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen allgemeingültige „Musterlösungen“ nach wie vor nur eingeschränkt angegeben werden können. Unter einem *Teilneubau* wird gemäß des Merkblatts 507-1 der DWA sowohl die Wiedererrichtung eines abgetragenen Deichbestandteils als auch eine Erweiterung des vorhandenen Deiches durch Integration des Altdeiches verstanden. Von den durch Schneider et al. (1997) aufgezeigten Vorschlägen wird nachfolgend die Lösungsvariante mit der *Erweiterung des vorhandenen Deiches* durch die Integration des Altdeiches sowie dem nachträglichen Einbau eines innenliegenden vollkommenen Dichtungssystems dargestellt (s. Abb. 1-4). Auf die verschiedenen innenliegenden Dichtungssysteme wird im Unterkapitel 2.5 genauer eingegangen.



(a) Ausgangssituation



(b) Vorschlag für angemessene Ertüchtigung

Abb. 1-4: Darstellung eines Deichprofils: (a) Ausgangszustand und (b) Vorschlag für angemessene Ertüchtigung (Quelle: Schneider et al., 1997)

Das Deichprofil im Ausgangszustand (a) lässt sich gemäß Abbildung 1-4 stichpunktartig wie folgt beschreiben:

- Durch Schichtung stark gegliederter, erosionsanfälliger Untergrund
- Inhomogener Deichaufbau und unzureichender (Verdichtungs-)Zustand der vorhandenen Materialien
- Schwache und lückenhafte Auelehmdedecke/ bereichsweise gestörtes Deichlager
- Deichabschnitt liegt im Bergsenkungsgebiet (noch erwartete Bergsenkung von 2 m)

Der Vorschlag für eine angemessene Ertüchtigung (b) des in Abbildung 1-4 dargestellten Deichprofils sieht demnach eine konsequente Abdichtung von Deich und erosionsanfälligen Untergrund mittels einer schlossgedichteten Spundwand vor. Darüber hinaus wird der bestehende Deichkörper in den oberflächennahen Bereichen vollständig aufgenommen, das Bodenmaterial fachgerecht umgelagert und verdichtet. Anschließend wird die Spundwand eingebracht und die neue Deichgeometrie durch Überhöhung der Deichkrone, Abflachung der Böschungen, Anlegen eines Deichverteidigungsweges auf einer Berme sowie eines Deichseitengrabens hergestellt (Schneider et al. 1997).

Die vorgenannten Maßnahmen dienen der Verbesserung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Deiches. Das innenliegende vollkommene Dichtungssystem übernimmt hierbei die Verlängerung bzw. Unterbindung des Sickerweges zur Verhinderung von Erosionsprozessen im Untergrund sowie die Absenkung der Sickerlinie zur Verbesserung der landseitigen Böschungsstandsicherheit. Wie im Unterkapitel 1.1 angedeutet, wird durch diese Art der Umgestaltung des bestehenden Deichquerschnittes – zur Verbesserung der Standsicherheit als Begleiterscheinung – maßgebend Einfluss auf die Grundwasserströmung genommen.

1.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Durch die in den Unterkapiteln 1.1 und 1.2 beschriebenen technischen Maßnahmen der Untergrundabdichtung erfolgt ein Eingriff in die Grundwasserverhältnisse. Dadurch wird der Anwendungsbereich des Wasserhaushaltsgesetzes (vgl. § 2 Abs. 1 Nr. 3 WHG) berührt, so dass das WHG im vorliegenden Fall Anwendung findet. Auch das Grundeigentum, auf dem die Baumaßnahme möglicherweise umgesetzt werden soll, berechtigt nicht automatisch zu einer Gewässerbenutzung – die einer behördlichen Zulassung (Erlaubnis oder Bewilligung) bedarf – oder zum Ausbau eines Gewässers (vgl. § 4 Abs. 3 Nr. 1 und 2 WHG).

Betrachtet man das vollkommene Dichtungssystem im Zusammenhang mit Baumaßnahmen, die dem öffentlichen Baurecht unterliegen und für deren Teilbauwerke

(z. B. mehrgeschossige Tiefgarage oder im Baugrund verbleibende wasserundurchlässige Baugrubenumschließung) zusätzlich eine wasserrechtliche Erlaubnis bzw. Bewilligung nach § 8 WHG erwirkt werden muss, dann liegt überwiegend eine *Benutzung* nach § 9 Abs. 2 Nr. 1 WHG vor. Danach gelten als Benutzungen auch das Aufstauen, Absenken und Umleiten von Grundwasser durch Anlagen, die hierfür bestimmt oder geeignet sind – dies trifft auf vollkommene Dichtungssysteme im Baugrund zwanglos zu – (Wellmann et al. 2019).

Aufgrund der Landeswassergesetze der Bundesländer können die erforderlichen Antragsunterlagen von Bundesland zu Bundesland variieren. Um einen ersten Überblick darüber zu erhalten, welche Unterlagen grundsätzlich von den Genehmigungsbehörden erwartet werden, lässt sich auf das Informationsblatt „Bauen im Grundwasser“ (Wasserwirtschaftsamt München 2013) zurückgreifen, welches im **Anhang A** beigefügt ist. Dem Informationsblatt ist zu entnehmen, dass bei einem zu erwartenden Aufstau des Grundwassers von mehr als 10 cm durch tiefreichende Bauteile die unter Nr. 3 b) des Merkblattes aufgeführten Antragsunterlagen vorzulegen sind. Daraus ergeben sich die beiden nachfolgenden wesentlichen Forderungen, welche auch bei Deichbau-maßnahmen zu betrachten sind:

- Durchführen von Berechnungen für den Endzustand und Angabe über den zu erwartenden Aufstau, die zu erwartende Umleitung und die zu erwartende Absenkung
- Darstellung über Lage und Art der Beobachtungsmessstellen zur Beweissicherung

Keine Benutzungen im Sinne des § 9 Abs. 1 und 2 WHG stellen hingegen Maßnahmen dar, die dem Ausbau eines Gewässers im Sinne des § 67 Abs. 2 dienen. Nach § 67 Abs. 2 Satz 3 sind Deich- und Dammbauten, die den Hochwasserabfluss beeinflussen, sowie Bauten des Küstenschutzes dem Ausbau eines Gewässers (*Gewässerausbau*) gleichgestellt. Der Gewässerausbau bedarf gemäß § 68 Abs. 1 WHG der Planfeststellung durch die zuständige Behörde. Dieser rechtlichen Forderung unterliegen somit auch die Deichsanierungsmaßnahmen. Im § 68 Abs. 2 Satz 1 WHG heißt es:

„Für einen Gewässerausbau, für den nach dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung keine Verpflichtung zur Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung besteht, kann anstelle eines Planfeststellungsbeschlusses eine Plangenehmigung erteilt werden“ (Wellmann et al. 2019).

„Welche Vorhaben, die sich als Gewässerausbau darstellen, einer Umweltverträglichkeitsprüfung und damit zwingend einer Planfeststellung bedürfen, ergibt sich

aus dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung und seiner Anlage 1“ (Wellmann et al. 2019).

Das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) gilt unter anderem für die in Anlage 1 aufgeführten Vorhaben (vgl. § 1 Abs. 1 Nr. 1 UVPG). In Tabelle 1-1 sind die gemäß § 67 Abs. 2 Satz 3 WHG für den Hochwasserschutz im Binnen- und Küstenbereich wichtigen Maßnahmen des Gewässerausbaus als Auszug der Anlage 1 des UVPG dargestellt.

Tab. 1-1: Auszug Anlage 1 (UVPG): Liste „UVP-pflichtige Vorhaben“ (Quelle: Peters et al., 2019)

Nr.	Vorhaben	Spalte 1	Spalte 2
13.	Wasserwirtschaftliche Vorhaben mit Benutzung oder Ausbau eines Gewässers:		
13.13	Bau eines Deiches oder Dammes, der den Hochwasserabfluss beeinflusst (sofern nicht von Nr. 13.16 erfasst);		A
13.16	Bauten des Küstenschutzes zur Bekämpfung der Erosion und meerestechnische Arbeiten, die geeignet sind, Veränderungen der Küste mit sich zu bringen (z. B. Bau von Deichen, Molen, Hafendämmen und sonst. Küstenschutzbauten), mit Ausnahme der Unterhaltung und Wiederherstellung solcher Bauten, soweit nicht durch Landesrecht etwas anderes als in dieser Nummer bestimmt ist;		A

Legende:

Nummer	= Nummer des Vorhabens
Vorhaben	= Art des Vorhabens mit ggf. Größen- oder Leistungswerten nach § 6 Satz 2 sowie Prüfwerten für Größe oder Leistung nach § 7 Absatz 5 Satz 3
X in Spalte 1	= Vorhaben ist UVP-pflichtig
A in Spalte 2	= allgemeine Vorprüfung des Einzelfalls: siehe § 7 Absatz 1 Satz 1
S in Spalte 2	= standortbezogene Vorprüfung des Einzelfalls: siehe § 7 Absatz 2

Wie der Tabelle 1-1 zu entnehmen ist, sind sowohl bei Maßnahmen des Gewässerausbaus im Binnen- als auch im Küstenbereich eine allgemeine Vorprüfung gemäß § 7 Abs. 1 Satz 1 erforderlich. In § 7 Abs. 1 UVPG heißt es dazu:

„Bei einem Neuvorhaben, das in Anlage 1 Spalte 2 mit dem Buchstaben „A“ gekennzeichnet ist, führt die zuständige Behörde eine allgemeine Vorprüfung zur Feststellung der UVP-Pflicht durch. Die allgemeine Vorprüfung wird als überschlägige Prüfung unter Berücksichtigung der in Anlage 3 aufgeführten Kriterien durchgeführt. Die UVP-Pflicht besteht, wenn das Neuvorhaben nach Einschätzung der zuständigen Behörde erhebliche nachteilige Umweltauswirkungen haben kann, die nach § 25 Absatz 2 bei der Zulassungsentscheidung zu berücksichtigen wären“ (Peters et al. 2019).

Sofern im Rahmen der allgemeinen Vorprüfung festgestellt wird, dass keine Verpflichtung zur Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung besteht, kann die Behörde ein Planfeststellungsverfahren durchführen. Ob die Genehmigungsbehörde stattdessen ein (vereinfachtes) Plangenehmigungsverfahren durchführt, welches weniger Zeit in Anspruch nimmt, liegt in ihrem Ermessen. Nach Einschätzung von Wellmann et al. (2019) besteht seitens der Antragsteller kein Anspruch auf Durchführung eines Plangenehmigungs- anstelle eines Planfeststellungsverfahrens.

Die anwendbaren Vorschriften ergeben sich aus § 70 WHG. Zum einen wird die Planfeststellung und die Plangenehmigung gemäß den §§ 72 bis 78 VwVfG durchgeführt und zum anderen muss das Planfeststellungsverfahren für einen UVP-pflichtigen Gewässerausbau den Anforderungen des UVPG entsprechen (Wellmann et al. 2019). Die Umweltverträglichkeitsprüfung ist hierbei ein unselbstständiger Teil des verwaltungsbehördlichen Verfahrens (Wasserrechtliches Verfahren nach WHG), welches der Zulassungsentscheidung dient. Das heißt, dass die Umweltprüfungen gemäß § 3 UVPG die Ermittlung, Beschreibung und Bewertung der erheblichen Auswirkungen des Gewässerausbauvorhabens auf die Schutzgüter umfassen.

Dazu zählen nach § 2 Abs. 1 Nr. 1 bis 5 UVPG:

- Menschen, insbesondere die menschliche Gesundheit,
- Tiere, Pflanzen und die biologische Vielfalt,
- Fläche, Boden, Wasser, Luft, Klima und Landschaft,
- kulturelles Erbe und sonstige Sachgüter sowie
- die Wechselwirkung zwischen den vorgenannten Schutzgütern.

Unter das Schutzgut Wasser fallen stehende und fließende oberirdische Gewässer, Küstengewässer, das Grundwasser und die hohe See (Peters et al. 2019). Im Rahmen der weiteren Betrachtungen wird lediglich auf das *Grundwasser* eingegangen.

Nach § 16 Abs. 1 UVPG hat der Vorhabenträger der zuständigen Behörde einen Bericht zu den voraussichtlichen Umweltauswirkungen des Vorhabens (UVP-Bericht) vorzulegen. Neben vielen weiteren Angaben soll eine Beschreibung der zu erwartenden erheblichen Umweltauswirkungen des Vorhabens enthalten sein (vgl. § 16 Abs. 1 Nr. 5 UVPG). Peters et al. (2019) führen aus, dass auf diese Darstellung höchste Sorgfalt gelegt werden sollte, da dies zum einen den Kerninhalt des UVP-Berichtes darstellt und zum anderen die für die Zulassungsentscheidung relevanten Sachverhalte in besonderer Weise aufzeigt. Für die Beschreibung der zu erwartenden erheblichen Umweltauswirkungen muss zunächst eine *Auswirkungsprognose* erstellt werden.

Die Anforderungen werden in Peters et al. (2019) wie folgt dargestellt:

„Die Prognose hat die vernünftigerweise vorhersehbaren Umweltauswirkungen soweit abzubilden, wie sie mit zumutbarem Aufwand anhand der gegenwärtigen Prognosemethoden und des gegenwärtigen Wissensstandes ermittelbar sind. Welche Prognosemethode innerhalb dieses Rahmens gewählt wird, ist eine Einzelfallentscheidung. Die UVP ist insofern im Rahmen der allgemeinen rechtlichen Anforderungen an die Methodenwahl prinzipiell methodenoffen.“

„Neben komplexen Modellprognosen, Szenarien, Simulationen oder Trendexplorationen können auch einfache Prognosetechniken in Form von verbalen sachwissenschaftlichen Argumentationen und (einfachen) Analogieschlüssen insbesondere auf planerischer Ebene sachgerecht sein. Entscheidend ist eine hinreichende Plausibilität und Begründung der Annahmen und Randbedingungen einer Prognose. Grobe prognostische Abschätzungen genügen immer dann, wenn sie im Ergebnis für die planerische Entscheidung hinreichend aussagekräftig sind und aufgrund konservativer Annahmen im Ergebnis „auf der sicheren Seite“ liegen.“

Den vorgenannten Anforderungen ist zu entnehmen, dass die Methode zur Bestimmung des Grundwasseraufstaus und der Grundwasserabsenkung infolge eines innenliegenden vollkommenen Dichtungssystems bei bogenförmigen Deichlinien frei wählbar ist. Der planende Ingenieur wird unabhängig von den weiteren vorgenannten Methoden zur groben prognostischen Abschätzung sinnvollerweise gerne auf die in den Ingenieurwissenschaften weitverbreiteten *Berechnungsansätze bzw. Bemessungsdiagramme* zurückgreifen.

1.4 Zielsetzung

Nach Einschätzung von Hauschild und Goens (2010) hat sich die Anwendung von numerischen Strömungs- und Transportmodellen (sog. Grundwassermodelle) zur Beantwortung von wasserwirtschaftlichen Fragestellungen im Laufe der letzten 15 Jahre als hydrogeologisches Werkzeug etabliert. Denn gerade bei großräumigen Betrachtungen hydraulischer und hydrogeologischer Systemzusammenhänge finden numerische Modelle ihren sinnvollen Einsatz (Hauschild und Goens 2010). Darüber hinaus muss aufgrund der rechtlichen Rahmenbedingungen (vgl. den Unterkapitel 1.3) heute nahezu für jedes Bauwerk die Beeinflussung des Grundwasserstromes nachgewiesen werden. Hierbei wird verstärkt auf die Möglichkeiten der Berechnungen nach der Methode der Finiten-Elemente (FEM) zurückgegriffen. Diese haben neben dem Vorteil, solche Fragestellungen sehr gut zu erfassen, allerdings den Nachteil, dass sie

zeitaufwendig und kostenintensiv sind (Schneider 1995). Vor diesem Hintergrund ist unter Umständen nicht jede hydraulische Fragestellung durch ein numerisches Modell zu beantworten, wenn sich diese durch die klassischen Methoden (z. B. analytische Berechnungen) abhandeln lässt (Hauschild und Goens 2010).

Aufgrund der vorgenannten Ausführungen ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, für Deichsanierungsmaßnahmen, bei welchen bogenförmige Deichlinien vorhanden sind und die im Rahmen der Sanierung mit innenliegenden vollkommenen Dichtungssystemen ertüchtigt werden, den Einfluss auf die Grundwasserströmung entsprechend abzuschätzen. Dies soll nach Möglichkeit anhand eines Berechnungsansatzes zur Überschlagsberechnung bzw. mit Bemessungsdiagrammen für ausgewählte Fälle erfolgen.

Dazu werden in **Kapitel 2** zunächst die notwendigen Grundlagen der Hydrologie/ Hydrogeologie, der Oberflächengewässer (Fließgewässer), der Grundwasserströmung, der Wechselwirkungsprozesse zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser (Interaktion), der innenliegenden vollkommenen Dichtungssysteme im Deichbau und der vorhandenen analytischen Berechnungsverfahren angrenzender Fachdisziplinen des Bauingenieurwesens erläutert.

In **Kapitel 3** erfolgt zu Beginn ein kurzer Überblick über den Rhein und den Flussabschnitt in Nordrhein-Westfalen. Anschließend wird das Kartenmaterial für den verzeichneten Flussverlauf in Nordrhein-Westfalen unter Berücksichtigung der Morphodynamik des Flusses sowie der Empirie der Mäander dahingehend ausgewertet, ob ein Zusammenhang mit einem empirischen Ansatz der Fachliteratur besteht. Auf dieser Grundlage erfolgt dann unter Festlegung von Annahmen sowie statistischer Methoden eine Bewertung hinsichtlich der Verwendung möglicher Bogenformen, die in der Natur häufig vorkommen, für exemplarische weiterführende Untersuchungen.

Die im Rahmen der eigenen numerischen Untersuchungen angewendete Methodik wird in **Kapitel 4** erläutert. Hierzu zählen die Grundlagen, das angewendete Programmsystem, das verwendete Berechnungsmodell und die untersuchten Parameter.

In **Kapitel 5** werden die Berechnungsergebnisse vor dem Hintergrund der Festlegung eines Berechnungsansatzes bzw. von Bemessungsdiagrammen bewertet und diskutiert. Darüber hinaus wird die Anwendung des Berechnungsansatzes bzw. der Bemessungsdiagramme anhand von Anwendungsbeispielen veranschaulicht.

Die Arbeit schließt im **Kapitel 6** mit einer kurzen Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse ab und gibt darüber hinaus noch einen Ausblick auf weiteren Untersuchungs- bzw. Forschungsbedarf.

2 Vorbetrachtung

Um die der Arbeit zugrundeliegenden Zusammenhänge und Wechselwirkungen der einzelnen Wissensgebiete besser nachvollziehen zu können, wird auf die Abbildung 2-1 verwiesen.

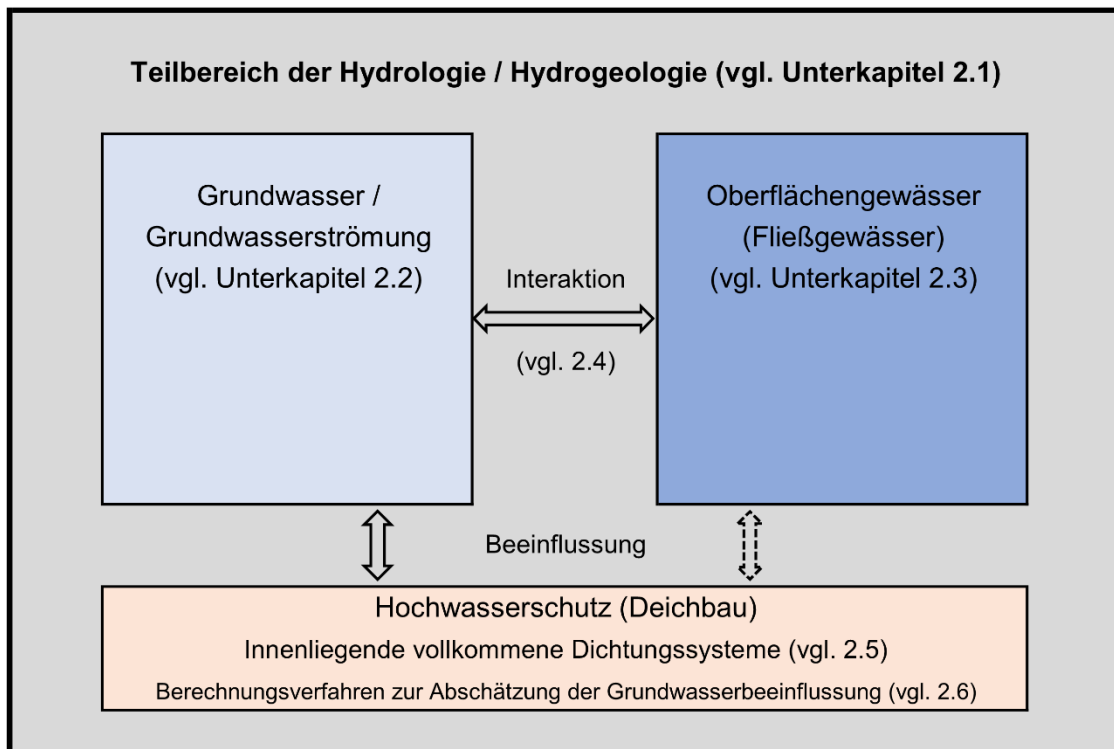


Abb. 2-1: Zusammenhänge und Wechselwirkungen der einzelnen Wissensgebiete

Die Beeinflussung der Fließgewässer durch Hochwasserschutzmaßnahmen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt.

2.1 Hydrologie und Hydrogeologie

Die Hydrologie als eigenständiges Wissensgebiet erforscht in enger Zusammenarbeit mit den artverwandten bzw. benachbarten Fachgebieten Meteorologie, Bodenkunde, Geologie, Biologie, Chemie und Ozeanologie die Vorkommens- und Zustandsgesetzmäßigkeiten des Wassers auf dem Festland (Liebscher und Baumgartner 1996).

Als übergeordnetes Sachgebiet rund um das Thema Wasser stellt es die wesentlichen Zusammenhänge des Wasserkreislaufes dar und ermöglicht durch die vorhandenen hydrologischen Modelle sowohl die Betrachtung der „wasserwirtschaftlichen Systeme“ (z. B. Niederschlag, Verdunstung, Bodenwasser, Grundwasser, Oberirdisches Gewässer etc.) als auch seiner Wechselwirkungen. Dabei weist der Bereich des Grundwassers eine enge Verzahnung mit der Hydrogeologie auf.

Aufgrund des flusnnahen Standortes von Hochwasserschutzanlagen (z. B. Deiche) sind für die weiteren Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit nur die unmittelbar angrenzenden „wasserwirtschaftlichen Systeme“ *Grundwasser* und *Oberflächengewässer (Fließgewässer)* von Bedeutung. Diese werden in den Unterkapiteln 2.2 und 2.3 behandelt. Darüber hinaus wird im Unterkapitel 2.4 auf die Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Systemen eingegangen.

2.2 Grundwasser und Grundwasserströmung

2.2.1 Grundwasser und Grundwasserleiter

Grundwasser wird definiert als das unterirdische Wasser der gesättigten Zone. Die gesättigte Zone stellt einen Teilbereich im hydrologischen System dar, in dem die Gesteinshohlräume vollständig mit Wasser gefüllt sind. Die Menge und Verfügbarkeit von Grundwasser hängt entscheidend von der strukturellen Beschaffenheit des *Grundwasserleiters* ab (Reiss und Harnischmacher 2016). Wie in der nachfolgenden Abbildung (s. Abb. 2-2) dargestellt, wird in Poren-, Kluft- und Karstgrundwasserleiter unterschieden (Hölting und Coldewey 2013).



Abb. 2-2: Arten der Grundwasserleiter (Quelle: Hölting und Coldewey, 2013)

Darüber hinaus hängt die Dynamik des Grundwasserleiters maßgeblich von den hydraulischen Druckverhältnissen ab. Hierbei ist gemäß Abbildung 2-3 zu unterscheiden zwischen freiem (1), gespanntem (2) und artesisch gespanntem (3) Grundwasser.

In einem *freien Grundwasserleiter (1)* ist an der freien Grundwasseroberfläche der Druck gleich dem absoluten Atmosphärendruck. Mit zunehmender Tiefe steigt der Druck infolge des Gewichts der überlagernden Wassersäule an (Auswahl für Kapitel 4). Im gespannten Grundwasserleiter (2) mit Überlagerung der Grundwasseroberfläche durch eine undurchlässige Schicht (Deckschicht) kann die unter Druck stehende Grundwasseroberfläche nicht weiter ansteigen. Der Druck an der Deckschichtfläche ist somit größer als der Atmosphärendruck. Um einen artesisch gespannten Grundwasserleiter (3)

handelt es sich, wenn die Grundwasserdruckfläche oberhalb der Geländeoberfläche liegt (Hölting und Coldewey 2013).

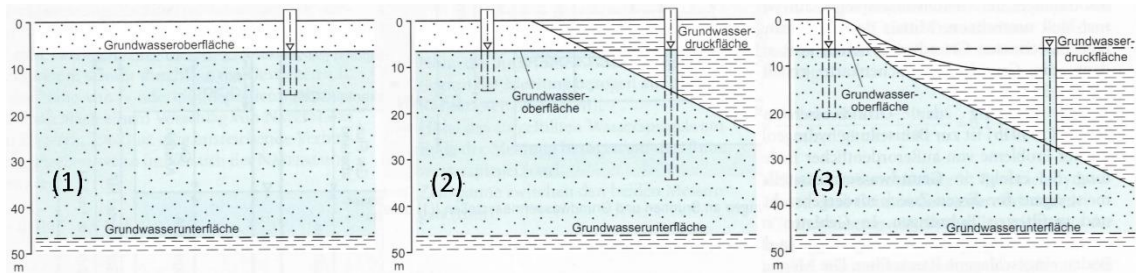


Abb. 2-3: Grundwasseroberflächen in freien (1), gespannten (2) und artesisch gespannten (3) Grundwasserleitern (Abgewandelt von: Hölting und Coldewey, 2013)

Der Grundwasserleiter gibt somit die Rahmenbedingungen für eine Grundwasserströmung vor. Neben der Voraussetzung eines hydraulischen Gefälles i ist eine Grundwasserbewegung (Grundwasserströmung) nur möglich, wenn ausreichend zusammenhängende Hohlräume vorhanden sind (Hölting und Coldewey 2013). Da sich das Flussbett sowie die Uferbereiche des Rheins in Nordrhein-Westfalen vorrangig im Lockergestein (Boden) befinden, wird nachfolgend und im Rahmen der numerischen Untersuchungen lediglich der *Porengrundwasserleiter* genauer betrachtet.

Aufgrund eines heterogenen Aufbaus der oberflächennahen Schichten, sind die Hohlräume im Grundwasserleiter entsprechend unterschiedlich ausgebildet. Lockergesteine wie Sand und Kies weisen zwischen den einzelnen Körnern Poren auf. Darunter sind Hohlräume zu verstehen, die verschiedene Gestalt und Größe aufweisen und mit Luft oder Wasser gefüllt sind (Hölting und Coldewey 2013). Für das weitere Verständnis dieser Zusammenhänge und der mathematischen Erfassung im Rahmen von Berechnungsmodellen werden üblicherweise Annahmen und Vereinfachungen getroffen um, die komplexen Naturvorgänge durch homogene Modelle handhabbar zu machen (s. Abb. 2-4).

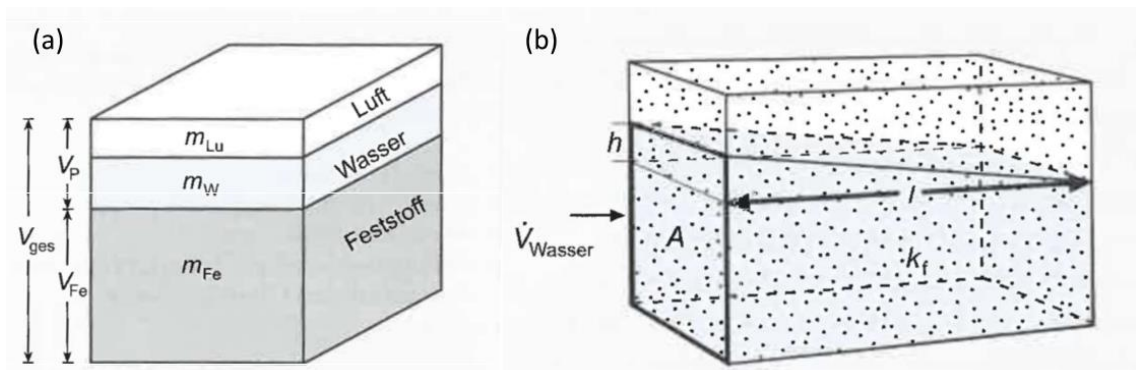


Abb. 2-4: (a) Phasen im Lockergestein und (b) Durchlässigkeitsbeiwert (Abgewandelt von: Hölting und Coldewey, 2013)

Bei der Betrachtung eines Kontrollvolumens wie in Abbildung 2-4 (a) dargestellt, lässt sich die Gesamtheit aller Poren als Porenvolumen V_P (Porenraum) bezeichnen. Der Porenanteil n_P , auch Porosität genannt, ist als Quotient aus Porenvolumen (Differenz aus Gesamtvolumen und Feststoffvolumen V_{Fe}) zum Gesamtvolumen V_{ges} einer Probe bzw. eines Kontrollvolumens definiert und lässt sich nach Gleichung (2.1) berechnen.

$$n_P = \frac{V_P}{V_{ges}} = \frac{(V_{ges} - V_{Fe})}{V_{ges}} \quad (2.1)$$

Mit Gleichung (2.1) lässt sich im bodenmechanischen Labor der Porenanteil n_P aus dem Quotienten des Porenvolumens V_P und dem Gesamtvolumen V_{ges} einer ungestörten Bodenprobe bestimmen. Hierzu ist anzumerken, dass ein Teil des Wassers an den Körnern in Form von Haftwasser adhäsiv gebunden wird. Der Haftwasseranteil nimmt mit geringer werdender Korngröße aufgrund des steigenden Verhältnisses von Kornoberfläche pro Volumeneinheit zu. Dies hat zur Folge, dass deutlich weniger Wasser abgegeben wird als von der trockenen ungestörten Bodenprobe aufgenommen werden kann. Somit steht ein Anteil des Porenvolumens für die Grundwasserbewegung bzw. Grundwasserströmung zur Verfügung, welcher nicht aus dem Volumen für das Haftwasser besteht. Dieses wird als effektives bzw. durchflusswirksames Porenvolumen V_{Peff} bezeichnet (Höltling und Coldewey 2013). Damit lässt sich der *effektive (durchflusswirksame) Porenanteil* n_{peff} (Quotient aus effektivem Porenvolumen der Hohlräume V_{Peff} und Gesamtvolumen V_{ges}) nach Gleichung (2.2) ermitteln.

$$n_{peff} = \frac{V_{Peff}}{V_{ges}} = \frac{(V_P - V_{Hw})}{V_{ges}} \quad (2.2)$$

Abschließend ist festzuhalten, dass mit einem hohen effektiven Porenanteil immer auch eine hohe *Durchlässigkeit* einhergeht. Darüber hinaus besteht zwischen dem Gesamtporenanteil und der Durchlässigkeit hingegen kein grundsätzlicher Zusammenhang. Schluffiger Ton besitzt zum Beispiel einen hohen Gesamtporenanteil n_P , aber nur einen geringen Durchlässigkeitsbeiwert k_f (vgl. Tab. 2-1).

In Tabelle 2-1 sind die Größenordnungen für den Gesamtporenanteil n_P und den effektiven Porenanteil n_{Peff} von verschiedenen Lockergesteinen mit unterschiedlichen Kornzusammensetzungen sowie mit der Bandbreite der sich aus Kornverteilungen ergebenden *Durchlässigkeitsbeiwerte* k_f dargestellt.

Tab. 2-1: Größenordnungen für Gesamtporenanteil, effektiven Porenanteil und Durchlässigkeitsbeiwert verschiedener Lockergesteine (Quelle: Hölting und Coldewey, 2013)

Lockergestein	Gesamtporen- anteil n_P [%]	effektiver Porenanteil n_{Peff} [%]	Durchlässigkeits- beiwert k_f [m/s]
sandiger Kies	25 - 35	20 - 25	$3 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$
kiesiger Sand	28 - 35	15 - 20	$1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-4}$
mittlerer Sand	30 - 38	10 - 15	$4 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-4}$
schluffiger Sand	33 - 40	8 - 12	$2 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-5}$
sandiger Schluff	35 - 45	5 - 10	$5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-6}$
toniger Schluff	40 - 55	3 - 8	$5 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-8}$
schluffiger Ton	45 - 65	2 - 5	$\sim 10^{-8}$

Der Durchlässigkeitsbeiwert ist exakt nur für eine *laminare Strömung* (siehe Abschnitt 2.2.2) bestimmbar. Das Versuchsmodell nach Darcy ist in Abbildung 2-4 (b) dargestellt.

$$\dot{V} = k_f \cdot A \cdot \frac{h}{l} \quad (2.3)$$

Das Gesetz von Darcy in der Form nach Gleichung (2.3) gibt das pro Zeiteinheit durch eine bestimmte Querschnittsfläche A eines Porengrundwasserleiters hindurchfließende Wasservolumen V an. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Querschnittsfläche A senkrecht zur Strömungs- bzw. Fließrichtung steht und sowohl den Feststoff- als auch den Hohlraumanteil beinhaltet, so dass es zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit noch der Berücksichtigung des effektiven (durchflusswirksamen) Porenvolumens bedarf (Hölting und Coldewey 2013).

Aufgrund der vorhandenen Dimensionen in Gleichung (2.3) ergibt sich für den Durchlässigkeitsbeiwert k_f die Einheit einer Geschwindigkeit (m/s). Der k_f -Wert ist jedoch nicht als Geschwindigkeit zu verstehen, sondern stellt vielmehr einen filterspezifischen Proportionalitätsfaktor dar. Aufgrund des Modellaufbaus und der Durchführung des Versuchs beinhaltet der Durchlässigkeitsbeiwert den Reibungswiderstand eines vom Wasser durchflossenen Lockergesteins unter Einbezug der Wassereigenschaften (Dichte, Viskosität und Temperatur) sowie der Porosität des jeweiligen Grundwasserleiters (Hölting und Coldewey 2013).

Es ist zudem anzumerken, dass der Durchlässigkeitsbeiwert aufgrund der Genese des Porengrundwasserleiters richtungsabhängig ist. Durch die überwiegende Sedimentierung der einzelnen Sedimentpartikel (oval, plattig, plättchenförmig, schuppig etc.) kann das Grundwasser den Grundwasserleiter in horizontaler Richtung leichter durchströmen als in vertikaler Richtung. Dies führt zu den verschiedenen Möglichkeiten der Lockergesteinsausbildung und ihrer Einstufung hinsichtlich der Homogenität und Isotropie (s. Abb. 2-5).

	homogen	heterogen
isotrop		
anisotrop		

Abb. 2-5: Grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Durchlässigkeit und Richtung (Quelle: Hölting und Coldewey, 2013)

In Abbildung 2-5 ist der Grundwasserleiter als vertikalebene System (2D) dargestellt. In der Praxis entspricht der Grundwasserleiter einem heterogenen und anisotropem Baugrund (s. Abb. 2-5 (4)). Dabei variieren die Korngrößenverteilungen in ihrer räumlichen Ausdehnung (Heterogenität), die höchste Durchlässigkeit ist in horizontaler schichtungparalleler Richtung ($k_{fx} = k_{fh}$) und die geringste Durchlässigkeit ist in vertikaler Richtung ($k_{fy} = k_{fv}$) lotrecht zur Schichtung (Anisotropie) festzustellen. Im Zuge geohydraulischer und numerischer Berechnungen erfolgt häufig zur Vereinfachung der Eigenschaften des Grundwasserleiters eine Festlegung gemäß den Darstellungen 1, 2 oder 3 in Abbildung 2-5.

Bildet man den Quotienten aus dem horizontalen und dem vertikalen Durchlässigkeitsbeiwert, erhält man nach Gleichung (2.4) den *Anisotropiefaktor*.

$$f_A = \frac{k_{fx}}{k_{fy}} = \frac{k_{fh}}{k_{fv}} \quad (2.4)$$

Dieser liegt üblicherweise zwischen 1 und 10. Der Anisotropiefaktor für sandige, kiesige Sedimente mit schluffigen Anteilen liegt bei etwa 3 bis 5. Aufgrund der ausgeprägten plättchenförmigen Sedimentpartikel ist für Schluffe und Tone ein Anisotropiefaktor von 10 charakteristisch (Hölting und Coldewey 2013).

Erfolgt im Rahmen geohydraulischer und numerischer Berechnungen eine dreidimensionale Modellierung des Grundwasserleiters, werden die Durchlässigkeiten in

horizontaler schichtungsparalleler Richtung häufig mit $k_{fx} = k_{fy}$ und in vertikaler Richtung mit k_{fz} bezeichnet.

Nach Hölting und Coldewey (2013) kann der Durchlässigkeitsbeiwert durch folgende Methoden bestimmt werden:

- Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen in situ,
- Durchführung und Auswertung von Laborversuchen an zylindrischen Probekörpern (Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit) und
- Durchführung von Siebanalysen (Bestimmung der Korngrößenverteilung von Bodenproben) und Auswertung mit analytischen bzw. grafischen Verfahren.

Auf dem Gebiet der hydraulischen Durchlässigkeitsbestimmung im Feld werden derzeit innovative Methoden erforscht. An dieser Stelle sind unter anderem die Verfahren Direct-Push Injektionslog (DPIL) und Direct-Push Slugtest (DPST) zu nennen (Blum et al. 2008).

Sowohl der effektive Porenanteil n_{Peff} als auch der Durchlässigkeitsbeiwert k_f stellen wichtige Kenn- bzw. Eingangsgrößen für die numerischen Untersuchungen der Grundwasserströmung dar.

2.2.2 Grundwasserströmung

Die Schwerkraft und die durch sie hervorgerufenen Druckkräfte stellen die treibenden Kräfte der Grundwasserströmung dar. Bei der Betrachtung eines mit Wasser gefüllten Behälters nimmt der Druck im Behälter über die Tiefe z zwar kontinuierlich zu, jedoch findet keine Wasserbewegung statt (Kinzelbach und Rausch 1995).

Voraussetzung für das Strömen von Grundwasser ist wie bereits erwähnt ein vorhandenes *Druckgefälle*, d. h. zwischen zwei Standorten muss eine Differenz der Standrohrspiegelhöhen ($h_1 \neq h_2$) vorliegen. Die Standrohrspiegelhöhe h berücksichtigt sowohl den hydrostatischen Druck ($p/\rho \cdot g$) als auch die Lage zum Bezugsniveau (z) und ist mathematisch in Gleichung (2.5) dargestellt.

$$h = \frac{p}{\rho \cdot g} + z \quad (2.5)$$

Darin enthalten sind der Druck p , die Dichte des Wassers ρ , die Erdbeschleunigung g und die Ortshöhe z . Gleichung (2.5) stellt die Vereinfachung der spezifischen mechanischen Energiegleichung E_{spez} dar, die sich aus dem Druckenergie- ($p/\rho \cdot g$), Lageenergie- (z) und kinetischem Energieanteil ($v^2/2g$) zusammensetzt. Aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers wird der kinetische Energieanteil in Gleichung (2.5) vernachlässigt, so dass die verbleibenden Größen als Piezometer- oder

Standrohrspiegelhöhe h bezeichnet werden. Eine Abnahme der Standrohrspiegelhöhe bedeutet Energieverlust, die dann durch interne Reibung in Wärmeenergie übergeht (Kinzelbach und Rausch 1995).

Aus dem Druckgefälle resultieren die Geschwindigkeit ($v = k_f \cdot i$) und die Strömungsrichtung ϑ des Grundwassers. Auf diese Größen wird im Verlauf des Unterkapitels 2.2 im Detail eingegangen. Durch spezielle GFV-Messsonden können in Grundwassermessstellen die Grundwasserfließrichtung und die Grundwasserfließgeschwindigkeit direkt und ohne künstliche Markierungen (z. B. Markierungsversuch) kontinuierlich aufgezeichnet werden (Schöttler und Schleicher 2010). Aufgrund der durch den Messstellenausbau im Ringraum geänderten hydraulischen Randbedingungen werden die vorgenannten Messwerte verzerrt. Um diese Einflüsse genauer zu untersuchen und realitätsnahe Fließprozesse im Grundwasserleiter aus den Messwerten abzuleiten, bedarf es weiterer Forschungsprojekte (Schöttler et al. 2012).

Eine weitere wichtige Kenngröße für das Verhalten von Wasser in Rohren sowie in Poren oder Klüften (Strömungsform) stellt die dimensionslose Reynoldszahl Re nach Gleichung (2.6) dar.

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (2.6)$$

Hierbei beschreibt die Variable d (m) den charakteristischen Rohr- oder Korn-durchmesser, v die Strömungsgeschwindigkeit (m/s) und ν die temperaturabhängige kinematische Viskosität des Wassers (m^2/s).

Die Reynoldszahl ermöglicht die Kennzeichnung des Übergangs einer laminaren in eine turbulente Strömung. Die laminare Strömung liegt beispielsweise bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten und großer Viskosität, d. h. bei kleinen Reynoldszahlen, vor. In diesem Fall bewegen sich die Flüssigkeitsteilchen parallel zueinander. In Locker- oder Porengesteinen ist die Voraussetzung für eine laminare Strömung überwiegend gegeben, da diese aus einem Gemenge überwiegend feiner Körner und Sedimentpartikel bestehen. Steigt der hydraulische Gradient i ($= h/l$) allerdings an, dann kann sich die laminare Strömung im Grundwasser in eine turbulente Strömung umwandeln, wie z. B. bei Grundwasserabsenkungen im Bereich des Absenktrichters am Brunnenrohr. Eine turbulente Strömung liegt größtenteils in Klufftgrundwasserleitern vor. Dabei stoßen die Wasserteilchen bei hohen Geschwindigkeiten, also großen Reynoldszahlen, auch quer zur Strömungsrichtung aneinander (Turbulenz), so dass hier viele Querbewegungen die Hauptbewegung überlagern (Höltling und Coldewey 2013).

In Abbildung 2-6 ist die Gültigkeitsgrenze des Darcyschen Gesetzes nach Sichardt in Abhängigkeit vom Gefälle i (%) und vom Durchlässigkeitsbeiwert k (m/s) des Bodens

dargestellt. Unterhalb des Kurvenverlaufes liegt eine laminare Strömung des Grundwassers vor, so dass das Darcysche Gesetz, z. B. nach Gleichung (2.3), Anwendung findet (Herth und Arndts 1995).

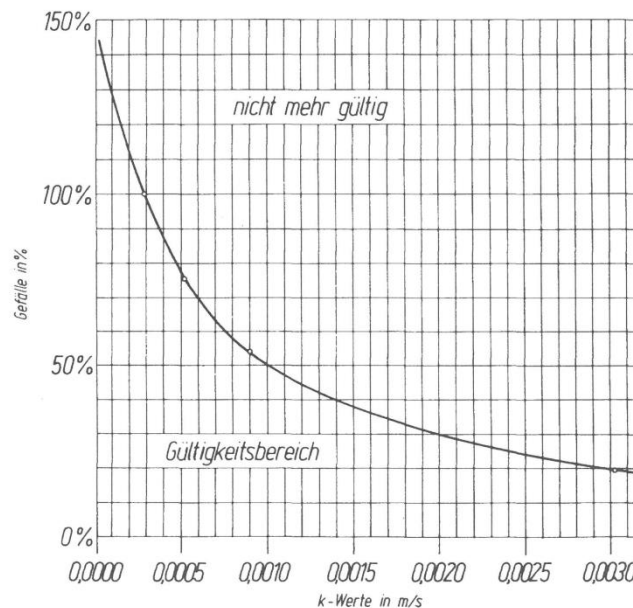


Abb. 2-6: Gültigkeitsgrenze des Darcyschen Gesetzes nach Sichardt (Quelle: Herth und Arndts, 1995)

Bei der Grundwasserströmung im Lockergestein (Porengrundwasserleiter) müssen die Wasserteilchen krümmungsreich um die einzelnen Körner herumfließen. Diese sog. Bahngeschwindigkeit v_b lässt sich jedoch nicht genau bestimmen, so dass gemäß des Modellversuchs in Abbildung 2-4 (b) vereinfacht die Abstandsgeschwindigkeit v_a verwendet wird. Sie errechnet sich nach Gleichung (2.7) als Quotient aus dem Abstand l und der Fließzeit t zwischen zwei Punkten A und B (Hölting und Coldewey 2013).

$$v_a = \frac{l}{t} = \frac{v_f}{n_{peff}} \quad (2.7)$$

In der Praxis kann die Abstandsgeschwindigkeit v_a z. B. als Näherungswert durch einen Markierungsversuch bestimmt werden. Im Gegensatz zur Abstandsgeschwindigkeit v_a lässt sich die Filtergeschwindigkeit v_f eines Grundwasserkörpers etwas einfacher und genauer bestimmen. Durch das Umstellen der Gleichung (2.3) erhält man die Filtergeschwindigkeit v_f nach Gleichung (2.8).

$$v_f = k_f \cdot \frac{h}{l} = k_f \cdot i = \frac{\dot{V}}{A} \quad (2.8)$$

Dividiert man die Filtergeschwindigkeit v_f durch den effektiven (durchflusswirksamen) Porenanteil n_{peff} , lässt sich ebenfalls die Abstandsgeschwindigkeit v_a ermitteln (siehe Gleichung (2.7)). Dieser Berechnungsansatz wird zur Bestimmung der Sicker-

geschwindigkeit in einzelnen Programmsystemen (z. B. GGU-2D-SSFLOW) verwendet (Buß 2019).

Auf die unterschiedlichen Strömungsprozesse des Grundwassers wie etwa die Strömungsverhältnisse (stationäre oder instationäre Strömung) und die Fließzustände (gleichförmige oder ungleichförmige Strömung) wird im Rahmen der Strömungsanalyse im Abschnitt 4.1.1. eingegangen.

2.2.3 Bestimmung von hydraulischem Gefälle i und Fließrichtung α

Aus den beiden vorhergehenden Abschnitten lässt sich entnehmen, dass das Grundwasser immer von einem Ort mit hohem zu einem Ort mit geringem hydraulischem Potenzial und somit in Richtung des größten Gefälles der gemessenen Standrohrspiegelhöhen strömt. Das größte Gefälle einer Grundwasser Oberfläche (Grundwasserdruckfläche), der sog. hydraulische Gradient (hydraulisches Gefälle i) und damit die Grundwasserfließrichtung (Fließrichtung α), können erst eindeutig bestimmt werden, wenn für mindestens drei Grundwassermessstellen folgende Angaben vorliegen (Reiss und Harnischmacher 2016):

- Geografische Lage der Grundwassermessstellen (z. B. Koordinaten)
- Entfernung zwischen den Grundwassermessstellen
- Standrohrspiegelhöhe in jeder Grundwassermessstelle (für einen Stichtag)

Mit diesen Angaben können das hydraulische Gefälle i und die Fließrichtung α , also die die reine Grundwasserströmung beschreibenden Größen, entweder grafisch (s. Abb. 2-7) oder rechnerisch (s. Abb. 2-8) bestimmt werden.

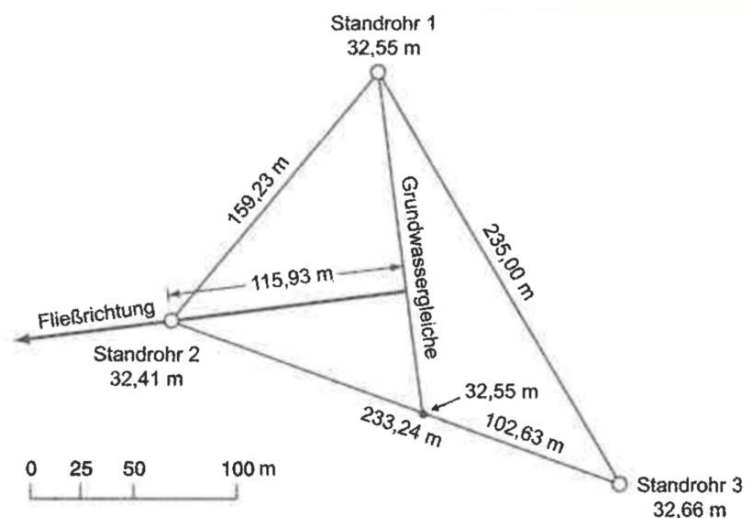


Abb. 2-7: Konstruktion einer Grundwassergleiche in einem hydrologischen Dreieck (Quelle: Reiss und Harnischmacher, 2016)

Wie in Abbildung 2-7 in Form einer grafischen Bestimmung dargestellt, werden sog. *Grundwassergleichen* nach dem Prinzip der linearen Interpolation in einem hydrologischen Dreieck ermittelt. Grundwassergleichen (Grundwasserisohypsen) sind Linien gleichen Potentials bzw. gleicher Standrohrspiegelhöhe h . Das hydraulische Gefälle i lässt sich zwischen zwei Grundwassergleichen nach Gleichung (2.9) bestimmen (Höltling und Coldewey 2013).

$$i = \frac{h_1 - h_2}{l} \quad (2.9)$$

Dabei sind h_1 die Höhe der höheren und h_2 die Höhe der tieferen Grundwassergleiche sowie l der horizontale Abstand zwischen den beiden Grundwassergleichen. Die Grundwasserfließrichtung steht senkrecht zu den Grundwassergleichen und fließt in Richtung von h_1 zu h_2 .

Im Abschnitt 2.2.1 wurde bereits darauf eingegangen, dass der k_f -Wert einen filterspezifischen Proportionalitätsfaktor darstellt. Aus einer abgewandelten Darstellungsform des Darcyschen Gesetzes lässt sich ableiten, dass je größer das Gefälle i ausfällt, desto kleiner der Durchlässigkeitsbeiwert k_f resultiert. Diese allgemeine Folgerung lässt sich auf praktische Weise bei der qualitativen Beurteilung der Durchlässigkeitsverhältnisse in einem Grundwasserleiter anwenden. Somit lässt sich in vielen Fällen aus den Abständen der Grundwassergleichen unter Anwendung von Gleichung (2.9) auf die Durchlässigkeit des Untergrundes schließen (Höltling und Coldewey 2013). Weiterführende Informationen hinsichtlich der Interpretation von Grundwasserständen und Grundwassergleichen im Hinblick auf die Grundwasserhydraulik und ihrer Randbedingungen sind im Heft 70 der FH-DGG (Fachsektion Hydrogeologie in der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 2010) aufgeführt.

Das hydraulische Gefälle i und die Grundwasserfließrichtung α lassen sich in einem hydrologischen Dreieck direkt und ohne die Konstruktion von Grundwassergleichen analytisch bestimmen (s. Abb. 2-8).

Mit den Koordinaten x_i und y_i sowie der Standrohrspiegelhöhe h_i der drei in Abb. 2-8 dargestellten Grundwassermessstellen werden unter Berücksichtigung der Rechengröße M nach Gleichung (2.10) jeweils das Gefälle in x - und y -Richtung nach den Gleichungen (2.11) und (2.12) ermittelt (Chiang et al. 1996).

$$M = x_1 \cdot y_2 + x_2 \cdot y_3 + x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3 - x_2 \cdot y_1 - x_3 \cdot y_2 \quad (2.10)$$

$$-\frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{1}{M} \cdot [(y_2 - y_3) \cdot h_1 + (y_3 - y_1) \cdot h_2 + (y_1 - y_2) \cdot h_3] \quad (2.11)$$

$$-\frac{\partial h}{\partial y} = -\frac{1}{M} \cdot [(x_3 - x_2) \cdot h_1 + (x_1 - x_3) \cdot h_2 + (x_2 - x_1) \cdot h_3] \quad (2.12)$$

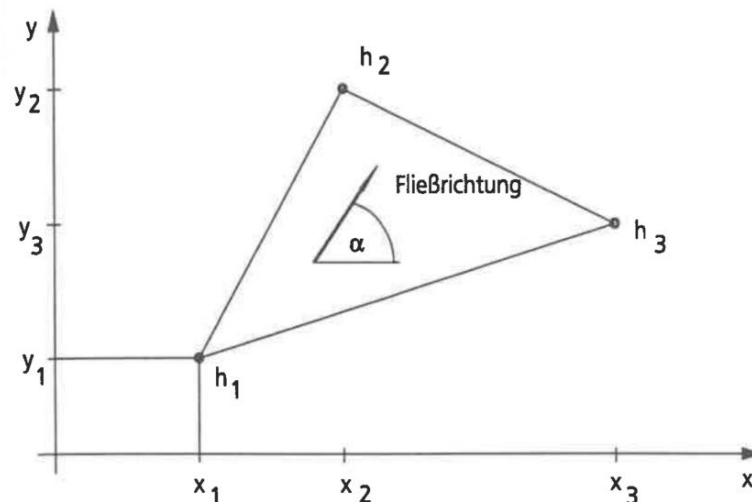


Abb. 2-8: Analytische Bestimmung von hydraulischem Gefälle und Strömungsrichtung (Quelle: Chiang et al., 1996)

Damit lässt sich das hydraulische Gefälle i nach Gleichung (2.13) und die Grundwasserfließrichtung als Winkel α zur x-Achse nach Gleichung (2.14) berechnen.

$$i = \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^2} \quad (2.13)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\partial h / \partial y}{\partial h / \partial x} \quad (2.14)$$

Der Winkel α zur x-Achse ändert sich je nach Fließrichtung des Grundwassers in Abhängigkeit der Quadranten dabei wie folgt:

- I. Quadrant: $+\partial h / \partial x$ und $+\partial h / \partial y \rightarrow +\alpha$
- II. Quadrant: $+\partial h / \partial x$ und $-\partial h / \partial y \rightarrow -\alpha$
- III. Quadrant: $-\partial h / \partial x$ und $-\partial h / \partial y \rightarrow +\alpha$
- IV. Quadrant: $-\partial h / \partial x$ und $+\partial h / \partial y \rightarrow -\alpha$

Bei der Bestimmung der die Grundwasserströmung beschreibenden Größen ist zum einen zu beachten, dass die Abstände zwischen den Grundwassermessstellen gegenüber dem Messfehler der Standrohrspiegelhöhen möglichst groß sind und zum anderen nur Grundwassermessstellen verwendet werden, bei denen die Filterrohre im gleichen Grundwasserstockwerk installiert sind (Chiang et al. 1996).

Bei einer kontinuierlichen Aufzeichnung der Grundwasserstände, z. B. durch sog. Datenlogger oder viele Stichtagsmessungen, lassen sich für jede Grundwassermessstelle Grundwasserganglinien als Zeitreihen der Grundwasserstände grafisch darstellen. Auf dieser Grundlage sollten idealerweise für unterschiedliche hydrologische Zustände (z. B. niedriger Grundwasserstand (NGW), mittlerer Grundwasserstand

(MGW) und hoher Grundwasserstand (HGW)) Grundwassergleichenpläne konstruiert und das hydraulische Gefälle i sowie die Grundwasserfließrichtung α bestimmt werden. Dabei gilt, dass je unterschiedlicher sich die zeitliche Dynamik der Grundwasserstände einzelner Messtellen innerhalb eines betrachteten Gebietes darstellt, die Anzahl der zu analysierenden Zustände umso größer sein soll (Himml und Schäfer 2010).

Im Rahmen der Genehmigungsplanung für die Sanierung des etwa 2,8 km langen linksrheinischen Deichabschnittes in Duisburg-Homberg ergab die Auswertung der Zeitreihen der Grundwasserstände für die Dichtwandabschnitte am ehemaligen Wasserwerksgelände und am Pumpwerk Gerdt die in Tabelle 2-2 aufgeführten hydraulischen Gefälle (Schloth 2020).

Tab. 2-2: Deichsanierung Duisburg-Homberg - Hydraulische Gefälle i (Quelle: Schloth, 2020)

Dichtwandabschnitt	Gefälle i (NGW) [‰]	Gefälle i (MGW) [‰]	Gefälle i (HGW) [‰]
Ehem. Wasserwerksgelände	0,53	1,00	1,50
Pumpwerk Gerdt	0,55	0,71	5,80

Der große Unterschied beim hydraulischen Gefälle i für den hydrologischen Zustand HGW resultiert zum einen aus dem flussnahen Standort des Pumpwerkes und zum anderen aus der Flusskurve (Prallhang). Die Gefälle bei NGW und MGW sind zum Fluss hingerrichtet. Beim HGW kehrt sich die Fließrichtung des Gefälles um.

2.3 Oberflächengewässer (Fließgewässer)

2.3.1 Entstehung und Gestaltungsvorgänge

In Hoch- und Mittelgebirgen kann der Grundwasserabfluss in Form von Quellen an die Geländeoberfläche, z. B. in die Gewässersohle, austreten und somit zum Beginn eines Fließgewässers werden. Das so entstehende Fließgewässer kann sich bei entsprechender Geländegeometrie (Geländeneigung und Muldenform) vom Oberlauf über den Unterlauf bis hin zur Mündung ins Meer entlang seines Flusslaufes zu einem außerordentlich vielfältigen dynamischen Gebilde entwickeln. In Abhängigkeit des Abflussspektrums, der Strömungsintensität, der geologischen und sedimentologischen Gegebenheiten und der Vegetation laufen die Gerinneveränderungen (Erosions- und Akkumulationsprozesse) mehr oder weniger schnell ab. Diese Dynamik der Gerinnebildung hängt in hohem Maße von den Kraftereinwirkungen des abfließenden Wassers und seiner mitgeführten Bestandteile (Feststoffe) ab (Schröder und Römisch 2001).

In Abbildung 2-9 sind die wesentlichen Faktoren als Kästen und die Wirkungen als Pfeile schematisch dargestellt.

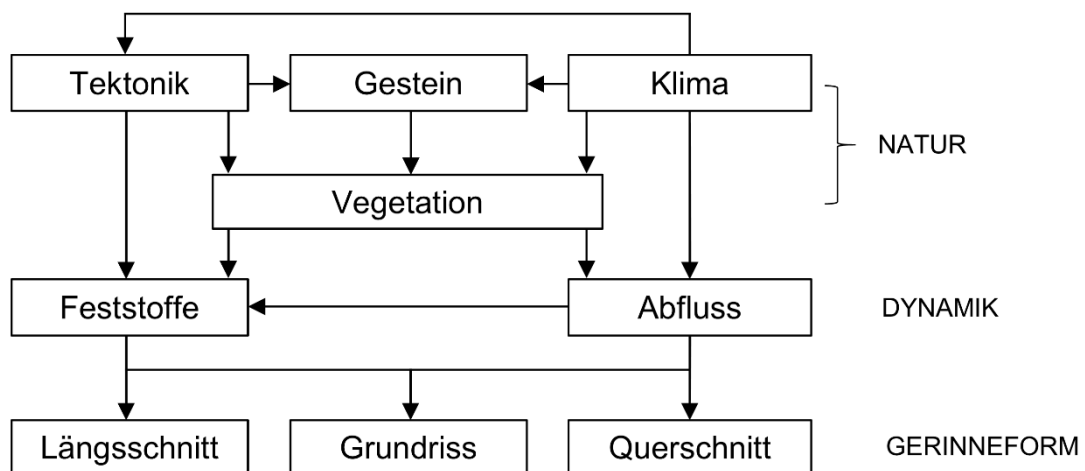


Abb. 2-9: Einflüsse auf die Gerinneform von Fließgewässern (Abgewandelt von: Schröder und Römisch, 2001)

Die Vegetation hemmt je nach Art und Dichte an den Ufern das Abbrechen von Locker- und Festgestein (natürliche Böschungssicherung) sowie im Einzugsgebiet den Abfluss und das Abschwemmen von Bodenteilchen. In Abhängigkeit der Feststoffzufuhr m_{FZ} und des Feststofftransportvermögens m_{FT} sind die Fließgewässerstrecken entlang des Flussverlaufes nach ihrer Erosions- und Akkumulationstendenz einzuordnen:

- $m_{FZ} < m_{FT}$ Erosionsstrecke (Eintiefung)
- $m_{FZ} \approx m_{FT}$ Akkumulationsstrecke (Beharrung)
- $m_{FZ} > m_{FT}$ Akkumulationsstrecke (Hebung)

Die Eigenschaften der Gerinnesohle bestimmen, ob hinsichtlich des jeweiligen Fließgewässers vorrangig eine Erosions- oder Akkumulationstendenz vorliegt. Insbesondere in großen Fließgewässern (z. B. Rhein) lässt sich die Eigenschaft der Gerinnesohle optisch nur sehr schwer feststellen. Vor diesem Hintergrund ist eine Beurteilung der Veränderungstendenz unter Umständen entweder durch einen Vergleich der Ist-Sohlenhöhen mit früheren Querprofilaufnahmen oder durch Sohlpeilungen möglich. Darüber hinaus kann auch eine Analyse des Sohlensubstrats (Bestimmung der Korngrößenverteilung) erste Anhaltswerte liefern. Nach den Grundsätzen im Flussbau handelt es sich beim Oberlauf mit seinem großen Längsgefälle im Allgemeinen um eine Erosionsstrecke und bei den daran anschließenden Bereichen um entsprechende Akkumulationsstrecken (s. Abb. 2-10).

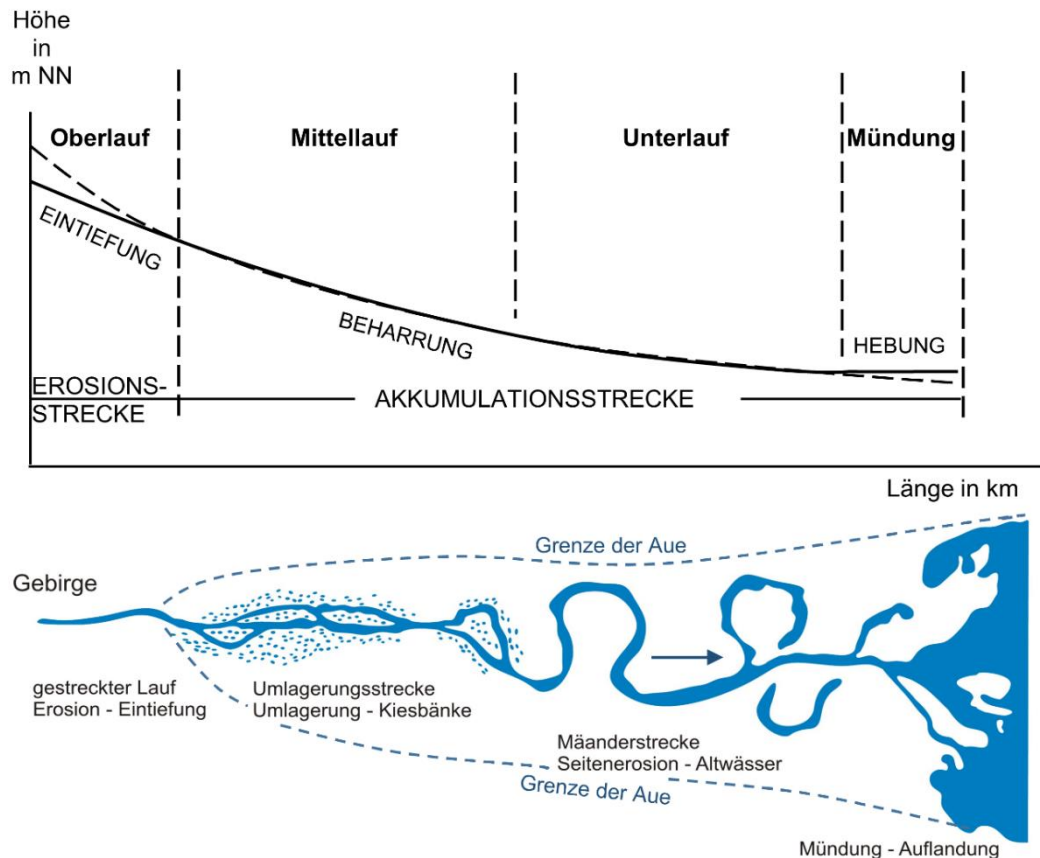


Abb. 2-10: Regellängsprofil und Regelgrundriss, ohne seitliche Zuläufe (Abgewandelt von: Schröder und Römisch, 2001)

Es kann jedoch vorkommen, dass diese Grundsätze – entweder von Natur aus oder durch menschliche Eingriffe verursacht – im jeweiligen Einzelfall stark variieren, so dass sich Erosion und Akkumulation entlang des Flussverlaufes mehrmals abwechseln. Darüber hinaus können sich diese Grenzen z. B. infolge von Rodungen, Aufforstungen oder durch den Verbau von Feststoffquellen (z. B. Ufersicherungen und Buhnen) verschieben. Sofern ein anthropogen nicht oder nur gering überprägter Zustand vorliegt, werden Akkumulationsstrecken häufig von einer Aue bzw. Auenlandschaft begleitet, die bei Hochwasser entweder in Gänze oder teilweise überflutet ist (Schröder und Römisch 2001). Auf die Auswirkungen von Schwankungen der Sohlenhöhe (Sohlenhebungen bzw. Sohlvertiefungen) wird im Unterkapitel 2.4 eingegangen.

2.3.2 Abfluss im Gewässersystem

Zur Beantwortung von wasserwirtschaftlichen Fragestellungen ist es erforderlich, das Abflussgeschehen eines Fließgewässers (Gewässersystem) möglichst genau zu kennen. Zu diesem Zweck werden an bestimmten Stellen eines Flussverlaufes entsprechende Messsysteme (sog. Pegel) errichtet und zwischen diesen umfangreiche

Vermessungsarbeiten zur Bestimmung der Lauflänge und der Querschnittsgeometrie durchgeführt. Auf diesen Grundlagen lässt sich für Gerinne unter der Annahme, dass die Querschnittsform und die Rauigkeitsverhältnisse über einen Abschnitt der Länge x nahezu unverändert sind, d.h. eine *gleichförmige Gerinneströmung* vorliegt, eine Abflusskurve ($Q = f(h)$) entwickeln (s. Abb. 2-11).

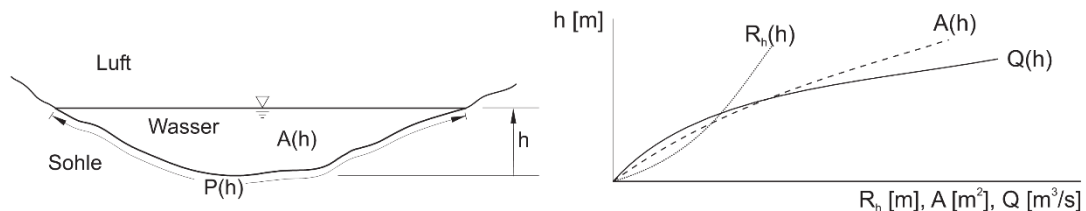


Abb. 2-11: Qualitative Darstellung einer Abflusskurve $Q(h)$ eines allgemeinen Querschnitts mit gleichförmiger Gerinneströmung (Quelle: Jirka und Lang, 2009)

Werden als Funktion der Wassertiefe h die geometrischen Beziehungen der Querschnittsfläche $A(h)$, des benetzten Umfangs $P(h)$ und des hydraulischen Radius $R_h(h)$ verwendet, dann lässt sich die Abflusskurve gemäß Gleichung (2.15) angeben.

$$Q(h) = v(h) \cdot A(h) \quad (2.15)$$

Dabei wird $v(h)$ durch eine der beiden Fließformeln von Manning-Strickler oder Darcy-Weisbach bestimmt, die den Einfluss des Gerinnegefälles I_0 beinhaltet. Mit dieser Vorgehensweise kann anhand von Wassertiefen h an den Pegeln (sog. Pegelstände) und unter Anwendung der pegelspezifischen Abflusskurve die Größe des Abflusses im Fließgewässer bestimmt werden (Jirka und Lang 2009).

Werden diese Daten kontinuierlich und sorgfältig erhoben, lassen sich über das langjährige Abflussverhalten vor Ort sowie für das Einzugsgebiet entsprechende Aussagen treffen. Ein wichtiges Hilfsmittel ist dabei die Abflussdauerlinie (s. Abb. 2-12). Hierbei werden statistisch gleichwertige Einzelbeobachtungen bzw. Mittelwerte einer langjährigen Beobachtungsreihe entsprechend ihrer Größe entweder mit der zugehörigen Überschreitungsdauer oder mit der Unterschreitungsdauer (vgl. Abb. 2-12) grafisch dargestellt. Darüber hinaus sind in Abbildung 2-12 folgende hydrologische Kennwerte abgebildet (Giesecke et al. 2014):

- NQ ist der niedrigste Abflusswert in einem anzugebenden Zeitraum.
- ZQ stellt den Median- bzw. Zentralwert des Abflusses dar, der in einem anzugebenden Zeitraum jeweils von der Hälfte der Werte über- bzw. unterschritten wird, d. h. bei einer jährlichen Darstellungsform liegt der Wert rechnerisch bei 182,5 Tagen.

- MQ definiert als arithmetisches Mittel den Mittelwasserabfluss in einem anzugebenden Zeitraum.
- HQ gibt den höchsten Abflusswert in einem anzugebenden Zeitraum an.

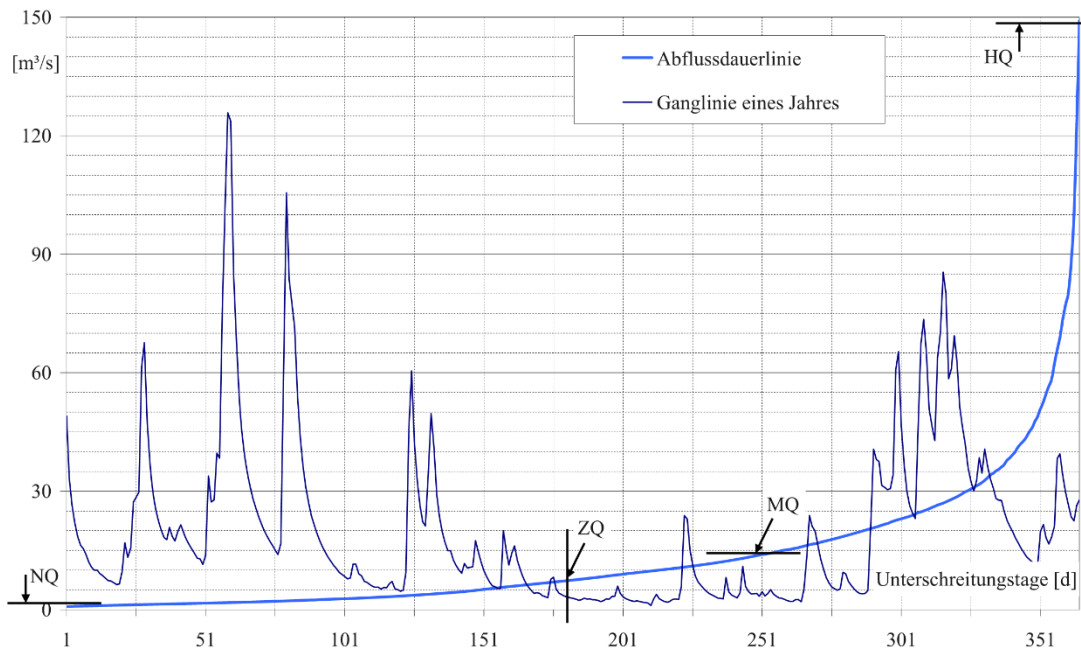


Abb. 2-12: Exemplarische Abflussdauerlinie mit einigen hydrologischen Kennwerten sowie der Ganglinie eines Jahres (Quelle: Giesecke et al., 2014)

Hydrologische Extreme stellen nach Schumann und Menzel (2016) unter anderem das Hoch- und Niedrigwasser dar. Diese beiden Extremwerte kennzeichnen die obere und untere Grenze des Abflussspektrums eines Fließgewässers.

Als Hochwasser werden hohe Abflüsse über einen begrenzten Zeitraum infolge extremer Niederschläge und/oder Schneeschmelze bezeichnet. Die Entstehung wird stark durch das Zusammenspiel von Niederschlag, ggf. in Kombination mit Schneeschmelze und der Bodenspeicherung beeinflusst. Der zeitliche Verlauf dieses Abflusszustandes an einem Gewässerpunkt (z. B. Pegel) wird durch die Hochwasserganglinie beschrieben. Dieser hängt maßgeblich von der zeitlichen Verteilung des Niederschlags, der Speicherung im Gebiet, den Fließvorgängen im Einzugsgebiet und den Wellenablaufprozessen ab. Hochwasserereignisse werden hauptsächlich durch die jährlichen statistischen Überschreitungswahrscheinlichkeiten ihres Scheitelabflusses in der Form HQ_n angegeben (Schumann und Menzel 2016).

Für die Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten wird auf das Merkblatt DWA-M 552 verwiesen (DWA 2012b).

Nach Schröder und Römisch (2001) ist auch Hochwasserereignissen ein Einfluss auf den Feststofftransport der Gewässersohle beizumessen. Beim Anstieg einer Hochwasserwelle wirkt das erhöhte Fließgefälle I_E – welches größer als das normalerweise im Fließgewässer vorhandene stationäre Fließgefälle I_{st} ist – zunächst ausräumend auf die Gewässersohle und beim Abfallen erfolgt anschließend durch das verminderte Fließgefälle ein auffüllender Effekt (s. Abb. 2-13).

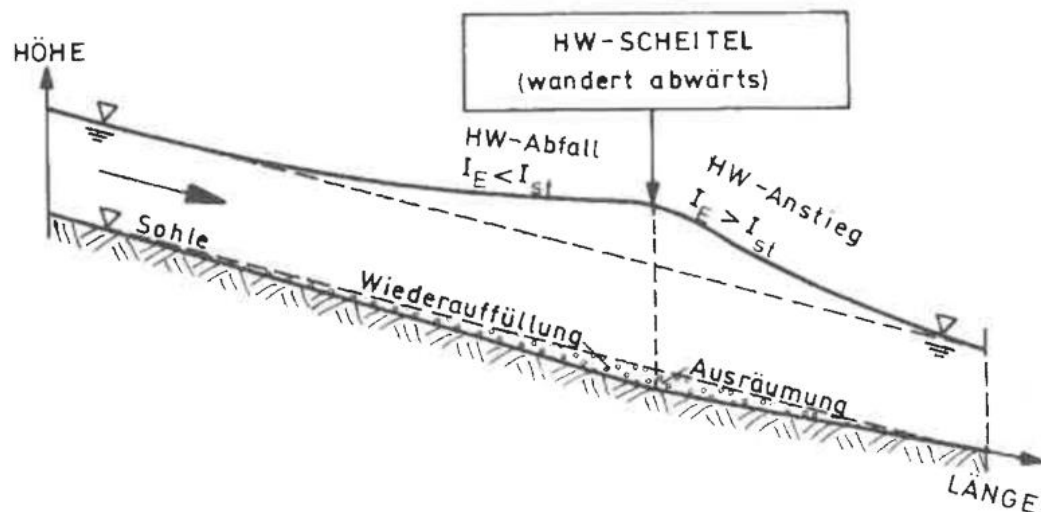


Abb. 2-13: Prinzipskizze eines Flusslängsschnittes zur Darstellung der Veränderungen von Energiehöhengefälle und Sohlenhöhe beim Durchgang einer Hochwasserwelle (Quelle: Schröder und Römisch, 2001)

Ist die Hochwasserdauer entsprechend lang, dann können sich nach Auffassung von Schröder und Römisch (2001) die Eintiefungs- und die Wiederanhebungsphase jeweils über mehrere Monate erstrecken.

Die untere Grenze des Abflussverhaltens eines Fließgewässers wird durch das Niedrigwasser definiert, welches nach Ansicht von Schumann und Menzel (2016) als ein natürliches und regelmäßig auftretendes hydrologisches Ereignis zu betrachten ist.

Die Wechselwirkungen zwischen Fließgewässern und Grundwasser bei niedrigen und mittleren Wasserständen sowie bei hohen Wasserständen werden im Unterkapitel 2.4 dargestellt.

2.4 Interaktion zwischen Fließgewässern und Grundwasser

Die Oberflächengewässer und das Grundwasser bilden grundsätzlich ein zusammenhängendes System, welches einer ganzheitlichen Betrachtung bedarf. Zwischen diesen beiden „wasserwirtschaftlichen Systemen“ besteht ein wechselseitiges Aufeinander-Einwirken, also eine Interaktion (Himml und Schäfer 2010). Auf diese

Interaktion wird nachfolgend, differenziert in niedrige/mittlere Wasserstände und hohe Wasserstände, eingegangen.

2.4.1 Niedrige und mittlere Wasserstände

Im Lockergestein dienen bei den überwiegenden Abflusssituationen, d. h. niedrige und mittlere Wasserstände im Fließgewässer, die Oberflächengewässer der Entwässerung des Grundwasserkörpers. Im Vergleich zum Grundwasserleiter kann im offenen Gerinne des Fließgewässers eine große Menge Wasser abgeführt werden, so dass sich im Abflussquerschnitt des Fließgewässers gegenüber dem umgebenden Grundwasserkörper ein geringerer Wasserstand einstellt. In diesem Fall stellen Oberflächengewässer für das Grundwasser eine Vorflut bzw. Potentialsenke dar und das Grundwasser fließt ihnen somit entgegen (vgl. Abb. 2-14, *Zustand 1*). Dieser Zustand wird auch Exfiltration genannt (Becker 2011).

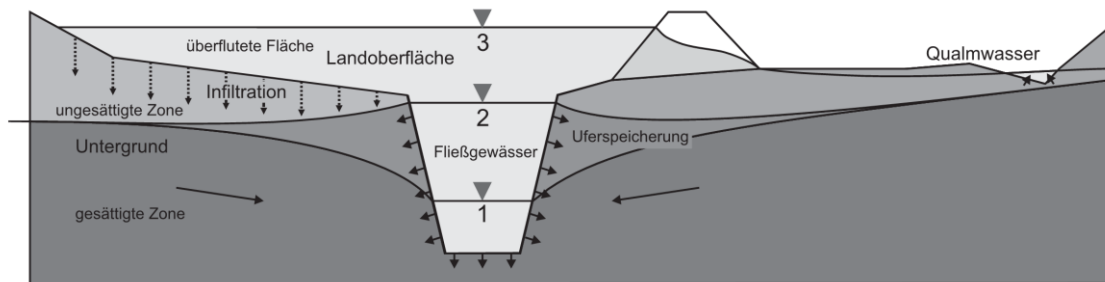


Abb. 2-14: Systemskizze eines flussnahen Grundwasserleiters und Interaktionsprozesse der Wasserbewegung (Quelle: Becker, 2011)

Bei diesem Zustand der Interaktion treffen ein niedriger bzw. mittlerer Abfluss NQ/MQ im Fließgewässer auf niedrige bzw. mittlere Grundwasserstände NGW/MGW im Grundwasserkörper. Gemäß der in Abbildung 2-12 dargestellten Abflussdauerlinie treten diese Ereignisse etwa an zwei Drittel der Kalendertage eines Jahres auf. Die Grundwasserströmung in das Fließgewässer lässt sich als „quasi-stationäre Strömung“ (zeitunabhängige Strömung) beschreiben, da sowohl der Grundwasserabfluss als auch die Grundwassergeschwindigkeiten innerhalb des Betrachtungszeitraums keiner wesentlichen zeitlichen Veränderung unterliegen.

Abschließend wird für die vorgenannten Wasserstände noch auf die Auswirkungen von Schwankungen der Sohlenhöhe eingegangen. Erosionsstrecken (vgl. Abschnitt 2.3.1) führen zwangsläufig zu einer Eintiefung des Flussbettes und damit zu einer Absenkung der Grundwasserstände. Dadurch entstehen auf der einen Seite negative ökologische Folgen (Trockenlegung von Flora und Fauna) und auf der anderen Seite eine Verbesserung für den Hochwasserschutz, da kleinere Hochwasserereignisse nicht mehr unmittelbar über die Ufer treten (Dittrich et al. 2009).

2.4.2 Hohe Wasserstände

Die im Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Akkumulationsstrecken führen zwangsläufig zu einer Sohlanhebung, die aus Sicht des naturnahen Wasserbaus entscheidend zur Verbesserung der ökologischen Verhältnisse in der freien Landschaft sowie Auenlandschaft beiträgt, da sie zum einen zur Anhebung der Grundwasserstände und zum anderen zu einem häufigeren Ausuferern von Hochwasser führt (Johannsen et al. 2009). Diese Entwicklung ist aus Sicht des Hochwasserschutzes kritisch zu sehen und erfordert Anpassungen (Erhöhung, Rückverlegung etc.) an den Hochwasserschutzanlagen (Deiche, HWS-Wände etc.).

Hohe Wasserstände stellen einen Extremfall dar und sind gemäß der Abflussdauerlinie (s. Abb. 2-12) seltene Ereignisse. Bei der Interaktion trifft ein höchster Abfluss HQ im Fließgewässer auf einen hohen Grundwasserstand HGW im Grundwasserkörper. Als Hochwasser ist ein periodisch wiederkehrendes natürliches Abflussereignis von Fließgewässern definiert, welches erst durch die Besiedelung der Flussufer an entsprechender Brisanz gewonnen hat und im Zusammenspiel mit dem Grundwasser zu erheblichen Schäden führen kann (Becker 2011). Deshalb bezeichnet Becker (2011) einen Grundwasseranstieg, der durch Hochwasser eines Flusses ausgelöst wird, als unterirdisches Hochwasser oder auch „Grund-Hochwasser“.

Tritt ein hoher Abfluss mit der Steigerung zu einem höchsten Abfluss HQ im Fließgewässer auf (s. Abbildung 2-14, *Zustand 2 und 3*), wird die Ausbreitung des „Grund-Hochwassers“ durch folgende drei Wechselwirkungsprozesse zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser bestimmt:

- Uferspeicherung (Dämpfung der Hochwasserwelle)
- Infiltration einer Überflutungsfläche (Anreicherung des Grundwasserleiters)
- Qualmwasseranstieg

Weiterführende Informationen zum „Grund-Hochwasser“ sind Liedl et al. (2016) zu entnehmen. Darin werden rechtliche Aspekte, Management- und Modellansätze sowie bauliche Aspekte im Umgang mit hohen Grundwasserständen vorgestellt (Liedl et al. 2016).

Im Hochwasserfall können auch Flächen ohne Zuströmen von Oberflächenwasser eingestaut werden, wenn der Grundwasserstand so weit ansteigt, dass das Grundwasser an der Oberfläche austritt (sog. Qualm- oder Drängewasser). Derartige Phänomene werden zum einen durch kiesige und sandige Grundwasserleiter begünstigt, wie sie in Flussauen oft vorkommen, und zum anderen durch Deiche, die im Hochwasserfall zu einem temporären Aufstau des Fließgewässers führen und damit den

Druck auf das Grundwasser erhöhen. Intakte Hochwasserschutzanlagen schützen somit die dahinter liegenden Bereiche wirkungsvoll gegen Hochwasser an der Oberfläche (sog. fließende Welle), können das „Grund-Hochwasser“ allerdings verstärken. Mit innenliegenden Dichtungssystemen in den Hochwasserschutzanlagen und Pumpwerken ist eine Reduzierung dieser Auswirkungen möglich.

In Abbildung 2-15 sind die Interaktionsprozesse der Wasserbewegung bei hohen Wasserständen (HQ und HGW) an einer Hochwasserschutzanlage mit innenliegendem vollkommenen Dichtungssystem skizziert. Hierbei handelt es sich um eine instationäre Grundwasserströmung, da sich die Strömungsgrößen Fließgeschwindigkeiten v und Abfluss Q innerhalb des Betrachtungszeitraums ändern.

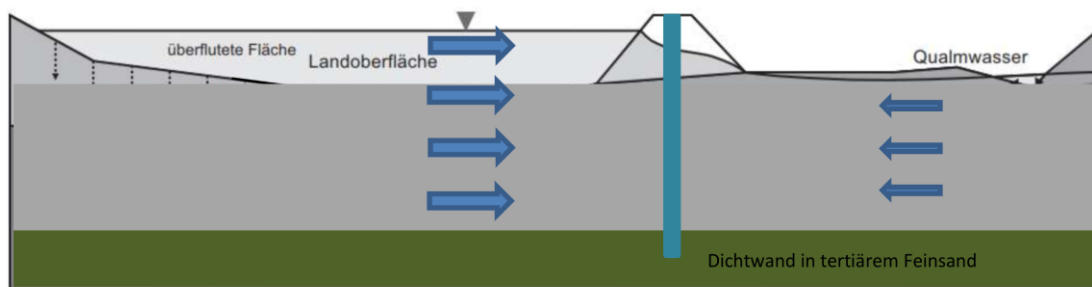


Abb. 2-15: Systemskizze eines flussnahen Grundwasserleiters mit Hochwasserschutzanlage und Interaktionsprozesse der Wasserbewegung bei hohen Wasserständen (Abgewandelt von: Becker, 2011)

Durch das innenliegende vollkommene Dichtungssystem wird der aus dem Hochwasser resultierende Wasserdruck (große Pfeile) auf den hinter der Dichtungswand liegenden Grundwasserleiter deutlich reduziert, das Zuströmen von Oberflächenwasser in den landseitigen Teil des Grundwasserkörpers verzögert und die Menge an Drängewasser vermindert. Gleichzeitig wird der Austausch von Grundwasser mit Oberflächenwasser verzögert. Das Abflussverhalten des Grundwassers (kleine Pfeile) wird infolge des innenliegenden vollkommene Dichtungssystems – welches in den wasserundurchlässigen tertiären Feinsand (sog. Grundwasserstauer) vollständig einbindet – dauerhaft beeinflusst.

2.5 Innenliegende Dichtungssysteme im Deichbau

2.5.1 Wirkungsweise und Anforderungen an die Dichtungssysteme

Dichtungssysteme haben im Deichbau eine zentrale Bedeutung. Sie vermindern zum einen den Sickerwasseranfall auf der Landseite und zum anderen die Strömungsbelastung des hinter der Dichtung liegenden Deichkörpers. Dadurch erhöhen sie gleichzeitig die Standsicherheit des Deiches (DWA 2011). Bei vollkommenen

innenliegenden Dichtungssystemen wirkt sich in erster Linie das Verhältnis der Durchlässigkeiten der Dichtung und der angrenzenden Bodenmaterialien auf die Verhältnisse der Durchströmung aus. Sobald die Dichtung um das 1.000-fache undurchlässiger als das Bodenmaterial des angrenzenden Stützkörpers ist, erfolgt der gesamte Druckabbau praktisch ausschließlich innerhalb der Dichtung. Darüber hinaus bildet sich die Sickerlinie im landseitigen Stützkörper zunehmend in Abhängigkeit des Unterwasserstands aus, wie beispielhaft in Abbildung 2-16 an einem Deich mit einer 0,50 m dicken Innendichtung anhand numerischer und analytischer Berechnungsergebnisse, nach Kozeny-Casagrande (KC), gezeigt wird. Dies gilt für Dichtungssysteme mit einer Dicke von wenigen Zentimetern bis einige Meter (Haselsteiner 2007).

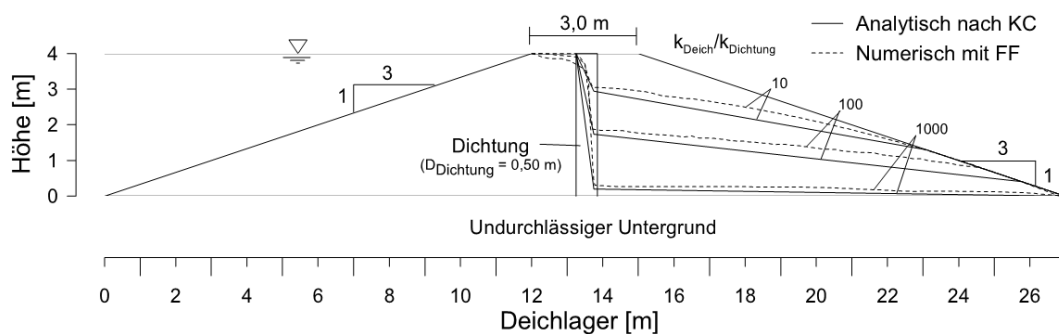


Abb. 2-16: Verlauf von Sickerlinien in einem Deich mit Innendichtung bei unterschiedlichen Verhältnissen $k_{\text{Deich}}/k_{\text{Dichtung}}$ (Quelle: Haselsteiner, 2007)

Neben der vorgenannten Reduktion der Durchströmung und damit des Durchflusses wird die Richtung des hydraulischen Gradienten verändert. Dabei können lokal auch sehr große hydraulische Gradienten, z. B. am Wandfuß des Dichtungssystems, auftreten. Für die Dimensionierung des Dichtungssystems und für die Gestaltung des Deichquerschnittes ist neben weiteren Faktoren vorrangig die Begrenzung der Durchströmung entscheidend (DWA 2011).

Dichtungssysteme müssen eine ausreichende Dichtigkeit (Wasserundurchlässigkeit) aufweisen. Die Wirksamkeit eines durchströmten Dichtungssystems im gesättigten Zustand kann an der durchtretenden Wassermenge pro Zeiteinheit bei einem gegebenen hydraulischen Gefälle beurteilt werden. Diese wird bei entsprechenden Randbedingungen durch den Durchlässigkeitsbeiwert des Dichtungsmaterials k und die Schichtdicke des Dichtungssystems d bestimmt.

Zum Vergleich der Wirksamkeit verschiedener Dichtungssysteme eignet sich hingegen die von der Schichtdicke d unabhängige Permittivität ψ , nach Gleichung (2.16), deutlich besser als der Durchlässigkeitsbeiwert k (DWA 2012a):

$$\psi = \frac{k}{d} \quad (2.16)$$

Neben der Begrenzung der Durchlässigkeit des Deiches werden gemäß der Merkblätter DWA-M 507-1 und DWA-M 512-1 weitere wesentliche Anforderungen an die Dichtungssysteme gestellt:

- Hydraulische Stabilität
- Alterungs- und Langzeitbeständigkeit
- Witterungsbeständigkeit (z. B. Hitze, Frost, UV-Strahlung und Niederschlag)
- Beständigkeit gegen mechanische Einwirkungen (z. B. Treibgut und Wellen)
- Beständigkeit gegen chemische und biologische Einwirkungen (z. B. Mikroorganismen, Wühltiere und Durchwurzelung)
- Verformbarkeit und Festigkeit

Ein Überblick der verschiedenen Innendichtungen erfolgt im Abschnitt 2.5.2. Wichtige Kriterien für die Auswahl eines dieser Dichtungssysteme stellen die örtlichen Platz- und Untergrundverhältnisse, die geplante Einbautiefe sowie baubetriebliche Aspekte wie etwa der Bauablauf, die Bauzeit und die Baukosten dar.

Als Vorteile der Innendichtung werden unter anderem folgende Punkte angesehen (DWA 2011):

- Bei der nachträglichen Herstellung, d. h. der Deichkörper ist vorhanden, kann die Deichdichtung und die Untergrundabdichtung innerhalb eines Prozesses eingebaut werden.
- Sie erfordert die geringste Dichtungsfläche.
- Bei mittiger Anordnung im Stützkörper des Deiches weist sie eine beidseitige Überdeckung auf, die vor äußeren Einwirkungen (s. Anforderungen) schützt.
- Anwendung bei Deichen an Flutungspoldern, da bei mittiger Anordnung im Stützkörper eine Aufnahme des Wasserdrucks von beiden Seiten möglich ist.

Bei den bisher in Duisburg in Planung und Bau befindlichen Deichsanierungsmaßnahmen weisen die Dichtwände Längen von etwa 300 bis 1.500 m auf.

2.5.2 Überblick der verschiedenen innenliegenden Dichtungssysteme

In Deichen kommen überwiegend Spundwände, Einphasenschlitzwände, Schmalwände, Injektionswände (z. B. Hochdruckinjektion bzw. Düsenstrahlverfahren), spezielle Verfahren der Bodenvermörtelung und mineralische Dichtungen aus gering durchlässigen Böden als Innendichtung zum Einsatz. Aus technischer Sicht sind Bohrpfahlwände, Ortbetonwände und Zweiphasenschlitzwände für Innendichtungen

ebenfalls geeignet. Aus wirtschaftlichen Gründen kommen sie im Deichbau lediglich in Ausnahmefällen, z. B. als statisch wirksame Innendichtungen, zur Anwendung. Bei der Errichtung von Hochwasserschutzwänden werden sie hingegen häufiger in Betracht gezogen (DWA 2011).

Die verschiedenen Dichtwand- bzw. Dichtungssysteme sind einschließlich der Eingruppierung nach dem Herstellungsprinzip, Darstellung des Grundrisses und der dafür benötigten Dichtungsmaterialien in Abb. 2-17 zusammengestellt (Koch 2018). Dazu ist anzumerken, dass die Verfahren der Bodenvermörtelung in der vorgenannten Tabelle nicht aufgeführt sind. Bei den beiden in Deutschland häufig eingesetzten Verfahren – MIP (Mixed-in-Place) und FMI (Fräs-Misch-Injektion) wird der anstehende Boden an Ort und Stelle (in-situ) mit einer Bindemittelsuspension vermischt. Dazu wird das vorhandene Korngerüst mit dem Bohr- bzw. Fräswerkzeug aufgebrochen und unter Zugabe einer Bindemittelsuspension derart umgelagert, so dass die Porenräume verfüllt werden (DWA 2012a).

Prinzip	Dichtwand-system	Grundriß	Material
Aushub des anstehenden Bodens und Einbau eines Abdichtungsmaterials	Dichtwand, Einphasen-Verfahren		Bentonit - Zement - Suspension mit / ohne Füllstoff
	Dichtwand, Zweiphasen-Verfahren		Bentonit - Suspension, Erdbeton
	Dichtwand, Kombinationsdichtung		Bentonit - Zement - Suspension, zusätzliche Dichtungselemente (z.B. PEHD-Bahn, Stahlsplundwand)
	Überschnittene Bohrpfehlwand		Erdbeton, Beton
Verdrängung des anstehenden Bodens und Einbau eines Abdichtungsmaterials	Schmalwand		Bentonit - Zement - Suspension mit Füllstoff
	Spundwand		Stahl
	Gerammte Dichtwand		Erdbeton, Beton
Verringerung der Durchlässigkeit des anstehenden Bodens	Injektionswand		Zement, Ton - Zement - Suspensionen, Silikatgele
	Düsenstrahlwand (HDI)		Bentonit - Zement - Suspension mit/ohne Füllstoff
	Gefrierwand		Flüssiger Stickstoff, Gefrieranlage

Abb. 2-17: Aufbau von Dichtwandssystemen (Quelle: Koch, 2018)

Auf die spezifischen Besonderheiten der verschiedenen Dichtwand- bzw. Dichtungssysteme wird im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen. Für die weiteren

Betrachtungen sind hingegen die Systemdicke d und der Durchlässigkeitsbeiwert k von besonderer Bedeutung. Hinsichtlich des Vergleiches der Wirksamkeit der verschiedenen Dichtungssysteme wird anstelle des Durchlässigkeitsbeiwertes k die Permittivität ψ verwendet. Eine Übersicht ausgewählter Dichtwandssysteme ist in Tab. 2-3 dargestellt.

Tab. 2-3: Richtwerte der Systemdicke d und der Permittivität ψ für ausgewählte Dichtwandssysteme (Quelle: DWA, 2012a)

Dichtwandssystem	Systemdicke d [m]	Permittivität ψ [1/s]	Weitere Informationen
Einphasenschlitzwand (Dichtwand)	0,40 – 2,00 (häufig 0,60)	$\leq 1 \cdot 10^{-8}$	(DWA 2012a), (Haugwitz und Pulsfort 2018)
Überschnittene Bohrpfahlwand	0,50 – 2,50 (häufig 0,90)	$\leq 1 \cdot 10^{-8}$	(DWA 2012a), (Haugwitz und Pulsfort 2018)
Schmalwand	0,07 – 0,30 (konventionell)	$\leq 1 \cdot 10^{-6}$	(DWA 2012a), (Buja 2007),
	0,20 – 0,50 (mit Hochdruck)	$\leq 1 \cdot 10^{-7}$	(Haugwitz und Pulsfort 2018)
Spundwand	(s. Absch. 5.1.2)	k. A. ¹⁾	(DWA 2012a), (Berndt 2018), (Grabe et al. 2018)
Bodenvermörtelung (MIP und FMI)	0,40 – 0,60 (MIP)	$\leq 1 \cdot 10^{-8}$	(DWA 2012a), (Haugwitz und Pulsfort 2018)
	0,35 – 1,00 (FMI)	$\leq 1 \cdot 10^{-8}$	
Injektionswand (HDI und DSV)	0,10 – 0,30 (Lamellen)	$\geq 2 \cdot 10^{-7}$	(DWA 2012a)

Anmerkung:

k. A. ¹⁾ = keine Angabe. Es ist eine individuelle Berechnung, z. B. nach DIN EN 12063 oder Berndt (2018), erforderlich.

Für viele Dichtwand- bzw. Dichtungssysteme sind Richtwerte der Systemdurchlässigkeit (Durchlässigkeitsbeiwert) k bzw. der Permittivität ψ bekannt. Bei der Spundwand ist diese Angabe allerdings nicht direkt anzugeben, da das Spundwandprofil (Bohle) undurchlässig und das Schloss ohne Abdichtungsmaßnahmen durchlässig ist (Berndt 2018). Gemäß der DIN EN 12063 gibt es zur Beschreibung der Durchlässigkeit von Stahlspundwänden kein formal korrektes Verfahren. Deshalb wird in der vorgenannten Norm auch lediglich ein informatives Beispiel zur Abschätzung der Durchflussmenge

durch eine Stahlspundwand aufgeführt (Deutsche Norm DIN EN 12063). Der darin verwendete Kehrwert des Schloss- bzw. Sickerwiderstands p ist für verschiedene Abdichtungssysteme (z. B. AKILA™, Roxan™ Plus, Beltan™ Plus oder Arcoseal™) im Teil 3 des Grundbau-Taschenbuchs (8. Auflage 2018) tabellarisch angegeben (Grabe et al. 2018). Mit dem Verfahren von Berndt (2018) lässt sich eine vereinfachte Sicker-mengenberechnung einer Stahlspundwand in Abhängigkeit des verwendeten Abdichtungssystems durchführen.

Sofern eine Systemdurchlässigkeit k bzw. Permittivität ψ für die projektspezifischen Randbedingungen bestimmt werden muss, wird häufig projektbegleitend ein sog. Dichtwandkasten hergestellt und ein Pumpversuch (Grundwasserabsenkung im Kasten) durchgeführt (Haugwitz und Pulsfort 2018).

2.5.3 Abschätzung des Wirkungsgrades von Dichtungssystemen

Brauns hat den Wirkungsgrad homogener Dichtungswände mit einer Restdurchlässigkeit unter Berücksichtigung verschiedener Parameter untersucht. Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Abdichtungswirkung von Dichtwänden bestimmter Dicke l und Restdurchlässigkeit k_2 abhängig vom Verhältnis der Breite des Stauwerkes B zur Tiefe des durchlässigen Untergrundes T ist und somit von den äußeren Randbedingungen des betrachteten Gesamtsystems (s. Abb. 2-18) abhängt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Breite B des Stauwerkes der Aufstandsfläche des dichtenden Damnteils entspricht (Brauns 1978).

Der Wirkungsgrad E einer homogenen Dichtwand lässt sich näherungsweise nach Gleichung (2.17) berechnen:

$$E = \left\{ 1 + \left[f^o \cdot \frac{l}{T} \cdot \left(\frac{k_1}{k_2} - 1 \right) \right]^{-1} \right\}^{-1} \quad (2.17)$$

Dem Formbeiwert f^o für diese Unterströmungssituation liegt eine hyperbelartige Abhängigkeit zugrunde, die in Dachler (1936) aufgeführt ist. Zur Bestimmung des Formbeiwertes f^o bei einem Verhältnis $B/T < 1$ gibt Dachler (1936) eine Näherungslösung an, die in Gleichung (2.18) aufgeführt ist:

$$B/T < 1: \quad f^o = 0,73 \log \frac{13 + \left(\frac{B}{T}\right)^2}{2,54 \left(\frac{B}{T}\right)} \quad (2.18)$$

Für ein Verhältnis $B/T > 1$ lässt sich der Formbeiwert f^o für einfache, baupraktische Zwecke näherungsweise gemäß Gleichung (2.19) bestimmen (Dachler 1936):

$$B/T > 1: \quad f^o = \frac{1}{0,88 + \frac{B}{T}} \quad (2.19)$$

Aus dem Unterkapitel 1.2 geht hervor, dass der nachträgliche Einbau eines innenliegenden vollkommenen Dichtungssystems in den vorhandenen Altdeich eine wirkungsvolle Methode der Deichsanierung darstellt. Hierbei wird die Innendichtung in der Regel von der Deichkrone aus eingebaut. Sollten die Platzverhältnisse die benötigte Aufstandsweite eines Deiches (Breite des Deichlagers B) nicht zulassen, dann können auch Hochwasserschutzwände zur Anwendung gelangen. Zur Abtragung des Wasserdrucks und zur Reduktion der Unterströmung müssen diese Wandkonstruktionen häufig tief gegründet werden. Vor diesem Hintergrund bietet sich eine Einbindung in die gering durchlässigen Bodenschichten an. Um eine Abschätzung des Wirkungsgrades E der vorgenannten Hochwasserschutzkonstruktionen mit homogenen innenliegenden vollkommenen Dichtwandssystemen zu erhalten, wurden für die in Tab. 2-4 aufgeführten Randbedingungen Berechnungen mit den Gleichungen (2.17) bis (2.19) durchgeführt. Bei den Berechnungen erfolgte eine Variation des Verhältnisses der Durchlässigkeiten von Untergrund zu Dichtwand zwischen $k_1/k_2 = 10^0$ bis 10^4 . Die Ergebnisse sind in Abbildung 2-18 dargestellt.

Tab. 2-4: Parameter zur Abschätzung des Wirkungsgrades von Dichtungssystemen für ausgewählte Hochwasserschutzkonstruktionen

HWS-Konstruktion	Breite B [m]	Tiefe T [m]	Dicke l [m]	Verhältnis B/T [-]	Verhältnis l/T [-]
Deich	50,00	10,00	0,50	5,00	0,05
Deich	40,00	20,00	0,40	2,00	0,02
HWS-Wand	0,50	10,00	0,50	0,05	0,05
HWS-Wand	0,40	20,00	0,40	0,02	0,02

Anhand der Abbildung 2-18 ist festzustellen, dass mit zunehmender Tiefe T ein größer werdendes Verhältnis der Durchlässigkeiten von Untergrund zu Dichtwand k_1/k_2 erforderlich ist, damit der Wirkungsgrad E entsprechend in Richtung 100 % ansteigt. Darüber hinaus ist der Wirkungsgrad des Dichtungssystems bei einer Hochwasserschutzwand gegenüber dem eines Deichs höher. Da die Durchströmung eines Deiches aus Erdstoffen gegenüber der eines Stahlbetonbauteils deutlich höher ist, sind die Ergebnisse qualitativ als plausibel einzuschätzen.

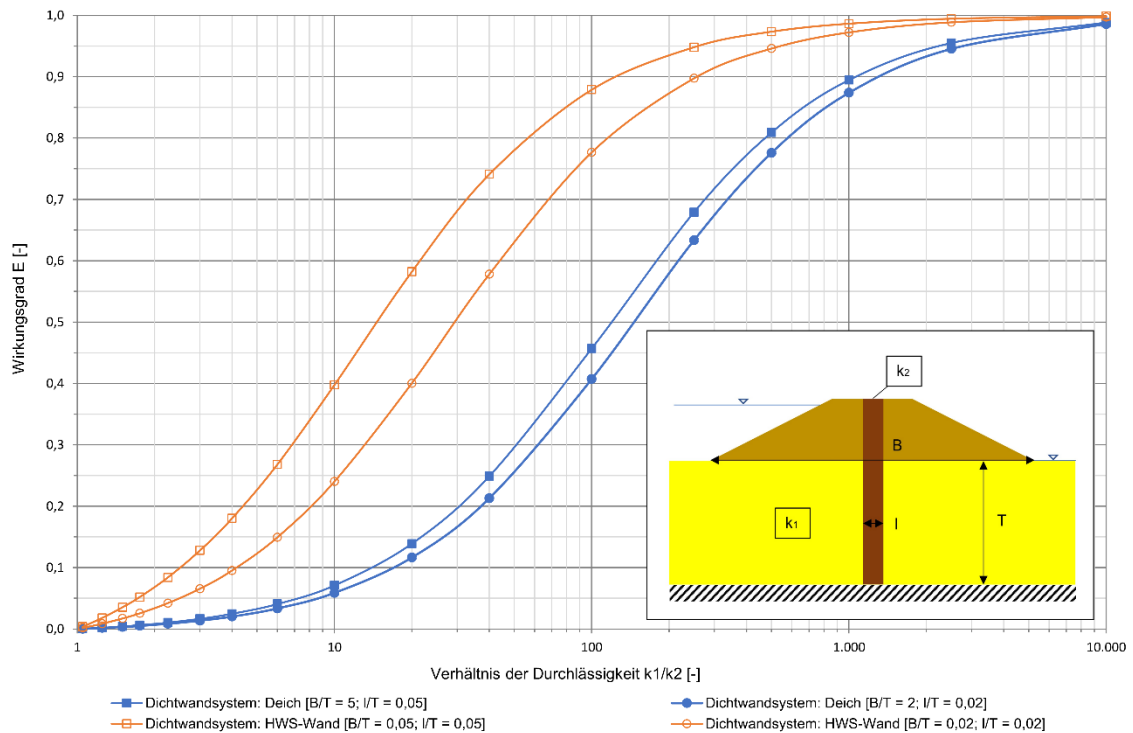


Abb. 2-18: Wirkungsgrad eines homogenen Dichtwandsystems (Abgewandelt von: Brauns, 1978)

Eine große Bedeutung für den Wirkungsgrad bilden die nachfolgenden Feststellungen von Brauns (1978), die anhand der durchgeführten Untersuchungen (s. Abb. 2-18) bestätigt wurden:

„Es zeigt sich, daß schmale Dichtungswände nur dann einen nennenswerten Rückgang der Unterläufigkeit durch den Untergrund eines Stauwerkes bewirken, wenn die Restdurchlässigkeit der Wand um Größenordnungen geringer als die Durchlässigkeit des Anstehenden ist.“

„Ein Wirkungsgrad von $E = 1$ kann durch Wände mit Restdurchlässigkeit naturgemäß niemals erzielt werden, solange $k_2 > 0$.“

2.6 Analytische Berechnungsverfahren

Sowohl bei der Herstellung eines unvollkommenen Dichtungssystems (sog. Teilsperrbauwerk – das Bauwerk bindet nicht vollständig in die wasserundurchlässige Bodenschicht (sog. Grundwasserstauer) ein) als auch eines vollkommenen Dichtungssystems (sog. Sperrbauwerk – das Bauwerk bindet in den Grundwasserstauer ein) werden die Grundwasserverhältnisse beeinflusst. Für die Ermittlung der Grundwasserbeeinflussung (Aufstau und Absenkung des Grundwasserspiegels) durch derartige

Bauwerke wurden in der Vergangenheit analytische Berechnungsverfahren entwickelt. Auf diese wird in den nachfolgenden Abschnitten eingegangen.

2.6.1 Überblick der vorhandenen Berechnungsverfahren

Die ersten Näherungsverfahren zur Erfassung der Grundwasserströmung bei Gründungskörpern stammen etwa aus den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts. Durch eine Vielzahl von innerstädtischen Tunnelbaumaßnahmen (U-Bahnbau) in den 70er und 80er Jahren des 20. Jahrhunderts in deutschen Großstädten, durch welche die Grundwasserströmung infolge der langgestreckten Teilsperrbauwerke bzw. Sperrbauwerke deutlich beeinflusst wurde, erfolgte in den darauffolgenden Jahrzehnten eine fokussierte Entwicklung entsprechender Berechnungsverfahren zur Abschätzung des Aufstaus und der Absenkung des Grundwasserspiegels.

Einige der analytischen Berechnungsverfahren wurden mit Hilfe der Theorie der konformen Abbildungen hergeleitet, die z. B. in Betz (1964) ausführlich behandelt wird. Mit dieser Methode besteht die Möglichkeit, ein Strömungsbild einer bestimmten Ebene durch eine komplexe Funktion in das Strömungsbild einer anderen Ebene winkeltreu zu überführen. Dabei bestehen die Abbildungsfunktionen aus komplexen Zahlen, wobei der Realteil die Potenzialfunktion und der Imaginärteil die Stromfunktion darstellt (Betz 1964). Andere Verfahren wurden auf der Grundlage numerischer Untersuchungen abgeleitet.

Einen chronologischen Überblick liefert die nachfolgende Aufstellung, ohne Anspruch auf Vollständigkeit:

- (*Dachler 1936*): Näherungsverfahren zur Ermittlung der Beeinflussung des Wasserdurchflusses unter zusammengesetzten Gründungskörpern (z. B. mit beidseitig angeordneten Spundwänden)
- (*Nendza und Lehmann 1978*): Untersuchungen über die Veränderung des Grundwasserverlaufs bei Behinderung des Durchflusses (Diagramme für unterströmte Bauwerke, unter- und umströmte Bauwerke und für umströmte Bauwerke mit regelmäßigen Abständen)
- (*Ulrichs 1978*): Maßnahmen zur Erhaltung der Grundwasserströmung bei tiefreichenden und sperrenden Bauwerken (Darstellung von verschiedenen Bauverfahren in Bezug zu den Untersuchungen von Nendza und Lehmann (1978))
- (*Schneider 1981*): Berechnung der Beeinflussung des Grundwasserstromes durch Baumaßnahmen (Herleitung über die konforme Abbildung für eine schräg angeströmte Platte)

- (*Schneider 1982*): Möglichkeit zur Berechnung der Grundwasserspiegelbeeinflussung durch ein sehr langes Bauwerk mit abschnittswisen Durchbrüchen
- (*Schneider 1983a*): Beeinflussung des Grundwasserstromes durch Baumaßnahmen mit Grundwasserdurchleitungen bei gleichzeitiger Umströmungsmöglichkeit (Bauwerke mit Durchbrüchen)
- (*Schneider 1983b*): Grundwasseraufstau vor Bauwerken bei gleichzeitiger Unter- und Umströmungsmöglichkeit
- (*Rückert 1994*): Berechnung der Hebung des Grundwasserspiegels bei Anlagen zur Grundwasserdükerung (auf der Grundlage eines Näherungsverfahrens zur Bemessung von Horizontalfilterbrunnen)
- (*Schneider 1995*): Näherungslösung für die Ermittlung der Beeinflussung des Grundwasserstroms durch Bauwerke mit räumlicher Erstreckung (annähernd quadratischer Grundriss und elliptischer Grundriss)
- (*Könemann 1995*): Überschlägige Dimensionierung der erforderlichen Durchflussöffnungen für unter- und umströmte Bauwerke sowie Bauwerke mit Fensteröffnungen (sog. hydraulische Fenster)
- (*Ernst 1999*): Beitrag zur Bestimmung des Grundwasseraufstaus durch Baukörper, die in den Grundwasserstrom hineinreichen sowie die Bewertung von Wasserumleitungen durch Drains (Nomogramme zur Bemessung)
- (*Ittershagen 2010*): Maßnahmen zur Vermeidung der Barrierewirkung von Baugruben im Grundwasser (Filterkiesdränage)

Nach fachlicher Prüfung der vorgenannten Berechnungsverfahren erfüllen nach Ansicht des Verfassers die *Verfahren von Schneider (1981) für langgestreckte rechteckige Bauwerke* und von *Schneider (1995) für Bauwerke mit elliptischem Grundriss* am ehesten die Voraussetzungen, den Einfluss auf die Grundwasserströmung infolge innenliegender vollkommener Dichtungssysteme abzuschätzen. Beide Verfahren werden deshalb nachfolgend genauer betrachtet.

2.6.2 Verfahren von Schneider für langgestreckte rechteckige Bauwerke

Infolge innerstädtischer Tunnelbaumaßnahmen (U-Bahnbau) und der dadurch hervorgerufenen Beeinflussung des Grundwasserstroms veröffentlichte Schneider (1981) ein analytisches Berechnungsverfahren zur überschlägigen Ermittlung der voraussichtlichen Wasserspiegeländerungen durch derartige Bauwerke.

Bei der Entwicklung dieses Verfahrens ging Schneider (1981) davon aus, dass der Grundwasserstrom im Grundwasserleiter durch das Bauwerk vollständig abgesperrt wird. Demzufolge muss der Anteil des Grundwassers, der zuvor auf der vollen Bauwerkslänge angekommen ist, nun durch Aufstau seitlich um das Bauwerk herumströmen. Somit hat das jetzt fehlende Grundwasser Unterstrom (Abstrom) eine Absenkung zur Folge, deren Ausmaß bedeutend von dem Weg bestimmt wird, den das gestaute Grundwasser vom Oberstrom (Anstrom) bis zum Unterstrom zurücklegen muss. Die mathematische Umsetzung dieser Modellvorstellung erfolgte mit Hilfe der Theorie der konformen Abbildungen. Dabei wird eine Zylinderumströmung der Z-Ebene in eine achsenparallele Strömung in der Bildebene Z_1 (Plattenumströmung) überführt (Schneider 1981). Weitere Einzelheiten sind Schneider (1981) zu entnehmen.

In Abbildung 2-19 sind die Strömungskomponenten an einem schräg angeströmten Bauwerk sowie die Einflussgrößen bei ausschließlicher Umströmung dieses Bauwerkes nach Schneider (1981) dargestellt.

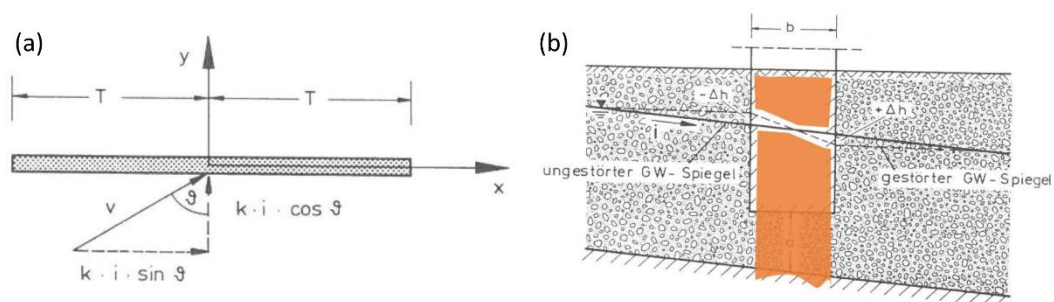


Abb. 2-19: (a) Strömungskomponenten und (b) Einflussgrößen bei ausschließlicher Umströmung eines Bauwerkes nach Schneider (1981) (Abgewandelt von: Könemann, 1995)

Die in Abb. 2-19 (a) aufgeführten Darstellungen beruhen auf den Angaben in (Schneider 1981), sind von Könemann (1995) allerdings geringfügig abgewandelt worden. Dies betrifft insbesondere die Lage des Bauwerkes, welches gegenüber der ursprünglichen Darstellung um 90° gedreht ist.

In Abbildung 2-19 ist T die halbe Bauwerkslänge, b die Bauwerksbreite, ϑ der Anströmwinkel gemessen zur Bauwerksnormalen und i das natürliche hydraulische Gefälle des Grundwassers im ungestörten Zustand. Darüber hinaus stellen $-\Delta h$ den Aufstau auf der Anstromseite und $+\Delta h$ die Absenkung auf der Abstromseite dar. Aufstau und Absenkung sind vom Betrag her gleich groß ($|\Delta h| = |+\Delta h|$). Diese lassen sich mit Gleichung (2.20) bestimmen:

$$\Delta h_{um} = \pm \frac{i \cdot \cos \vartheta \cdot \sqrt{2}}{2} \cdot \sqrt{\sqrt{(y^2 - x^2 + T^2)^2 + 4 \cdot x^2 \cdot y^2} + y^2 - x^2 + T^2} - i \cdot y \cdot \cos \vartheta \quad (2.20)$$

Gleichung (2.20) entspricht den Angaben in (Schneider 1981), ist aufgrund der abgewandelten Darstellung in Abb. 2-19 (a) allerdings von Könemann (1995) verändert worden. Dies betrifft die Koordinaten x und y , die gegenüber der ursprünglichen Gleichung vertauscht sind.

Könemann (1995) gibt an, dass bei dem Berechnungsansatz von Schneider (1981) ein konstanter, isotroper Durchlässigkeitsbeiwert k und die Gültigkeit des Gesetzes von Darcy vorausgesetzt werden. Des Weiteren hat die Größe des Strömungsgebietes keinen Einfluss auf die Ergebnisse (Könemann 1995).

Beim Vergleich der Variablen in Abb. 2-19 (a) mit Gleichung (2.20) fällt auf, dass die Strömungskomponente $v \cdot \sin \vartheta$ und die Bauwerksbreite b im Berechnungsansatz nicht enthalten sind.

Könemann (1995) führt dazu aus, dass Schneider (1981) den Einfluss einer schrägen Bauwerksanströmung dadurch berücksichtigte, dass er nur die normal zur Bauwerkslängsachse verlaufende Strömungskomponente $v \cdot \cos \vartheta$ ansetzte und die parallel zum Bauwerk verlaufende Strömungskomponente $v \cdot \sin \vartheta$ hingegen vernachlässigte. Darüber hinaus wird auch auf den Ansatz der Bauwerksbreite ($b = 0$) verzichtet (Könemann 1995). Das analytische Berechnungsverfahren von Schneider (1981) zur überschlägigen Ermittlung der voraussichtlichen Wasserspiegeländerungen weist somit einige mathematische Vereinfachungen auf.

Die Anwendung der Gleichung (2.20) erfolgte im Zuge der Ausarbeitung der Antragsunterlagen für das Planfeststellungsverfahren der Deichsanierung in Duisburg-Homburg. Dabei wurden nach einer rasterförmigen Aufteilung ($50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$) des Untersuchungsgebietes mit vorgenanntem Berechnungsansatz der Aufstau bzw. die Absenkung [m] für die Rasterpunkte berechnet (Schloth 2020). Die dreidimensionale Darstellung der Berechnungsergebnisse ist Abbildung 2-20 zu entnehmen.

Wird nur der maximale Aufstau bzw. die maximale Absenkung gesucht, dann lässt sich Gleichung (2.20) mit $x = 0$ und $y = 0$ zur Gleichung (2.21) vereinfachen.

$$\Delta h_{um} = \pm i \cdot T \cdot \cos \vartheta \quad (2.21)$$

Hierzu merkt Könemann (1995) an, dass dieser Zusammenhang in Schneider (1981) nicht richtig dargestellt sei. Allerdings korrigierte Schneider diese Aussage in der Veröffentlichung (Schneider 1983a). Infolge dieser Korrektur des Berechnungsansatzes tritt der größte Aufstau bzw. die größte Absenkung fortan immer in Bauwerksmitte auf.

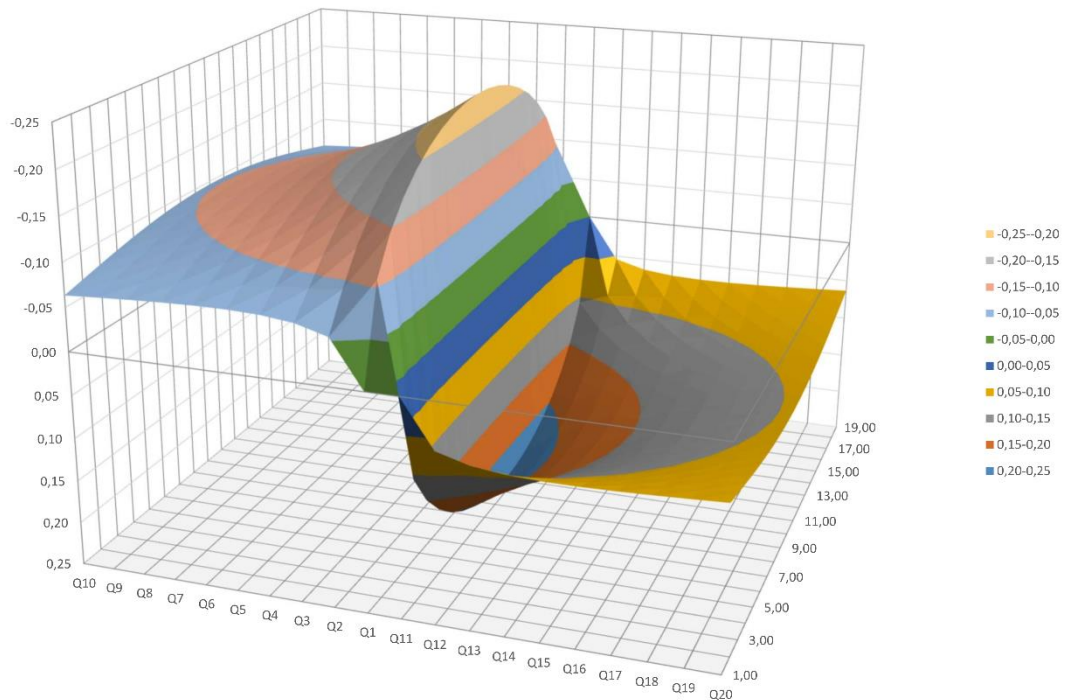


Abb. 2-20: Deichsanierung Duisburg-Homberg: Dichtwandabschnitt [$L=2T=900\text{ m}$ / $i=0,00053$ / $\vartheta=10^\circ$] am ehemaligen Wasserwerksgelände - Aufstau und Absenkung [m] bei niedrigem Grundwasserstand (NGW) (Abgewandelt von: Schloth, 2020)

2.6.3 Verfahren von Schneider für Bauwerke mit elliptischem Grundriss

Hin und wieder kommt es vor, dass Bauwerke mit elliptischem Grundriss im Grundwasser errichtet werden. Um auch dafür die Grundwasserbeeinflussung überschlägig zu ermitteln, entwickelte Schneider (1995) ein weiteres Verfahren. Hierbei wendet Schneider (1995) das in (Kozeny 1953) beschriebene komplexe Potential bei der Strömung um zylindrische Körper auf Bauwerke mit elliptischem Grundriss an. Das komplexe Potential erhält man in diesem Fall durch Überlagerung der Quelle A (+) und der Senke B (-) mit gleicher Intensität q , die die Abstände t vom Ursprung aufweisen und in der x -Achse liegen, mit einer Parallelströmung in x -Richtung (s. Abbildung 2-21).

Aufgrund der unterschiedlichen Breite des Bauwerkes mit elliptischem Grundriss ($x_0 > y_0$), auf die der Grundwasserstrom abgesperrt wird, wenn er entweder aus der x -Richtung oder aus der y -Richtung auf das Ellipsoid zuströmt, sind auch unterschiedlich große Beeinflussungen des Grundwasserspiegels zu erwarten. Deshalb wird der Einfluss der jeweiligen Parallelströmungen in x - und y -Richtung zunächst separat berechnet.

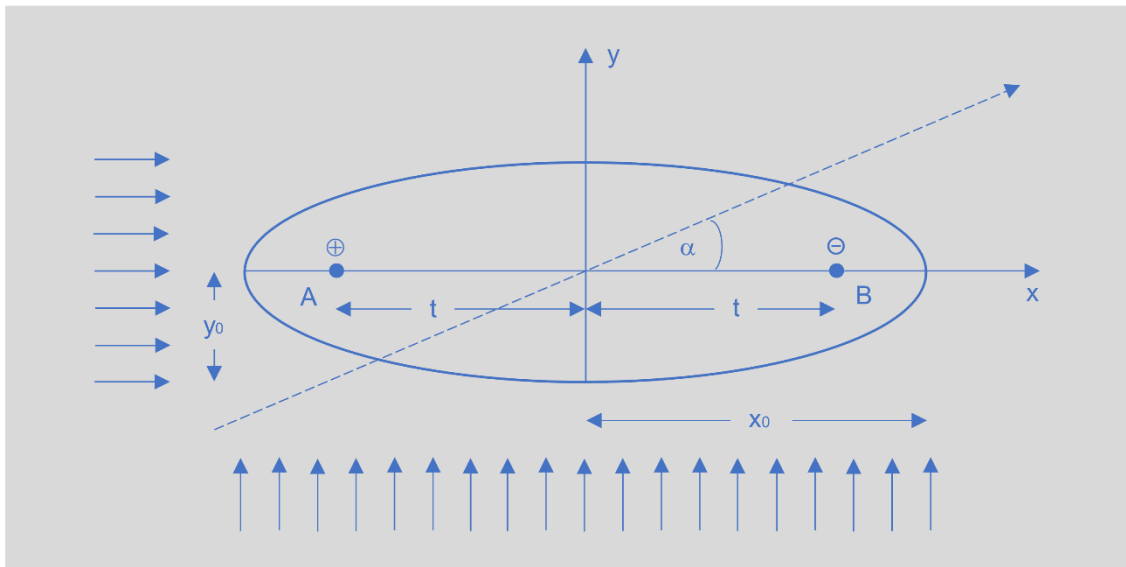


Abb. 2-21: Anströmung eines Bauwerkes mit elliptischem Grundriss (Abgewandelt von: Schneider, 1995)

Die Ermittlung der Parallelströmung in x-Richtung erfolgt in zwei Schritten. Zunächst ist Gleichung (2.22) iterativ zu lösen d. h. t ist so zu wählen, dass beide Seiten der Gleichung gleich groß sind:

$$t = y_0 \cdot \tan\left(\frac{y_0 \cdot t}{x_0^2 - t^2} \cdot 57,3\right)^\circ \quad (2.22)$$

Anschließend kann mit Gleichung (2.23) für einen beliebigen Punkt $P(x, y)$ die Wasserspiegeländerung $\Delta h(x)$ berechnet werden:

$$\Delta h(x) = i(x) \cdot \left(\frac{x_0^2 - t^2}{4t}\right) \ln \frac{(x+t)^2 + y^2}{(x-t)^2 + y^2} \quad (2.23)$$

Der maximale Aufstau $-\Delta h(x)_{\max}$ bzw. die maximale Absenkung $+\Delta h(x)_{\max}$ treten an den Staupunkten $x = \pm x_0, y = 0$ auf und können durch einsetzen in die vorgenannte Gleichung bestimmt werden.

Die Ermittlung der Parallelströmung in y-Richtung erfolgt ebenfalls in zwei Schritten. Im ersten Schritt ist Gleichung (2.24) iterativ zu lösen. Hierbei ist t so zu wählen, dass die rechte Seite der Gleichung der Abmessung x_0 des Bauwerkes entspricht:

$$x_0 = \frac{(y_0^2 + t^2)}{2t} \cdot \ln \frac{x_0 + t}{x_0 - t} \quad (2.24)$$

Im zweiten Schritt erfolgt die Bestimmung der maximalen Wasserspiegeländerung $\Delta h(y)$ für einen beliebigen Punkt $P(x, y)$ nach Gleichung (2.25):

$$\Delta h(y) = i(y) \cdot \left(\frac{y_0^2 + t^2}{2t}\right) \arctan \frac{2yt}{x^2 + y^2 - t^2} \quad (2.25)$$

Auch hier stellt sich der maximale Aufstau $-\Delta h(y)_{\max}$ bzw. die maximale Absenkung $+\Delta h(y)_{\max}$ an den Staupunkten $x = 0$, $y = \pm y_0$ ein und kann durch das Einsetzen in die vorgenannte Gleichung bestimmt werden.

Hierbei ist noch auf eine Besonderheit bei der Bestimmung des Arkustangens-Wertes hinzuweisen. Bei $y_0 = t$ besitzt der Tangens den Wert ∞ , d. h. der Arcus entspricht somit $\pi/2$. Sofern $t > y_0$ ist, ergeben sich negative Tangenswerte, so dass der β -Wert größer als 90° ist. Der zugehörige Arcus wird dann dadurch erhalten, dass der Tangenswert von π subtrahiert wird. Ist beispielsweise der $\arctan(-6,9364)$, dann beträgt das Ergebnis im Bogenmaß $-1,428$ und der modifizierte β -Wert wird $\pi - 1,428 = 1,713$ (Schneider 1995).

Bei einer schrägen Anströmung des Bauwerkes mit elliptischem Grundriss erfolgt die Ermittlung der Wasserspiegeländerung dadurch, dass der Grundwasserstrom in eine x- und y-Komponente zerlegt wird, wie dies zuvor beschrieben ist. Die endgültige Änderung des Grundwasserspiegels wird dann durch vektorielle Addition der x- und y-Komponenten nach Gleichung (2.26) ermittelt:

$$\Delta h_{(x,y)} = \pm \sqrt{\left| \operatorname{sgn}(\Delta h_{(x)} \cos \alpha) \cdot (\Delta h_{(x)} \cos \alpha)^2 + \operatorname{sgn}(\Delta h_{(y)} \sin \alpha) \cdot (\Delta h_{(y)} \sin \alpha)^2 \right|} \quad (2.26)$$

Dabei beschreibt sgn die Signumfunktion d. h. bei $x < 0$ wird $\operatorname{sgn}(x) = -1$, bei $x = 0$ wird $\operatorname{sgn}(x) = 0$ und bei $x > 0$ wird $\operatorname{sgn}(x) = +1$. Nach Gleichung (2.26) ist der Δh -Wert positiv, wenn der Ausdruck zwischen den Absolutstrichen einen positiven Wert annimmt. Ähnlich verhält es sich bei negativen Werten.

Die ausführliche Herleitung dieses Berechnungsverfahrens ist (Schneider 1995) zu entnehmen. Nach Angaben von Schneider (1995) werden hinsichtlich der Genauigkeit des Berechnungsansatzes FEM-Vergleichsrechnungen durchgeführt und zu einem späteren Zeitpunkt veröffentlicht. Eine diesbezügliche Veröffentlichung lag zum Zeitpunkt der durchgeführten Literaturrecherche des Verfassers nicht vor.

3 Auswertung des verzeichneten Flussverlaufes

3.1 Der Rhein

3.1.1 Flussgebietseinheit Rhein

Der Rhein ist mit einer Länge von etwa 1.233 km einer der bedeutendsten Flüsse Europas. Er verläuft von der Schweiz bis in die Niederlande. Sein Einzugsgebiet beträgt etwa 200.000 km² und verteilt sich auf insgesamt neun Staaten (Italien, Liechtenstein, Österreich, Schweiz, Frankreich, Luxemburg, Belgien, Niederlande und Deutschland). In diesem Einzugsgebiet (s. Abb. 3-1) leben etwa 58 Millionen Menschen, mehr als 30 Millionen davon werden mit Trinkwasser aus dem Rhein versorgt. Der Rhein ist darüber hinaus die bedeutendste Schifffahrtsstraße Europas (MULNV NRW 2016).

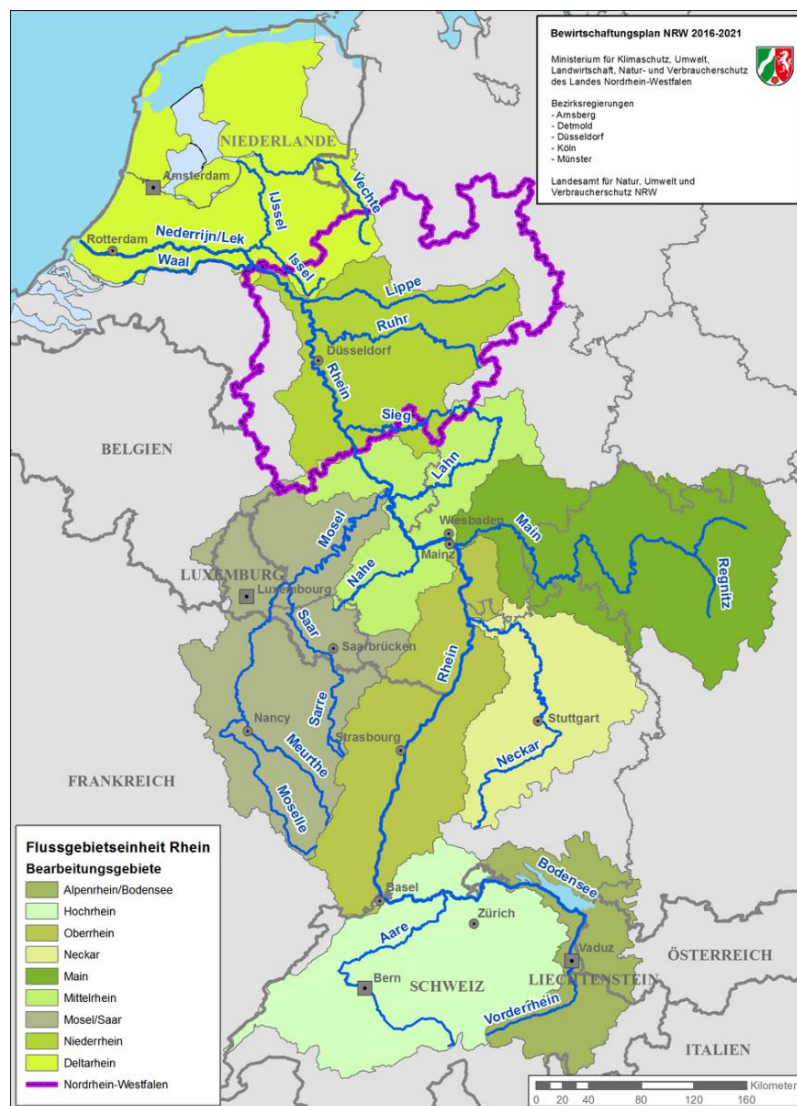


Abb. 3-1: Übersichtskarte der Flussgebietseinheit Rhein (Quelle: MULNV, 2016)

Deutschland beansprucht an der Fläche der Flussgebietseinheit Rhein etwa einen Anteil von 50 %. Zur international koordinierten Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) wurde die Flussgebietseinheit in neun Bearbeitungsgebiete aufgeteilt. Der Anteil Nordrhein-Westfalens an der Flussgebietseinheit Rhein beträgt bezogen auf die vorgenannte Fläche etwa 10 % (s. lilafarbene Umrandung in Abb. 3-1). Das nordrhein-westfälische Einzugsgebiet des Rheins besitzt eine Fläche von etwa 21.000 km² und nimmt damit etwa zwei Drittel der Gesamtfläche des Bundeslandes NRW ein. In diesem Einzugsgebiet leben etwa 13,2 Millionen Menschen, das entspricht 74 % der Gesamtbevölkerung des Bundeslandes (MULNV NRW 2016).

Der Flussabschnitt des Rheins in Nordrhein-Westfalen wird im folgenden Abschnitt 3.1.2 genauer beschrieben.

3.1.2 Der Rhein in Nordrhein-Westfalen

Der Rhein verlässt südlich von Bonn, bei Bad Honnef, das Bundesland Rheinland-Pfalz und fließt somit vom Mittelgebirge aus als Niederrhein durch Nordrhein-Westfalen (MULNV NRW 2016). Eine schematische Darstellung des Rheinverlaufs ist Abb. 3-2 zu entnehmen (BfG 2020). Entsprechend dem in Abschnitt 2.3.1 vorgestellten Regellängsprofil eines Fließgewässers mit seinen vier grundlegenden Flussverlaufsabschnitten, repräsentiert der Niederrhein den Unterlauf und die Mündung (s. Abb. 3-2). Der Flussabschnitt des Rheins in Nordrhein-Westfalen ist gemäß seiner Flussverlaufscharakteristik (vgl. Regelgrundriss in Abb. 2-10) eindeutig dem Unterlauf zuzuordnen.

Wie im Abschnitt 2.3.1 dargestellt, handelt es sich bei einem natürlichen Fließgewässer um ein außerordentlich vielfältiges dynamisches Gebilde. Bei anthropogen nicht veränderten Fließgewässern ist die auffälligste Eigenschaft die Verlagerung des Gerinnes durch das Mäandrieren. Der gewundene Fluss oder Bach verlagert dabei ständig seinen Lauf, vorrangig fortschreitend in Fließrichtung.

Durch massive anthropogene Eingriffe im Rhein, beginnend im Jahr 1824 durch Tulla am Oberrhein, ist aktuell nicht mehr von einer natürlichen Fließgewässerdynamik entlang des Flussverlaufes auszugehen (Schröder und Römisch 2001). Um die für die Schifffahrt bedeutendste Wasserstraße für ein möglichst großes Abflussspektrum dauerhaft schiffbar zu machen, wurden vorrangig im Oberrhein Staustufen errichtet. Darüber hinaus sind entlang des gesamten Flussverlaufes wasserbauliche Eingriffe zur Fahrrinnenstabilität, z. B. durch den Bau von Buhnen erfolgt. Durch diese und weitere Maßnahmen wurde der Flussverlauf des Rheins in seiner heutigen Lage fixiert. Vor diesem Hintergrund sind die Ergebnisse der Auswertung des verzeichneten Flussverlaufes im Unterkapitel 3.3 kritisch zu hinterfragen.



Abb. 3-2: Schematische Darstellung des Rheinverlaufes (Quelle: BfG, 2020)

Innerhalb von Nordrhein-Westfalen legt der Rhein etwa 226 Flusskilometer zurück. Nördlich von Emmerich, bei Bimmen, verlässt der Rhein nordrhein-westfälisches und damit deutsches Gebiet und fließt anschließend im sogenannten Rheindelta durch die Niederlande bis zu seiner Mündung in die Nordsee (MULNV NRW 2016).

Eine Auswertung des vorgenannten Flussverlaufes anhand von Kartenmaterial erfolgt im Unterkapitel 3.2.

3.2 Auswertung von Kartenmaterial

3.2.1 Empirische und mathematische Grundlagen

Bei der Bildung von Flusskurven und Flusskrümmungen spielen sowohl die Morphodynamik des Flusses (reliefbildende Prozesse) als auch die Empirie der Mäander eine bedeutende Rolle. Auf die reliefbildenden Prozesse wird nachfolgend nicht eingegangen. Das Hauptaugenmerk soll auf die empirischen Grundlagen der Geometrie von Mäandern gelegt werden, da diese bei der Auswertung des Kartenmaterials zur Anwendung gelangen.

Leopold et al. (1964) fanden heraus, dass nahezu alle natürlichen Fließgewässer eine gewisse Tendenz zur Entwicklung von Kurven zeigen, die proportional zur Größe des Fließgewässers zu sein scheinen. Per Definition wird ein Fließgewässer als Mäander bezeichnet, wenn er eine Sinuosität, d.h. Verhältnis von rektifizierter Länge zu geradlinigem Talweg, von mehr als 1,5 aufweist (Malcherek 2019). Dabei ist eine Strecke mit mehreren aufeinanderfolgenden Kurvenverläufen zu untersuchen. Durch Auswertung von 50 Flüssen unterschiedlicher Größe konnten Leopold et al. (1964) feststellen, dass die Sinuosität der mäandrierenden Flüsse einen Median von 1,5 aufweist. Im Rahmen der statistischen Auswertung und grafischen Darstellung der Beobachtungswerte als relative Häufigkeitssummenkurve existiert bei 0,5 ein kennzeichnender Wert auf der Ordinate. Projiziert man diesen auf die relative Häufigkeitssummenkurve, dann sind genau 50 % der Beobachtungswerte kleiner und 50 % größer. Der dazugehörige Wert auf der Abszisse wird als Median (Zentralwert) bezeichnet. Die weiteren Zusammenhänge und Begriffe zum Mäander werden anhand der nachfolgenden Abbildung 3-3 beschrieben.

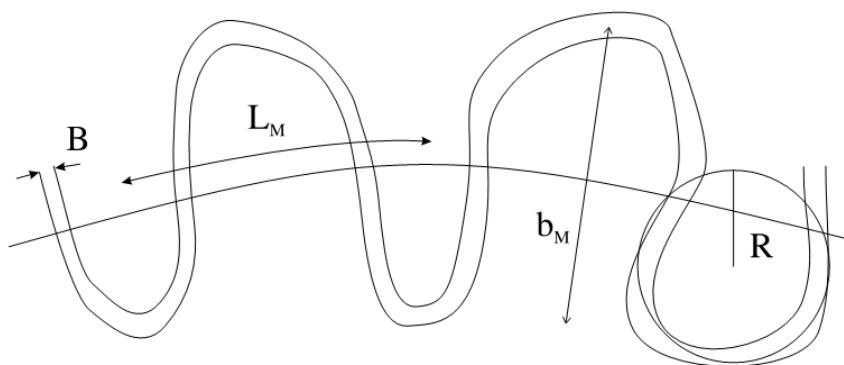


Abb. 3-3: Zusammenhänge und Begriffe zum Mäander (Quelle: Malcherek, 2019)

Die Länge einer Mäanderschleife (sog. Mäanderlänge L_M) bezieht sich empirisch auf die Quadratwurzel des effektiven bzw. dominanten Abflusses. Im Gegensatz zur Mäanderlänge korreliert die Breite der Mäanderschleife (sog. Amplitude b_M) nur bedingt mit der

Mäanderlänge. Daraus wird von Leopold et al. (1964) geschlossen, dass die Amplitude von Mäanderschleifen eher durch die Erosionscharakteristik von Bachufern und andere lokale Faktoren bestimmt wird als durch ein hydrodynamisches Prinzip. Da die Flussbreite B ebenfalls mit dem Abfluss zusammenhängt, wurde angenommen, dass eine grundlegende Beziehung zwischen Breite und Mäanderlänge existiert. Aus den vorgenannten Untersuchungen geht hervor, dass die als am aussagekräftigsten empirischen Beziehungen jene zwischen der Flussbreite B und der Mäanderlänge L_M sowie zwischen Flussbreite B und Krümmungsradius R identifiziert wurden (Leopold et al. 1964).

Wie die vorgenannten Untersuchungsergebnisse hinsichtlich der mäandrierenden Flüsse und der Flusskurven zeigen, stehen alle drei Elemente (Mäanderlänge L_M , Amplitude b_M und Krümmungsradius R) in engem Zusammenhang zur Flussbreite B . Betrachtet man die Mäanderlänge L_M und die Amplitude b_M in Abbildung 3-3 genauer, dann ist festzustellen, dass sich bei einer Veränderung der Ausdehnung von L_M und b_M (größer oder kleiner) die Flusskurve entweder gestaucht oder gestreckt darstellt. Dadurch verändert sich zwangsläufig auch der Krümmungsradius R . Somit wirken sich Veränderungen von L_M und b_M direkt auf R aus.

Vor diesem Hintergrund wird nachfolgend zur Eingrenzung möglicher Bogenformen für die weiterführenden Untersuchungen lediglich die empirische Beziehung zwischen Flussbreite B und Krümmungsradius R weiter betrachtet. Darüber hinaus bietet dieser Ansatz einen direkten geometrischen Zusammenhang zu den gesuchten Bogenformen.

Eine Vertiefung der Thematik der Beziehungen zwischen Flussbreite und Mäanderlänge sowie Mäanderlänge und Abfluss ist in (Leopold et al. 1964) und (Malcherek 2019) dargestellt.

Bei der Untersuchung einer Stichprobe von 50 Flüssen unterschiedlicher Größe wurde von Leopold et al. (1964) festgestellt, dass ein großer Anteil der einzelnen Flusskurven bzw. Flusskrümmungen einen Wert für das Verhältnis von Krümmungsradius R zur Breite B im Bereich von 2 bis 3 mit einem Median von 2,7 aufweisen. Dabei lagen allerdings zwei Drittel der Werte im Bereich von 1,5 bis 4,3.

Abschließend gibt Malcherek (2019) folgenden Hinweis:

„Bei all diesen Formeln handelt es sich nur um Abschätzungen aus einer Vielzahl von Untersuchungen. Eine exakte Prognose der Ausgestaltung eines Flusses durch Mäander ist nicht möglich.“

Zur Vereinfachung einer Abschätzung des Krümmungsradius R wurde in Abbildung 3-3 in die vorhandene Flusskurve bzw. Flusskrümmung ein Kreis eingezeichnet, jedoch stimmt nur ein gewisser Teil des Kreises mit dem Flussverlauf (Flussachse) überein. Begrenzt man diesen Teilabschnitt beidseitig durch den Radius, dann ergibt sich geometrisch ein Kreissektor (Fläche) und ein Kreisbogen (Länge). Vereinfacht man den Flussverlauf, wie in Abbildung 3-4 dargestellt, dann ergibt sich für die Flussachse eine trassierte Linie bestehend aus Geraden und Kreisbögen (Baumann 1999).

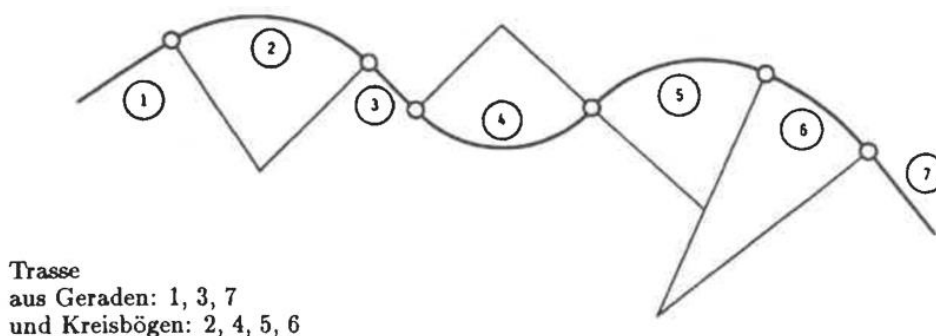


Abb. 3-4: Vereinfachter Flussverlauf mit Geraden und Kreisbögen (Quelle: Baumann, 1999)

Somit stellt der Kreisbogen ein bedeutendes geometrisches Element zur Beschreibung bogenförmiger Trassenabschnitte dar. In der nachfolgenden Abbildung 3-5 werden die für die weiteren Untersuchungen relevanten mathematischen Zusammenhänge grafisch dargestellt.

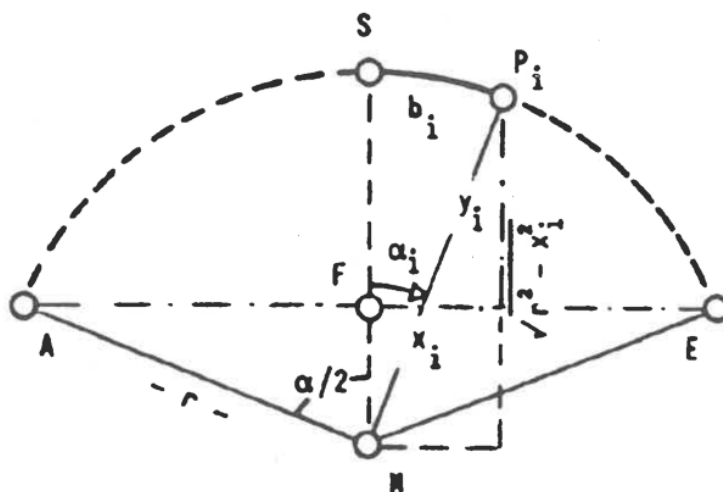


Abb. 3-5: Mathematische Zusammenhänge des Kreisbogens (Quelle: Baumann, 1999)

Die Berechnungsansätze zur Ermittlung der wesentlichen Elemente und Größen des Kreisbogens sind in der Tabelle 3-1 aufgeführt.

Tab. 3-1: Berechnungsansätze zur Ermittlung der wesentlichen Elemente des Kreisbogens (Quelle: Baumann, 1999)

Element des Kreisbogens	Berechnungsansatz
Bogenlänge AE	$b = r \cdot \frac{\alpha}{rad} \quad (3.1)$
Sehne \overline{AE}	$s = 2 \cdot r \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \quad (3.2)$
Pfeilhöhe \overline{FS}	$h_p = r \cdot \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right) \quad (3.3)$
Zentriwinkel des Bogenintervalls SP_i	$\alpha_i = b_i \cdot \frac{rad}{r} \quad (3.4)$
Abszisse des Bogenkleinpunktes P_i	$x_i = r \cdot \sin \alpha_i \quad (3.5)$
Ordinate des Bogenkleinpunktes P_i	$y_i = \sqrt{r^2 - x_i^2} - r \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \quad (3.6)$

In den nachfolgenden Abschnitten und Unterkapiteln erfolgt eine Anwendung der vorgenannten empirischen und mathematischen Grundlagen.

3.2.2 Kartenmaterial und Auswertungsmethode

Für die Auswertung des verzeichneten Flussverlaufes wurden für den etwa 216 km langen Rheinabschnitt (von Rhein-km 642 bis Rhein-km 858) in Nordrhein-Westfalen folgende digitale georeferenzierte Karten bzw. Planungsdaten verwendet:

- Digitale Topografische Karte 1:100.000 (Geobasis NRW 2018)
- Digitale Gewässerstationierungskarte NRW (LANUV NRW 2010)

Die Digitale Topografische Karte 1:100.000 (DTK 100) weist einen Aktualisierungsstand mit Datum vom 06.08.2018 auf. In der Digitalen Gewässerstationierungskarte NRW sind hingegen die Flussachse und die Uferlinien mit Stand 30.11.2010 enthalten.

Diese digitalen Karten wurden, jede auf einem separaten Layer, zunächst in einem CAD-System eingelesen. Anschließend erfolgte eine überlagerte Darstellung der vorgenannten Karten und Planungsdaten. Die Georeferenzierung, d. h. sämtliche Rasterdaten (Historische Karten, Luftbilder, Satellitenbilder etc.) wurden mit räumlichen Referenzdaten (einheitliches Koordinatensystem) verknüpft, dies erleichterte die passgenaue Überlagerung der verschiedenen Datengrundlagen.

In einem ersten Schritt fand, ausgehend von der Landesgrenze zum Bundesland Rheinland-Pfalz in Fließrichtung bis zur niederländischen Grenze, eine grobe visuelle Überprüfung des Flussverlaufes mit seinen Kurven und Krümmungen statt. Dabei ließ

sich feststellen, dass grundsätzlich eine dem Unterlauf entsprechende Flussverlaufescharakteristik sowie gewisse Sinuosität (qualitativ) vorhanden ist (s. Abb. 3-6).

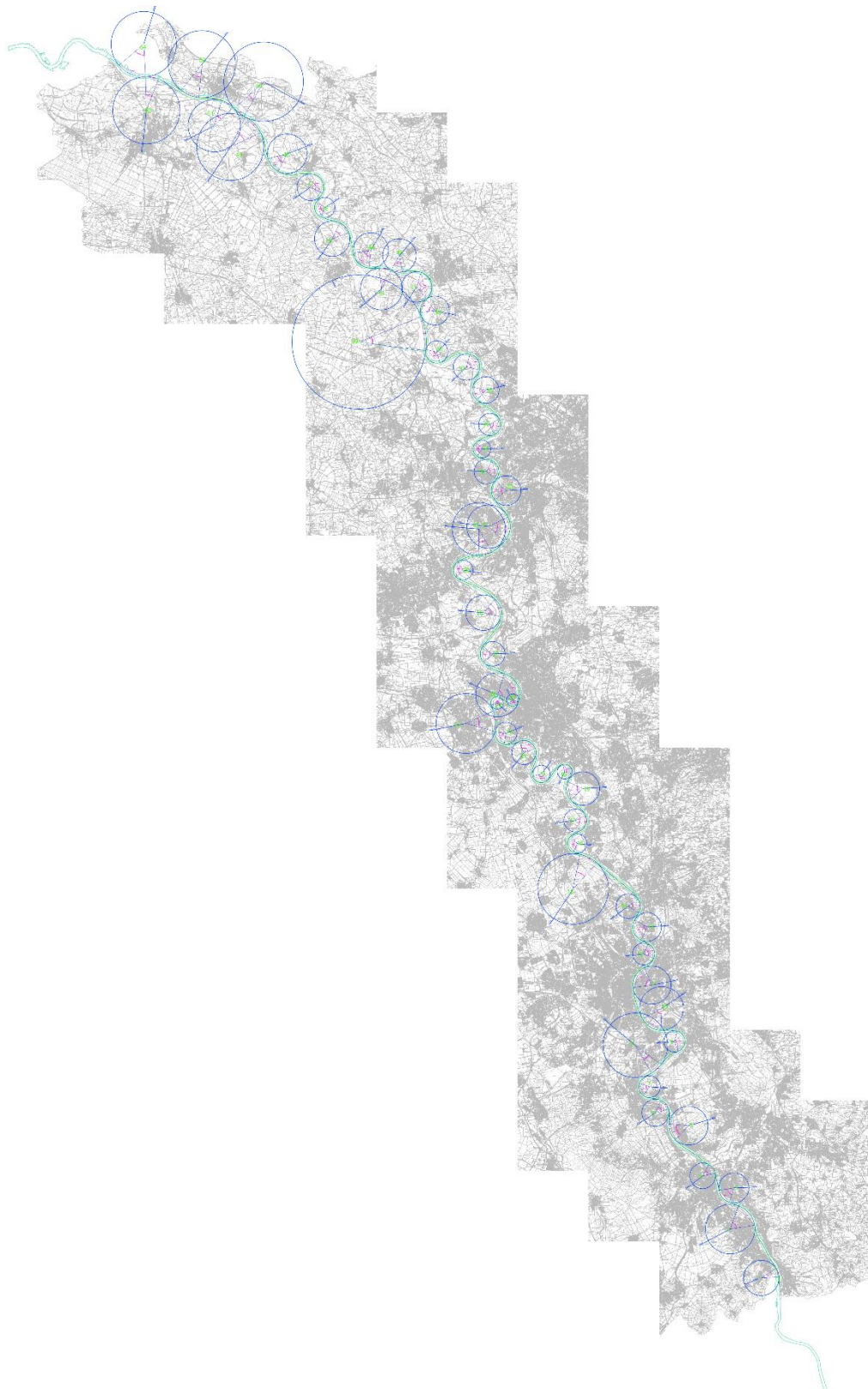


Abb. 3-6: Auswertung des Flussverlaufes im CAD mittels Kreis Anpassung (Abgewandelt von: Geobasis NRW, 2018 und LANUV NRW, 2010)

In einem zweiten Schritt wurde bei den vorhandenen Flusskurven und -krümmungen ein Kreis konstruiert und sowohl der Radius solange variiert als auch der Mittelpunkt solange verschoben (Kreisanpassung), bis sich eine gute Annäherung des Kreises an die Flussachse ergab (s. Abb. 3-7). Insgesamt konnten entlang des Flussverlaufes 54 Kreise festgestellt und entsprechend angepasst werden (s. Abb. 3-6).

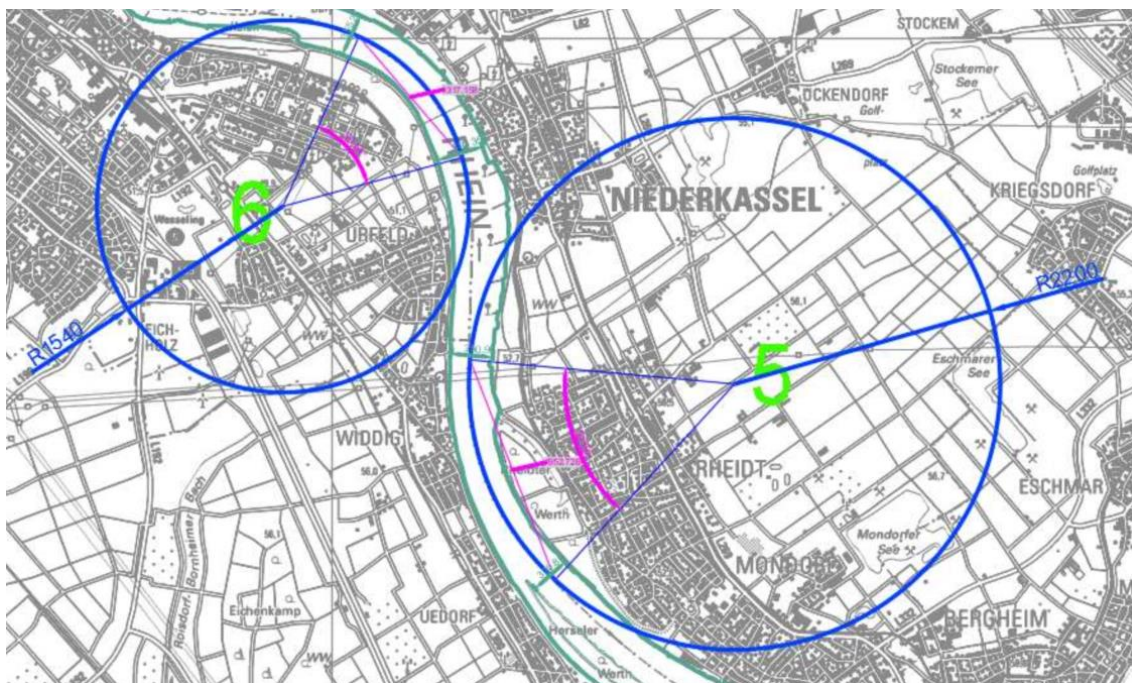


Abb. 3-7: Auswertung des Flussverlaufes im CAD - Kreisbogen (Abgewandelt von: Geobasis NRW, 2018 und LANUV NRW, 2010)

Wie in Abbildung 3-7 dargestellt, ergibt sich bei der Kreisanpassung für die Flusskurven Nr. 5 und 6 eine gute Annäherung an die gestrichelt dargestellte Flussachse.

Im dritten und letzten Schritt erfolgte die Konstruktion des Kreisbogens. Dabei wurden, ausgehend vom Mittelpunkt des an die Flussachse angepassten Kreises, zwei Linien jeweils mit der Länge des Radius bis zu den beiden Tangentialpunkten (Flussachse löst sich gerade vom Kreis ab) gezeichnet. Somit ließ sich der Kreisbogen mit dem Krümmungsradius R fixieren. Im Bereich der beiden Tangentialpunkte ergaben sich die Flussbreiten B_1 und B_2 , aus dem Mittelwert die Breite B . Damit ließen sich das Verhältnis R/B und darüber hinaus der Zentriwinkel α bestimmen.

Die vorgenannten Messwerte der Flusskurven des Rheins in NRW sind in der sog. Urliste im **Anhang B** dokumentiert.

3.3 Statistische Analyse der Messwerte und Bewertung

3.3.1 Verhältnis von Krümmungsradius zur Flussbreite (R/B)

Um eine Einordnung der zuvor ermittelten R/B-Werte des Rheins zu den Untersuchungsergebnissen (empirischer flussbaulicher Zusammenhang) von Leopold et al. (1964) vornehmen zu können, mussten die Ergebnisse der durchgeführten Messungen zunächst sortiert und quantitativ beschrieben werden. Dies erfolgte mit Hilfe der Stichprobenanalyse, der elementaren Kenngrößen der beschreibenden Statistik und abschließend mit Methoden der bewertenden Statistik (Prüfverfahren). Da der ausgewertete Flussabschnitt nur einen gewissen Teil des Flussverlaufes darstellt und somit hinsichtlich der Flusskurven/Flusskrümmungen nur eine Teilmenge aller denkbaren R/B-Werte bei der statistischen Analyse zur Verfügung steht, war nachfolgend von einer Stichprobe auszugehen.

Da lediglich das Verhältnis R/B betrachtet wurde, handelte es sich hier um die Analyse einer eindimensionalen Stichprobe. Gegeben sind die Elemente x_1, x_2, \dots, x_i , die in zufälliger Reihenfolge $i = 1, 2, \dots, n$ aus einer Gesamtheit stammen, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht erfasst werden konnte. Da die Reihenfolge der Messwertermittlung keinen Einfluss auf die Ergebnisse der nachfolgenden Strukturanalyse besaß, handelt es sich um eine probabilistische Stichprobe (Plate 1993).

Zur weiteren Analyse der eindimensionalen Stichprobe führt Plate (1993) weiter aus:

„Die statistische Struktur dieser Stichprobe wird durch die Häufigkeitsverteilung ausgedrückt, [...]. Diese Verteilung wird analytisch durch Kenngrößen oder statistische Parameter beschrieben, – das sind Größen, die aus den Daten der Stichprobe berechnet werden.“

Zunächst wurde die Häufigkeitsverteilung bestimmt. Sie ist nicht geeignet, um eine Strukturaussage über Stichproben gleicher Arten von Beobachtungswerten zu tätigen, jedoch hinsichtlich der Betrachtung verschiedener Längen n . Um diesen Nachteil zu vermeiden, wurde die absolute Häufigkeitssumme normiert und somit die Verteilung der relativen Häufigkeiten n_i/n als Funktion von x erzeugt (Plate 1993).

Wie der Urliste im **Anhang B** zu entnehmen ist, enthält die Stichprobe 54 Messwerte, die in der Reihenfolge ihres Auftretens in die Liste eingetragen wurden. Aufgrund der vorgenannten Anzahl an Messwerten handelt es sich nach Plate (1993) um eine große Stichprobe. Daher erfolgte eine Vorsortierung der Stichprobe vor der Analyse zunächst in Klassen (Klassierung) und anschließend ein Ersatz der Einzelwerte durch den Mittelwert seiner jeweiligen Klasse. Für die Klassierung wurde primär der Merkmals-

bereich durch die Spannweite w der Elemente nach Gleichung (3.7) abgesteckt (Plate 1993).

$$w = x_{max} - x_{min} \tag{3.7}$$

Gemäß der Urliste im **Anhang B** ergibt sich der kleinste Wert x_{min} (= 2,0) und der größte Wert x_{max} (= 23,7). Die Spannweite w beträgt (= 21,7).

Für die Wahl der erforderlichen Klassenanzahl k existieren keine festen Regeln. In Plate (1993) wird für $n \leq 100$ jedoch empfohlen, dass k mindestens (≥ 10) betragen soll. Mit Hilfe von k ließ sich die Klassenbreite als Quotient aus der Spannweite w und der Klassenzahl k ermitteln. Im vorliegenden Fall betrug die Klassenbreite Δx ($w/k = 2,17$). Die Forderung, dass sowohl die Klassenmitte als auch die Klassengrenzen eine gerade Zahl ergeben sollen, erfüllte sich zunächst nicht. Vor diesem Hintergrund musste sowohl der Merkmalsbereich (0 bis 24) ausgedehnt als auch die Klassenanzahl k (= 12) erhöht werden. Dadurch ließen sich die Anforderungen an eine gerade Zahl hinsichtlich der Klassenmitte sowie den Klassengrenzen erfüllen. Die Klassenbreite Δx betrug somit ($24/12 = 2$). Abschließend wurden die Messwerte R/B den Klassen zugeordnet. Dafür konnte eine Arbeitstabelle erstellt werden (s. Abb. 3-8).

Klassen- grenze	Klassen- mitte x_j	Strichliste	n_j	$\frac{n_j}{n}$	$x_j \frac{n_j}{n}$	$(x_j - \bar{x})^2 \frac{n_j}{n}$	$\sum n_j$	$\sum \frac{n_j}{n}$
0	1		0	0	0	0		
2	3		16	0,30	0,9	2,4	0	0,00
4	5		19	0,35	1,8	0,3	16	0,30
6	7		9	0,17	1,2	0,2	35	0,65
8	9		7	0,13	1,2	1,3	44	0,81
10	11		1	0,02	0,2	0,5	51	0,94
12	13		1	0,02	0,2	0,9	52	0,96
14	15		0	0	0	0	53	0,98
16	17		0	0	0	0	53	0,98
18	19		0	0	0	0	53	0,98
20	21		0	0	0	0	53	0,98
22	23		1	0,02	0,4	5,4	53	0,98
24			0	0	0	0	54	1,00
		$\sum =$	54		5,9	11,1		

Abb. 3-8: Arbeitstabelle zur statistischen Analyse der R/B-Werte (Abgewandelt von: Plate, 1993)

Durch eine Strichmarkierung eines jeden Messwertes in die Spalte „Strichliste“ ließ sich die Besetzungszahl n_j je Klasse j ermitteln. Bei der Zuordnung der Messwerte, welche

auf die Klassengrenze fallen wie z. B. ($R/B = 2,0$), wurde die Konvention vereinbart, dass ein solcher Wert der größten Klasse zuzuordnen ist.

Mit den Daten der statistischen Analyse (vgl. Abb. 3-8) ließ sich die Verteilung der relativen Häufigkeiten der Stichprobe in Abbildung 3-9 zum einen als relative Häufigkeitsverteilung (a) und zum anderen als relative Häufigkeitssummenkurve bzw. empirische Verteilungsfunktion (b) darstellen.

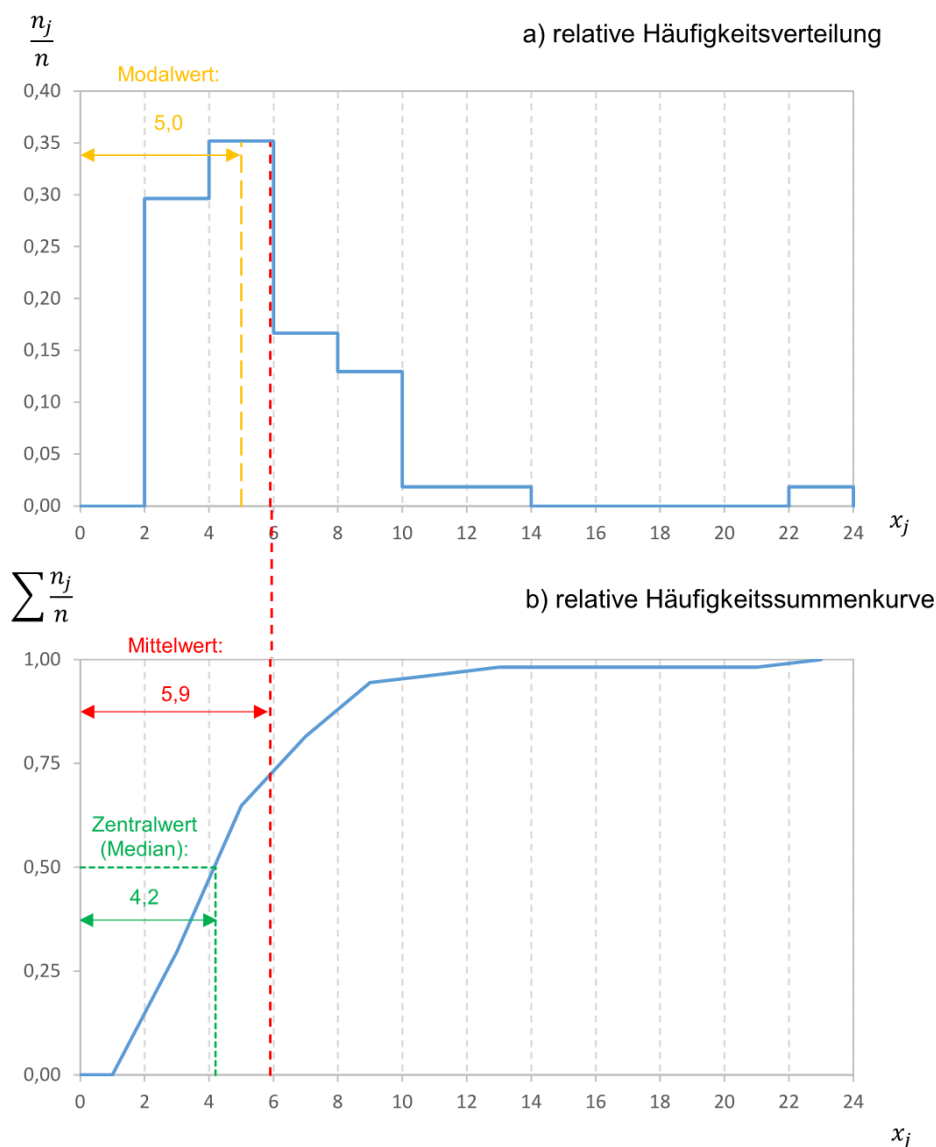


Abb. 3-9: Verteilung der relativen Häufigkeiten der R/B-Werte gemäß der Stichprobe in Abbildung 3-8 (Abgewandelt von: Plate, 1993)

Um die Ergebnisse der Stichprobenanalyse (s. Abb. 3-9) detaillierter beschreiben zu können, werden zunächst die elementaren Kenngrößen der beschreibenden Statistik in Tabelle 3-2 aufgelistet. Anschließend werden die Berechnungsansätze der statistischen Kenngrößen entsprechend auf die bereits in Abbildung 3-8 dargestellten analysierten Daten (Verhältnis R/B) angewendet.

Tab. 3-2: Auflistung der verwendeten statistischen Kenngrößen (Quelle: Plate, 1993)

Statistische Kenngröße	Berechnungsansatz
Mittelwert \bar{x}	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \approx \sum_{j=1}^k \frac{n_j}{n} x_j \quad (3.8)$
Varianz \tilde{s}_x^2 (Streuung)	$\tilde{s}_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \approx \frac{n}{n-1} \sum_{j=1}^k \frac{n_j}{n} (x_j - \bar{x})^2 \quad (3.9)$
Standardabweichung \tilde{s}_x	$\tilde{s}_x = \sqrt{\tilde{s}_x^2} \quad (3.10)$
Variationskoeffizient C_{vx}	$C_{vx} = \frac{\tilde{s}_x}{\bar{x}} \quad (3.11)$
Allgemeine Form für das q-te Zentralmoment	$M_{cxq} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^q \approx \sum_{j=1}^k \frac{n_j}{n} (x_j - \bar{x})^q \quad (3.12)$
Schiefekoeffizient C_{sx} (mit q = 3)	$C_{sx} = \frac{M_{cx3}}{(\tilde{s}_x^2)^{3/2}} \quad (3.13)$
Angepasster Schiefeffizient \tilde{C}_{sx}	$\tilde{C}_{sx} = \frac{n^2}{(n-1) \cdot (n-2)} \cdot C_{sx} \quad (3.14)$
Kurtosis K_x (mit q = 4)	$K_x = \frac{M_{cx4}}{(\tilde{s}_x^2)^2} \quad (3.15)$
Angepasste Kurtosis \tilde{K}_x	$\tilde{K}_x = \frac{n^3}{(n-1) \cdot (n-2) \cdot (n-3)} \cdot K_x \quad (3.16)$

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Stichprobenanalyse zusammen mit den Berechnungsergebnissen der statistischen Kenngrößen in Textform beschrieben.

In Abbildung 3-9 (a) stellt die Funktion der relativen Häufigkeitsverteilung eine sog. Treppenkurve dar. Dies resultiert dadurch, dass im Rahmen der vorgenommenen Datenauswertung (vgl. Abb. 3-8) alle Werte innerhalb der Klasse $x_{j-1}/2\Delta x < x_i < x_{j+1}/2\Delta x$ als innerhalb der Klasse j gleichverteilt angenommen wurden. Der nach Gleichung (3.8) berechnete Mittelwert \bar{x} (= 5,9) entspricht dem Schwerpunktabstand der Fläche unter der Treppenkurve (s. Abb. 3-9). Nach Plate (1993) ist der Mittelwert eine fundamentale Strukturkenngroße und liefert eine gewichtete Schätzung für die tatsächliche Größe eines Einzelwertes. Er ist somit die beste Schätzung für die zu bestimmende Größe x, in diesem Fall des R/B-Verhältnisses. Zur Quantifizierung der Messgenauigkeit liefert die Varianz \tilde{s}_x^2 (= 11,3) ein Maß für den Streubereich der einzelnen Messung. Sie gehört neben dem Mittelwert zu den wichtigsten Kenngrößen in der Statistik. Über die Varianz lässt sich die wichtigste Fehlerangabe der Stichprobe berechnen, die Standardabweichung \tilde{s}_x (= 3,4). Die Standardabweichung stellt ein geeignetes Maß für die

Fehlergrenzen der Messung dar und wird auch als sog. „wahrscheinlicher Fehler“ bezeichnet. Da die Angabe des Fehlerbereichs in der Regel nicht ausreichend ist, wurde zur Darstellung des relativen Fehlers in der Statistik der Variationskoeffizient C_{vx} (= 57 %) eingeführt. Dieser stellt einerseits ein Maß für den relativen Fehler (als Prozentsatz des wahrscheinlichen Fehlers vom Mittelwert) dar und andererseits ist er eine wichtige Kenngröße für die Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen (Plate 1993).

Bei einer genaueren Betrachtung der relativen Häufigkeitssummenkurve in Abbildung 3-9 (b) existiert ein kennzeichnender Wert auf der Ordinate, von 0,5. Projiziert man diesen auf die relative Häufigkeitssummenkurve, sind genau 50 % der Beobachtungswerte kleiner und 50 % größer, auf der Abszisse ergibt sich der dazugehörige Zentralwert oder Median \tilde{x} (= 4,2). Darauf wird im Zusammenhang mit den Untersuchungen von Leopold et al. (1964) noch eingegangen. Der Median dient in Verbindung mit der grafischen Darstellung in Abbildung 3-9 (b) zur augenscheinlichen Abschätzung der Verteilung. Da der Median links vom Mittelwert liegt, ist von einer eingipfligen linksschiefen Verteilung auszugehen.

Auch die relative Häufigkeitsverteilung in Abbildung 3-9 (a) lässt eine erste Abschätzung der Verteilung zu. Die sog. Treppenkurve hat ihr Maximum (= 0,35) bei einem Wert x_j (Klassenmitte), der als Modalwert (= 5,0) bezeichnet wird. Durch den Modalwert kann im Vergleich zum Mittelwert ebenfalls auf die Art der Verteilung (symmetrisch, linksschief oder rechtsschief) geschlossen werden. Liegt der Schwerpunkt, also der Mittelwert der Häufigkeitsverteilung rechts vom Modalwert, dann handelt es sich um eine linksschiefe Verteilung, wie im vorliegenden Fall. Liegt der Mittelwert hingegen links vom Modalwert, dann heißt die Verteilung rechtsschief. Handelt es sich dagegen um eine symmetrische und eingipflige Verteilung, dann liegen der Modal- und der Mittelwert identisch übereinander.

Für eine erste Abschätzung hinsichtlich der Verteilung können sowohl der Median als auch der Modalwert im Vergleich zum Mittelwert herangezogen werden. Bei der genauen Untersuchung der Struktur der Daten sowie der Verteilung kommen sowohl der sog. Schiefe als auch der Kurtosis eine besondere Bedeutung zu. Ein positiver Schiefekoeffizient steht für linksschiefe, ein C_{sx} (= 0) für symmetrische und ein negativer Schiefekoeffizient für rechtsschiefe Verteilungen. Für eine erwartungstreue Schätzung sollte der angepasste Schiefekoeffizient verwendet werden (Plate 1993).

Der Schiefekoeffizient (= 2,6) und der angepasste Schiefekoeffizient (= 2,8) bestätigen somit die vorhergehenden Abschätzungen hinsichtlich der linksschiefen Verteilung. Die Kurtosis stellt ein Maß für die Konzentration der Häufigkeitsverteilung um den höchsten Wert dar. Auch sie sollte für eine erwartungstreue Schätzung angepasst werden. Die

Kurtosis (= 13,4) und die angepasste Kurtosis (= 15,0) bestätigen die große Konzentration der Häufigkeitsverteilung um den höchsten Wert (= 0,35) in Abb. 3-9 (a).

Wie im Abschnitt 3.2.1 beschrieben, stellten Leopold et al. (1964) fest, dass ein großer Teil der Flusskurven einen R/B-Wert im Bereich von 2 bis 3 mit einem Median von 2,7 aufweist. Allerdings lagen dabei zwei Drittel der Werte im Bereich von 1,5 bis 4,3.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte bei der Auswertung des etwa 216 km langen Rheinabschnittes (von Rhein-km 642 bis Rhein-km 858) in Nordrhein-Westfalen festgestellt werden, dass die einzelnen Flusskurven einen R/B-Wert im Bereich von 2,0 bis 23,7 mit einem Median von 4,2 aufweisen. Anhand der relativen Häufigkeitssummenkurve war darüber hinaus erkennbar, dass etwa 94 % der ausgewerteten Flusskurven ein Verhältnis R/B im Bereich von 2,0 bis 10,0 aufweist.

Beim Vergleich der vorgenannten Untersuchungsergebnisse miteinander ist eine deutliche Abweichung sowohl hinsichtlich der Spannweite der R/B-Werte als auch des Medians festzustellen. Eine mögliche Erklärung kann zum einen in dem großen zeitlichen Abstand der beiden Untersuchungen und zum anderen in der Größe der jeweiligen Stichprobe begründet sein. Schaut man sich weitere Untersuchungen von Leopold et al. an, dann stellt man fest, dass viele Untersuchungen zu empirischen Zusammenhängen von Flussläufen bereits um 1950 begonnen wurden. Zu diesem Zeitpunkt waren möglicherweise viele der 50 untersuchten Flüsse noch nicht oder nur geringfügig anthropogen beeinflusst. Der untersuchte Rheinabschnitt in Nordrhein-Westfalen ist aufgrund der Fixierung in seiner Lage als stark anthropogen beeinflusst einzuschätzen. Somit wurde durch Eingriffe des Menschen der ursprünglich durch mäandrieren geprägte Flussverlauf des Niederrheins zu einem gewissen Zeitpunkt verändert, wie wir ihn heute vorfinden und anhand von Kartenmaterial auswerten können.

Aufgrund der Auswertung nur eines Flussabschnittes des Rheins liegt lediglich eine (kleine) Stichprobe für die R/B-Werte von Flusskurven vor. Vor dem Hintergrund der zuvor aufgezeigten Abweichungen zu den Untersuchungen von Leopold et al. (1964) infolge anthropogener Veränderungen des Flussverlaufes soll nachfolgend auf die theoretisch denkbare, sehr viel größere Datenmenge (Gesamtheit bzw. Grundgesamtheit) geschlossen werden. Grundsätzlich können dazu weitere Auswertungen von Flussverläufen durchgeführt werden, die im Rahmen dieser Arbeit jedoch keine Berücksichtigung finden können. Deshalb soll mit den Methoden der bewertenden Statistik (sog. Prüfverfahren) auf die nur vermutete Form einer im Grunde unbekanntem Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion oder ihre Parameter geschlossen werden. Die

Ermittlung derartiger Kenngrößen aus der vorliegenden Stichprobe wird als sog. Schätzung bezeichnet (Plate 1993).

Auf den ersten Blick, erscheint die in Abbildung 3-9 (a) dargestellte Treppenkurve keiner normalverteilten Grundgesamtheit anzugehören. Zur Überprüfung dieser Fragestellung stehen zum einen der Chi-Quadrat Test und zum anderen der Test von Kolmogorov - Smirnov zur Verfügung. Aufgrund der einfacheren Handhabung und Ausführbarkeit in Excel wurde zur Klärung der Frage, ob die R/B-Werte einer normalverteilten Grundgesamtheit angehören, der Test von Kolmogorov - Smirnov ausgeführt. Die ausführliche Beschreibung dieses Anpassungstests ist im **Anhang C** dargestellt, wobei auf statistische Tabellen (Runde 2015) zurückgegriffen wurde. Hierbei ist zu beachten, dass die Anpassungstests häufig nur eine mittlere Anpassung der zu untersuchenden Daten an die Verteilungsfunktion, die hier nicht im Detail erarbeitet wurde, ermöglichen.

Im Rahmen der praktischen Anwendung ist nicht nur das mittlere Verhalten von Bedeutung, sondern auch die Extrembereiche. Hierzu waren weitere Prüfverfahren wie etwa die Ermittlung des Streubereiches des Mittelwertes mit Konfidenzzahlen und die Bestimmung des Lagemaßes von seltenen Werten (Fraktile im Randbereich) notwendig. Diese sind detailliert im **Anhang D** und **Anhang E** beschrieben.

Bei der Durchführung und Anwendung der Prüfverfahren auf die R/B-Werte wurde eine Signifikanz (α -Niveau) von 1 % als Irrtumswahrscheinlichkeit angenommen. Die Signifikanz gibt bei den entsprechenden Prüfverfahren die Wahrscheinlichkeit der Verwerfung der Nullhypothese, obwohl diese richtig ist (sog. α -Fehler), an. Die Ergebnisse (Schätzungen) der durchgeführten Prüfverfahren sind im **Anhang F** aufgeführt. Danach wurde die Nullhypothese des Kolmogorov - Smirnov Tests erfüllt, so dass die R/B-Werte der Stichprobe den Daten einer Verteilung $F_x(x)$ auf dem Signifikanzniveau $\alpha (= 0,01)$ entstammen. Bei der Ermittlung des Streubereiches für den Mittelwert der Grundgesamtheit μ_x der R/B-Werte mittels Konfidenzzahlen wurde festgestellt, dass der Mittelwert μ_x mit einer Wahrscheinlichkeit von $1 - \alpha (= 99 \%)$ im Bereich von 4,7 bis 6,9 lag. Die Bestimmung des Lagemaßes der seltenen Werte x_T ergab, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % die R/B-Werte der Grundgesamtheit im Bereich von 3,0 bis 8,5 auftraten.

3.3.2 Verhältnis von Radius zur Sehne (r/s)

Um zu einem späteren Zeitpunkt (s. Abschnitt 3.3.3) einen Zusammenhang zwischen dem empirischen flussbaulichen Verhältnis R/B und dem für die numerischen Untersuchungen benötigten Verhältnis r/s herstellen zu können, wurde an dieser Stelle die

Vereinbarung getroffen, dass $R = r$ entspricht. Mit den im **Anhang B** angegebenen Radien und Winkeln ließ sich mit der Gleichung (3.2) aus Abschnitt 3.2.1 für jede Flusskurve die dazugehörige Sehne s berechnen. Somit kann auch das Verhältnis r/s für jede Flusskurve angegeben werden. Im **Anhang G** sind die durchgeführten Modifikationen der Urliste zur Bestimmung des Verhältnisses r/s dokumentiert.

Die im **Anhang G** aufgelisteten r/s -Werte wurden nachfolgend der aus Abschnitt 3.3.1 bekannten statistischen Analyse unterzogen. Aufgrund der getroffenen Vereinbarung hinsichtlich des Radius, welcher sowohl im Verhältnis R/B als auch im Verhältnis r/s enthalten ist, waren im Rahmen der statistischen Betrachtung vergleichbare Ergebnisse wie im Abschnitt 3.3.1 zu erwarten.

Wie bereits beschrieben erfolgte zunächst eine Klassierung der r/s -Werte. Gemäß der Urliste im **Anhang C** ergaben sich der kleinste Wert x_{\min} ($= 0,52$) und der größte Wert x_{\max} ($= 3,23$). Die Spannweite nach Gleichung (3.7) betrug w ($= 2,7$). Mit der mindestens erforderlichen Klassenanzahl k (≥ 10) betrug die Klassenbreite Δx ($w/k = 0,27$). Aufgrund der bekannten Forderung (vgl. Abschnitt 3.3.1) wurde der Merkmalsbereich (0 bis 4) entsprechend ausgedehnt. Die Anforderungen einer geraden Zahl hinsichtlich der Klassenmitte und der Klassengrenzen konnten im vorliegenden Fall nicht eingehalten werden. Deshalb wurde die Klassenbreite Δx mit ($4/10 = 0,4$) festgelegt. Somit war eine Zuordnung der r/s -Werte zu den einzelnen Klassen gegeben. Die daraus resultierende Arbeitstabelle ist der Abbildung 3-10 zu entnehmen.

Klassen-grenze	Klassen-mitte x_j	Strichliste	n_j	$\frac{n_j}{n}$	$x_j \frac{n_j}{n}$	$(x_j - \bar{x})^2 \frac{n_j}{n}$	$\sum n_j$	$\sum \frac{n_j}{n}$
0,0	0,2		0	0	0	0	0	0,00
0,4	0,6		22	0,41	0,2	0,1		
0,8	1,0		17	0,31	0,3	0,0	22	0,41
1,2	1,4		5	0,09	0,1	0,0	39	0,72
1,6	1,8	I	6	0,11	0,2	0,1	44	0,81
2,0	2,2	I	1	0,02	0,0	0,0	50	0,93
2,4	2,6		2	0,04	0,1	0,1	51	0,94
2,8	3,0		0	0	0	0	53	0,98
3,2	3,4	I	1	0,02	0,1	0,1	53	0,98
3,6	3,8		0	0	0	0	54	1,00
4,0		$\sum =$	54		1,1	0,4	54	1,00

Abb. 3-10: Arbeitstabelle zur statistischen Analyse der r/s -Werte (Abgewandelt von: Plate, 1993)

Bei der Zuordnung der r/s-Werte wurde ebenfalls die Konvention vereinbart, dass ein auf die Klassengrenze fallender Wert der größeren Klasse zuzuordnen ist.

Für die Beschreibung der Ergebnisse der Stichprobenanalyse wurden die elementaren Kenngrößen der beschreibenden Statistik für die in Abbildung 3-10 aufgeführten Daten (Verhältnis r/s) ermittelt und die Berechnungsergebnisse in Tabelle 3-3 aufgelistet.

Tab. 3-3: Auflistung der statistischen Kenngrößen und Berechnungsergebnisse für r/s

Statistische Kenngröße	Berechnungsergebnisse
Mittelwert \bar{x}	1,1
Varianz \tilde{s}_x^2 (Streuung)	0,4
Standardabweichung \tilde{s}_x	0,6
Variationskoeffizient C_{vx}	56 %
Median \tilde{x}	0,7
Modalwert	0,6
Schiefekoeffizient C_{sx}	1,6
Angepasster Schiefekoeffizient \tilde{C}_{sx}	1,7
Kurtosis K_x	5,6
Angepasste Kurtosis \tilde{K}_x	6,3

Mit den Daten der Abbildung 3-10 wurde nach der durchgeführten statistischen Analyse die Verteilung der relativen Häufigkeiten der Stichprobe in Abbildung 3-11 grafisch dargestellt. Die Abb. 3-11 (a) zeigt die relative Häufigkeitsverteilung und die Abb. 3-11 (b) die relative Häufigkeitssummenkurve bzw. empirische Verteilungsfunktion.

Die Ergebnisse der Stichprobenanalyse werden nachfolgend zusammen mit den Berechnungsergebnissen der statistischen Kenngrößen kurz in Textform beschrieben.

Auch bei den r/s-Werten stellt die Funktion der relativen Häufigkeitsverteilung eine sog. Treppenkurve dar, wie in Abbildung 3-11 (a) zu sehen ist. Der nach Gleichung (3.8) berechnete Mittelwert \bar{x} (= 1,1) entspricht auch hier dem Schwerpunktabstand der Fläche unter der Treppenkurve in Abbildung 3-11 (a). Da der Median \tilde{x} (= 0,7) auch in diesem Fall links vom Mittelwert liegt, ist von einer eingipfligen linksschiefen Verteilung auszugehen.

Mit der relativen Häufigkeitsverteilung in Abbildung 3-11 (a) lässt sich die vorgenannte Einschätzung bezüglich der Verteilung überprüfen. Die Treppenkurve weist ihr Maximum (= 0,41) auf, so dass der Modalwert im Bereich der Klassenmitte (= 0,6) beträgt. Dadurch liegt der Schwerpunkt, also der Mittelwert der Häufigkeitsverteilung, rechts vom Modal-

wert, so dass es sich hier um eine linksschiefe Verteilung handelt und die o. g. Einschätzung bestätigt wird. Der Schiefekoeffizient $C_{sx} (= 1,6)$ bestätigt diese linkschiefe Verteilung ebenfalls.

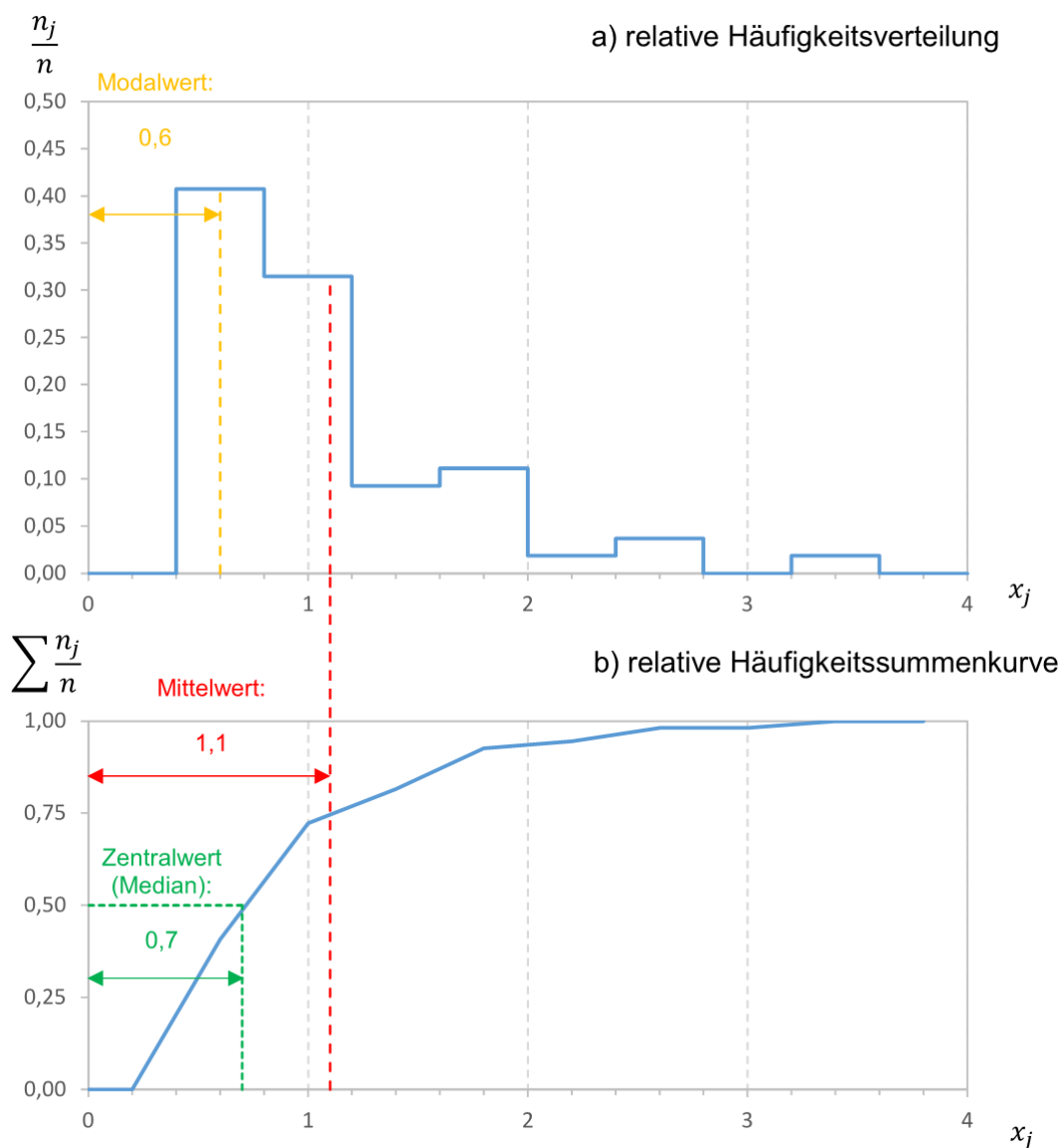


Abb. 3-11: Verteilung der relativen Häufigkeiten der r/s-Werte gemäß der Stichprobe in Abbildung 3-10 (Abgewandelt von: Plate, 1993)

Das Maß für die Konzentration der Häufigkeitsverteilung um den höchsten Wert stellt die Kurtosis dar. Auch sie ist für eine erwartungstreue Schätzung anzupassen. Die Kurtosis (= 5,6) und die angepasste Kurtosis (= 6,3) bestätigten die mäßig hohe Konzentration der Häufigkeitsverteilung in der Nähe des höchsten Wertes (= 0,41) in Abb. 3-11 (a).

Auch hinsichtlich der r/s-Werte wurden die im Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Methoden der bewertenden Statistik (sog. Prüfverfahren) angewendet, um auf die lediglich vermutete Form einer im Grunde unbekanntes Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion oder ihre Parameter zu schließen.

Ähnlich der Betrachtung der R/B-Werte wird auch bei der Durchführung und Anwendung der Prüfverfahren in Bezug auf die r/s-Werte von einem Signifikanzniveau (α -Niveau) von 1 % ausgegangen. Die Ergebnisse (Schätzungen) der durchgeführten Prüfverfahren sind im **Anhang H** aufgeführt. Die Nullhypothese des Kolmogorov - Smirnov Test wurde erfüllt, so dass die r/s-Werte der Stichprobe den Daten einer Verteilung $F_x(x)$ mit dem Signifikanzniveau $\alpha (= 0,01)$ entsprechen. Die Ermittlung des Streubereiches für den Mittelwert der Grundgesamtheit μ_x der r/s-Werte mit Konfidenzzahlen ergab, dass der Mittelwert μ_x mit einer Wahrscheinlichkeit von $1 - \alpha (= 99 \%)$ im Bereich von 0,9 bis 1,3 lag. Bei der Bestimmung des Lagemaßes für die seltenen Werte x_T wurde festgestellt, dass die r/s-Werte der Grundgesamtheit mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % im Bereich von 0,8 bis 1,4 auftraten.

3.3.3 Korrelation zwischen R/B und r/s

Nach der durchgeführten statistischen Untersuchung der Verhältnisse R/B und r/s in den beiden vorhergehenden Abschnitten sollte nun überprüft werden, ob zwischen den R/B-Werten und den r/s-Werten eine Abhängigkeit besteht. Hierzu wurde zunächst eine Korrelationsanalyse zur Feststellung von Abhängigkeiten zwischen zwei Merkmalen einer Grundgesamtheit anhand der Messwerte R/B (= x) und r/s (= y) durchgeführt. Im zweiten Schritt wurde weiterführend mit Hilfe der Regressionsanalyse die Form der Abhängigkeit zwischen diesen Merkmalen untersucht (Bronštejn 1995).

Im Rahmen der praktischen Anwendung war zu untersuchen, ob eine Stichprobe, welche aus einer bestimmten Anzahl n von Messpunkten (x_i, y_i) mit $(i = 1, 2, \dots, n)$ besteht, aus einer zweidimensionalen, normalverteilten Grundgesamtheit mit dem Korrelationskoeffizienten $\rho_{xy} = 0$ stammt, so dass die beiden Zufallsgrößen R/B (= x) und r/s (= y) als unabhängig angesehen werden können. Hierzu wurde zunächst der empirische Korrelationskoeffizienten $r_{xy} (= 0,636)$ tabellarisch nach Gleichung (3.17) bestimmt (s. **Anhang I**).

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} \cdot S_{yy}}} \quad (3.17)$$

Dabei stellen S_{xx} und S_{yy} die empirischen Varianzen und S_{xy} die empirische Kovarianz dar. Die empirischen Varianzen wurden auf der Grundlage der Gleichung (3.9) ermittelt, jedoch ohne Berücksichtigung des Faktors $1/(n-1)$. Die empirische Kovarianz wurde mit Gleichung (3.18) bestimmt (Baumann 1999).

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (3.18)$$

Anschließend wurde die Hypothese $\rho_{xy} = 0$ aufgestellt und durch Vorgabe einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha (= 0,01)$ das Quantil $t_{1-\alpha,m}$ der t-Verteilung aus **Anhang D** für $m = n - 2 (= 52)$ ermittelt (Bronštejn 1995). Resultierend ließ sich die Testgröße t nach Gleichung (3.19) berechnen.

$$t = \frac{r_{xy} \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}} \quad (3.19)$$

Die Testgröße $t (= 5,9387)$ wurde mit dem Quantil $t_{0,99,52} (\sim 2,4033)$ verglichen. Da der Betrag von t größer als $t_{\alpha,m}$ ausfiel, war die Hypothese abzulehnen d. h. die beiden Zufallsgrößen $R/B (= x)$ und $r/s (= y)$ waren als abhängig von einander anzusehen. Aufgrund der in Abschnitt 3.3.2 getroffenen Vereinbarung, dass $R = r$ entspricht, ließ sich das vorgenannte Testergebnis vermuten. Aufgrund der Tendenz des empirischen Korrelationskoeffizienten in Richtung $(= 1)$, war von einer gleichsinnigen Abhängigkeit auszugehen.

Da eine Abhängigkeit festgestellt werden konnte, lag die Aufgabe folglich in der Ermittlung des funktionalen Zusammenhanges $y = f(x)$. Primär wurde hier von einer linearen Regression gemäß Gleichung (3.20) ausgegangen.

$$y = a + bx \quad (3.20)$$

Diese Beziehung bedeutet, dass die Zufallsgröße y (r/s) im Mittel von dem festen x -Wert (R/B) linear abhängt und aufgrund der Angabe „im Mittel“ eine Streuung σ^2 aufweist. Die Güte des Zusammenhangs der einzelnen Datenpunkte mit der Regressionsgeraden wird durch das Bestimmtheitsmaß R^2 angegeben. Mit den Gleichungen (3.21), (3.22) und (3.23) erhält man näherungsweise die Schätzwerte a , b und R^2 (Bronštejn 1995).

$$\tilde{b} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (3.21)$$

$$\tilde{a} = \bar{y} - \tilde{b}\bar{x} \quad (3.22)$$

$$R^2 = r_{xy}^2 \quad (3.23)$$

Die Koeffizienten \tilde{a} und \tilde{b} werden Regressionskoeffizienten genannt. Die Gerade $y(x) = \tilde{a} + \tilde{b}x$ heißt Regressionsgerade. Die Messwerte $R/B (= x)$ und $r/s (= y)$ sind zusammen mit der Regressionsgeraden in Abbildung 3-12 dargestellt.

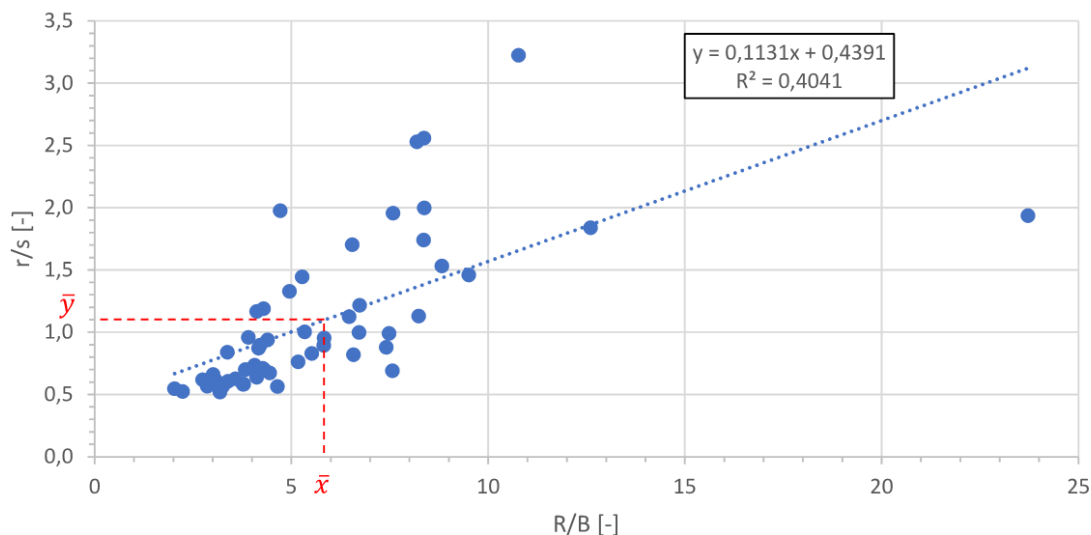


Abb. 3-12: Darstellung der Korrelation zwischen den Werten R/B und r/s

Somit konnte in einer ersten Näherung ein Zusammenhang zwischen den aus dem Flussverlauf gewonnenen Verhältnis R/B und dem für die numerischen Untersuchungen wichtigen Verhältnis r/s (geometrischer Verhältniswert des Kreisbogens) hergestellt werden. Durch weitere Auswertungen von Flussverläufen ist zu erwarten, dass sich der vorgenannte Zusammenhang verändern wird, dennoch kann dieser als erster Anhaltswert zur Plausibilitätsprüfung herangezogen werden.

3.4 Festlegung möglicher Bogenformen

Auf der Grundlage der in den Abschnitten 3.3.1 bis 3.3.3 durchgeführten Auswertungen und Untersuchungen sollten nun die möglichen Bogenformen für die numerischen Untersuchungen zur Beantwortung der Fragestellung, inwieweit die jeweiligen Bogenformen die Grundwasserströmung im Sinne eines Grundwasseraufstaus bzw. einer Grundwasserabsenkung beeinflussen, festgelegt werden.

Sieht man sich die Messpunkte in Abbildung 3-12 im Abschnitt 3.3.3 genauer an und zieht gedanklich eine waagerechte Linie sowohl bei $r/s = 0,5$ als auch bei $r/s = 2,0$, ist festzustellen, dass fast sämtliche Messpunkte der Stichprobe enthalten sind. Die Schätzung für die Grundgesamtheit besagt, dass die r/s-Werte mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % innerhalb des Bereiches von 0,8 bis 1,4 liegen (vgl. Abschnitt 3.3.2). Schaut man sich darüber hinaus noch die relative Häufigkeitssumme $\sum n_i/n$ der Stichprobe in Abbildung 3-10 (Arbeitstabelle) im Abschnitt 3.3.2 an, stellt man fest, dass sämtliche r/s-Verhältnisse zwischen 0,4 und 2,0 mit einer relativen Häufigkeit von 93 % vertreten sind. Diese Erkenntnisse grenzen die zu untersuchenden möglichen Bogenformen verhältnismäßig gut ein. Dennoch wurden die nachfolgenden weiteren Betrachtungen vorgenommen.

Aufgrund der im Abschnitt 3.3.2 getroffenen Konvention ($R = r$) bezieht sich im Verhältnis r/s die Sehne auf den Krümmungsradius R der Flussachse. Jedoch sind die Hochwasserschutzanlagen (Deiche, HWS-Wände, etc.) nicht an dieser Stelle angeordnet, sondern am inneren und äußeren Ufer (s. Abb. 3-13).

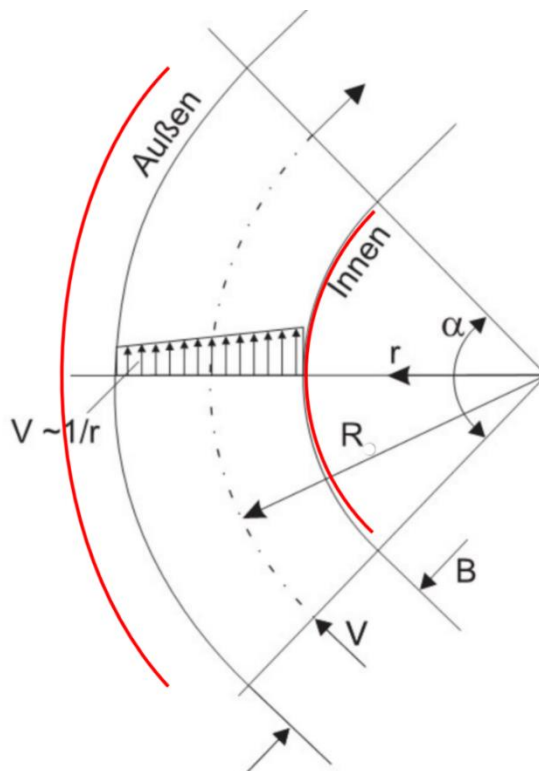


Abb. 3-13: Flusskurve mit Hochwasserschutzanlagen am inneren und äußeren Ufer
(Abgewandelt von: Jirka und Lang, 2009)

Analog der geometrischen Zusammenhänge des Kreisbogens (vgl. Abschnitt 3.2.1) ist aufgrund des gleichen Zentriwinkels α in Abbildung 3-13 (Jirka und Lang 2009) das r/s -Verhältnis sowohl für die Innenseite (Gleithang) als auch für die Außenseite (Prallhang) des Flusses fixiert und entspricht dem der Flussmitte. Durch diesen Zusammenhang nimmt die Länge der Sehne von der Innenseite bis zur Außenseite des Flusses zu. Unter der Annahme, dass die Hochwasserschutzanlagen unmittelbar am Flussufer errichtet werden, lässt sich die Sehne für die Innenseite s_I bzw. für die Außenseite des Flusses s_A unter Bezugnahme der Gleichung (3.2) und den Angaben in Abbildung 3-13 nach den Gleichungen (3.24) und (3.25) berechnen.

$$s_I = 2 \left(R - \frac{B}{2} \right) \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \quad (3.24)$$

$$s_A = 2 \left(R + \frac{B}{2} \right) \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \quad (3.25)$$

Aus bisher ausgeführten bzw. derzeit in Planung befindlichen Deichsanierungsmaßnahmen auf dem Stadtgebiet von Duisburg ist bekannt, dass die Dichtwände eine

Länge (Sehne oder Bogenlänge) von etwa 300 bis 1.500 m aufweisen (vgl. Abschnitt 2.5.1). Vor diesem Hintergrund wurden für die weitere Betrachtung die aus **Anhang G** bekannten Werte der Sehne (Flussmitte) mit den dazugehörigen r/s -Werten als blaue Datenpunkte (Wertepaare) in einem Diagramm dargestellt (s. Abb. 3-14).

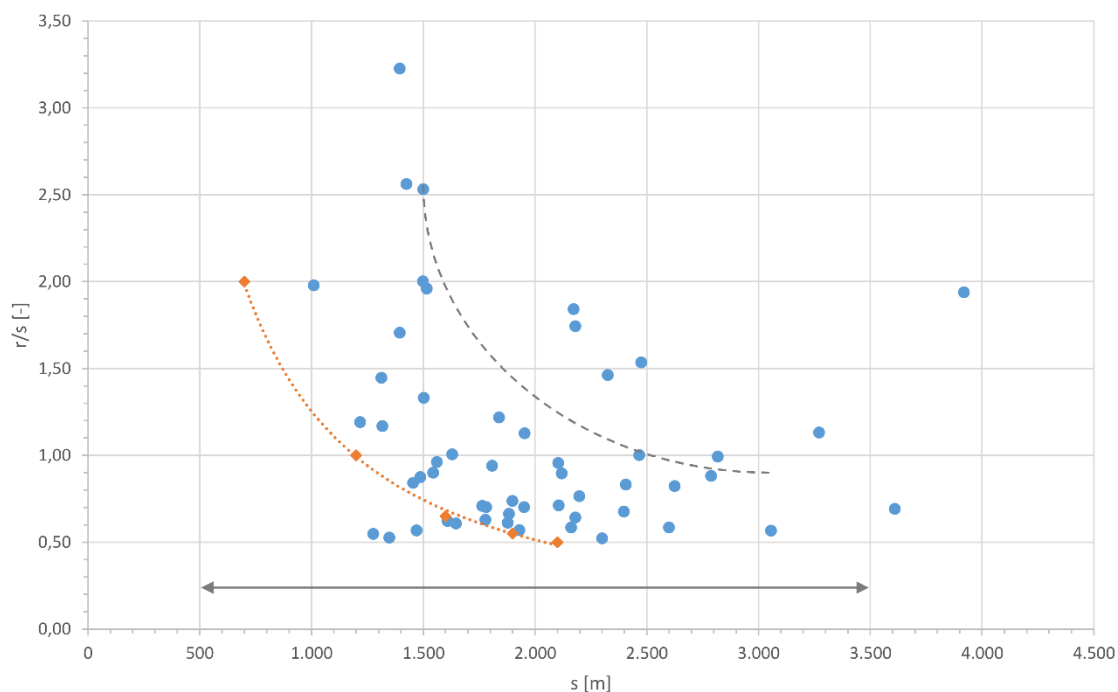


Abb. 3-14: Darstellung der Wertepaare s und r/s zur Festlegung der möglichen Bogenformen

Bei einer Berücksichtigung der Sehnenlängen für die Innenseite s_i und für die Außenseite des Flusses s_A nach den Gleichungen (3.24) und (3.25) bei gleichbleibendem r/s -Verhältnis, würde sich die Bandbreite der Sehnenlänge in etwa wie durch den grauen Pfeil in Abbildung 3-14 dargestellt ausweiten. Betrachtet man innerhalb dieser Bandbreite die dazugehörigen r/s -Werte und lässt mit zunehmender Sehnenlänge einzelne Datenpunkte außer Acht, dann ergibt sich die unter der grau gestrichelten Linie dargestellte Datenmenge für die weiteren Überlegungen. In Anbetracht dieser abgegrenzten Datenmenge sind ausgehend von einer Sehnenlänge s (~ 500 m) r/s -Werte in einer Größenordnung von etwa 0,5 bis 3,2 vorhanden, welche mit zunehmender Sehnenlänge s (~ 3.500 m) in etwa exponentiell auf r/s -Werte in einer Größenordnung von annähernd 0,5 bis 1,0 abfallen.

Mit dieser zusätzlichen Erkenntnis ließen sich die zu untersuchenden Bogenformen weiter eingrenzen. Legt man die in der Praxis üblichen Dichtwandlängen (ohne Unterbrechungen bzw. hydraulische Fenster) zugrunde, so ist anzunehmen, dass eine Begrenzung der Sehnenlänge auf s (~ 2.100 m) als obere Grenze bei den weiteren Betrachtungen und numerischen Untersuchungen ausreichend ist. Um abschließend zu

einer sinnvollen Festlegung der möglichen Bogenformen zu gelangen, wurde grafisch in Excel eine iterative Betrachtung der Bogenformen, definiert durch s und r/s , durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3-15 dargestellt.

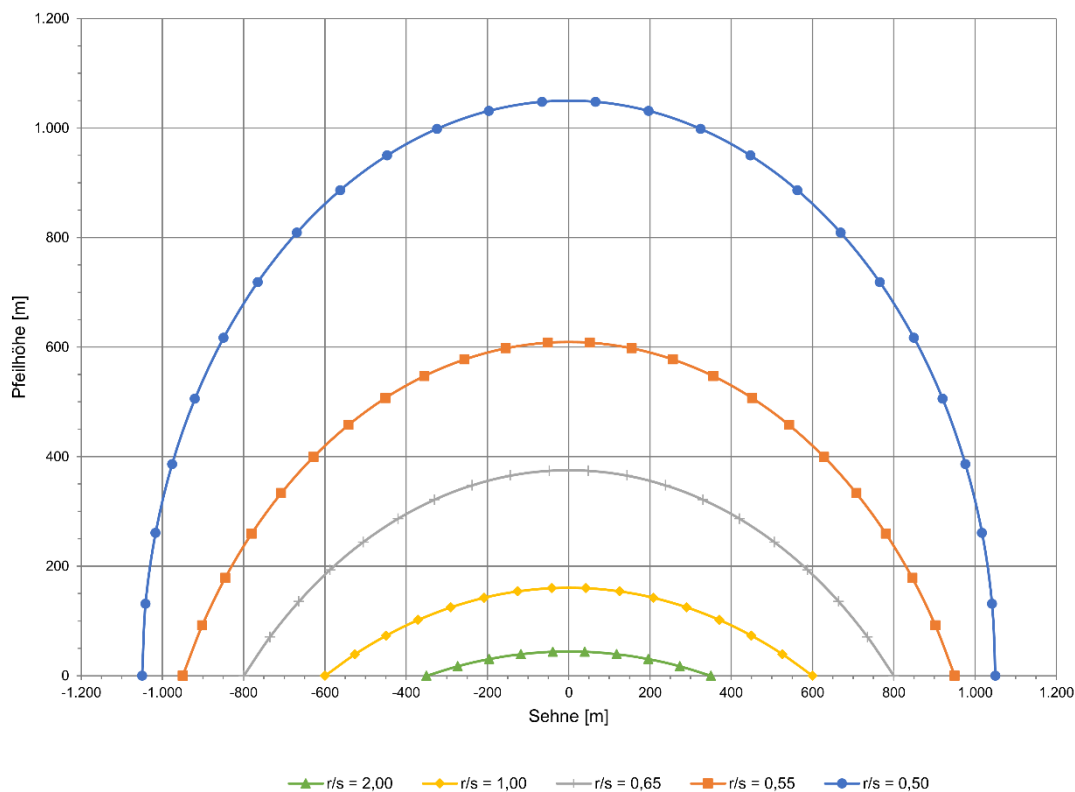


Abb. 3-15: Mögliche Bogenformen (Kreisbögen mit $s = 700$ bis 2.100 m und $r/s = 0,5$ bis $2,0$)

Bei der grafischen Iteration wurde zum einen darauf geachtet, dass die Abstände (Pfeilhöhe) zwischen den einzelnen Bögen in Abbildung 3-15 optisch nicht zu stark auseinanderliegen und zum anderen die Lage der möglichen Bogenformen (siehe orangene Punkte in Abbildung 3-14) in etwa dem Verlauf der grau gestrichelten Linie entspricht. Sieht man sich die orange und blaue Bogenform in Abbildung 3-15 genauer an, dann ist erkennbar, dass der Unterschied zwischen den Bogenformen mit einem r/s -Verhältnis von $1,0$ bzw. $2,0$ in einem vertretbaren Rahmen hinsichtlich des Abstandes der Bögen zueinander liegt. Mit kleiner werdendem r/s -Verhältnis hingegen wird die Pfeilhöhe stetig größer und nimmt bei $r/s (= 0,5)$ den Wert der halben Sehne an. Es handelt sich somit um einen Halbkreis (untere Grenze). Bei einer Veränderung des r/s -Wertes in Richtung unendlich nähert sich die Bogenform einer Geraden an (obere Grenze). Dafür existiert bereits ein Bemessungsansatz von Schneider (1981).

Da sich die Bogenform zwischen den r/s -Verhältnissen $0,5$ und $0,7$ sehr stark ändert, wurden die in Abbildung 3-15 dargestellten r/s -Werte $0,50$, $0,55$ und $0,65$ gewählt. Es war davon auszugehen, dass die Unterschiede bei den numerischen Untersuchungen hier deutlich größer ausfallen würden als zwischen den r/s -Verhältnissen von $1,0$ bzw.

2,0. Hier lag die Vermutung nahe, dass sich die numerischen Ergebnisse für die r/s-Verhältnisse von 1,0 bzw. 2,0 am ehesten mit dem Bemessungsansatz einer geraden Dichtwand von Schneider (1981) vergleichen lassen.

Auf der Grundlage der zuvor durchgeführten Überlegungen und Betrachtungen wurden für die numerischen Untersuchungen im Kapitel 4 die in Tabelle 3-4 aufgeführten Bogenformen festgelegt.

Tab. 3-4: Festlegung der Bogenformen für die numerischen Untersuchungen

Bogenform Nr.	r/s-Wert [-]	Radius r [m]	Sehne s [m]	Zentriwinkel α [°]	Pfeilhöhe h_p [m]
1	0,50	1.050	2.100	180,0000	1.050,000
2	0,55	1.045	1.900	130,7600	609,655
3	0,65	1.040	1.600	100,5697	375,470
4	1,00	1.200	1.200	60,0000	160,770
5	2,00	1.400	700	28,9550	44,456

Von diesen fünf Bogenformen ist zu erwarten, dass zum einen eine adäquate Interpolation zwischen den Berechnungsergebnissen möglich ist und zum anderen eine Übertragung auf andere Bogenformen ermöglicht wird.

Auf die vorgenannten Vermutungen und Behauptungen (Thesen) wird abschließend im Abschnitt 5.2.1 eingegangen.

4 Numerische Untersuchungen

Numerische Untersuchungen werden hinsichtlich ihres Ablaufes in die folgenden drei Hauptarbeitsschritte unterteilt:

- Vorbereitung (preprocessing)
- Bearbeitung (processing)
- Nachbereitung (postprocessing)

Hierbei sind Strömungsanalyse, Modellauswahl, Analyse, Auswahl und Aufbereitung der Datengrundlage sowie die Modellerstellung im Rahmen des Arbeitsschrittes *Vorbereitung* durchzuführen (s. Unterkapitel 4.1 und 4.2). Im Zuge der numerischen Berechnungen (Arbeitsschritt *Bearbeitung*) werden die diskreten Grundgleichungen vom verwendeten Programmsystem gelöst. Im Arbeitsschritt der *Nachbereitung* geht es um die Visualisierung und Auswertung der Berechnungsergebnisse (vgl. Unterkapitel 4.3). Bei umfangreichen hydrodynamisch-numerischen Modellierungen oder Grundwassermodellierungen kann es erforderlich sein, dass nach der ersten Auswertung der Berechnungsergebnisse ein iterativer Prozess, begleitet von Sensitivitätsanalysen, Kalibrierung, Validierung und Variantenstudium zwischen der Datenauswahl/Datenaufbereitung, Modellerstellung, Numerischen Berechnung und Visualisierung/Auswertung, bis zum Erreichen der Zielsetzung durchzuführen ist (DWA 2019).

4.1 Grundlagen

In Kenntnis der Vorbetrachtungen im Kapitel 2, werden nachfolgend einige weitere Grundlagen der numerischen Untersuchungen (Strömungsanalyse, Modell- und Verfahrensauswahl sowie Wahl des Programmsystems) zum besseren Verständnis und zur Überleitung in die Thematik der numerischen Modellierung der Grundwasserströmung beschrieben.

4.1.1 Strömungsanalyse

Die Strömungsanalyse verfolgt gemäß DWA (2019) das Ziel, sich vor der Modellauswahl, Datenanalyse, Modellerstellung und der Durchführung numerischer Berechnungen hinsichtlich der Strömungscharakteristik im betrachteten Untersuchungsabschnitt einen ersten Überblick zu verschaffen und die zu ermittelnden Zielgrößen herauszuarbeiten. Darüber hinaus bildet sie die Grundlage für die Wahl eines geeigneten Berechnungsmodells, d. h. 1D, 2D oder 3D (s. Abschnitt 4.1.2), welches die Strömungssituation möglichst realistisch abbilden soll. In Verbindung mit dem jeweils zur

Anwendung kommenden numerischen Verfahren erfolgt dann die Auswahl eines geeigneten Programmsystems.

Strömungen sind verantwortlich für die meisten Transport- und Mischungsprozesse in Natur und Technik. Strömende kompressible Gase werden dabei der Aerodynamik zugeordnet. Bekannte Beispiele dafür sind die Umströmung von Tragflügeln und Kraftfahrzeugen. Je strömungsgünstiger dabei die Tragfläche bzw. die Silhouette des Kraftfahrzeuges ausgebildet ist, desto kleiner fällt der Widerstandsbeiwert c_w aus. Daraus resultiert mit zunehmender Geschwindigkeit des Flug- bzw. Fahrzeuges eine wachsende Widerstandskraft und somit ein steigender Energie- bzw. Kraftstoffverbrauch (Oertel et al. 2009). Diese Erkenntnisse treffen in einer etwas abgewandelten Form auch auf die strömenden inkompressiblen Flüssigkeiten in der Hydrodynamik zu.

Im Bauwesen sind die überwiegend unbeweglichen Bauwerke fixiert. Die Größe des Aufstaus und der Absenkung bei einer Anströmung im Fließgewässer oder im Grundwasser hängt hier wesentlich von der Anströmgeschwindigkeit bzw. vom Gefälle, der Anströmrichtung und von der Konstruktion und Formgebung des Bauwerkes ab (vgl. Unterkapitel 2.6). Dem Bauwerk kann somit ein Formbeiwert, ähnlich dem Widerstandsbeiwert c_w , zugeordnet werden. Ein bekanntes Beispiel im Wasserbau sind die Untersuchungen von Rehbock (1921) zur Bestimmung von Formwerten für verschiedene Pfeilerformen von Brückenbauwerken in strömenden Fließgewässern. Er fasste seine theoretischen Überlegungen wie folgt zusammen:

„Alle seitherigen Versuche, die Größe des Brückenstauens allgemein rein theoretisch zu bestimmen, haben zu einem negativen Ergebnis führen müssen, da der Stau, der durch stehende Einbauten in einem Wasserlauf erzeugt wird, in den meisten Fällen nur durch Reibungsarbeit im Wasser entsteht, deren streng mathematische Erfassung bei den verwickelten und noch ungeklärten Abflußerscheinungen der Flüssigkeiten bis jetzt unmöglich ist und wohl auch in Zukunft nicht voll gelingen wird“ (Rehbock 1921).

Zur Klärung der Zusammenhänge des Aufstaus von im Flusslauf stehenden Brückenpfeilern hat Rehbock (1921) den Weg des Modellversuches (heute: wasserbauliches Versuchswesen) gewählt. Durch die Beobachtung des Wasserabflusses unter der Berücksichtigung einer wechselnden Anzahl von Brückenpfeilern verschiedenster Gestalt in den Modellwasserläufen ist der heute bekannte Berechnungsansatz von Rehbock entstanden. Weitere Einzelheiten dazu sind (Rehbock 1921) zu entnehmen.

Aufgrund der sichtbaren Wasseroberfläche bei Fließgewässern lassen sich Auswirkungen von Bauwerkseinbauten durch das wasserbauliche Versuchswesen relativ gut überprüfen und stellen somit zu den heute überwiegend zum Einsatz kommenden numerischen Methoden eine gute Ergänzung dar. Bei der nicht ohne Messsysteme

(z. B. Grundwassermessstelle mit Datenlogger) sichtbaren Grundwasserströmung sind derartige Modellversuche sehr aufwendig und kostenintensiv. Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb zur *Bestimmung der Formwerte bzw. Formfaktoren* für die in Tabelle 3-4 (vgl. Unterkapitel 3.4) aufgeführten Bogenformen und weiterer möglicher Einflussgrößen auf numerische Methoden zurückgegriffen. Auf diese wird im Abschnitt 4.1.2 genauer eingegangen.

Die Grundlage für die im Abschnitt 4.1.2 benannten und in Abbildung 4-3 dargestellten numerischen Lösungsmethoden (Verfahren) bilden die nachfolgend aufgezählten allgemeinen Grundgleichungen der dreidimensionalen Strömung.

- Kontinuitätsgleichung (Erhaltung der Masse):

Die zeitliche Änderung der Masse im Volumenelement ist gleich der Summe der einströmenden Massenströme in das Volumenelement abzüglich der Summe der ausströmenden Massenströme aus dem Volumenelement.

- Navier-Stokes Gleichungen (Erhaltung des Impulses):

Hierbei ist die zeitliche Änderung des Impulses im Volumenelement gleich der Summe der eintretenden Impulsströme in das Volumenelement abzüglich der Summe der ausströmenden Impulsströme aus dem Volumenelement zuzüglich der Summe der auf das Volumenelement wirkenden Scherkräfte, Normalspannungen und der Summe der auf die Masse des Volumenelements wirkenden Kräfte.

- Energiegleichungen (Erhaltung der Energie):

Dabei ist die zeitliche Änderung der inneren und kinetischen Energie im Volumenelement gleich der Summe der durch die Strömung ein- und ausfließenden Energieströme zuzüglich der Summe der durch Wärmeleitung ein- und ausfließenden Energieströme zuzüglich der Summe der durch die Druck-, Normalspannungs- und Schubspannungskräfte am Volumenelement geleisteten Arbeiten pro Zeit plus der Energiezufuhr von außen und Arbeit pro Zeit, die durch das Wirken der Volumenkräfte verursacht wird.

Sowohl bei den Navier-Stokes Gleichungen als auch bei den Energiegleichungen wird zwischen der laminaren (gleichmäßiges Strömungsmuster) und der turbulenten Strömung (Wirbelbildung) unterschieden. Die vollständige mathematische Herleitung der drei zuvor genannten Grundgleichungen ist in (Oertel et al. 2009) ausführlich dargestellt.

Aus den Vorbetrachtungen im Unterkapitel 2.6 geht hervor, dass durch unvollkommene (sog. Teilspernbauwerk) und vollkommene Dichtungssysteme (sog. Sperrbauwerk) im Baugrund die Grundwasserströmung derart verändert wird, dass vor dem Teil-/Sperr-

bauwerk ein Grundwasseraufstau (steigende Standrohrspiegelhöhe $\uparrow h$) und hinter dem Teil-/Sperrbauwerk eine Grundwasserabsenkung (fallende Standrohrspiegelhöhe $\downarrow h$) auftritt. Bei einer dreidimensionalen Ausdehnung des Porengrundwasserleiters lässt sich die Standrohrspiegelhöhe h durch folgende Differentialgleichung (4.1) als Funktion des Ortes und der Zeit beschreiben.

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(k_{fx} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(k_{fy} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(k_{fz} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_p \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \pm q_{o3} \quad (4.1)$$

In dem allgemeinen Fließgesetz für die dreidimensionale horizontale Grundwasserströmung in Gleichung (4.1) steht q_{o3} für das Wasservolumen, welches pro Bodenvolumen und pro Zeiteinheit zugeführt oder entzogen wird. Der spezifische Speicherkoeffizient S_p repräsentiert physikalisch das Wasservolumen ΔV_w , welches ein Gesamtvolumen V_g bezogen auf die Änderung der Standrohrspiegelhöhe Δh bei fallender Standrohrspiegelhöhe $\downarrow h$ als Folge der Ausdehnung des Wassers (Dilatation) entlässt oder bei steigender Standrohrspiegelhöhe $\uparrow h$ als Folge der Kompressibilität des Wassers im gespannten Grundwasser aufnimmt. Das Gefälle $\text{grad}(h)$ ist in Gleichung (4.1) durch die Komponenten $\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}$ beschrieben, die in festgelegten, senkrecht zueinanderstehenden Richtungen x, y und z eines Koordinatensystems wirken. Die Durchlässigkeit k_f kann in den Richtungen x, y und z unterschiedliche Werte annehmen, so dass der Grundwasserleiter bezüglich der Durchlässigkeit als anisotrop zu bezeichnen ist (Mull und Holländer 2002).

Zur Lösung dieser Differentialgleichung ist die Vorgabe von Randbedingungen nach Gleichung (4.2) und Anfangsbedingungen nach Gleichung (4.3) erforderlich.

$$h = f(x_R, y_R, z_R) \quad (4.2)$$

$$h = f(x, y, z, t = 0) \quad (4.3)$$

Dabei bezeichnen x_R, y_R und z_R die Raumkoordinaten entlang des Randes des betrachteten Gebietes sowie x, y und z die Raumkoordinaten im gesamten Gebiet einschließlich des Randes. Hierauf wird im Abschnitt 4.2.4 noch im Detail eingegangen.

Für die weiteren numerischen Untersuchungen der Grundwasserströmung ist auch die Gleichung (4.4) von besonderem Interesse, welche auf der Kontinuitätsgleichung sowie der Euler-Gleichungen (entsprechen den Navier-Stokes Gleichungen ohne Reibungsglieder) aufbaut.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (4.4)$$

Gleichung (4.4) wird auch als potentialtheoretische Behandlung der Grundwasserströmung bezeichnet. Diese Potentialgleichung für inkompressible Strömungen ist eine Differentialgleichung zweiter Ordnung und entspricht der Laplace-Gleichung.

Die Grundwasserströmung im Bereich von Teilspernbauwerken und Sperrbauwerken lässt sich mit den Erläuterungen im Merkblatt DWA-M 543-1 (2019) zu den Strömungsarten qualitativ wie folgt beschreiben:

- *Unvollkommenes Dichtungssystem* bzw. Teilspernbauwerk:

Durch die fehlende Einbindung des Bauwerkes in die wasserundurchlässige Bodenschicht (sog. Grundwasserstauer) strömt das Grundwasser zum einen links und rechts um das Bauwerk herum und zum anderen darunter hindurch. Somit weist die resultierende Strömung einen deutlich dreidimensionalen Charakter auf, welcher durch vollständig unregelmäßige (horizontale und vertikale) Stromlinienkrümmungen gekennzeichnet ist. Dadurch üben die Strömungskomponenten in allen drei Raumrichtungen (x, y und z) einen maßgebenden Einfluss auf die Gesamtströmung aus und müssen entsprechend berücksichtigt werden. Dies lässt sich nur durch eine dreidimensionale Modellierung (3D-Strömung) sicherstellen.

- *Vollkommenes Dichtungssystem* bzw. Sperrbauwerk:

Anders stellt es sich hingegen beim Sperrbauwerk dar, bei dem das Bauwerk bis in den Grundwasserstauer hineinreicht. Dadurch strömt das Grundwasser ausschließlich links und rechts um das Bauwerk herum. Somit nimmt die Strömung im Umfeld des Bauwerkes im Wesentlichen eine zweidimensionale Form (x und y) an und die vertikale Strömungskomponente (z) kann prinzipiell vernachlässigt werden. Unter diesen Umständen ist eine zweidimensionale Modellierung (2D-Strömung) ausführbar.

Die numerische Untersuchung der Auswirkungen der fünf verschiedenen bogenförmigen vollkommenen Dichtungssysteme auf die Grundwasserverhältnisse erfolgte somit anhand einer zweidimensionalen Modellierung. Dies macht es erforderlich, neben den bereits zuvor beschriebenen mathematischen Grundlagen für den dreidimensionalen Raum nachfolgend auf den zweidimensionalen Raum einzugehen.

Die Potentialgleichung (4.4) lässt sich für den zweidimensionalen Raum gemäß Gleichung (4.5) darstellen.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (4.5)$$

Das Potenzial Φ der stationären Grundwasserströmung lässt sich mit der Potentialtheorie als Funktion von x und y mit der Proportionalitätskonstante a nach Gleichung (4.6) beschreiben (Mull und Holländer 2002).

$$\Phi = a \cdot h \quad (4.6)$$

Für die Beschreibung der horizontal zweidimensionalen Strömung in einem homogenen und isotropen Grundwasserleiter im stationären Fall ($dh/dt = 0$) lässt sich Gleichung (4.5) unter Verwendung von Gleichung (4.6) in Gleichung (4.7) überführen.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (4.7)$$

Mit den x - und y -Koordinaten spannt sich eine Ebene auf (s. Abb. 4-1). Hierbei sind h und Φ die Potentiale, deren Abstände sich zur Ebene x - y durch die Gleichungen (4.7) und (4.5) angeben lassen.

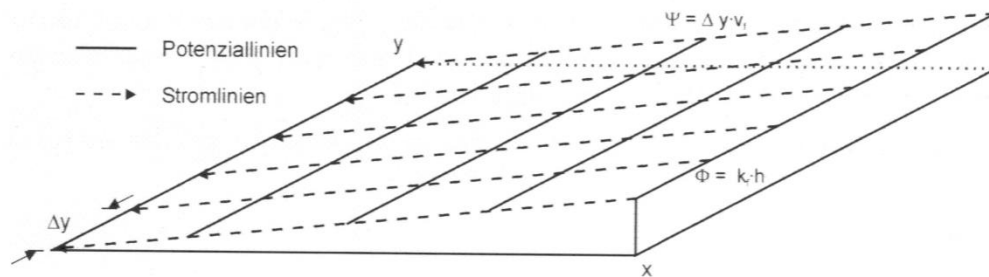


Abb. 4-1: Linien gleicher Potentiale und Stromlinien (Quelle: Mull und Holländer, 2002)

Die Potentialströmung in Richtung der x -Achse, welche in Abbildung 4-1 schrittweise durch die schwarz durchgezogenen Linien dargestellt ist, lässt sich mit Gleichung (4.8) beschreiben (Mull und Holländer 2002).

$$\Phi = k_f \cdot h \quad (4.8)$$

Das Potenzial Φ ist proportional der Standrohrspiegelhöhe h , wobei die Proportionalitätskonstante a hier durch den Durchlässigkeitsbeiwert k_f repräsentiert wird. Es liegt somit ein linearer Abfall des Potentials in Richtung der x -Achse vor. Das Grundwasser fließt in Richtung des Potentialabfalls und die Fließrichtung wird durch die Stromlinien (s. Abb. 4-1) gekennzeichnet. Die Potential- und Stromlinien stehen senkrecht zueinander. Die Richtung der Potentiallinien lässt sich durch die Projektion auf die x - y -Ebene in der Form dy/dx angeben, so dass sich die Richtung der Stromlinie an gleicher Stelle gemäß Gleichung (4.9) als negativen reziproken Wert darstellt.

$$-\frac{1}{dy/dx} = -\frac{dx}{dy} \quad (4.9)$$

In diesem Fall ist die Stromfunktion proportional der Filtergeschwindigkeit und lässt sich gemäß Gleichung (4.10) angeben.

$$\Psi = \Delta y \cdot v_f \quad (4.10)$$

Die physikalische Bedeutung der Stromfunktion geht aus Abbildung 4-1 hervor. Die Potential- und Stromlinien sind dort in die x-y-Ebene projiziert. Die Stromfunktion stellt den Durchfluss durch einen Stromstreifen Δy dar, welcher unmittelbar von zwei Stromlinien begrenzt wird. Unter Einbeziehung der Mächtigkeit des Grundwasserleiters M lässt sich die Stromfunktion nach Gleichung (4.11) in den Durchfluss zwischen zwei Stromlinien bezogen auf den Grundwasserleiter q_s umformen (Mull und Holländer 2002).

$$\Psi = \Delta y \cdot v_f = \Delta y \cdot \frac{Q}{A} = \Delta y \cdot \frac{Q}{\Delta y \cdot M} = \frac{Q}{M} = q_s \quad (4.11)$$

Da die Strömungsprozesse in der Natur zeitabhängig ablaufen, ist zusätzlich zu der bereits beschriebenen räumlichen Betrachtung eine zeitliche Charakterisierung der Strömung notwendig. Hier wird zwischen stationären und instationären Verhältnissen unterschieden (DWA 2019):

- *Stationäre Strömung* (zeitunabhängige Strömung):

Im Grundwasser- oder Fließgewässerabschnitt unterliegen der dortige Abfluss und die Fließgeschwindigkeiten innerhalb des Betrachtungszeitraums keiner zeitlichen Veränderung (z. B. symmetrischer Flussquerschnitt mit beidseitigen Schardeichen).

- *Instationäre Strömung* (zeitabhängige Strömung):

Die Strömungsgrößen (Abfluss und Fließgeschwindigkeiten) ändern sich innerhalb des Betrachtungszeitraums (z. B. Deichbruch).

Im Vergleich zur Strömung im Fließgewässer verlaufen bei der Grundwasserströmung die Änderungen über die Zeit so allmählich, dass die im Rahmen einer numerischen Untersuchung zu simulierenden Strömungsergebnisse vereinfacht als *stationär* betrachtet werden können.

Darüber hinaus ist noch zwischen folgenden Fließzuständen der Hydrodynamik zu unterscheiden:

- *Gleichförmige Strömung*:

Es treten keine Veränderungen der Strömungscharakteristika entlang des Fließweges auf, d. h. Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten bleiben in Fließrichtung konstant.

- *Ungleichförmige Strömung:*

Es treten entlang des Fließweges Querschnitts- bzw. Gefälleänderungen oder auch Zuflüsse auf, die zu Beschleunigungen bzw. Verzögerungen des Abflusses führen. Dadurch ändern sich auch die Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten in Fließrichtung.

Durch bogenförmige vollkommene Dichtungssysteme (Sperrbauwerk) ändert sich der Querschnitt entlang des Fließweges des Grundwassers (Querschnittseinengung), so dass eine *ungleichförmige Strömung* vorliegt.

4.1.2 Aspekte der Modell- und Verfahrensauswahl

In einer detaillierten Betrachtung sowohl der Strömung in Grundwasserleitern als auch in Fließgewässern ist erkennbar, dass diese stets dreidimensionale Effekte aufweist. Diese Effekte werden z. B. durch das Korngefüge im Grundwasserleiter (Grundwasser wird in alle drei Raumrichtungen ab- bzw. umgelenkt) oder durch Sekundärströmungen in Flusskurven hervorgerufen. Um in der Ingenieurpraxis zu handhabbaren Berechnungsmodellen zu gelangen, werden naturwissenschaftliche Phänomene häufig vereinfacht. Eine Vereinfachung im vorgenannten Fall stellt z. B. die Annahme dar, dass die beschriebenen Effekte nur lokal und in begrenztem Umfang auftreten und somit je nach zu berechnender Zielgröße (z. B. Grundwasserstand, Wasserstand etc.) unter Berücksichtigung des vorhandenen Betrachtungsmaßstabes nicht detailliert analysiert werden müssen. Die Auswahl des Berechnungsmodells wird deshalb in vielen Fällen auf die klar definierte Hauptströmung mit meist ein- oder zweidimensionalem Charakter ausgerichtet und der Einfluss der zuvor genannten Effekte – soweit möglich – über entsprechende Modellparameter berücksichtigt (DWA 2019).

Darüber hinaus ist es in vielen Fällen, unabhängig von großen Rechnerkapazitäten angesichts anderer Unwägbarkeiten – hier sind die unvollständige Erfassung der naturwissenschaftlichen Vorgänge im Modell oder eine zu komplexe Diskretisierung (d. h. Art und Umfang des numerischen Netzes in Verbindung mit der näherungsweise Lösung der jeweiligen Erhaltungsgleichungen (sog. Approximation)) zu nennen – sinnvoll, ein übersichtliches ebenes oder rotationssymmetrisches Berechnungsmodell zu wählen. Bei ebenen Modellen ist davon auszugehen, dass die Änderungen (z. B. der Fließgeschwindigkeiten oder der Spannungszustände im Baugrund) senkrecht zur x-y-Ebene gering ausfallen und ihre Auswirkungen demzufolge zu vernachlässigen sind (DGGT 2014). Die DGGT (2014) gibt in ihren Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik (EANG) an, dass zur Lösung praktischer Probleme die Grundwasserströmung üblicherweise als ebenes Problem betrachtet wird.

Die DWA (2019) unterscheidet bei der Strömungsmodellierung von Fließgewässern hinsichtlich der räumlichen Dimensionalität zwischen ein-, zwei- und dreidimensionalen Strömungssituationen. Die grundlegenden Unterschiede zwischen den drei Strömungsarten und den daher zu verwendenden 1D-, 2D- oder 3D-Modellen sind anhand eines Rechteckkanals in Abbildung 4-2 schematisch dargestellt.

Bei einer vollständigen Auffüllung des rechteckigen Gerinnes mit einem nichtbindigen Boden (z. B. Sand, Kiessand oder Kies) bis zur Geländeoberkante und unter Beibehaltung der in Abbildung 4-2 dargestellten hydraulischen Randbedingungen ergibt sich anstelle der Fließgewässerströmung eine Grundwasserströmung. Die Grundwasserströmung im Bereich der fünf verschiedenen bogenförmigen vollkommenen Dichtungssysteme entspricht der 2D-Strömung (Modelltyp 2D), da weder überströmte noch unterströmte Einbauten vorhanden sind.

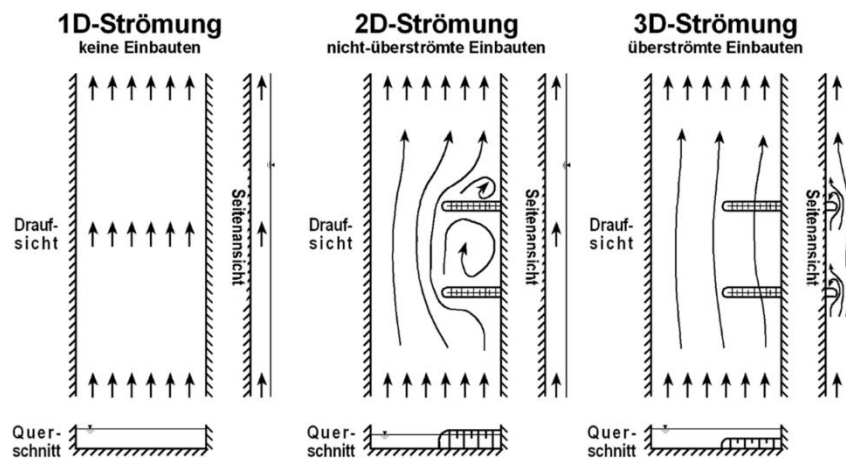


Abb. 4-2: Ein-, zwei- und dreidimensionale Strömung im Rechteckkanal (Quelle: DWA, 2019)

Nach der Auswahl des Modelltyps folgt die Betrachtung der Modellanwendung. Für den Einsatz verschiedenartiger Modelle (Berechnungsmodell, Simulationsmodell etc.) ergeben sich nach der DWA (2019) folgende Anwendungsfälle:

- Simulation des Abfluss- oder Fließverhaltens im Ist-Zustand
- Prognoseberechnung bei unveränderten Systemparametern, aber veränderten Eingangsgrößen (z. B. Ermittlung der Wasserstände für verschiedene Abflussszenarien)
- Prognoseberechnung mit veränderten Systemparametern, mit oder ohne Veränderung der Eingangsgrößen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden *Prognoseberechnungen mit veränderten Systemparametern sowie mit und ohne Veränderung der Eingangsgrößen* durchgeführt.

Nach der Beschreibung der Aspekte der Modellauswahl werden nachfolgend die wichtigsten Gesichtspunkte der Verfahrensauswahl dargestellt.

Numerische Verfahren ermöglichen es, ein Strömungsproblem unter Einhaltung von Rand- und Anfangsbedingungen (vgl. Abschnitt 4.2.4) näherungsweise möglichst genau zu lösen, ohne dass gravierende Vereinfachungen oder Annahmen, wie z. B. in analytischen Verfahren, getroffen werden müssen (Oertel et al. 2009).

Somit können diese Verfahren in der Regel für komplexe und beliebige Geometrien zur Anwendung kommen (s. Abb. 4-3). Als ein Nachteil der numerischen Verfahren ist jedoch festzustellen, dass mit diesen die Abhängigkeit eines Ergebnisses von einer eingehenden Größe lediglich durch aufeinander folgende Rechnungen unter Variation der eingehenden Größen bestimmt werden kann. Vor diesem Hintergrund sind numerische Verfahren durch analytische Betrachtungen zu ergänzen. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Genauigkeit des numerischen Verfahrens zu untersuchen ist. Hierauf wird im Abschnitt 4.2.6 exemplarisch durch eine Vergleichsberechnung an einem Modell eingegangen.

Grundsätzlich ist jede numerische Lösung fehlerbehaftet. Zum einen handelt es sich um numerische Fehler, welche durch die mathematische Diskretisierung und Rundungsfehler auf der Rechenanlage (Computer) entstehen und zum anderen um Fehler, die aus dem Einsatz der verwendeten physikalischen Modelle resultieren. Aus diesem Grund muss für jede untersuchte Geometrieklasse (hier: Bogenform) die numerische Lösung entweder im Experiment (ggf. mit kalibrierten Grundwassermodellen) oder sofern möglich mit analytischen Lösungen verifiziert werden (Oertel et al. 2009).

In Abbildung 4-3 sind die numerischen Lösungsmethoden (Verfahren) hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Flexibilität qualitativ dargestellt.

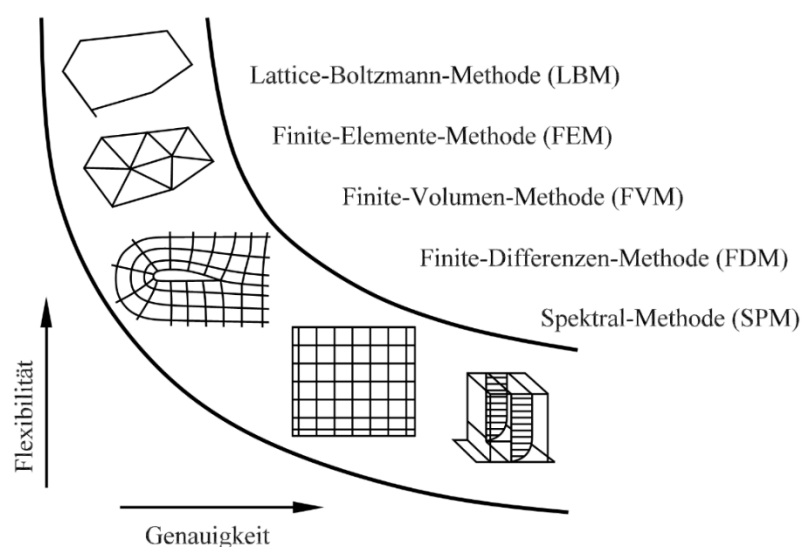


Abb. 4-3: Qualitative Darstellung der Genauigkeit und Flexibilität von numerischen Lösungsmethoden (Quelle: Oertel et al., 2009)

Die in Abbildung 4-3 dargestellten numerischen Methoden bzw. Verfahren werden nachfolgend kurz beschrieben:

- Galerkin- und Spektralverfahren (SPM):
Aufgrund der gewählten Ansatzfunktion (z. B. global definierte Funktionensysteme) und je nach Anzahl der Reihenglieder ist das Verfahren sehr genau, jedoch auf komplexe Geometrien nicht anwendbar.
- Finite-Differenzen-Methode (FDM):
Hierbei wird das Strömungsfeld in orthogonale Gitter diskretisiert und die Differentialquotienten der Grundgleichungen werden durch entsprechende Differenzenquotienten ersetzt. Darüber hinaus ist für gewölbte Strukturen eine aufwendige Transformation der komplexen Konfiguration auf ein Rechteckgebiet erforderlich.
- Finite-Volumen-Methode (FVM):
Es werden die diskretisierten Erhaltungssätze über jedes Volumenelement im Strömungsfeld erfüllt. Eine aufwendige Transformation wie bei der FDM entfällt.
- Finite-Elemente-Methode (FEM):
Eine aufwendige Transformation wie bei der FDM entfällt auch hier. Der numerische Fehler wird mit geeigneten Ansatzfunktionen und der Formulierung eines Variationsproblems in jedem Volumenelement minimiert. Diese Methode besitzt eine hohe Flexibilität, da sie auf sehr flexiblen unstrukturierten Netzen aufbaut.
- Lattice-Boltzmann-Methode (LBM):
Diese Methode weist die höchste Flexibilität bezüglich des Rechnernetzes auf, da diesbezüglich keinerlei Anforderungen gestellt werden. Hierbei werden in beliebig vorgegebenen Volumenelementen die Bewegungen und Stöße einer vorgegebenen Anzahl von Modellpartikeln simuliert.

Bei der Anwendung in der Praxis haben sich die Finite-Volumen-Methode (FVM) und die Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgesetzt. Die Methode der Finiten-Elemente (FEM) wurde ursprünglich in der Festkörper-Mechanik zur Berechnung von Strukturproblemen entwickelt, bevor sie für die Bearbeitung von Strömungsproblemen im Zusammenhang mit der erforderlichen Diskretisierung des Integrationsfeldes mit unstrukturierten Netzen zunächst bei komplexen Konfigurationen im Flugzeug- und Fahrzeugbau und später im Bauwesen angewendet wurde (Oertel et al. 2009). Für weitergehende Details zur Finiten-Elemente-Methode wird auf (Zienkiewicz 1984) verwiesen.

Die Anwendung der FEM für eine geotechnische oder geohydraulische Aufgabenstellung setzt die Festlegung eines zwei- oder dreidimensionalen Berechnungsausschnitts des geotechnischen oder geohydraulischen Systems voraus. An den Endpunkten des Definitionsbereichs müssen die Wirkungen der abgeschnittenen Außenbereiche durch entsprechende Randbedingungen (Kräfte, Verschiebungen, Potenziale etc.) erfasst werden (DGGT 2014). Der vorgenannte Definitionsbereich wird in sich nicht überlappende geometrische Elemente gleicher Art unterteilt d. h. bei 2D-Modellen in Dreiecke und bei 3D-Modellen in Tetraeder. Die Eckpunkte dieser Elemente werden Knoten genannt und bilden mit der Gesamtheit der Elemente das FE-Netz, welches den Definitionsbereich diskretisiert.

4.1.3 Verwendetes Programmsystem

Im Rahmen der Auswahl eines geeigneten Programmsystems für die Modellierung der Grundwasserströmung mit bogenförmigen vollkommenen Dichtungssystemen wurden folgende Programme getestet

- Aquifer-Simulations-Modell (ASM):

Dieses 2D-Grundwasserströmungs- und Transportmodell kann sowohl horizontal als auch vertikal eben eingesetzt werden. Bei der Lösung der Strömungsgleichung wird das Differenzen-Verfahren (FDM) verwendet (Kinzelbach und Rausch 1995).

- GGU-2D-SSFLOW:

Dieses Programm kann stationäre Grundwasserströmungen in horizontal ebenen, vertikal ebenen und rotationssymmetrischen Grundwassersystemen (2D) nach der Finiten-Element-Methode (FEM) berechnen (Buß 2019).

- Groundwater Flow Realization (GFR):

Das Programm besteht aus mehreren Einzelmodulen, mit denen verschiedene Anwendungsbereiche (z. B. Brunnen, Dichtwand, Dränagen, Dichtsohlen etc.) der stationären Grundwasserströmung in gespannten Aquiferen modelliert werden können. Es arbeitet nach der Methode der konjugierten Gradienten mit Präkonditionierung (PCG nach Braess, 1985) und erlaubt sowohl eine zwei- als auch eine dreidimensionale Modellierung (Chiang et al. 1996).

- GGU-3D-SSFLOW:

Dieses Programm kann stationäre Grundwasserströmungen in einem räumlichen Grundwassersystem (3D) nach der Finiten-Element-Methode (FEM) berechnen (Buß 2017).

Sowohl das Programm ASM als auch GFR sind DOS-basierte Programmsysteme, die auf neuen Rechnern mit Windows-Betriebssystemen nur mit Unterstützung eines x86-Emulators (z. B. DOSBox) funktionieren. Da ASM die Finite-Differenzen-Methode (FDM) verwendet, welche ausschließlich ein rechteckiges FE-Netz benötigt, gestaltete sich die Anpassung des Netzes an eine bogenförmige Dichtwandstruktur sehr ungünstig. Das Programmsystem GFR erweist sich in der Ausgabe der Berechnungsergebnisse und somit der weiteren Auswertung als sehr umständlich. Die Modellierung eines 3D-Netzes in GGU-3D-SSFLOW ist sehr zeitaufwendig.

Vor diesem Hintergrund wurde für die Berechnung der stationären Grundwasserströmung des horizontal ebenen Grundwassersystems nach der Finiten-Element-Methode das Programm GGU-2D-SSFLOW (Version 11.03 vom 27.02.2018) verwendet. Nach Ansicht des Verfassers war bei der Verwendung dieses Programmsystems das Verhältnis von Aufwand zu Nutzen ausgewogen:

- Das Programmsystem verfügt über einen leistungsfähigen Netzgenerator zur Verdichtung und Optimierung des FE-Netzes.
- Es arbeitet dimensionsecht d. h. die Eingabewerte brauchen nicht umgerechnet zu werden (Eingabe in [m] = Ausgabe in [m]).
- Darüber hinaus verfügt es über komfortable Auswerteverfahren, so dass die Berechnungsergebnisse z. B. als Isolinien oder 3D-Grafiken darstellbar sind.

Die bei der FEM entstehenden Gleichungssysteme können in GGU-2D-SSFLOW entweder mit dem Gleichungslöser nach *CHOLESKY* oder *iterativ* gelöst werden. Der Gleichungslöser nach *CHOLESKY* ist im Allgemeinen sehr schnell und robust. Der *iterative* Gleichungslöser hingegen benötigt sehr wenig Speicherplatz. Eine Vergleichsrechnung im Rahmen dieser Arbeit ergab, dass sich die Berechnungsergebnisse (Potenziale) der beiden Gleichungslöser nicht signifikant voneinander unterscheiden. Letztendlich wurde der Gleichungslöser nach *CHOLESKY* verwendet.

Zum Verständnis der Arbeitsweise des Programms GGU-2D-SSFLOW waren die nachfolgenden Aspekte zur Kenntnis zu nehmen (Buß 2019):

- Bei der Diskretisierung werden Dreieckselemente verwendet.
- Es wird das Gesetz von DARCY angewendet.
- Die Standrohrspiegelhöhen (Piezometerhöhen bzw. Potenziale) werden elementweise linear berechnet.
- Aus der linearen Annäherung der Standrohrspiegelhöhen resultiert eine elementweise konstante Annäherung der Geschwindigkeiten. Zur Verbesserung der

Güte der Geschwindigkeitsannäherung wurden die Geschwindigkeiten für die Berechnung von Stromlinien in einer Nachlaufberechnung auf Knotenwerte gemittelt. Darüber hinaus wurden für jeden Elementknoten die Geschwindigkeiten aus den benachbarten Elementen aufaddiert und im Anschluss durch die Anzahl der benachbarten Elemente geteilt. Dadurch ergab sich eine verbesserte Wiedergabe des Geschwindigkeitsverlaufs. Die Ergebnisse an den Randknoten büßten an Exaktheit ein. Im Bereich von Elementknoten mit unterschiedlichen Materialtypen (z. B. Boden/Dichtwand) kann sich die Annäherung der Geschwindigkeiten verschlechtern. Hier konnte eine Netzverdichtung im Rahmen der Modellierung Abhilfe schaffen.

Die weiteren Details rund um die Modellerstellung mit dem verwendeten Programmsystem GGU-2D-SSFLOW werden ausführlich im Unterkapitel 4.2 behandelt.

4.2 Berechnungsmodell

Das nachfolgend beschriebene Berechnungsmodell stellt weder ein hydrologisches Modell, noch ein physikalisches Modell (PM), hydrodynamisch-numerisches Modell (sog. HN-Modell) oder ein Grundwassermodell (sog. GW-Modell) dar. Deshalb wurde von den drei generellen Hauptarbeitsschritten Vorbereitung, Bearbeitung und Nachbereitung in Teilen abgewichen. Zum Beispiel waren aufgrund der Zielstellung dieser Arbeit eine Analyse, Auswahl und Aufbereitung von Daten im üblichen Umfang nicht notwendig. Stattdessen war eine Auswahl von möglichen Einflussgrößen und eine Parameterstudie erforderlich (s. Unterkapitel 4.3). Mit dem hypothetischen, experimentellen Berechnungsmodell war für jede in Tabelle 3-4 aufgeführte Bogenform unter Berücksichtigung veränderter Eingangsgrößen die Auswirkung des bogenförmigen vollkommenen Dichtungssystems auf die Grundwasserverhältnisse, in Form eines Grundwasseraufstaus bzw. einer Grundwasserabsenkung, zu untersuchen. Auf dieser Grundlage wurden die Formbeiwerte bzw. Formfaktoren bestimmt.

4.2.1 Modellgeometrie

Aus dem Abschnitt 4.1.2 ist bekannt, dass ein Strömungsproblem unter Einhaltung von Rand- und Anfangsbedingungen mit numerischen Verfahren näherungsweise verhältnismäßig genau untersucht werden kann. Hierfür bedurfte es eines Berechnungsmodells, welches geometrisch zunächst definiert und anschließend im Programmsystem erstellt werden musste. Wie im Abschnitt 2.4.1 beschrieben, werden vor allem die häufig über das Jahr auftretenden Grundwasserverhältnisse NGW und MGW (Grundwasserabfluss zur Vorflut) durch das vollkommene Dichtungssystem beeinflusst. Die Grundwasserströmung findet hierbei ausschließlich im Grundwasserleiter statt. Aus dem

vorgenannten Grund sowie der Vereinfachung des Berechnungsmodells, wurde nachfolgend auf die Modellierung des Deichkörpers verzichtet. Das Berechnungsmodell wurde deshalb horizontal in Höhe des Deichlagers abgeschnitten und lediglich der darunter liegende Grundwasserleiter in der Modellierung berücksichtigt (s. Abb. 4-4).

Das bogenförmige Dichtungssystem erforderte gegenüber einem geradlinigen Dichtungssystem oder quadratischen bzw. rechteckigen Sperrbauwerken erweiterte Überlegungen hinsichtlich der Modellgeometrie. Bei symmetrischen Elementen lässt sich das Modell an der Symmetrieachse halbieren und somit der Modellierungsaufwand verringern. Das bogenförmige Dichtungssystem ließe sich durch die y-Achse ebenfalls symmetrisch teilen, wie im Berechnungsmodell in Abbildung 4-4 ersichtlich ist. Allerdings trifft dies nicht auf die x-Achse zu, so dass im Rahmen der nachfolgenden Untersuchungen eine quadratische Grundform des Berechnungsmodells (Strömungsgebiet) verwendet wurde. Somit ist die Modelllänge M_L gleich der Modellbreite M_B . Dadurch ließen sich unter anderem die Potenziale Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 und Φ_4 an den Modellecken bei einer schrägen Anströmung einfacher ermitteln. Hierauf wird im Abschnitt 4.3.7 (Einfluss der Strömungsrichtung) noch detailliert eingegangen.

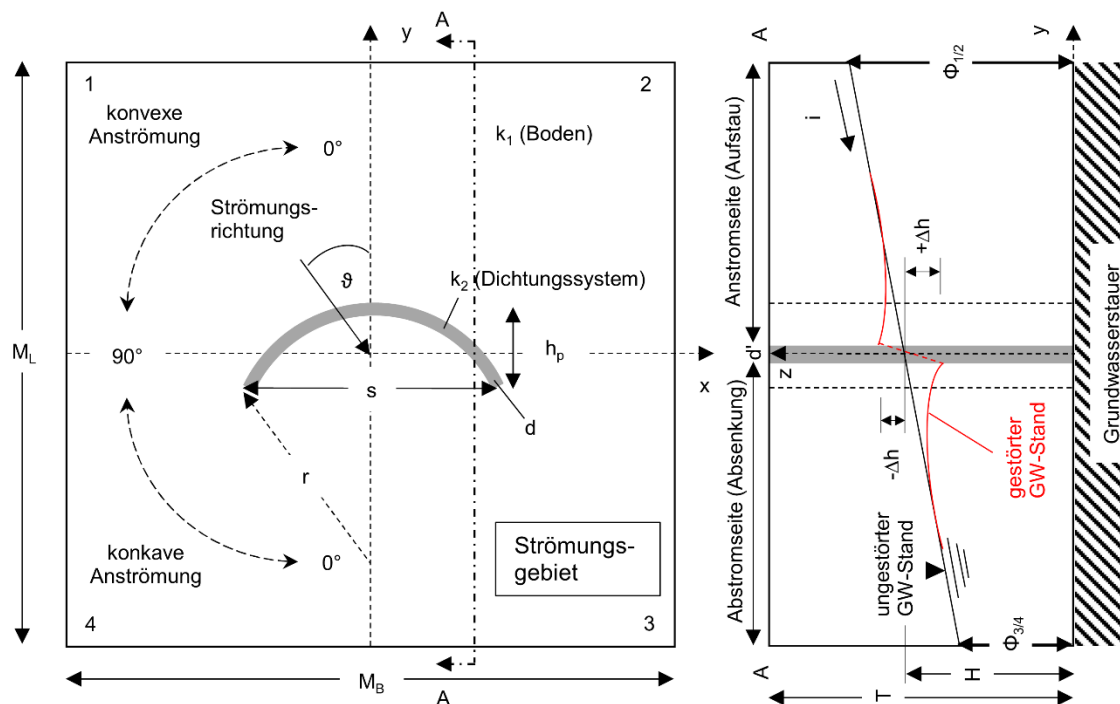


Abb. 4-4: Berechnungsmodell in der Draufsicht und im Schnitt A-A mit Einflussfaktoren (Abgewandelt von: Ernst, 1999)

Gegenüber einem geradlinigen vollkommenen Dichtungssystem, bei dem eine Untersuchung der Anströmungsrichtung ϑ zwischen 0° und 90° ausreichend ist, sind bei einem bogenförmigen vollkommenen Dichtungssystem die Anströmungsrichtungen ϑ zwischen 0° und 180° zu untersuchen. Hierbei ist zwischen der konvexen und der

konkaven Anströmung zu unterscheiden. Der Einfluss auf die Grundwasserströmung wird nachfolgend erläutert.

Die Beeinflussung der Grundwasserströmung infolge eines bogenförmigen vollkommenen Dichtungssystems, bei dem das Grundwasser das Sperrbauwerk vollständig umströmen muss, lässt sich unter Berücksichtigung des Schnittes A-A in Abbildung 4-4 mit Gleichung (4.12) ermitteln.

$$\Delta h_{um} = \text{Soll} - \text{Ist} = h_{GW,ungestört} - h_{GW,gestört} \quad (4.12)$$

Gemäß Gleichung (4.12) ergibt sich für den Grundwasseraufstau ein negatives Ergebnis ($-\Delta h_{um}$) und für die Grundwasserabsenkung ein positives Ergebnis ($+\Delta h_{um}$). Wie aus Abschnitt 2.6.2. bekannt, ist der Betrag des Grundwasseraufstaus und der Grundwasserabsenkung bei einem geradlinigen vollkommenen Dichtungssystem gleich groß. Wird hingegen das bogenförmige vollkommene Dichtungssystem konvex angeströmt, dann ist ein Ergebnis gemäß Gleichung (4.13) zu erwarten.

$$|-\Delta h_{um,vex}| < |+\Delta h_{um,vex}| \quad (4.13)$$

Wird es dagegen konkav angeströmt, dann ist ein Ergebnis nach Gleichung (4.14) zu vermuten.

$$|-\Delta h_{um,kav}| > |+\Delta h_{um,kav}| \quad (4.14)$$

Um im Berechnungsmodell sowohl eine konvexe als auch eine konkave Anströmung des bogenförmigen vollkommenen Dichtungssystems unter vergleichbaren Randbedingungen (in etwa gleich lange Fließwege und Fließkorridore) zu ermöglichen und die Ergebnisse der unterschiedlichen Bogenformen miteinander vergleichen zu können, erfolgte eine Positionierung der jeweiligen Bogenform in der Modellmitte d. h. das bogenförmige vollkommene Dichtungssystem wurde so eingepasst, dass die halbe Sehne ($s/2$) und die halbe Pfeilhöhe ($h_P/2$) der Bogenform mit der Modellmitte des Berechnungsmodells übereinstimmte.

Den Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik (EANG) ist zu entnehmen, dass die Größe des Berechnungsausschnittes (Strömungsgebiet) so zu wählen ist, dass die Berechnungsergebnisse dadurch nicht signifikant beeinflusst werden. Sollten keine Erfahrungen bei der Festlegung der Randbedingungen und vor allem der Größe des Berechnungsausschnittes vorliegen, dann sind in ausreichendem Umfang Vorberechnungen mit nennenswert unterschiedlichen großen Berechnungsausschnitten und ggf. auch mit veränderten Randbedingungen durchzuführen (DGGT 2014).

Bei der nachfolgenden Festlegung der Größe des Strömungsgebietes (Modelllänge M_L und Modellbreite M_B) wurde auf entsprechende Untersuchungen und Empfehlungen in der Fachliteratur zurückgegriffen.

Könemann (1995) hat im Rahmen seiner numerischen Untersuchungen von unter- und umströmten rechteckigen Bauwerken mit Verhältnissen von Bauwerksbreite zu Bauwerkslänge b/l ($= 0,05, 0,2$ und $0,5$) festgestellt, dass bei einem Verhältnis von B/l ($= 4$ bzw. 5) die Strömungsgebietsbreite B keine Erhöhung der Aufstauhöhen mehr bewirkt. Die Aussage trifft sowohl für lange Bauwerke ($b/l = 0,05$) als auch für kurze Bauwerke ($b/l = 0,5$) zu. Darüber hinaus hat er die Beeinflussung der Aufstauhöhe sowie der Absenkung durch die Größe der Strömungsgebietslänge L untersucht. Dabei stellte er fest, dass bei einer Strömungsgebietsgröße L/l ($= 3$) die Aufstauhöhe nicht mehr wesentlich zunimmt. Auf dieser Grundlage führte er seine weiteren numerischen Untersuchungen mit den Verhältnissen L/l ($= 5$) und B/l ($= 5$) durch, so dass sich eine Beeinflussung der Ergebnisse durch die Größe des Strömungsgebietes ausschließen ließ (Könemann 1995).

Die Ergebnisse von Könemann (1995) wurden im Rahmen numerischer Untersuchungen von unter- und umströmten rechteckigen Bauwerken mit vergleichbaren Bauwerksgeometrien von Ernst (1999) verifiziert.

Bei FE-Berechnungen mit Wasser im Baugrund wird empfohlen, dass der Abstand zum seitlichen Modellrand mindestens das 4- bis 5-Fache der Abmessungen der modellierten Struktur beträgt (DGGT 2014).

Bei einem Vergleich des Berechnungsmodells von Könemann (1995) mit dem in Abbildung 4-4, entsprachen die geometrischen Modellabmessungen Strömungsgebietslänge ($L = M_B$), Strömungsgebietsbreite ($B = M_L$), Bauwerkslänge ($l = s$) und Bauwerksbreite ($b = h_P$) einander. Bei einer Umrechnung der Bogenformen 1 bis 5 (s. Tab. 3-4) in das Verhältnis von Bauwerksbreite zu Bauwerkslänge b/l ergab sich h_P/s ($= 0,5$ bis $0,06$). Die Bogenform 1 mit einem Verhältnis von r/s ($= 0,5$) kann somit als kurzes Bauwerk und die Bogenform 5 mit einem Verhältnis von r/s ($= 2,0$) als langes Bauwerk angesehen werden. Somit sind die Erkenntnisse von Könemann (1995) prinzipiell auf die nachfolgenden numerischen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit übertragbar.

Aufgrund der bogenförmigen Geometrie der Dichtwand wurden die weiteren numerischen Untersuchungen mit den Verhältnissen M_L/s ($= 6$) und M_B/s ($= 6$), anstelle der bei rechteckigen Bauwerksgeometrie verwendeten Verhältnisse L/l ($= 5$) und B/l ($= 5$), durchgeführt.

Unter Berücksichtigung dieser Festlegung und der Maßgabe, dass die Grundwasserströmung ausschließlich im Grundwasserleiter stattfindet ($\Phi_{\text{Modellecken}} \leq T$), wurde die Tiefe des durchlässigen Untergrundbereiches (Mächtigkeit des Grundwasserleiters) T , wie in Tabelle 4-1 aufgeführt, festgelegt.

Für den Fall der konvexen Anströmung gemäß Abb. 4-4 mit der Anströmungsrichtung $\vartheta (= 0^\circ)$ errechnen sich die Randpotenziale nach den Gleichungen (4.15) und (4.16).

$$\Phi_{1/2} = H + i \cdot M_L/2 \quad (4.15)$$

$$\Phi_{3/4} = H - i \cdot M_L/2 \quad (4.16)$$

Setzt man in die vorgenannten Gleichungen die Modelllänge M_L des Modells Nr. 1 ein, wählt für $H (= 0 \text{ m})$ sowie $i (= 2,5 \text{ ‰})$ und addiert den Betrag des jeweiligen Randpotenzials miteinander, dann war T größer 31,5 m zu wählen, damit das Modell einer ausschließlichen Grundwasserströmung im Grundwasserleiter entspricht. Im Rahmen der Modellierung wurde für alle Modelle die Tiefe des durchlässigen Untergrundbereiches $T (= 33,333 \text{ m})$ festgelegt.

Tab. 4-1: Festlegung der Modellgeometrie der einzelnen Bogenformen für die numerischen Untersuchungen

Bogenform (Modell Nr.)	r/s-Wert [-]	Sehne s [m]	Länge M_L [m]	Breite M_B [m]	Tiefe T [m]
1	0,50	2.100	12.600	12.600	33,333
2	0,55	1.900	11.400	11.400	33,333
3	0,65	1.600	9.600	9.600	33,333
4	1,00	1.200	7.200	7.200	33,333
5	2,00	700	4.200	4.200	33,333

Die Grunddaten, die Koordinaten der bogenförmigen Dichtwand (Bogenform) und das FE-Netz für die in Tabelle 4-1 aufgeführten fünf Berechnungsmodelle sind in den **Anhängen J bis N** aufgeführt.

Die Bestimmung der Potenziale bei einer schrägen Anströmung wird im Abschnitt 4.3.7 erläutert. Auf die übrigen in Abbildung 4-4 dargestellten Einflussfaktoren wird im Rahmen der Parameterstudie im Unterkapitel 4.3 eingegangen.

4.2.2 Diskretisierung

Im Abschnitt 4.1.2 wurde bereits angedeutet, dass die Untersuchung eines Kontinuums mit der FEM immer eine Näherung darstellt. Die Ergebnisse stimmen bei gleichen

Stoffansätzen und Materialparametern mit der exakten Lösung umso besser überein, je feiner die Diskretisierung (Netzeinteilung) und/oder je höherwertiger die Ansatzfunktionen für die Verschiebungen oder Spannungen in den Elementen sind.

Wie groß die einzelnen Elemente sein dürfen, um noch ausreichend zutreffende Ergebnisse zu erhalten, hängt wesentlich von der Art der verwendeten Elemente und der gewählten Ansatzfunktion ab. Tendenziell darf die Größe der Elemente ansteigen, wenn höherwertige Ansatzfunktionen verwendet werden und/oder wenn das Element sich in Bereichen befindet, in denen nur kleine Änderungen (z. B. Spannungs- und Formänderungsgradienten) zu erwarten sind. Mit zunehmenden Gradienten ist die Diskretisierung lokal entsprechend zu verfeinern (DGGT 2014).

Aufgrund dieser Empfehlungen sind die FE-Netze der Berechnungsmodelle Nr. 1 bis 5 an den Modellrändern des Strömungsgebietes relativ grobmaschig und verfeinern sich zur Modellmitte sukzessiv, um genauere Ergebnisse im Bereich der bogenförmigen Dichtwandsysteme zu erzielen. Die Art und Weise der Modellerstellung wird im Abschnitt 4.2.5 ausführlich beschrieben.

Um mit den jeweils gewählten Elementen optimale Ergebnisse zu erzielen, sollten die Elemente möglichst gedungen sein. Bei Dreieckselementen sollte das Verhältnis der Radien des äußeren umschriebenen und des inneren einbeschriebenen Kreises nicht größer als 5 sein. Das Ergebnis automatisch erstellter Netze ist kritisch zu bewerten und demzufolge häufig nachzubessern (DGGT 2014).

In der automatischen Erzeugung von quadratischen oder rechteckigen FE-Netzen ist das zuvor genannte Radienverhältnis überwiegend erfüllt. Die Einhaltung dieser Empfehlung wird insbesondere dann schwierig, wenn quadratische oder rechteckige FE-Netze mit kreisrunden oder elliptischen FE-Netzen, die als Polygonzüge modelliert sind, zu einem Gesamtnetz gekoppelt werden müssen, wie es in den Berechnungsmodellen Nr. 1 bis 5 der Fall ist. Die bogenförmigen Dichtwandsysteme sind in allen fünf Berechnungsmodellen einheitlich als abgeschlossene ebene Streckenzüge (Polygonzüge) mit Streckenlängen von etwa 50 m zwischen den Verzweigungspunkten (Knoten) modelliert. Darüber hinaus ergibt sich bei der Modellierung eines Dichtwandsystems $d (= 1 \text{ m})$ im Hinblick auf die großen Modellabmessungen in Tabelle 4-1 die Schwierigkeit, dass die Zoom-Funktion an die Grenze gelangt d. h. einzelne Knoten können hinsichtlich einer händischen Netzerzeugung nicht mehr angesteuert werden. Für diese bleibt dann lediglich der Weg der automatischen Netzerstellung.

Ob die Diskretisierung für die gegebene Aufgabenstellung ausreichend fein ist, hängt sowohl von der zu untersuchenden Struktur (Geometrie) als auch von den Einwirkungen ab. Die Wahl eines Elementnetzes muss unter Einbeziehung dieser Faktoren erfolgen

und setzt darüber hinaus eine gewisse Erfahrung voraus. Bei ähnlichen Aufgabenstellungen kann auf entsprechende Literatur zurückgegriffen werden.

Ernst (1999) hat im Rahmen seiner numerischen Untersuchungen von unter- und umströmten rechteckigen Bauwerken mit Verhältnissen von Bauwerkslänge zu Bauwerksbreite b/l ($= 2, 10$ und 20) unter anderem den Einfluss der Verfeinerung des FE-Netzes auf die Aufstauhöhe überprüft.

Dabei erstellte er für kurze bzw. gedrungene Bauwerke ($b/l = 2$) mit einer Grundfläche des Strömungsgebietes von B/L ($= 250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$) das FE-Netz mit 63, 154, 345 und 647 Dreieckselementen. Er konnte feststellen, dass die berechnete Aufstauhöhe des feinsten FE-Netzes (647 Elemente bzw. $\approx 97 \text{ m}^2$ je Dreieckselement) gegenüber dem größten FE-Netz (63 Elemente bzw. $\approx 992 \text{ m}^2$ je Dreieckselement) um etwa 12 % größer ist. Für lange bzw. schlanke Bauwerke ($b/l = 20$) mit einer Grundfläche des Strömungsgebietes von B/L ($= 2.500 \text{ m} \times 2.500 \text{ m}$) erstellte er das FE-Netz mit 197, 311, 591, 1.151 und 1.879 Dreieckselementen. Hierbei konnte er feststellen, dass die berechnete Aufstauhöhe des feinsten FE-Netzes (1.879 Elemente bzw. $\approx 3.326 \text{ m}^2$ je Dreieckselement) gegenüber dem größten FE-Netz (197 Elemente bzw. $\approx 31.726 \text{ m}^2$ je Dreieckselement) lediglich um etwa 5 % größer ist (Ernst 1999).

Aus den Untersuchungsergebnissen von Ernst (1999) ist erkennbar, dass bereits mit einer geringen Unterteilung des FE-Netzes in Dreieckselemente (grobe Diskretisierung) hinreichend genaue Berechnungsergebnisse mit der Methode der Finiten-Elemente (FEM) erzielt werden können. Voraussetzung ist allerdings eine kontinuierliche Netzverfeinerung von den Modellrändern bis zur Modellmitte, wie den dargestellten FE-Netzen in Ernst (1999) zu entnehmen ist.

Das Berechnungsmodell Nr. 1 mit einem Verhältnis von Pfeilhöhe zu Sehne h_p/s ($= 0,50$) ist somit als kurzes bzw. gedrungenes Bauwerk und das Berechnungsmodell Nr. 5 mit einem Verhältnis h_p/s ($= 0,06$) als langes bzw. schlankes Bauwerke anzusehen. Bei einer Übertragung der vorgenannten Untersuchungsergebnisse auf die Berechnungsmodelle Nr. 1 bis 5 war eine lineare Abstufung der FE-Netze von etwa 992 m^2 je Dreieckselement (Modell 1) bis etwa 31.726 m^2 je Dreieckselement (Modell 5) denkbar. Aufgrund der großen Modellgeometrie des Berechnungsmodells Nr. 1 ergab sich bei einer Diskretisierung des FE-Netzes mit einer mittleren Flächengröße von etwa 992 m^2 je Dreieckselement ein sehr feines Netz, dass bei der numerischen Berechnung enorme Rechenzeiten erforderte. Da das Berechnungsmodell Nr. 5 gegenüber dem der Nr. 1 relativ klein war, ergab sich bei einer Diskretisierung des FE-Netzes mit einer mittleren Flächengröße von etwa 31.726 m^2 je Dreieckselement ein sehr grobes Netz, so dass die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse entsprechend abnahm.

Hier galt es, einen sinnvollen Kompromiss zwischen der Vergleichbarkeit der Modelle untereinander, der Genauigkeit der Berechnungsergebnisse und der akzeptablen Rechenzeiten, vor dem Hintergrund der zahlreichen Parametervariationen, zu finden. Nach einigen Voruntersuchungen stellte sich für das Berechnungsmodell Nr. 1 eine mittlere Flächengröße von etwa 2.000 m^2 je Dreieckselement als guter Kompromiss heraus. Für ein langes bzw. schlankes Bauwerk mit einem Verhältnis h_p/s ($= 0,05$) wurde für das Berechnungsmodell eine mittlere Flächengröße von etwa 2.300 m^2 je Dreieckselement als sinnvoll erachtet. Dieser Wert liegt darüber hinaus noch unter dem Wert von $\approx 3.326 \text{ m}^2$ je Dreieckselement, der sich aus den numerischen Untersuchungen von Ernst (1999) entnehmen lässt. Somit ergab sich eine idealisierte Abstufung der mittlere Flächengröße je Dreieckselement in Zuordnung zum geometrischen Verhältnis von Pfeilhöhe zu Sehne von 2.000 m^2 ($h_p/s = 0,5$) bis 2.300 m^2 ($h_p/s = 0,05$).

Die gewählte Diskretisierung als mittlere Fläche eines Dreieckselementes ist für jedes Berechnungsmodell in Zuordnung zum geometrischen Verhältnis von Pfeilhöhe zu Sehne h_p/s in Abbildung 4-5 dargestellt.

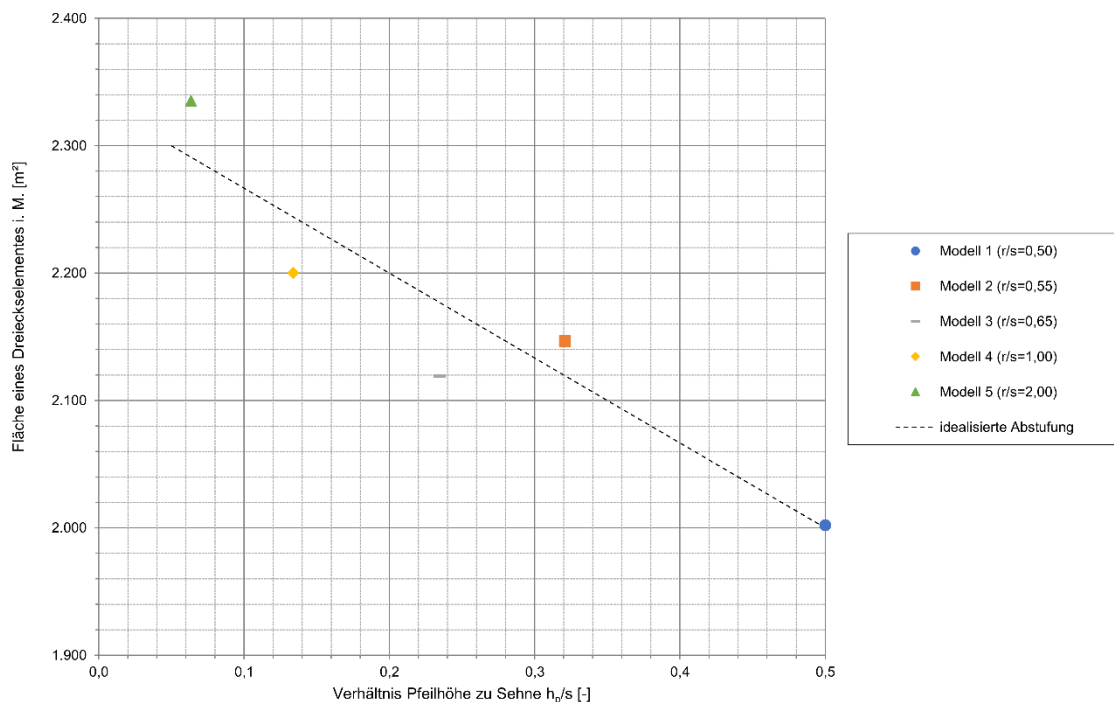


Abb. 4-5: Darstellung der gewählten Diskretisierung der Berechnungsmodelle in Form von mittlerer Fläche eines Dreieckselementes in Zuordnung zum geometrischen Verhältnis h_p/s

Ob die gewählte Diskretisierung für die gegebene Aufgabenstellung ausreichend fein war, um eine hinreichende Genauigkeit bestimmen zu können, wurde im Rahmen der Validierung (vgl. Abschnitt 4.2.6) überprüft.

Für den Entwurf von Netzen ist der Einsatz eines Netzgenerierungsprogramms zweckmäßig, welches als sog. Netzgenerator bei vielen Softwareprodukten bereits enthalten ist. Mit der Komplexität der zu berechnenden Struktur steigt allerdings auch hierbei der Aufwand für die Dateneingabe und erfordert oft nachträgliche Eingriffe in die generierte Struktur. In allen Fällen sollte die Möglichkeit gegeben sein, Netze mithilfe von grafischen Ausgaben einer intensiven Prüfung zu unterziehen (DGGT 2014).

Um eine Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse zwischen den fünf Berechnungsmodellen zu gewährleisten, erfolgte der Modellaufbau einschließlich Diskretisierung nach einer einheitlichen Vorgehensweise. Diese ist schrittweise durch grafische Ausgaben am Beispiel des Berechnungsmodells Nr. 1 im **Anhang O** dargestellt.

4.2.3 Strömungsgleichung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur Grundwasserströmungen im ungespannten bzw. freiem Grundwasserleiter (d. h. keine Deckschicht vorhanden) berechnet, so dass das Programm nur die Differentialgleichung (4.17) löst.

$$T_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + T_y \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + Q = 0 \quad (4.17)$$

Im Zuge der weiteren Berechnungen ist die Wassermenge $Q (= 0)$ nicht von Bedeutung. Die Standrohrspiegelhöhe bzw. Piezometerhöhe h stellt wichtige Rand- bzw. Anfangsbedingungen dar und ist im Abschnitt 4.2.4 genauer erläutert. In dem horizontal ebenen System stellen x und y die Koordinaten dar. Die Transmissivitäten T_x und T_y , für die x - und y -Richtung des Modellgebiets, berechnen sich aus dem Produkt von Durchlässigkeitsbeiwert k_x bzw. k_y und der Grundwasser erfüllten Mächtigkeit des Grundwasserleiters d (wird in der Lit. auch als h_M bezeichnet) gemäß Abbildung 4-6.

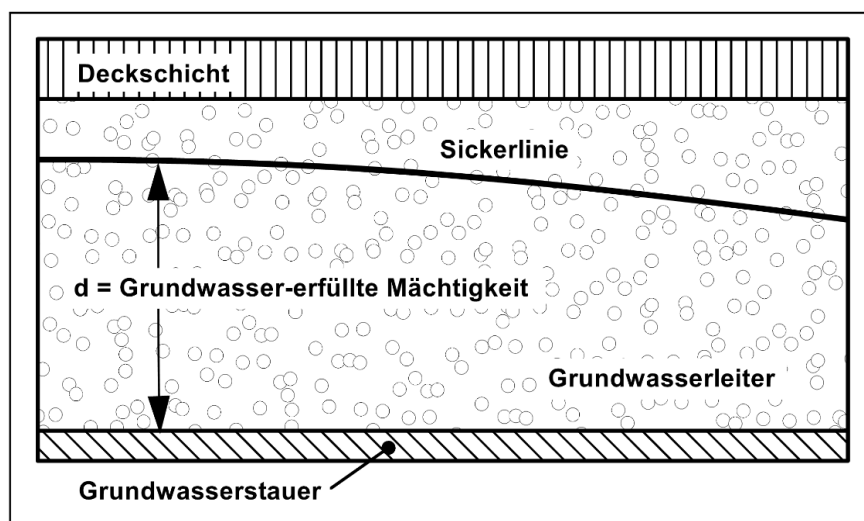


Abb. 4-6: Schematische Darstellung zur Berechnung der Transmissivitäten im Programm GGU-2D-SSFLOW (Quelle: Buß, 2019)

Wie der Abb. 4-6 zu entnehmen ist, sind die Transmissivitäten in einem nicht gespannten Grundwasserleiter nicht unmittelbar bekannt, da sich in Abhängigkeit von der Lage des Grundwasserspiegels an allen Orten andere Werte einstellen können. Somit ist zur Berechnung des horizontal ebenen Systems eine Iteration zur Bestimmung der Lage der Sickerlinie erforderlich. Das Programm GGU-2D-SSFLOW führt diesen Iterationsprozess selbständig durch.

4.2.4 Rand- und Anfangsbedingungen

Wie im Rahmen der Strömungsanalyse (vgl. Abschnitt 4.1.1) angedeutet, stellen die Strömungsgleichungen partielle Differentialgleichungen zweiter Ordnung für die unbekannte Piezometerhöhenverteilung (Potentialverteilung) als Funktion der Zeit und des Ortes $h(x,y,t)$ dar. Zur Lösung dieser Differentialgleichungen sind Anfangs- und Randbedingungen erforderlich, die nachfolgend kurz vorgestellt werden.

Die Anfangsbedingungen bestehen lediglich aus einer gegebenen Piezometerhöhenverteilung zum Zeitpunkt t_0 , bei dem die Simulation beginnt. Die mathematische Beschreibung ist in Gleichung (4.3) dargestellt. Die Anfangsbedingungen müssen nur für die Berechnung von instationären Grundwasserströmungen vorgegeben werden (Kinzelbach und Rausch 1995).

Bei stationären Strömungsproblemen werden hingegen nur Randbedingungen benötigt. Hier ist es erforderlich, dass auf allen Rändern des Modellabschnitts bzw. Definitionsbereichs zu jedem Zeitpunkt der Berechnung die entsprechenden Randbedingungen für die unbekanntes Strömungsgrößen vorgegeben werden (DWA 2019). Im Rahmen dieser Arbeit waren das ausschließlich Piezometerhöhen bzw. Potentiale.

Es existieren folgende Arten von Randbedingungen (Kinzelbach und Rausch 1995):

- Erste Art (DIRICHLET-Bedingungen):

Es handelt sich um Piezometerhöhen $h = f(t)$ am Rand. Ein Spezialfall dieser Randbedingung ist der Festpotentialrand mit zeitlich unabhängiger Piezometerhöhe $h = \text{const}$. Ein Beispiel dafür stellt ein Pumpensumpf dar, in dem auf eine feste Wasserspiegelhöhe Wasser abgepumpt wird.

- Zweite Art (NEUMANN-Bedingungen):

Diese schreiben den Zu- oder Abfluss am Modellrand (Normalkomponente von v_f) vor und legen damit im isotropen Aquifer den Gradienten von h senkrecht zum Modellrand ($\partial h / \partial n$) fest. Ein Spezialfall dieser Randbedingung ist der undurchlässige Modellrand ($\partial h / \partial n = 0$). Wird das Modellgebiet z. B. von Randstromlinien begrenzt, dann werden diese wie undurchlässige Ränder behandelt.

- Dritte Art (CAUCHY-Bedingungen):

Diese stellen eine Kombination aus den Randbedingungen der ersten sowie zweiten Art dar und schreiben eine Linear-kombination ($\alpha h + \beta \partial h / \partial n$) am Modellrand vor. Sie werden zur Beschreibung von halbdurchlässigen Rändern, wie z. B. bei Leakage aus einem hangenden oder liegenden Aquifer, verwendet. Hierbei wird das äußere Potenzial durch einen Widerstand abgeschwächt und somit im Aquifer wirksam.

- Druck $p = 0$:

In diesem Fall stellt die Grundwasseroberfläche ebenso wie eine Sickerlinie eine Randbedingung mit Atmosphärendruck dar. Sie gelangt in 2D-vertikalen und 3D-Modellen zur Anwendung. Dabei gilt, dass bei Atmosphärendruck ($p = 0$) die Piezometerhöhe gleich der geodätischen Höhe des Randes ist. Damit lassen sich Grundwasserspiegel und Sickerlinien iterativ bestimmen.

- Bewegliche Ränder:

Bei veränderlichem Grundwasserspiegel stellen Randbedingungen ($p = 0$) gleichzeitig veränderliche Ränder dar. Bei horizontal ebenen 2D-Modellen können bewegliche Ränder z. B. dann vorkommen, wenn aufgrund der Sohlneigung eines Aquifers mit geringer Mächtigkeit die Randbereiche infolge eines sinkenden Grundwasserspiegels trockenfallen.

Um die Eindeutigkeit der Lösung stationärer Grundwasserströmungen zu gewährleisten, muss zumindest an einem Punkt des Modellgebiets eine Randbedingung erster oder dritter Art angegeben sein. Im Rahmen dieser Arbeit wurde an jedem Eckpunkt des Modellgebiets eine feste Piezometerhöhe h bzw. ein festes Potenzial Φ am Modellrand vorgegeben, so dass die *Randbedingungen erster Art (nach DIRICHLET)* erfüllt waren.

In GGU-2D-SSFLOW werden zu den Randbedingungen folgende Anmerkungen gemacht (Buß 2019):

„Der Fall eines undurchlässigen Randes wird von der Finiten-Element-Methode automatisch berücksichtigt. Es gilt, dass alle Systemränder oder Systemteileränder, die keine Quellen- oder Potential-Randbedingungen besitzen, automatisch undurchlässig sind. Diese Art der Randbedingungen wird in der Theorie der Finiten Elemente auch natürliche Randbedingung genannt.“

Wie der Abbildung 4-4 zu entnehmen ist, muss die Anströmung in y -Richtung differenziert werden. Die Ermittlung der Randpotenziale für den Fall der konvexen Anströmung erfolgt deshalb nach den Gleichungen (4.15) und (4.16). Für den Fall der konkaven

Anströmung mit der Anströmungsrichtung ϑ ($= 0^\circ$) errechnen sich die Randpotenziale hingegen nach den Gleichungen (4.18) und (4.19).

$$\Phi_{1/2} = H - i \cdot M_L/2 \quad (4.18)$$

$$\Phi_{3/4} = H + i \cdot M_L/2 \quad (4.19)$$

Bei einer Anströmung in x-Richtung fallen die konvexe und konkave Anströmung mit der Anströmungsrichtung ϑ ($= 90^\circ$) zusammen und die Randpotenziale können einheitlich nach den Gleichungen (4.20) und (4.21) berechnet werden.

$$\Phi_{1/4} = H + i \cdot M_B/2 \quad (4.20)$$

$$\Phi_{2/3} = H - i \cdot M_B/2 \quad (4.21)$$

Im Fall einer schrägen Anströmung ($0^\circ < \vartheta < 90^\circ$) sind die Randpotenziale gesondert zu ermitteln. Hierauf wird im Abschnitt 4.3.7 (Einfluss der Strömungsrichtung) detailliert eingegangen.

4.2.5 Modellaufbau in GGU-2D-SSFLOW

Die schrittweise Erstellung eines Berechnungsmodells im Programmsystem GGU-2D-SSFLOW lässt sich wie folgt beschreiben (Buß 2019):

- Wahl des Grundwassersystems (hier: horizontal ebenes System)
- Eingabe der Grobstruktur des Grundwassersystems durch relevante FE-Knoten (Modellecken, Einbauten etc.) und anschließende Netzgenerierung
- Festlegung der Mächtigkeit T des Grundwasserleiters
- Boden- bzw. Bauteilkennwerte zuweisen
- FE-Netz verdichten
- Randpotenziale definieren
- Grundwassersystem testen

Von dieser Vorgehensweise der Modellerstellung wurde aufgrund der Art des numerisch zu untersuchenden, bogenförmigen Dichtungssystems abgewichen, um die Schwierigkeiten bei der Kopplung des Gesamtnetzes aus vier quadratischen/ rechteckigen Teilnetzen mit dem Hauptnetz, welches das polygonal modellierte Dichtwandssystem enthält, zu lösen (vgl. Abschnitt 4.2.2). Die abweichende Reihenfolge des Modellaufbaus wurde schrittweise anhand von grafischen Abbildungen am Beispiel des Berechnungsmodells Nr. 1 im **Anhang O** beschrieben.

4.2.6 Kalibrierung/Validierung

Die Kalibrierung von HN-Modellen oder GW-Modellen erfolgt anhand von Vergleichen zwischen den Simulationsergebnissen und in der Natur oder im Modellversuch gemessenen Strömungsgrößen (meist Wasserspiegellagen bzw. Grundwasserstände, selten Geschwindigkeiten). Sofern die dabei ermittelte Abweichung zwischen Modell- und Messwert nicht innerhalb eines zuvor festgelegten Toleranzbereichs liegt, erfolgt eine Anpassung der Eingangsdaten (z. B. empirische Modellparameter und/oder unsichere hydrologische oder geometrische Daten). Der Kalibrierungsprozess erfolgt in der Praxis häufig durch iterative Variation der entsprechenden Modelleingangsgrößen. Simulationsläufe nach jeder Variation einer Modelleingangsgröße finden solange statt, bis die erforderliche Toleranz unterschritten ist. Darüber hinaus stellt die Validierung eine weitere Form der Überprüfung des Modells anhand zusätzlicher Messdaten dar, welche unabhängig von denen der Kalibrierung sind (DWA 2019).

Aufgrund der hypothetischen, experimentellen numerischen Untersuchungen war im gegenwärtigen Fall sowohl eine Kalibrierung als auch eine Validierung des Berechnungsmodells so gut wie nicht möglich. Vor diesem Hintergrund bestand lediglich die Möglichkeit, die Berechnungsergebnisse anhand einer Plausibilitätsprüfung mit Literaturangaben und unter Berücksichtigung analytischer Berechnungsverfahren (vgl. Unterkapitel 2.6) zu beurteilen.

Könemann (1995) stellte im Rahmen seiner numerischen Untersuchungen von unter- und umströmten rechteckigen Bauwerken mit Verhältnissen von Bauwerksbreite zu Bauwerkslänge b/l ($= 0,05, 0,2$ und $0,5$) fest, dass es bei der Ermittlung der maximalen Aufstauhöhe in Bauwerksmitte mit einer Bauwerksbreite $b = 0$ bei reiner Umströmung nach dem Verfahren von Schneider (Gleichung (2.21)) gegenüber der numerischen Lösung zu entsprechenden Abweichungen kommt. Diese Abweichungen entstehen dadurch, dass beim Ansatz von Schneider die Bauwerksbreite b vernachlässigt wird. Den Berechnungen von Könemann (1995) ist zu entnehmen, dass bei einem Verhältnis von b/l ($= 0,1$) die Abweichung zwischen analytischer und numerischer Lösung etwa 6 % beträgt.

Die Abschätzung der Modellgüte erfolgte in einem kleinen Modellversuch anhand einer geradlinigen vollkommenen Dichtwand. Diese besitzt eine Länge von 1.000 m und eine Dicke von 1,0 m. Mit einem Verhältnis d/L ($= 0,001$) handelt es sich um ein sehr langes bzw. sehr schlankes Bauwerk. Der Modellaufbau und die Durchführung der Berechnungen erfolgten auf der Grundlage der Darstellungen in den vorherigen Abschnitten 4.2.1 bis 4.2.5. Das FE-Netz und weitere Angaben zu diesem Berechnungsmodell „DW1000“ sind im **Anhang P** aufgeführt.

Aufgrund der gewählten geradlinigen vollkommenen Dichtwand waren die Aufstauhöhe und die Absenkung gleich groß. Der Aufstau bzw. die Absenkung wurden unter Variation der Anströmungsrichtung ϑ ($= 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ und 90°) sowohl analytisch nach dem Verfahren von Schneider (Gleichung (2.21)) als auch numerisch mit GGU-2D-SSFLOW berechnet. Die Berechnungsergebnisse wurden dimensionslos in Abbildung 4-7 dargestellt.

Die Abweichungen zwischen den analytischen und numerischen Berechnungsergebnissen betragen für die Anströmungsrichtungen ϑ ($= 0^\circ$ bis 75°) etwa 11,2 bis 11,8 %. Bei der Anströmungsrichtung ϑ ($= 90^\circ$) stimmte das analytische mit dem numerischen Berechnungsergebnis überein. Hierbei ist festzuhalten, dass das Berechnungsmodell „DW1000“ eine mittlere Flächengröße von etwa 2.874 m^2 je Dreieckselement aufweist und somit hinsichtlich der Diskretisierung im Vergleich zu den Berechnungsmodellen Nr. 1 bis 5 mit mittleren Flächengrößen von etwa 2.002 m^2 bis 2.335 m^2 je Dreieckselement geringfügig größere Abweichungen zu erwarten sind. Aufgrund der feineren Diskretisierung der Berechnungsmodelle Nr. 1 bis 5 war im Rahmen der weiteren numerischen Untersuchungen im Unterkapitel 4.3 von einer Genauigkeit der numerischen Berechnungsergebnisse (Näherung) gegenüber dem „exakten Ergebnis“ von etwa $\pm 10 \%$ auszugehen.

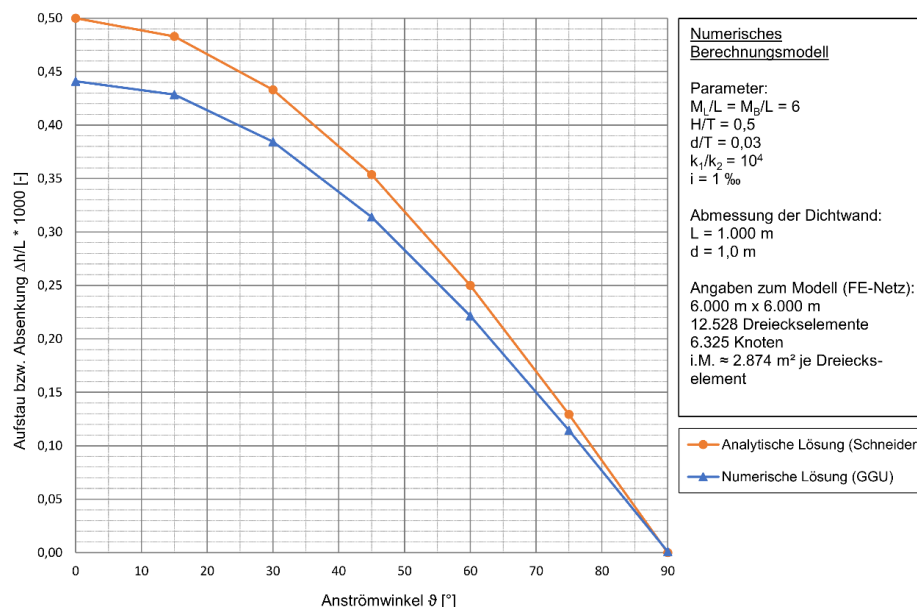


Abb. 4-7: Berechnungsmodell „DW1000“ - Vergleich von analytischer und numerischer Lösung

Abschließend ist festzustellen, dass mit dem zuvor beschriebenen Berechnungsmodell und dem verwendeten Programmsystem grundsätzlich eine hinreichend genaue Bestimmung der Auswirkung eines vollkommenen Dichtungssystems auf die Grundwasserhältnisse, in Form eines Grundwasseraufstaus bzw. einer Grundwasserabsenkung, gegeben war.

4.3 Parameterstudie

Im Rahmen der Parameterstudie wurden Einflussfaktoren untersucht und bewertet, welche eine Veränderung des Grundwasserspiegels hervorrufen. Diese Einflussfaktoren können z. B. im Zusammenhang mit dem bogenförmigen innenliegenden vollkommenen Dichtungssystem stehen oder durch die Baugrundverhältnisse und die Grundwasserströmung bedingt sein.

4.3.1 Übersicht möglicher Einflussfaktoren

Nach Ansicht von Oertel et al. (2009) bildet die Dimensionsanalyse grundsätzlich die Vorbereitung der numerischen Untersuchungen (Dimensionsanalyse des vorgegebenen Strömungsproblems), um sich einen ersten Überblick über die eingehenden Parameter zu verschaffen. Die Vorzüge zur Anwendung der Dimensionsanalyse bei der Lösung physikalischer Problemstellungen werden von Görtler (1975) wie folgt beschrieben:

„Allgemein kann man sagen, daß die wichtigste Vorleistung für eine Dimensionsanalyse darin besteht, vollständig anzugeben, von welchen Argumenten die gesuchte Größe abhängt (oder abhängen kann). Das ist eine physikalische Fragestellung. Ist diese Frage beantwortet - oft braucht man dazu die mathematischen Bestimmungsgleichungen des Problems nicht einmal zu kennen -, oder ist eine bestimmte Beziehung postuliert - vielleicht als reine Spekulation -, so besteht die Dimensionsanalyse selbst in einer einfachen mathematischen Operationsfolge. Wieviel Information sie zu liefern vermag (oder ob sie gar eine spekulativ angenommene Beziehung zum Widerspruch führt), kann in diesem Stadium propädeutischer Betrachtung neben allen bisherigen Fragezeichen nur als weitere Frage in den Raum gestellt werden. Der exakte Aufbau der Theorie der physikalischen Dimensionen und der dimensionshomogenen Funktionen wird mit dem umfassenden Π -Theorem die Antwort (bezogen auf das jeweils zugrundegelegte Grundgrößensystem) geben.“

Um den hohen Modellierungs-, Generierungs- und Rechenaufwand der numerischen Untersuchungen zu reduzieren, ist eine Minimierung der Versuchsparameter (Einflussfaktoren) wünschenswert. Hierfür stellt die Dimensionsanalyse ein entsprechendes Instrument dar. Das Verfahren der Dimensionsanalyse ist ausführlich in (Kobus 1974) und (Görtler 1975) beschrieben. Mit diesem Verfahren kann eine physikalisch dimensionsbehaftete Größe in eine dimensionslose Form überführt werden. Dadurch ist der funktionale Zusammenhang zur Beschreibung eines physikalischen Problems immer unabhängig vom verwendeten Maßsystem und den zugrunde gelegten Bezugsparametern (Könemann 1995).

Eine Reduktion der zu untersuchenden Parameter (Einflussfaktoren) lässt sich aus dem Π -Theorem herleiten. Danach kann jede dimensionsmäßige Gleichung der Form (s. Gleichung (4.22))

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (4.22)$$

mit n physikalischen Variablen und einer Dimensionsmatrix der Ordnung r zu einer Gleichung der Form (s. Gleichung (4.23)) überführt werden.

$$F(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-r}) = 0 \quad (4.23)$$

Gleichung (4.23) enthält $(n - r)$ dimensionslose Größen, die sich aus Potenzen der ursprünglichen Variablen x_1, \dots, x_n zusammensetzen. Der Grad der größten hierin enthaltenen, von Null verschiedenen Determinante gibt die Ordnung der Dimensionsmatrix an. Durch die dimensionslose Darstellung ist eine Übertragbarkeit der Berechnungsergebnisse auf allgemeine Fälle möglich (Könemann 1995).

Anhand der durchgeführten Strömungsanalyse im Abschnitt 4.1.1 stellt die Umströmung des bogenförmigen vollkommenen Dichtungssystems ein zweidimensionales Strömungsproblem dar. Der Einfluss der baugrundbedingten Anisotropie ($k_h \neq k_v$) war in diesem Fall nicht von Bedeutung, wie auch die Untersuchungsergebnisse von Könemann (1995) zeigen. Darüber hinaus konnte Könemann (1995) im Rahmen seiner Untersuchungen feststellen, dass bei ausschließlich umströmten Bauwerken die Grundwasserbeeinflussung nicht vom Verhältnis b/H (entspricht h_p/H) abhängt. Durch die Angabe der Bogenform als Verhältnis von Radius zur Sehne (r/s) ist der Zentriwinkel α und somit auch die Pfeilhöhe h_p nach Gleichung (3.3) bestimmbar. Die Pfeilhöhe h_p ist somit unmittelbar an das Verhältnis r/s gekoppelt, so dass nachfolgend auf eine dimensionslose Untersuchung des Parameters h_p verzichtet wurde. Auch auf die Größe des Strömungsgebietes, bestimmt durch die Parameter M_L und M_B , wird hier nicht mehr eingegangen, da eine Bewertung und Festlegung im Abschnitt 4.2.1 erfolgte und die numerischen Berechnungsmodelle darauf abgestimmt wurden.

Somit ist anhand der Vorbetrachtungen im Kapitel 2 und den Untersuchungen im Kapitel 3 und 4 davon auszugehen, dass die gesuchte Größe des Grundwasseraufstaus $-\Delta h$ bzw. die Grundwasserabsenkung $+\Delta h$ von folgenden in Abb. 4-4 dargestellten Parametern (Einflussfaktoren) abhängt:

- Bogenform des Dichtungssystems, bestimmt durch die Parameter r und s
- Höhe des Grundwasserstands H in der Modellmitte (Bauwerksbereich)
- Mächtigkeit T des Grundwasserleiters
- Dicke d des Dichtungssystems

- Durchlässigkeit des Bodens k_1
- Durchlässigkeit des Dichtungssystems k_2
- Natürliches hydraulisches Gefälle i des Grundwasserstroms
- Anströmungsart (konvex oder konkav)
- Anströmrichtung des Dichtungssystems, gemessen von der y -Achse des Modells durch den Winkel ϑ

Im Rahmen der numerischen Untersuchungen wurde ein *homogener Aufbau des Bodens und des Dichtungssystems mit isotropem Durchlässigkeitsverhalten* vorausgesetzt. Die Beeinflussung der Grundwasserverhältnisse Δh (Aufstaus - Δh bzw. Absenkung + Δh) ließ sich vereinfacht durch die funktionale Abhängigkeit nach Gleichung (4.24) darstellen.

$$\Delta h = F(r, s, H, T, d, k_1, k_2, i, \vartheta) \quad (4.24)$$

Sämtliche Berechnungen wurden zunächst mit einem konstanten hydraulischen Gefälle von i ($= 1 \text{ ‰}$) durchgeführt. Darüber hinaus wurde aufgrund der besonderen Modellgeometrie des Dichtungssystems bei jedem Berechnungsgang die Anströmrichtung wie folgt variiert:

- Konvexe Anströmung (y -Richtung von oben, $\vartheta = 0^\circ$)
- Konkave Anströmung (y -Richtung von unten, $\vartheta = 0^\circ$)
- Anströmung in x -Richtung ($\vartheta = 90^\circ$)

Durch die vorgenannten Festlegungen reduzierte sich die Anzahl der Parameter (Einflussfaktoren) in Gleichung (4.24) und man erhielt Gleichung (4.25).

$$\Delta h = F(r, s, H, T, d, k_1, k_2) \quad (4.25)$$

Bis auf die Durchlässigkeit von Boden und Dichtungssystem, stellten sich in Gleichung (4.25) ausschließlich Längen als Maßeinheit dar. Durch Umformung von Gleichung (4.25) in die dimensionslose Darstellungsform ergab sich die in Gleichung (4.26) dargestellte Abhängigkeit.

$$\frac{\Delta h}{s} = F\left(\frac{r}{s}, \frac{H}{T}, \frac{d}{T}, \frac{k_1}{k_2}\right) \quad (4.26)$$

Die dimensionslosen Verhältnisse, welche die in der Praxis am häufigsten vorkommenden Fälle abdecken, wurden nachfolgend untersucht

4.3.2 Verhältnis Radius/Sehne (Bogenform r/s)

Anhand der durchgeführten Untersuchungen im Kapitel 3 erfolgte im Unterkapitel 3.4 die Festlegung der möglichen Bogenformen. Aufgrund dieser Festlegungen wurde die Modellgeometrie der numerischen Berechnungsmodelle Nr. 1 bis 5 (vgl. Abschnitt 4.2.1) erstellt. Nachfolgend wurde der Einfluss der Bogenformen mit den Verhältnissen von Radius zu Sehne r/s auf die Grundwasserverhältnisse untersucht:

- $r/s = 0,50$ (Modell/Bogenform 1)
- $r/s = 0,55$ (Modell/Bogenform 2)
- $r/s = 0,65$ (Modell/Bogenform 3)
- $r/s = 1,00$ (Modell/Bogenform 4)
- $r/s = 2,00$ (Modell/Bogenform 5)

Dazu war es zunächst erforderlich, den übrigen in Gleichung (4.26) aufgeführten dimensionslosen Verhältnissen entsprechende Werte (Start- bzw. Grundparameter) zuzuweisen. Es wurden folgende Festlegungen getroffen:

- $H/T = 0,50$ ($T = 33,333$ m vgl. Tabelle 4-1)
- $d/T = 0,03$ ($d = 1,0$ m in den Berechnungsmodellen Nr. 1 bis 5)
- $k_1/k_2 = 10^4$ (Boden $k_1 = 1 \cdot 10^{-4}$ und Dichtungssystem $k_2 = 1 \cdot 10^{-8}$)

Um den Einfluss eines jeden Parameters (Verhältniswertes) auf die Grundwasserverhältnisse untersuchen zu können, darf lediglich der zu untersuchende Parameter variiert werden. Die übrigen Parameter wurden deshalb auf ihre Startwerte fixiert.

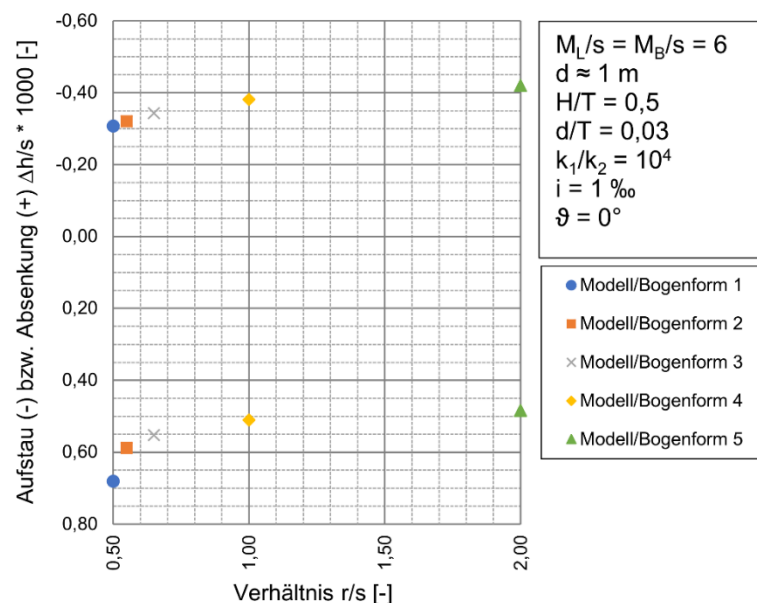


Abb. 4-8: Einfluss der Bogenform r/s auf die Grundwasserverhältnisse (konvexe Anströmung)

Die Berechnungsergebnisse wurden in der dimensionslosen Form $\Delta h/s \cdot 10^3$ ausgegeben. Zuerst erfolgte eine Untersuchung des Einflusses der jeweiligen Bogenform r/s auf die Grundwasserverhältnisse bei einer konvexen Anströmung. Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 4-8 dargestellt.

Anhand der vorgenannten Abbildung ist zu erkennen, dass der Aufstau bei der halbkreisförmigen Bogenform 1 ($r/s = 0,50$) am kleinsten und bei der deutlich flacheren Bogenform 5 ($r/s = 2,00$) am größten ist. Im Gegenzug ist die Absenkung bei der flacheren Bogenform 5 ($r/s = 2,00$) am kleinsten und bei der halbkreisförmigen Bogenform 1 ($r/s = 0,50$) am größten. Weiter ist erkennbar, dass sich mit flacher werdenden Bogenformen ($r/s > 2,00$) der Aufstau bzw. die Absenkung in ihrer Größenordnung immer mehr angleichen. Für diese Fälle können die Verfahren von Schneider (Gleichung (2.21) und die Gleichungen (2.22) bis (2.26)) gegebenenfalls hinreichend genaue Ergebnisse liefern.

Als nächstes wurde der Einfluss der jeweiligen Bogenform r/s auf die Grundwasserverhältnisse bei einer konkaven Anströmung untersucht. Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 4-9 dargestellt.

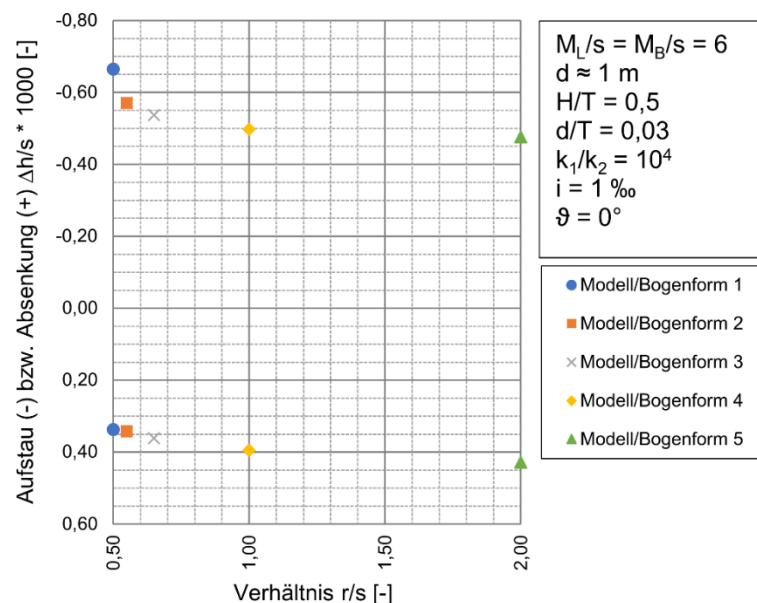


Abb. 4-9: Einfluss der Bogenform r/s auf die Grundwasserverhältnisse (konkave Anströmung)

In Abbildung 4-9 ist zu erkennen, dass der Aufstau bei der halbkreisförmigen Bogenform 1 ($r/s = 0,50$) am größten und bei der deutlich flacheren Bogenform 5 ($r/s = 2,00$) am kleinsten ist. Im Gegenzug ist die Absenkung bei der flacheren Bogenform 5 ($r/s = 2,00$) am größten und bei der halbkreisförmigen Bogenform 1 ($r/s = 0,50$) am kleinsten. Die zunehmende Angleichung der Größenordnung von Aufstau

bzw. Absenkung ist auch hier mit flacher werdenden Bogenformen ($r/s > 2,00$) erkennbar.

Im Rahmen von strömungsmechanischen Versuchen (Windkanal) wurden die Widerstandsbeiwerte c_w im Reynolds-Zahl-Bereich von 10^4 bis 10^5 für unterschiedliche dreidimensionale und zweidimensionale Körperformen bestimmt und in Oertel et al. (2009) dokumentiert. Danach ergab sich für einen halbkreisförmigen Bogen ($r/s = 0,50$) bei konvexer Anströmung ein Widerstandsbeiwert $c_w (= 1,20)$ und bei konkaver Anströmung ein Widerstandsbeiwert $c_w (= 2,30)$. Damit ließen sich die Verhältniswerte von konvex/konkav ($= 0,52$) und konkav/konvex ($= 1,92$) bestimmen. Für die übrigen untersuchten r/s -Werte sind in Oertel et al. (2009) keine vergleichbaren Körperformen und somit Widerstandsbeiwerte c_w dokumentiert. Bei der konvexen Anströmung der Bogenform 1 ($r/s = 0,50$) im Berechnungsmodell Nr. 1 ergibt sich ein Verhältnis von dimensionsloser Aufstauhöhe ($= -0,307$) zur dimensionslosen Absenkung ($= 0,680$) von $0,45$. Die konkave Anströmung der Bogenform 1 ($r/s = 0,50$) im Berechnungsmodell Nr. 1 liefert ein Verhältnis von dimensionsloser Aufstauhöhe ($= -0,664$) zur dimensionslosen Absenkung ($= 0,337$) von $1,97$. Aufgrund der unterschiedlichen Medien, strömende Luft (kompressibel) und strömendes Grundwasser (inkompressibel) im Porengrundwasserleiter, ist ein Vergleich von Widerstandsbeiwerten mit Änderungen des Grundwasserstands (Aufstau/Absenkung) nur bedingt möglich, dennoch liefert dieser eine wichtige Tendenz hinsichtlich der Plausibilität der Berechnungsergebnisse.

Anhand der vorgenannten Betrachtungen ist die Plausibilität der Berechnungsergebnisse gegeben.

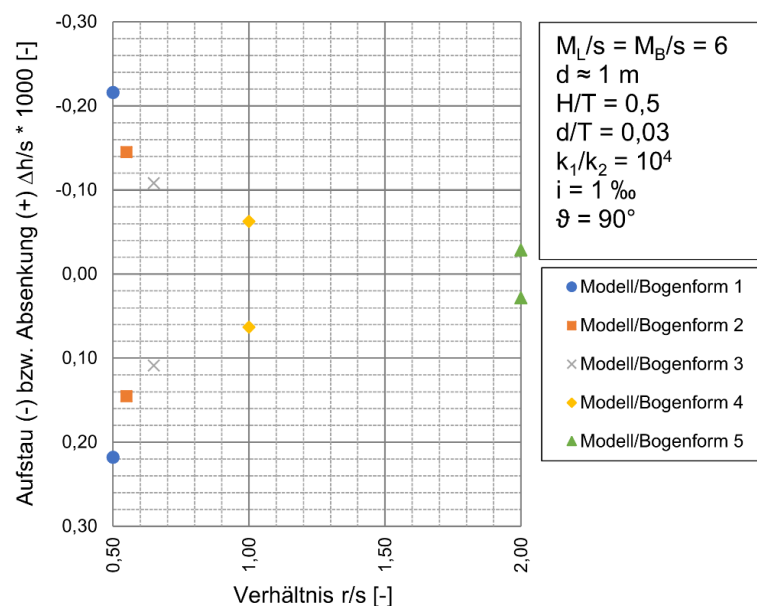


Abb. 4-10: Einfluss der Bogenform r/s auf die Grundwasserverhältnisse (Anströmung x-Achse)

Als letztes wurde der Einfluss der jeweiligen Bogenform r/s auf die Grundwasserverhältnisse bei einer Anströmung parallel zur x -Achse untersucht. Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 4-10 dargestellt.

Gemäß der vorgenannten Abbildung ist ersichtlich, dass der Aufstau bzw. die Absenkung bei jeder Bogenform gleich groß sind. Bei der halbkreisförmigen Bogenform 1 ($r/s = 0,50$) ist der Aufstau bzw. die Absenkung am größten und bei der deutlich flacheren Bogenform 5 ($r/s = 2,00$) am kleinsten. Bei der Anströmung parallel zur x -Achse gewinnt hinsichtlich der Größe des Aufstaus bzw. der Absenkung, die Größe der Pfeilhöhe h_p deutlich an Einfluss. Bei der Bogenform 1 beträgt die Pfeilhöhe h_p ($= 1,050$ m) und bei der Bogenform 5 ($= 44,456$ m).

4.3.3 Verhältnis GW-Stand (Modellmitte)/Tiefe Grundwasserleiter (H/T)

Die Untersuchung des Einflusses der Höhe des Grundwasserstandes in Modellmitte im Verhältnis zur Mächtigkeit bzw. Tiefe des Grundwasserleiters erfolgte für die Werte H/T ($= 0,20, 0,30, 0,50, 0,70$ und $0,80$). Die unterschiedlichen Modellabmessungen der Berechnungsmodelle Nr. 1 bis 5 machten es erforderlich, eine Begrenzung auf H/T ($= 0,20$ bzw. $0,80$) vorzunehmen, da andernfalls die Grundwasseroberfläche nicht mehr im freien Grundwasserleiter läge. Die übrigen Parameter wurden dabei auf die in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Startwerte fixiert.

Die Berechnungen wurden separat für jedes Berechnungsmodell Nr. 1 bis 5 und getrennt für die konvexe und konkave Anströmung (y -Richtung) sowie für die Anströmung in x -Richtung durchgeführt. Darüber hinaus waren für das Berechnungsmodell „DW1000“ (vgl. Abschnitt 4.2.6) die konvexe und konkave Anströmung (y -Richtung) zu berechnen. Mit diesen Berechnungen sollte geprüft werden, ob das Verhältnis H/T einen eigenen Einfluss auf die Grundwasserverhältnisse ausübt oder lediglich mit der Bogenform assoziiert ist. Die Berechnungsergebnisse wurden in der dimensionslosen Form $\Delta h/s \cdot 10^3$ ausgegeben.

Es wurde zuerst der Einfluss des Verhältnisses H/T auf die Grundwasserverhältnisse bei einer konvexen Anströmung untersucht. Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 4-11 dargestellt.

Anhand der Abb. 4-11 ist zu erkennen, dass der Aufstau bei sämtlichen bogenförmigen Dichtungssystemen sowie bei dem geraden Dichtungssystem mit kleiner werdendem Verhältnis H/T ebenfalls kleiner wird. Eine vergleichbare Bewertung lässt sich auch für die Absenkung abgeben. Beim Blick auf die Kurvenschar des Aufstaus bzw. der Absenkung ist erkennbar, dass das Verhältnis H/T einen entsprechenden Einfluss auf die Grundwasserverhältnisse besitzt. Passt man das Gesetz von Darcy in der Form nach

Gleichung (2.3) auf das numerische Modell an, dann lässt sich der Volumenstrom gemäß Gleichung (4.27) darstellen.

$$\dot{V} = k_f \cdot h_M \cdot B_M \cdot i \tag{4.27}$$

In den numerischen Untersuchungen des Verhältnisses H/T waren der Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens k_f , die Modellbreite B_M und das hydraulische Gefälle i konstant. Durch die Variation von H/T wird maßgeblich die Grundwasser erfüllte Mächtigkeit h_M beeinflusst. Bei kleiner werdendem Verhältnis H/T wird auch h_M geringer und somit der Volumenstrom. Dies wirkt sich dann auf die Größe des Aufstaus bzw. der Absenkung aus. Darüber hinaus konnte der Einfluss der Bogenform, gerade auf die Größe des Aufstaus bzw. der Absenkung, nicht ausgeschlossen werden. Diese reduziert entsprechend den Durchflussquerschnitt A, der aus dem Produkt von B_M und h_M gebildet wird.

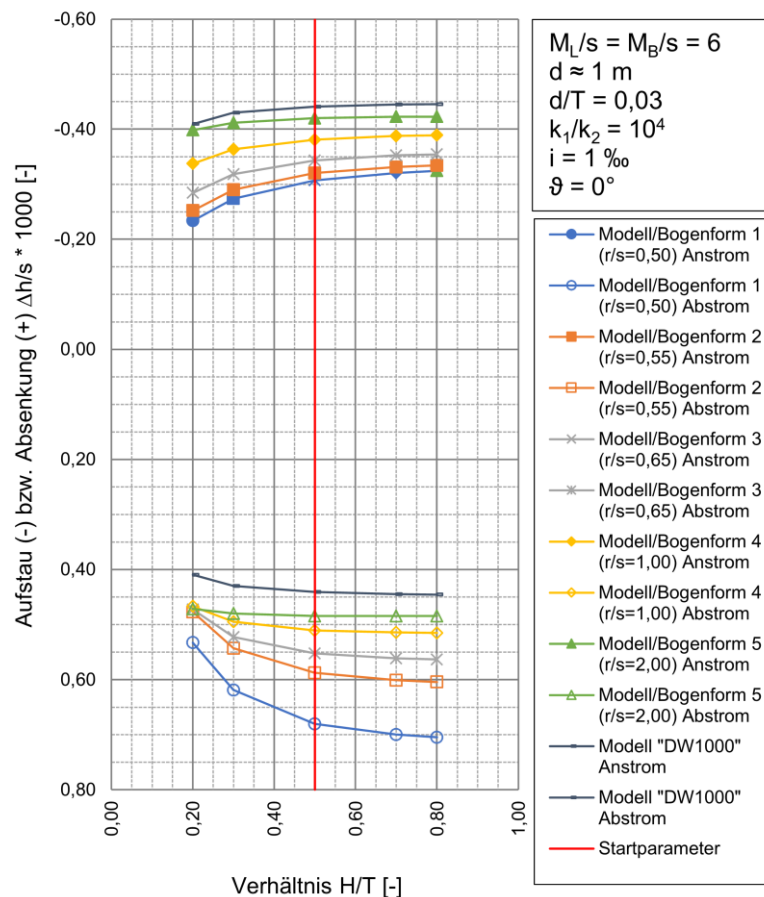


Abb. 4-11: Einfluss des Verhältnis H/T auf die Grundwasserverhältnisse (konvexe Anströmung)

Als nächstes wurde der Einfluss des Verhältnisses H/T auf die Grundwasserverhältnisse bei einer konkaven Anströmung untersucht. Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 4-12 dargestellt.

Im Vergleich zur konvexen Anströmung wird auch bei der konkaven Anströmung der Aufstau bei sämtlichen bogenförmigen Dichtungssystemen sowie dem geraden Dichtungssystem mit kleiner werdendem Verhältnis H/T ebenfalls kleiner (*s* Abb. 4-12). Diese Bewertung lässt sich auch für die Absenkung abgeben.

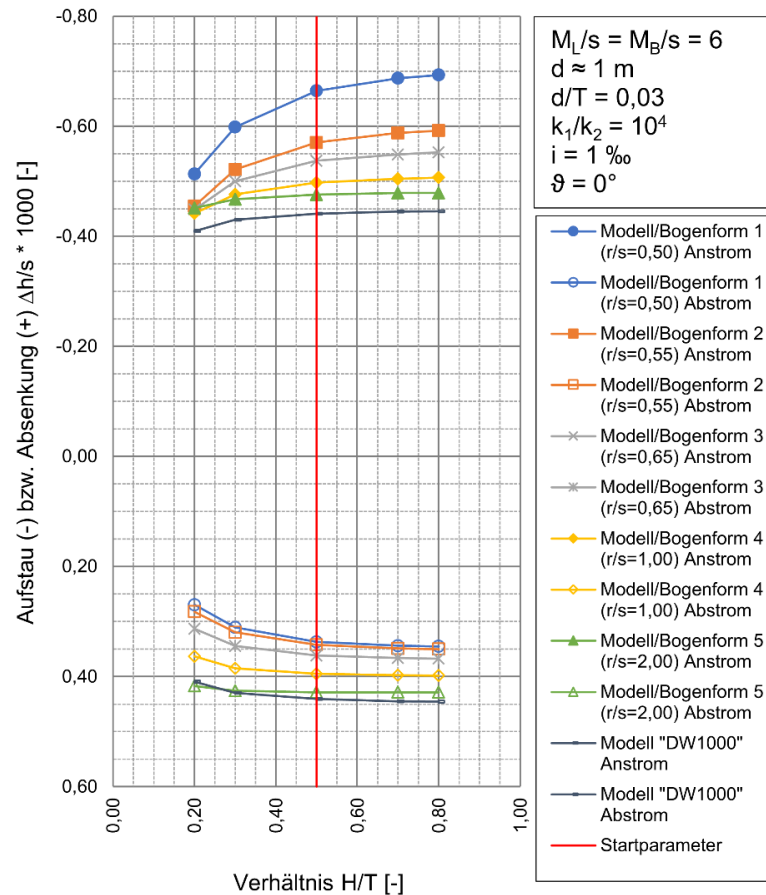


Abb. 4-12: Einfluss des Verhältnis H/T auf die Grundwasserverhältnisse (konkave Anströmung)

Als letztes wurde der Einfluss des Verhältnisses H/T auf die Grundwasserverhältnisse bei einer Anströmung parallel zur x -Achse untersucht. Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 4-13 dargestellt.

In Abbildung 4-13 ist erkennbar, dass bei einer Anströmung parallel zur x -Achse der Aufstau bei sämtlichen bogenförmigen Dichtungssystemen mit kleiner werdendem Verhältnis H/T , wie bei der konvexen und konkaven Anströmung, ebenso kleiner wird. Bei den Bogenformen 4 ($r/s = 1,00$) und 5 ($r/s = 2,00$) ist diese Auswirkung allerdings sehr gering ausgeprägt.

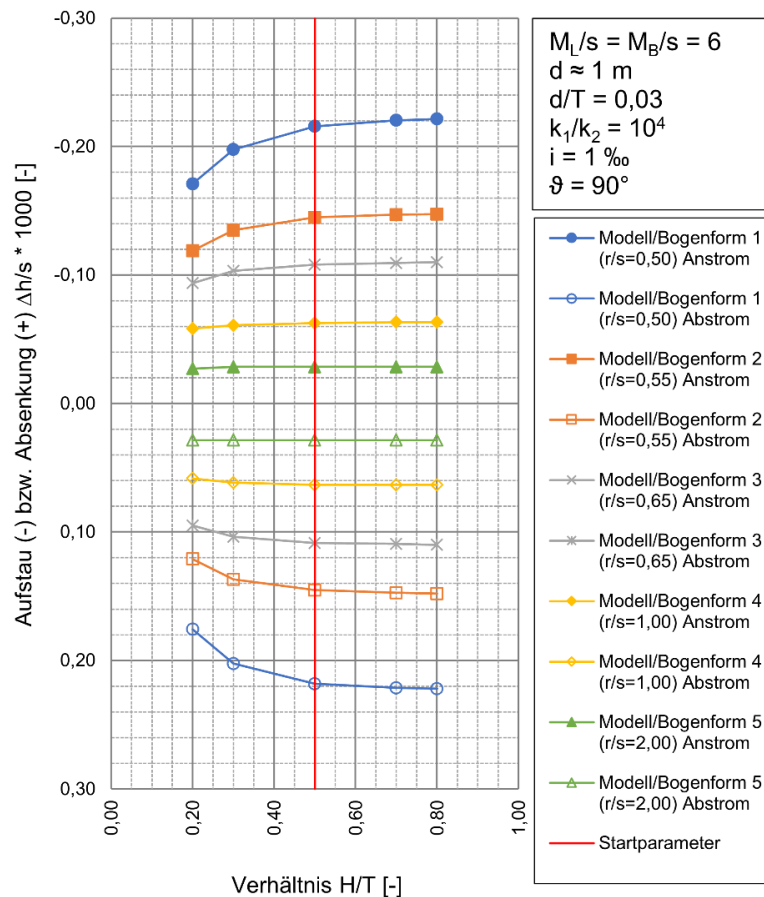


Abb. 4-13: Einfluss des Verhältnis H/T auf die Grundwasserverhältnisse (Anströmung x-Achse)

4.3.4 Verhältnis Dicke Dichtungssystem/Tiefe Grundwasserleiter (d/T)

Der Einfluss der Dicke des Dichtungssystems im Verhältnis zur Mächtigkeit bzw. Tiefe des Grundwasserleiters wurde für die Werte d/T (= 0,02 bis 0,08) untersucht. Die unterschiedlichen Modellabmessungen der Berechnungsmodelle Nr. 1 bis 5 machen es hierbei erforderlich, eine Begrenzung auf d/T (= 0,02 bzw. 0,08) vorzunehmen, da die Grundwasseroberfläche andernfalls nicht mehr im freien Grundwasserleiter liegen würde. Darüber hinaus wurde die Dicke des Dichtungssystems infolge der Berechnungsmodelle fixiert, so dass im Rahmen der numerischen Berechnungen die Mächtigkeit bzw. Tiefe des Grundwasserleiters variiert werden musste. Für die übrigen Parameter wurden hingegen die in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Startwerte verwendet.

Auch in diesem Fall wurden die Berechnungen separat für jedes Berechnungsmodell Nr. 1 bis 5 und getrennt für die konvexe und konkave Anströmung (y-Richtung) sowie für die Anströmung in x-Richtung durchgeführt. Für das Berechnungsmodell „DW1000“ (vgl. Abschnitt 4.2.6) wurden ebenfalls die konvexe und konkave Anströmung (y-Richtung) berechnet. Dadurch sollte geprüft werden, ob das Verhältnis d/T einen entsprechenden Einfluss auf die Grundwasserverhältnisse besitzt oder lediglich mit der Bogenform

verbunden ist. Die Berechnungsergebnisse wurden in der dimensionslosen Form $\Delta h/s \cdot 10^3$ dargestellt.

Als Erstes wurde der Einfluss des Verhältnisses d/T auf die Grundwasserverhältnisse bei einer konvexen Anströmung untersucht. Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 4-14 dargestellt.

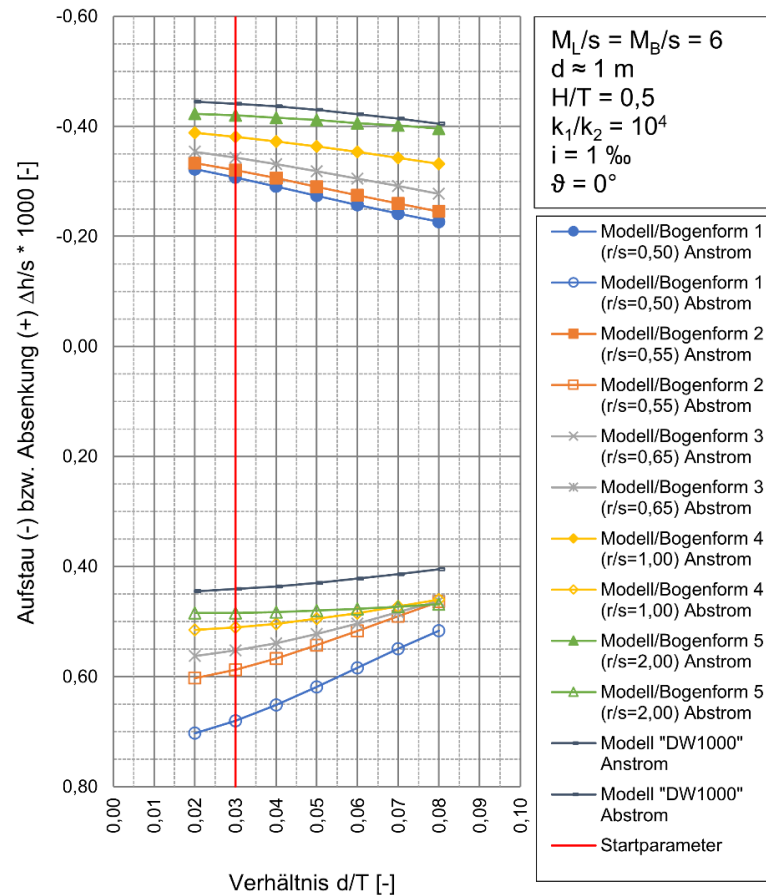


Abb. 4-14: Einfluss des Verhältnis d/T auf die Grundwasserverhältnisse (konvexe Anströmung)

In Abbildung 4-14 ist zu erkennen, dass der Aufstau und die Absenkung bei sämtlichen bogenförmigen Dichtungssystemen sowie dem geraden Dichtungssystem mit steigendem Verhältnis d/T , d. h. einer Abnahme der Mächtigkeit bzw. Tiefe des Grundwasserleiters im Verhältnis zur Dicke des Dichtungssystems, zunehmend kleiner wird.

Beim Blick auf die Kurvenschar des Aufstaus bzw. der Absenkung ist erkennbar, dass das Verhältnis d/T einen entsprechenden Einfluss auf die Grundwasserverhältnisse besitzt. Die Untersuchungen im Abschnitt 2.5.3 zum Wirkungsgrad des Dichtungssystems zeigten, dass der Wirkungsgrad mit steigendem Verhältnis d/T ($= l/T$) tendenziell zunimmt. Allerdings ist diese Steigerung des Wirkungsgrades bei einem Verhältnis k_1/k_2 ($= 10^4$) sehr gering. Vor diesem Hintergrund erscheint es möglich, dass der verringerte Volumenstrom gemäß Gleichung (4.27) den verringerten Aufstau bzw.

die verringerte Absenkung bei steigendem Verhältnis d/T hervorruft. Bei konstantem Verhältnis H/T ($= 0,50$) nimmt bei steigendem Verhältnis d/T die Tiefe des Grundwasserleiters T ab und somit wird auch die Grundwasser erfüllte Mächtigkeit h_M geringer. Somit verringert sich der Volumenstrom. Dies wirkt sich entsprechend auf die Größe des Aufstaus bzw. der Absenkung aus. Aufgrund der unterschiedlich großen Abstände zwischen den Kurvenverläufen konnte der Einfluss der Bogenform, gerade auf die Größe des Aufstaus bzw. der Absenkung, nicht in Gänze ausgeschlossen werden.

Es wurde der Einfluss des Verhältnisses d/T auf die Grundwasserverhältnisse bei einer konkaven Anströmung untersucht. Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 4-15 dargestellt.

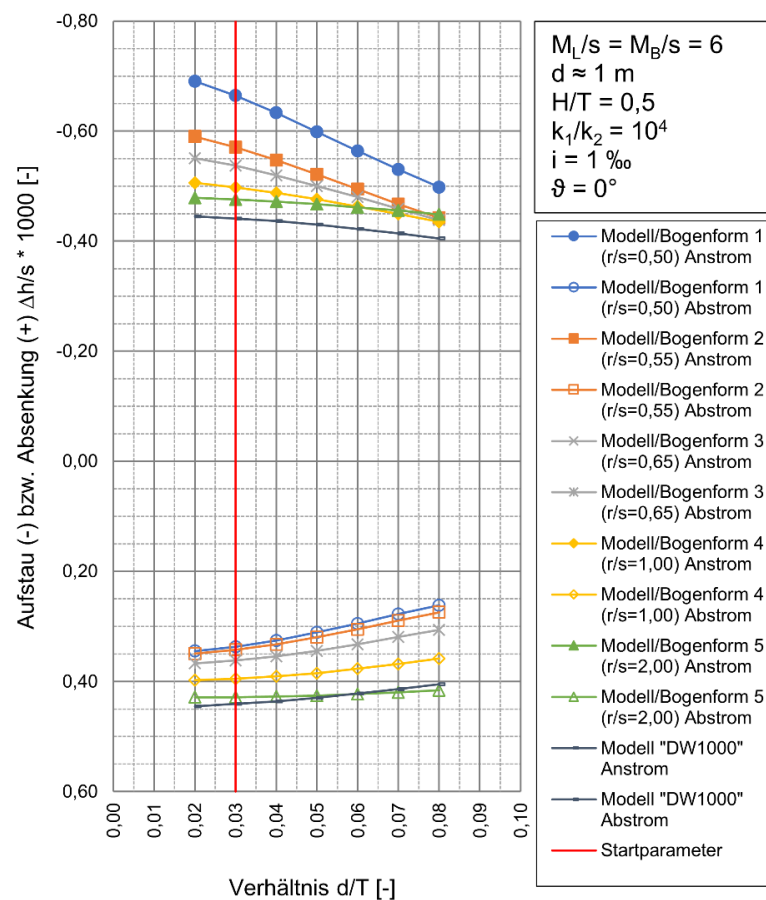


Abb. 4-15: Einfluss des Verhältnis d/T auf die Grundwasserverhältnisse (konkave Anströmung)

Auch in Abbildung 4-15 ist zu erkennen, dass der Aufstau und die Absenkung bei sämtlichen bogenförmigen Dichtungssystemen sowie dem geraden Dichtungssystem mit steigendem Verhältnis d/T zunehmend kleiner wird.

Abschließend wurde der Einfluss des Verhältnisses d/T auf die Grundwasserverhältnisse bei einer Anströmung parallel zur x -Achse untersucht. Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 4-16 grafisch dargestellt.

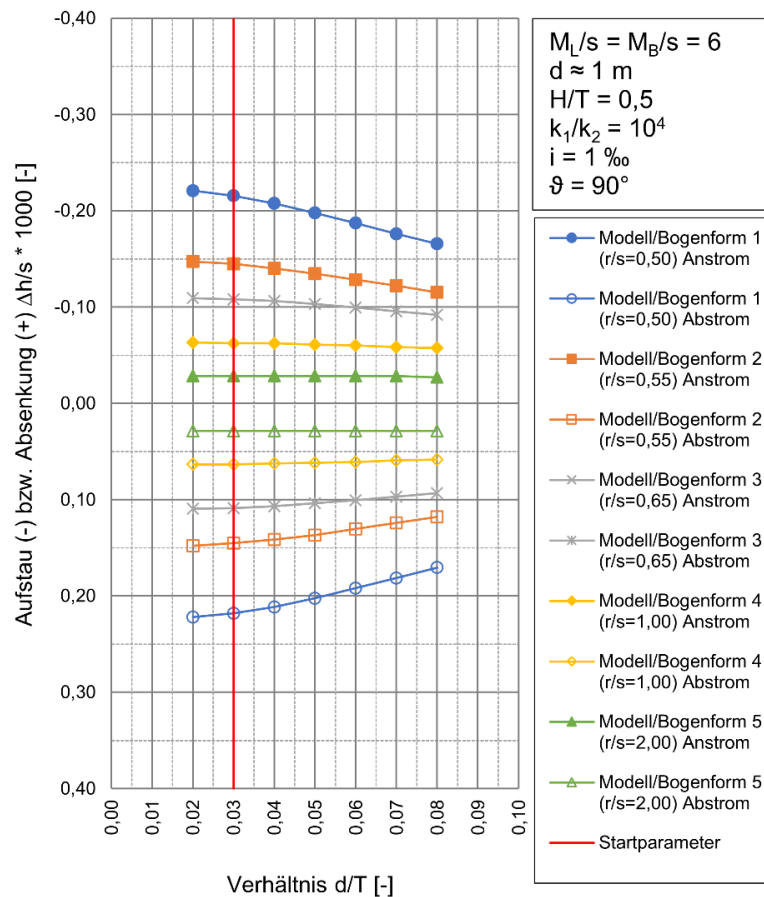


Abb. 4-16: Einfluss des Verhältnis d/T auf die Grundwasserverhältnisse (Anströmung x-Achse)

Gemäß Abbildung 4-16 ist erkennbar, dass der Aufstau und die Absenkung bei sämtlichen bogenförmigen Dichtungssystemen mit steigendem Verhältnis d/T zunehmend kleiner wird. Ähnlich dem Verhältnis H/T ist diese Auswirkung bei den Bogenformen 4 (r/s = 1,00) und 5 (r/s = 2,00) dagegen sehr gering ausgeprägt.

4.3.5 Verhältnis der Durchlässigkeitsbeiwerte Baugrund/Dichtwand (k_1/k_2)

Nachfolgend wurde der Einfluss des Verhältnisses der Durchlässigkeitsbeiwerte von Baugrund zur Dichtwand für die Werte k_1/k_2 ($= 10^2, 2,5 \cdot 10^2, 10^3, 2,5 \cdot 10^3, 5 \cdot 10^3, 7,5 \cdot 10^3, 10^4, 2,5 \cdot 10^4, 10^5$ und 10^6) untersucht. Dabei wurden die übrigen Parameter auf die in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Startwerte fixiert. Wie bei den vorangegangenen Berechnungen erfolgte auch hier für jedes Berechnungsmodell Nr. 1 bis 5 und getrennt für die konvexe und konkave Anströmung (y-Richtung) sowie für die Anströmung in x-Richtung eine separate numerische Versuchsdurchführung. Für das Berechnungsmodell „DW1000“ (vgl. Abschnitt 4.2.6) wurden ebenfalls die konvexe und konkave Anströmung (y-Richtung) berechnet. Dadurch sollte auch für das Verhältnis k_1/k_2 geprüft werden, ob es einen entsprechenden Einfluss auf die Grundwasserverhältnisse besitzt oder lediglich

mit der Bogenform zusammenhängt. Die Berechnungsergebnisse wurden in der dimensionslosen Form $\Delta h/s \cdot 10^3$ dargestellt.

Es wurde zuerst der Einfluss des Verhältnisses k_1/k_2 auf die Grundwasserverhältnisse bei einer konvexen Anströmung untersucht. Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 4-17 dargestellt.

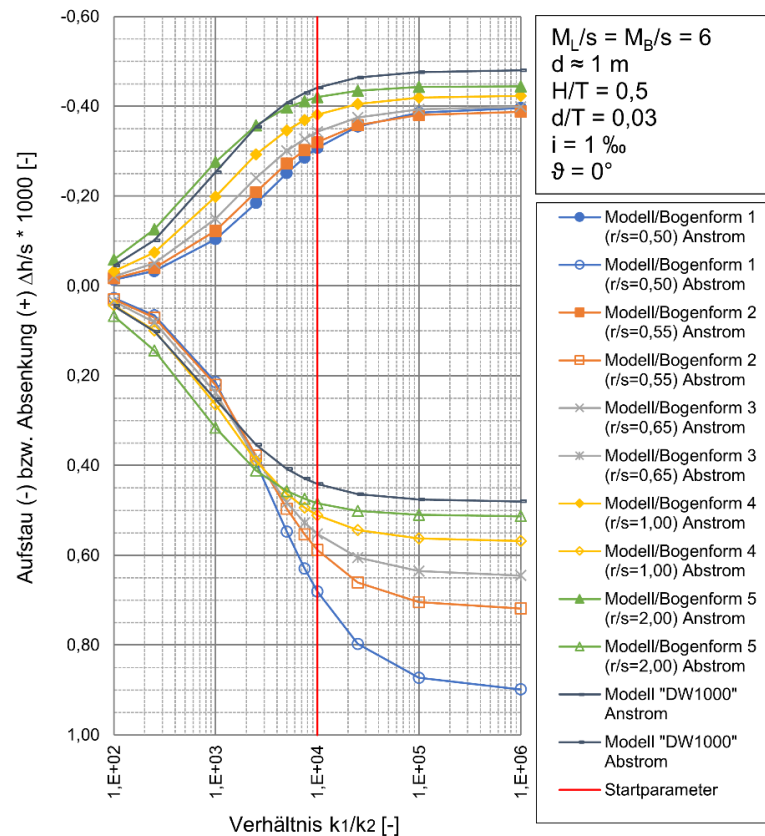


Abb. 4-17: Einfluss des Verhältnis k_1/k_2 auf die Grundwasserverhältnisse (konvexe Anströmung)

Anhand der Abb. 4-17 ist zu erkennen, dass der Aufstau in sämtlichen bogenförmigen Dichtungssystemen sowie dem geraden Dichtungssystem ausgehend vom Startparameter (= 10^4) mit kleiner werdendem Verhältnis k_1/k_2 deutlich abnimmt und bei einem Wert von 10^2 keinen nennenswerten Einfluss mehr ausübt. Eine vergleichbare Bewertung lässt sich auch für die Absenkung abgeben. Beim Blick auf die Kurvenschar des Aufstaus ist darüber hinaus erkennbar, dass eine Zunahme des Verhältnisses k_1/k_2 bis zu einem Wert von 10^6 keinen nennenswerten Anstieg des Aufstaus hervorruft. Anders stellt es sich bei der Größe der Absenkung dar. Die Größe der Absenkung nimmt in Abhängigkeit der Bogenform von $r/s = 0,50$ bis $r/s = 2,00$ stetig zu. Insgesamt übte das Verhältnis k_1/k_2 einen entsprechenden Einfluss auf die Grundwasserverhältnisse aus.

Als nächstes wurde der Einfluss des Verhältnisses k_1/k_2 auf die Grundwasserverhältnisse bei einer konkaven Anströmung untersucht. Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 4-18 dargestellt.

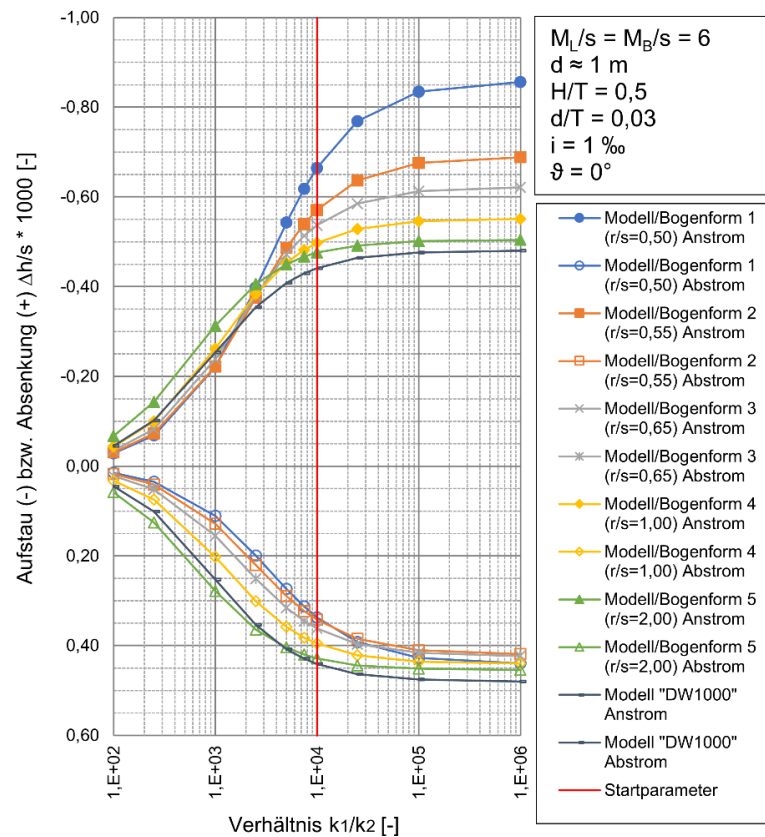


Abb. 4-18: Einfluss des Verhältnis k_1/k_2 auf die Grundwasserverhältnisse (konkave Anströmung)

Die Bewertung der konvexen Anströmung lässt sich grundsätzlich auf die konkave Anströmung übertragen. Allerdings sind aufgrund der konkaven Anströmungsrichtung gegenüber der konvexen die individuellen Bewertungen zwischen Aufstau und Absenkung zu tauschen. Dies wird bei einem Vergleich von Abb. 4-17 und Abb. 4-18 ersichtlich.

Als letztes wurde der Einfluss des Verhältnisses k_1/k_2 auf die Grundwasserverhältnisse bei einer Anströmung parallel zur x-Achse untersucht. In Abbildung 4-19 sind die Berechnungsergebnisse dargestellt.

In Abbildung 4-19 ist erkennbar, dass bei einer Anströmung parallel zur x-Achse sowohl der Aufstau als auch die Absenkung bei sämtlichen bogenförmigen Dichtungssystemen mit kleiner werdendem Verhältnis k_1/k_2 , wie bei der konvexen und konkaven Anströmung, ebenfalls deutlich abnimmt. Im Wertebereich $10^4 < k_1/k_2 < 10^6$ nehmen der Aufstau und die Absenkung hingegen leicht zu. Bei den Bogenformen 4 ($r/s = 1,00$) und 5 ($r/s = 2,00$) ist diese Auswirkung allerdings sehr gering.

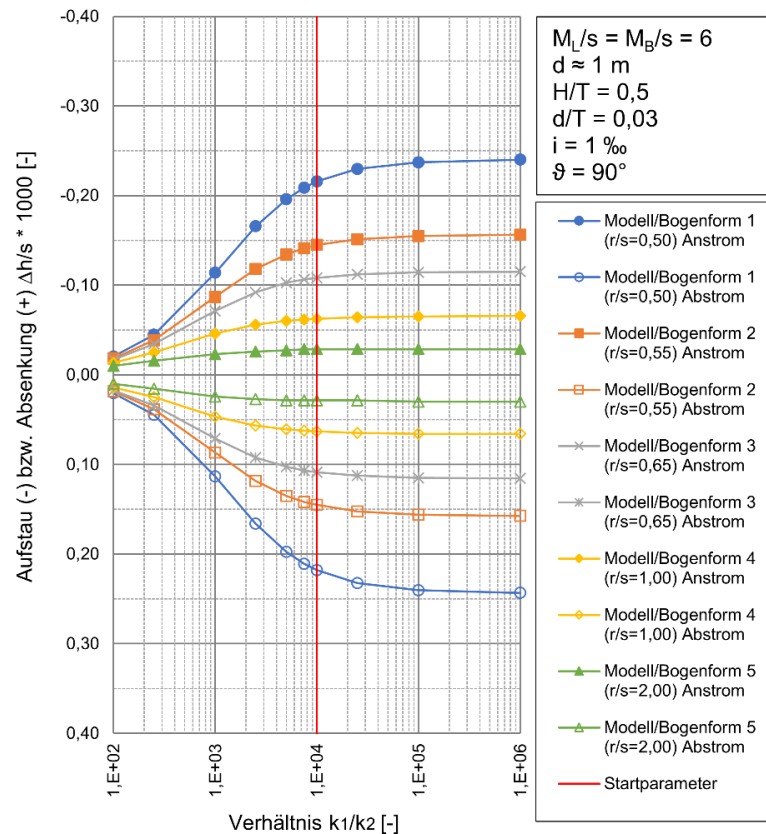


Abb. 4-19: Einfluss des Verhältnis k_1/k_2 auf die Grundwasserverhältnisse (Anströmung x-Achse)

4.3.6 Hydraulisches Gefälle (i)

Nachdem der Einfluss der dimensionslosen Verhältnisse r/s , H/T , d/T und k_1/k_2 mit einem konstanten hydraulischen Gefälle von i ($= 1 \text{ ‰}$) auf die Grundwasserverhältnisse untersucht wurde, waren nachfolgend zur Abschätzung des Einflusses eines veränderten hydraulischen Gefälles auf die Größe des Aufstaus bzw. der Absenkung numerische Berechnungen mit den Werten i ($= 0,25$ und $2,50 \text{ ‰}$) durchzuführen. Die übrigen Parameter blieben dabei auf die in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Startwerte fixiert. Im Rahmen der Abschätzung erfolgte eine Beschränkung der untersuchten Bogenformen, so dass lediglich die Berechnungsmodelle Nr. 1 und 5 untersucht wurden, da diese die äußeren Grenzen der untersuchten Bogenformen bilden. Die Berechnungen wurden getrennt für die konvexe und konkave Anströmung (y-Richtung) sowie für die Anströmung in x-Richtung durchgeführt. Für das Berechnungsmodell „DW1000“ wurden ebenfalls die konvexe und konkave Anströmung (y-Richtung) berechnet. Die Berechnungsergebnisse wurden in der dimensionslosen Form $\Delta h/s \cdot 10^3$ dargestellt.

Als Erstes wurde der Einfluss des hydraulischen Gefälles i auf die Grundwasserverhältnisse bei einer konvexen Anströmung untersucht. Die Abbildung 4-20 zeigt die Berechnungsergebnisse.

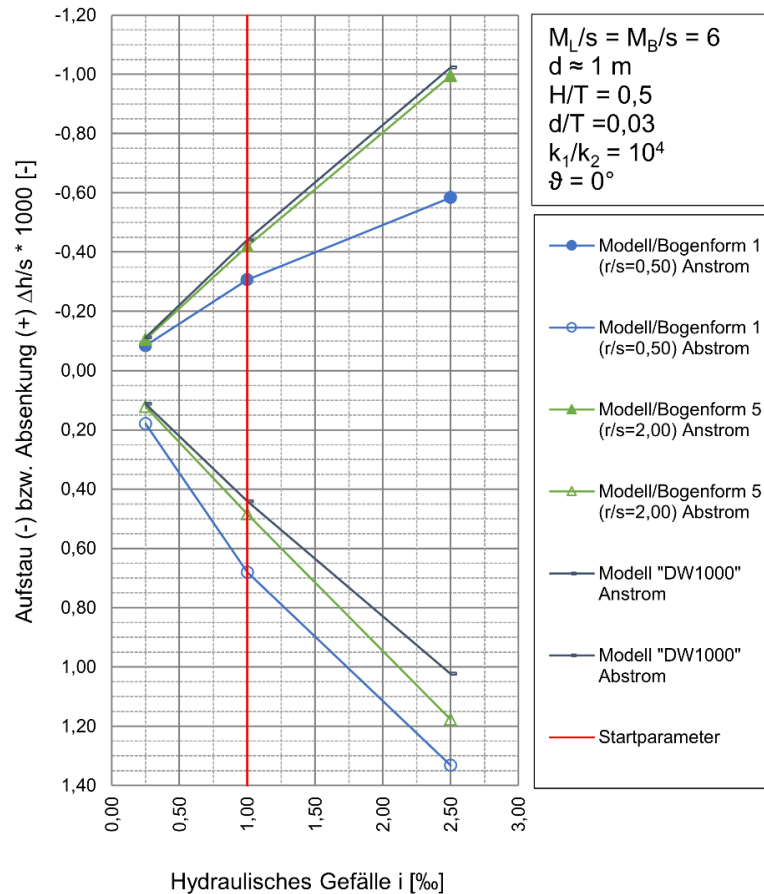


Abb. 4-20: Einfluss des hydraulischen Gefälles i auf die Grundwasserverhältnisse (konvexe Anströmung)

Gemäß der Abbildung 4-20 ist ersichtlich, dass bei der konvexen Anströmung sowohl der Aufstau als auch die Absenkung bei den untersuchten bogenförmigen Dichtungssystemen sowie dem geraden Dichtungssystem mit größer werdendem hydraulischem Gefälle i zunimmt. Beim geraden Dichtungssystem ist dieser Anstieg in etwa linear. Bei den untersuchten bogenförmigen Dichtungssystemen ist hingegen ein mit der Bogenform assoziierter Einfluss auf die Grundwasserverhältnisse zu erkennen. Der Einfluss nimmt tendenziell von Bogenform 5 ($r/s = 2,00$) bis Bogenform 1 ($r/s = 0,50$) zu.

Nachfolgend wurde der Einfluss des hydraulischen Gefälles i auf die Grundwasserverhältnisse bei einer konkaven Anströmung untersucht. Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 4-21 dargestellt.

Im Vergleich von Abb. 4-20 und Abb. 4-21 wird ersichtlich, dass sich die Bewertung der konvexen Anströmung prinzipiell auf die konkave Anströmung übertragen lässt. Aufgrund der konkaven Anströmungsrichtung gegenüber der konvexen sind die individuellen Bewertungen (z. B. Größenordnung von Aufstau und Absenkung) zwischen Aufstau und Absenkung zu tauschen.

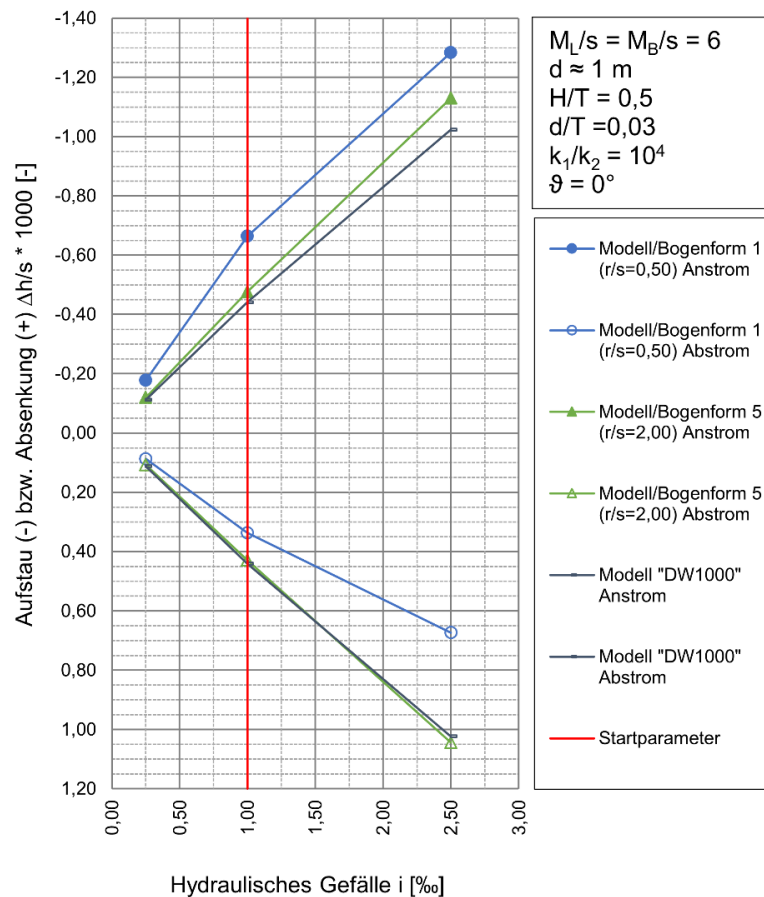


Abb. 4-21: Einfluss des hydraulischen Gefälles i auf die Grundwasserverhältnisse (konkave Anströmung)

Abschließend wurde der Einfluss des hydraulischen Gefälles i auf die Grundwasserverhältnisse bei einer Anströmung parallel zur x -Achse untersucht. Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 4-22 grafisch dargestellt.

In Abbildung 4-22 ist zu erkennen, dass der Aufstau und die Absenkung bei den untersuchten bogenförmigen Dichtungssystemen mit steigendem hydraulischem Gefälle i entsprechend zunehmen. Bei der Bogenform 5 ($r/s = 2,00$) ist dieser Anstieg in etwa linear. Bei der Bogenform 1 ($r/s = 0,50$) ist hingegen ein mit der Bogenform assoziierter Einfluss auf die Grundwasserverhältnisse erkennbar.

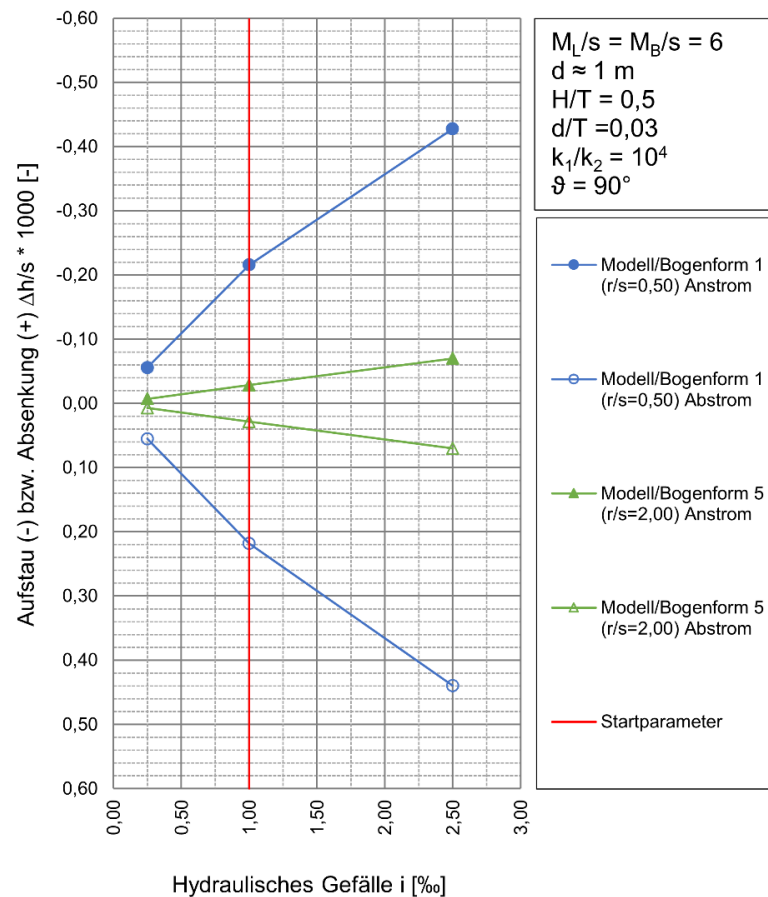


Abb. 4-22: Einfluss des hydraulischen Gefälles i auf die Grundwasserverhältnisse (Anströmung x-Achse)

4.3.7 Strömungsrichtung (Anströmwinkel ϑ)

Sowohl der Einfluss der dimensionslosen Verhältnisse r/s , H/T , d/T und k_1/k_2 als auch ein verändertes hydraulisches Gefälle auf die Größe des Aufstaus bzw. der Absenkung wurde bereits numerisch untersucht. Nachfolgend wurden zur Abschätzung des Einflusses eines veränderten Anströmwinkels auf die Größe des Aufstaus bzw. der Absenkung numerische Berechnungen mit den Werten ϑ ($= 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ und 90°) durchgeführt. Die übrigen Parameter blieben dabei auf die in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Startwerte fixiert. Auch im Rahmen dieser Abschätzung erfolgte eine Beschränkung der untersuchten Bogenformen, so dass lediglich die Berechnungsmodelle Nr. 1 und 5 sowie „DW1000“ untersucht wurden. Die Berechnungen wurden getrennt für die konvexe und konkave Anströmung (y-Richtung) durchgeführt, die Berechnungsergebnisse in der dimensionslosen Form $\Delta h/s \cdot 10^3$ dargestellt.

Wie in den vorangegangenen Abschnitten 4.2.1 und 4.2.4 bereits erläutert, bedurfte die Ermittlung der Randpotenziale bei einer schrägen Anströmung ($0^\circ < \vartheta < 90^\circ$) einer gesonderten Berechnung.

Aus den Untersuchungsergebnissen von Ernst (1999) geht hervor, dass für diese Art der Modellierung des Strömungsproblems folgende Vorgehensweisen in Betracht gezogen werden können. Zum einen besteht die Möglichkeit das Bauwerk bzw. Dichtungssystem unter dem Anströmwinkel ϑ verdreht im Strömungsgebiet zu elementieren, welche aufgrund der aufwendigen Netzgenerierung und der unflexiblen Anwendbarkeit des Modells (mehrfacher Modellaufbau) nicht empfehlenswert ist. Zum anderen kann die schräge Anströmung durch entsprechend verteilte Randpotenziale auf den Systemgrenzen des numerischen Modells simuliert werden. Dazu ist das unter dem Anströmwinkel ϑ fließende Grundwassergefälle i in eine senkrecht i_{\perp} und eine parallel i_{\parallel} zum Bauwerk bzw. zum Dichtungssystem verlaufende Strömungskomponente gemäß Gleichung (4.28) zu zerlegen.

$$i_{\vartheta} = i_{\perp} + i_{\parallel} = (\cos \vartheta \cdot i) + (\sin \vartheta \cdot i) \quad (4.28)$$

Im Rahmen der weiteren numerischen Untersuchungen wurde von der zweiten beschriebenen Möglichkeit Gebrauch gemacht. Im verwendeten Programmsystem mussten anstelle der bekannten Randpotenziale an den Ecken des numerischen Modells Einzelpotenziale angegeben werden. Die Potenziale an den Modellrändern wurden zwischen diesen Einzelpotenzialen automatisch interpoliert. Aufgrund der besonderen Bauwerksgeometrie der bogenförmigen Dichtungssysteme war im weiteren Verlauf zwischen der konvexen und konkaven Anströmung zu unterscheiden.

Auf der Grundlage der Gleichungen (4.15), (4.16), (4.20), (4.21) und (4.28) lassen sich für die in Abb. 4-4 dargestellten Modellecken Nr. 1 bis 4 bei einer schrägen konvexen Anströmung ($0^{\circ} < \vartheta < 90^{\circ}$) die Einzelpotenziale entsprechend den Gleichungen (4.29) bis (4.32) bestimmen.

$$\Phi_1 = H + (\cos \vartheta \cdot i \cdot M_L/2) + (\sin \vartheta \cdot i \cdot M_B/2) \quad (4.29)$$

$$\Phi_2 = H + (\cos \vartheta \cdot i \cdot M_L/2) - (\sin \vartheta \cdot i \cdot M_B/2) \quad (4.30)$$

$$\Phi_3 = H - (\cos \vartheta \cdot i \cdot M_L/2) - (\sin \vartheta \cdot i \cdot M_B/2) \quad (4.31)$$

$$\Phi_4 = H - (\cos \vartheta \cdot i \cdot M_L/2) + (\sin \vartheta \cdot i \cdot M_B/2) \quad (4.32)$$

Für die Modellecken Nr. 1 bis 4 lassen sich bei einer schrägen konkaven Anströmung ($0^{\circ} < \vartheta < 90^{\circ}$) unter Anwendung der Gleichungen (4.18) bis (4.21) und (4.28) die Einzelpotenziale hingegen mit den Gleichungen (4.33) bis (4.36) ermitteln.

$$\Phi_1 = H - (\cos \vartheta \cdot i \cdot M_L/2) + (\sin \vartheta \cdot i \cdot M_B/2) \quad (4.33)$$

$$\Phi_2 = H - (\cos \vartheta \cdot i \cdot M_L/2) - (\sin \vartheta \cdot i \cdot M_B/2) \quad (4.34)$$

$$\Phi_3 = H + (\cos \vartheta \cdot i \cdot M_L/2) - (\sin \vartheta \cdot i \cdot M_B/2) \quad (4.35)$$

$$\Phi_4 = H + (\cos \vartheta \cdot i \cdot M_L/2) + (\sin \vartheta \cdot i \cdot M_B/2) \quad (4.36)$$

Es wurde zuerst der Einfluss des Anströmwinkels ϑ auf die Grundwasserverhältnisse bei einer konvexen Anströmung untersucht. Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 4-23 dargestellt.

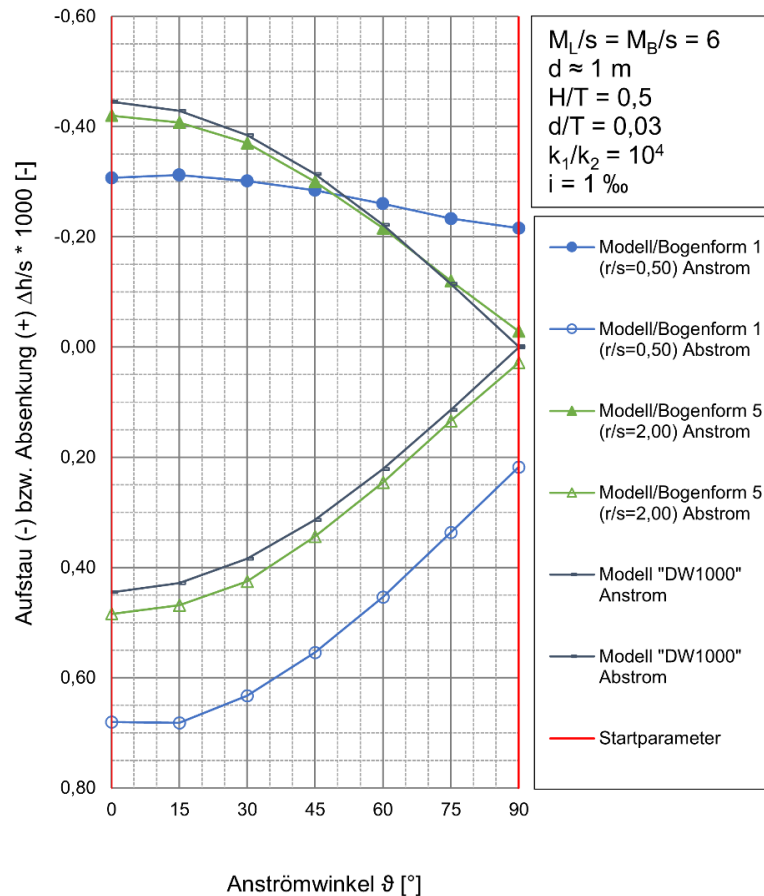


Abb. 4-23: Einfluss des Anströmwinkels ϑ auf die Grundwasserverhältnisse (konvexe Anströmung)

Anhand der Abb. 4-23 ist zu erkennen, dass der Aufstau bei den untersuchten bogenförmigen Dichtungssystemen sowie dem geraden Dichtungssystem ausgehend vom Anströmwinkel ϑ ($= 0^\circ$) bis zum Anströmwinkel ϑ ($= 90^\circ$) deutlich abnimmt. Im geraden Dichtungssystem nimmt dieser aufgrund des fehlenden Strömungswiderstandes in x-Richtung bis zu einem Wert von Null ab. Mit zunehmender Anströmung aus der x-Richtung wird die Pfeilhöhe h_p gegenüber der Sehne s dominanter, so dass die Bogenform einen wesentlichen Einfluss auf die Größe des Aufstaus sowie der Absenkung ausübt. Je nach Anströmungswinkel wirkt sich der vorgenannte Einfluss entsprechend aus. Aufgrund der kleineren Pfeilhöhe h_p der Bogenform 5 ($r/s = 2,00$) fällt die Abnahme des Aufstaus gegenüber der Bogenform 1

($r/s = 0,50$) deutlich größer aus. Für die Absenkung lässt sich eine vergleichbare Bewertung abgeben.

Zum Abschluss wurde der Einfluss des Anströmwinkels ϑ auf die Grundwasser- verhältnisse bei einer konkaven Anströmung untersucht. Die Abbildung 4-24 zeigt die Berechnungsergebnisse.

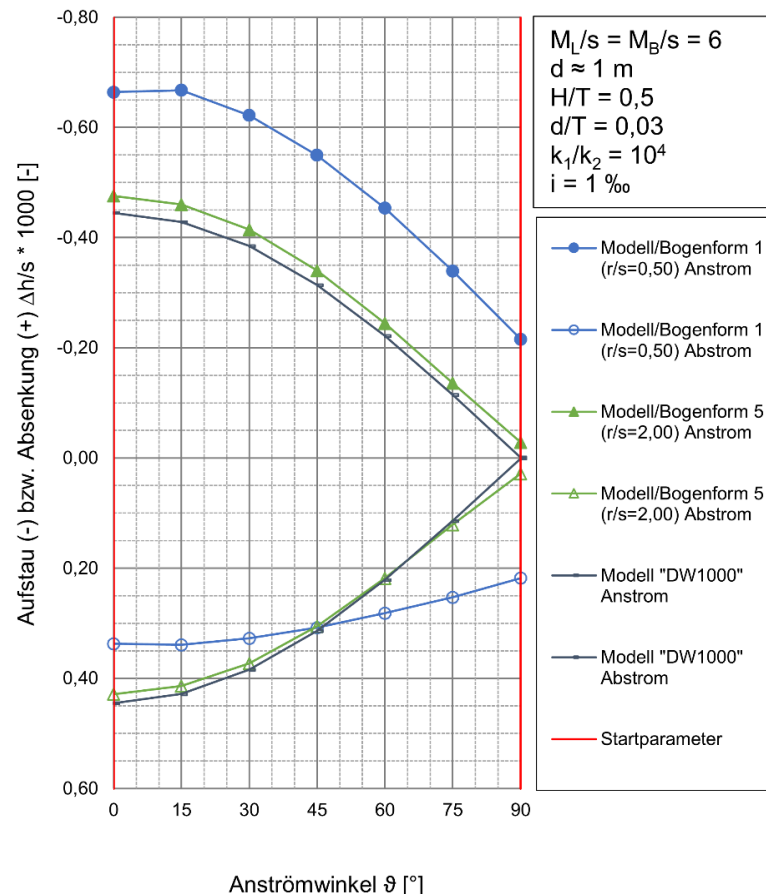


Abb. 4-24: Einfluss des Anströmwinkels ϑ auf die Grundwasserhältnisse (konkave Anströmung)

Gemäß Abbildung 4-24 ist erkennbar, dass sich der Aufstau bei den untersuchten bogenförmigen Dichtungssystemen sowie dem geraden Dichtungssystem analog der Absenkung bei einer konvexen Anströmung (vgl. Abb. 4-23) verhält. Die Absenkung in Abb. 4-24 verhält sich hingegen genau wie der Aufstau bei einer konvexen Anströmung. Anhand der vorgenannten Ergebnisse war dem Anströmwinkel ϑ Verhältnis k_1/k_2 ein entsprechender Einfluss auf die Grundwasserhältnisse zuzuordnen.

5 Ergebnisse und Diskussion

Im Unterkapitel 4.3 wurde im Zusammenhang mit den numerischen Berechnungen eine Parameterstudie durchgeführt. Dabei wurden Einflussfaktoren untersucht und bewertet, die im Zusammenhang mit den bogenförmigen Dichtungssystemen eine Veränderung des Grundwasserspiegels (Aufstau und Absenkung) hervorrufen. Diese Ergebnisse werden nachfolgend weiter ausgewertet. Auf der Grundlage der im Abschnitt 2.6.2 und 2.6.3. aufgeführten Berechnungsverfahren wird untersucht, inwieweit sich diesbezüglich ein entsprechendes Berechnungsverfahren bzw. Diagramme für vollkommene bogenförmige Dichtungssysteme ableiten lässt. Des Weiteren wird die Anwendung anhand von Beispielen erklärt. Darüber hinaus werden die erhaltenen Berechnungsergebnisse der unterschiedlichen Berechnungsverfahren abschließend diskutiert.

5.1 Bewertung der Ergebnisse und Ableitung eines Berechnungsansatzes

5.1.1 Maßgebende Einflussfaktoren

Bei der im Abschnitt 4.3.1 durchgeführten Dimensionsanalyse wurden die in Gleichung (4.24) dargestellten Größen als mögliche Einflussfaktoren für eine Veränderung der Grundwasserverhältnisse Δh (Aufstau - Δh bzw. Absenkung + Δh) herausgearbeitet. Auf den Einfluss des hydraulischen Gefälles i und des Anströmwinkels ϑ wird im Abschnitt 5.1.3 detailliert eingegangen. Auf der Grundlage der durchgeführten numerischen Untersuchungen konnte anhand der erhaltenen Ergebnisse in den Abschnitten 4.3.2 bis 4.3.5 festgestellt werden, dass die dimensionslosen Parameter r/s , H/T , d/T und k_1/k_2 einen mehr oder weniger großen Einfluss auf die Grundwasserverhältnisse ausüben.

Anhand der erhaltenen Ergebnisse konnten die im Abschnitt 4.2.1 aufgestellten Thesen, dass bei konvexer Anströmung bogenförmiger vollkommener Dichtungssysteme der Aufstau geringer als die Absenkung und bei konkaver Anströmung der Aufstau größer als die Absenkung ist, bestätigt werden (vgl. Gleichung (4.13) und (4.14)).

Die Vorzüge der Dimensionsanalyse wurden im Abschnitt 4.3.1 ausführlich dargestellt. Neben diesen sind jedoch auch Schwächen bei der Anwendung der Dimensionsanalyse zu nennen, die von Kobus (1974) wie folgt beschrieben werden:

„Es ist in diesem Zusammenhang zu betonen, daß die Dimensionsanalyse im allgemeinen Fall nicht die Funktion selbst liefert und somit auch keine Aussagen über die physikalischen Zusammenhänge über das hinaus ergibt, was bereits bei der Auswahl der Parameter bekannt war.“

„Schließlich muß jedoch auch darauf hingewiesen werden, daß eine dimensionslose Darstellung von Meßergebnissen leicht zu Fehlinterpretationen verleitet.“

„Es ist daher zu beachten, daß die Dimensionsanalyse stets nur Aussagen über die Zuordnung der dimensionslosen Größen zueinander liefert und daß direkte Rückschlüsse auf die Beziehungen der einzelnen darin enthaltenen dimensionsbehafteten Größen nicht zulässig sind.“

Ergänzend dazu gibt Görtler (1975) an, dass, sofern die angesetzte Abhängigkeit nach Gleichung (5.1) physikalisch zutreffend ist, d. h. alle Bestimmungsgleichungen des physikalischen Problems vorliegen, in letzter Konsequenz auch Gleichung (5.2) zutrifft.

$$y = f(x_1, \dots, x_n) \quad (5.1)$$

$$y = x_1^{k_1} \cdot \dots \cdot x_n^{k_n} G(\Pi_1, \dots, \Pi_n), \quad p = n - r \quad (5.2)$$

Danach sind grundsätzlich die Anwendung und Kombination der Ergebnisse der dimensionslosen Parameter z. B. in Form von Berechnungsfaktoren untereinander gegeben. Wie im Abschnitt 4.1.1 beschrieben, sollen anhand der durchgeführten numerischen Untersuchungen für die in Tabelle 3-4 (vgl. Unterkapitel 3.4) aufgeführten Bogenformen Nr. 1 bis 5 sogenannte Formfaktoren, ähnlich wie die von Rehbock (1921) zur Bestimmung des Aufstaus von im Flusslauf stehenden Brückenpfeilern, ermittelt werden. Hierzu ist von folgenden Grundüberlegungen auszugehen:

- Die Formfaktoren sollen auf den bewährten Berechnungsansatz von Schneider (Gleichung (2.21)) aufbauen.
- Die Formfaktoren sollen dimensionslos sein.

Demzufolge wurden die numerischen Berechnungsergebnisse aus Abschnitt 4.3.2 (vgl. Abb. 4.8 bis 4.10) zur Bestimmung der Formfaktoren $f_{(r/s)}$ zu den analytischen Ergebnissen gemäß Gleichung (2.21) ins Verhältnis gesetzt. Die Formfaktoren $f_{(r/s)}$ lassen sich dann mit den Gleichungen (5.3) und (5.4) bestimmen.

$$f_{y,(r/s)} = \frac{\Delta h_{y,numerisch}}{\Delta h_{y,analytisch}} = \frac{\Delta h/s \cdot 1000}{s/2 \cdot i \cdot 1000/s} = \frac{\Delta h}{s/2 \cdot i} \quad (5.3)$$

$$f_{x,(r/s)} = \frac{\Delta h_{x,numerisch}}{\Delta h_{x,analytisch}} = \frac{\Delta h/s \cdot 1000}{h_{p/2} \cdot i \cdot 1000/s} = \frac{\Delta h}{h_{p/2} \cdot i} \quad (5.4)$$

Das hydraulische Gefälle i ($= 1,0 \text{ ‰}$ bzw. $0,001$) ist in den Gleichungen (5.3) und (5.4) als dimensionslose Dezimalzahl einzusetzen. Die Formfaktoren $f_{y,(r/s)}$ und $f_{x,(r/s)}$ sind in Tabelle 1 im **Anhang Q** aufgeführt.

Die Berechnungen der dimensionslosen Parameter r/s der Bogenformen Nr. 1 bis 5 wurden ausschließlich in Abhängigkeit der festgelegten Start- bzw. Grundparameter H/T ($= 0,50$), d/T ($= 0,03$) und k_1/k_2 ($= 10^4$) durchgeführt. Deshalb sind zur Berücksichtigung abweichender Parameter noch die Faktoren $f_{(H/T)}$, $f_{(d/T)}$ und $f_{(k_1/k_2)}$ zu bestimmen. Dazu wurde allen Berechnungsergebnissen der Start- bzw. Grundparameter H/T ($= 0,50$), d/T ($= 0,03$) und k_1/k_2 ($= 10^4$) in der dimensionslosen Form $\Delta h/s \cdot 10^3$ der Wert ($= 1,00000$) zugewiesen. Die infolge der Variation des jeweiligen Start- bzw. Grundparameters erhaltenen Berechnungsergebnisse in der dimensionslosen Form $\Delta h/s \cdot 10^3$ wurden anschließend zum vorgenannten Wert ins Verhältnis gesetzt. Dadurch ergaben sich entsprechende Dezimalzahlen (Faktoren), die entweder größer oder kleiner als der Wert ($= 1,00000$) sind. Die erhaltenen Faktoren sind im **Anhang Q** wie folgt aufgeführt.

- Faktoren $f_{(H/T)}$ (Tabelle 2.1 bis 2.3)
- Faktoren $f_{(d/T)}$ (Tabelle 3.1 bis 3.3)
- Faktoren $f_{(k_1/k_2)}$ (Tabelle 4.1 bis 4.3)

In Anlehnung an die Gleichungen (4.26) und (5.2) lässt sich die Veränderung der Grundwasserverhältnisse Δh (Aufstau - Δh bzw. Absenkung + Δh) mit den erhaltenen Formfaktoren und Faktoren, wie in Gleichung (5.5) dargestellt, umformen.

$$\pm \Delta h = f_{(r/s)}^{k_{(1)}} \cdot f_{(H/T)}^{k_{(2)}} \cdot f_{(d/T)}^{k_{(3)}} \cdot f_{(k_1/k_2)}^{k_{(4)}} \cdot s \quad (5.5)$$

Da derzeit keine genaueren Erkenntnisse vorliegen, wurden sämtliche Exponenten $k_{(1)}$ bis $k_{(4)}$ mit dem Wert ($= 1$) versehen. Eine davon abweichende Festlegung kann nur auf der Grundlage einer zeitaufwändig durchgeführten Sensitivitätsanalyse getroffen werden. Diese wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt und stellt somit einen weiterführenden wissenschaftlichen Untersuchungsumfang dar. Um dennoch eine erste grobe Einschätzung hinsichtlich der Genauigkeitsauswirkung dieser Festlegung zu erhalten, wird dies im Abschnitt 5.2.1 in Form von Anwendungsbeispielen diskutiert.

5.1.2 Einfluss der Dicke des Dichtungssystems

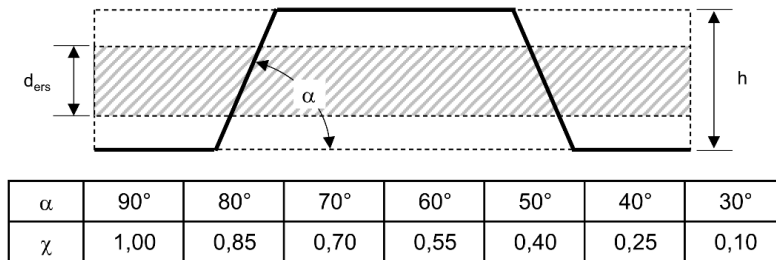
Im Rahmen der Parameterstudie wurden die numerischen Untersuchungen an den Berechnungsmodellen Nr. 1 bis 5 sowie dem Modell „DW1000“ durchgeführt. Diese Modelle weisen hinsichtlich der Bogenform (r/s) unterschiedliche bogenförmige Dichtungssysteme bzw. eine gerade Dichtwand auf, wobei die Dicke des Dichtungssystems mit d ($= 1$ m) bei sämtlichen Modellen konstant ist. In der Praxis kommen aufgrund der unterschiedlichen Dichtungssysteme überwiegend Bauteildicken zur Ausführung, die von der verwendeten Referenzdicke d_{ref} ($= 1$ m) in den Berechnungsmodellen abwei-

chen. Bei einer Vernachlässigung der unterschiedlichen Bauteildicken im Berechnungsansatz ist gemäß den Untersuchungsergebnissen im Abschnitt 4.2.6 mit entsprechenden Abweichungen, wie etwa beim Verfahren von Schneider (Gleichung (2.21)), zu rechnen.

Auf eine Variation der Bauteildicken im Zuge der numerischen Untersuchungen wurde aufgrund des enormen Arbeitsaufwandes bei bogenförmigen Strukturen verzichtet, da jede Bauteildicke ein eigenes Berechnungsmodell erfordert. Eine von der verwendeten Referenzdicke $d_{\text{ref}} (= 1 \text{ m})$ abweichende Bauteildicke d des Dichtungssystems lässt sich lediglich in Form des Faktors $f_{(d/T)}$ berücksichtigen. Bei einer vorhandenen Mächtigkeit des Grundwasserleiters T ändert sich das Verhältnis d/T in Abhängigkeit des eingesetzten Dichtungssystems mit der jeweiligen Bauteildicke d und somit der Faktor $f_{(d/T)}$. Darüber hinaus weisen die verschiedenen Dichtungssysteme unterschiedliche Systemdurchlässigkeiten k_2 auf, so dass eine weitere Berücksichtigung durch den Faktor $f_{(k_1/k_2)}$ gegeben ist.

Dem Einfluss der Dicke des Dichtungssystems wird durch entsprechende Anwendungsbeispiele im Abschnitt 5.2.1 stichprobenartig nachgegangen. Dabei erfolgt zum einen eine genaue Betrachtung bei der Modellierung und zum anderen eine Plausibilisierung der Berechnungsergebnisse.

Im Vergleich zu den im Abschnitt 2.5.2 beschriebenen Dichtungssystemen ergeben sich für die Spundwand aufgrund der geometrischen Besonderheiten gewisse Schwierigkeiten bei der sinnvollen Angabe der Bauteildicke d . Die reine Angabe der Stahldicke des Spundwandprofils (z. B. 20 mm) führt bei Mächtigkeiten des Grundwasserleiters T ($= 5 \text{ m}$ bzw. 25 m) zu Verhältnissen d/T ($= 0,004$ bzw. $0,0008$), die im Rahmen der numerischen Berechnungen aus Gründen der Modellierung nicht bestimmt werden konnten. Vor diesem Hintergrund war eine realitätsnahe Ersatzbauteildicke d_{ers} zu ermitteln. Bei der Ermittlung der vertikalen Tragfähigkeit (charakteristische Fußwiderstände) von geramnten Spundwänden werden z. B. nach den Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“ (4. Auflage 2006) die geometrischen Besonderheiten bei der Bestimmung der wirksamen Fuß- bzw. Aufstandsflächen in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel des Spundwandprofils berücksichtigt (DGGT 2006). Dieser Ansatz ist in abgewandelter Form zur Bestimmung einer Ersatzbauteildicke d_{ers} in Abb. 5-1 dargestellt und wird zur weiteren Anwendung vorgeschlagen.



Zwischenwerte können interpoliert werden.

Abb. 5-1: Ersatzbauteildicke d_{ers} bei Spundwänden (Abgewandelt von: DGGT, 2006)

In Verbindung mit der Darstellung in Abbildung 5-1 errechnet sich die Ersatzbauteildicke d_{ers} in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel α des Spundwandprofils nach Gleichung (5.6).

$$d_{ers} = \chi \cdot h \quad (5.6)$$

Der Abminderungsfaktor χ ist hierbei der Abbildung 5-1 zu entnehmen.

Um die Größenordnung der möglichen Ersatzbauteildicken einschätzen zu können, wurden anhand von Herstellerangaben in (ArcelorMittal 2019) und (ThyssenKrupp 2007) für einige Spundwandprofile die entsprechenden Ersatzbauteildicken ermittelt und in Tabelle 5-1 aufgeführt.

Tab. 5-1: Ersatzbauteildicken d_{ers} für einige Spundwandprofile

Hersteller	Spundwandprofil von ... bis	h von / bis [mm]	α von / bis [°]	d_{ers}
				von / bis [m]
ArcelorMittal	AZ 18-800 ... 27-800	449 / 476	51,8 / 52,9	0,19 / 0,21
ArcelorMittal	AZ 28-750 ... 32-750	509 / 511	58,9 / 58,9	0,27 / 0,27
ArcelorMittal	AZ 12-700 ... 52-700	344 / 505	39,5 / 63,2	0,08 / 0,30
ArcelorMittal	AZ 12-770 ... 14-770	344 / 345	39,5 / 39,5	0,08 / 0,08
ArcelorMittal	AZ 18 ... 50	380 / 483	55,4 / 71,5	0,18 / 0,35
ArcelorMittal	AU 14 ... 25	408 / 450	47,8 / 59,6	0,15 / 0,24
ArcelorMittal	PU 12 ... 32	360 / 452	50,4 / 68,1	0,15 / 0,30
ArcelorMittal	GU 6N ... 33N	309 / 452	42,5 / 68,1	0,09 / 0,30
ThyssenKrupp	LARSEN 600 ... 607n	150 / 452	37,0 / 55,9	0,03 / 0,22
ThyssenKrupp	LARSEN 22 ... 25	340 / 420	54,7 / 62,1	0,16 / 0,24
ThyssenKrupp	HOESCH 1706 ... 2706	380 / 430	50,0 / 57,0	0,15 / 0,22
ThyssenKrupp	HOESCH 1105 ... 3806	260 / 485	50,0 / 66,0	0,10 / 0,31

Hierbei ist zu erkennen, dass sich für Spundwandprofile von ArcelorMittal Ersatzbauteildicken in der Größenordnung von 0,08 m bis 0,35 m und für Spundwandprofile von ThyssenKrupp Ersatzbauteildicken in der Größenordnung von 0,03 m bis 0,31 m ergeben. Mit zunehmender Einbringtiefe und bei entsprechenden Baugrundverhältnissen (z. B. schwere Rammung) sind Spundwände mit größeren Widerstandsmomenten auszuwählen. Somit steigt zwangsläufig die Ersatzbauteildicke d_{ers} . Mit den Ersatzbauteildicken d_{ers} (= 0,08 m bzw. 0,35 m) ergeben sich bei Mächtigkeiten des Grundwasserleiters T (= 5 m bzw. 25 m) Verhältnisse d/T (= 0,016 bzw. 0,014). In diesen Fällen wird vorgeschlagen, ein Verhältnis von d/T (= 0,02) zu wählen. In einzelnen Fällen sind auch Verhältnisse bis d/T (= 0,04) möglich.

5.1.3 Vorschlag für einen Berechnungsansatz

Im Abschnitt 5.1.1 wurden die Formfaktoren $f_{y,(r/s)}$ und $f_{x,(r/s)}$, zur Berücksichtigung der jeweiligen Bogenform des Dichtungssystems, auf der Grundlage des bewährten Berechnungsansatzes von Schneider (Gleichung (2.21)) bestimmt. Darüber hinaus wurden zur Berücksichtigung abweichender Parameter gegenüber den festgelegten Start- bzw. Grundparametern zusätzlich die Faktoren $f_{(H/T)}$, $f_{(d/T)}$ und $f_{(k1/k2)}$ herausgearbeitet. Anhand der numerischen Untersuchungen im Abschnitt 4.3.6 konnte festgestellt werden, dass das hydraulische Gefälle i ebenfalls einen Einfluss auf die Veränderung der Grundwasserverhältnisse Δh (Aufstau - Δh bzw. Absenkung + Δh) ausübt. Auf der Grundlage der numerischen Berechnungsergebnisse ist außerdem abzuleiten, dass, unabhängig von der Bogenform, die Grundwasserveränderung in y -Richtung von der Größe der Sehne s und in x -Richtung von der Größe der Pfeilhöhe h_p abhängt. Damit wird die Erkenntnis von Schneider (1995) bestätigt, dass für den von Bauwerken hervorgerufenen Grundwasseraufstau vorrangig die Bauwerksbreite maßgebend ist, welche den Grundwasserstrom versperrt und nicht die Erstreckung des Bauwerkes in Richtung des Grundwasserstroms ausschlaggebend ist. Durch das Einsetzen von $i \cdot s/2$ bzw. von $i \cdot h_p/2$ anstelle von s in Gleichung (5.5) erhält man die maximale Grundwasserveränderung in y - und x -Richtung mit den Gleichungen (5.7) und (5.8).

$$\pm \Delta h_{y,max} = f_{y,(r/s)} \cdot f_{y,(H/T)} \cdot f_{y,(d/T)} \cdot f_{y,(k1/k2)} \cdot i \cdot \frac{s}{2} \quad (5.7)$$

$$\pm \Delta h_{x,max} = f_{x,(r/s)} \cdot f_{x,(H/T)} \cdot f_{x,(d/T)} \cdot f_{x,(k1/k2)} \cdot i \cdot \frac{h_p}{2} \quad (5.8)$$

Das hydraulische Gefälle i ist in den Gleichungen (5.7) und (5.8) als dimensionslose Dezimalzahl einzusetzen. Die richtige Auswahl und Anwendung der Faktoren wird anhand von Anwendungsbeispielen im Unterkapitel 5.2 erläutert.

Durch die numerischen Untersuchungen im Abschnitt 4.3.7 konnte gezeigt werden, dass die Veränderung der Grundwasserverhältnisse Δh (Aufstau - Δh bzw. Absenkung + Δh) bei bogenförmigen Dichtungssystemen ausgehend vom Anströmwinkel ϑ ($= 0^\circ$) bis zum Anströmwinkel ϑ ($= 90^\circ$) deutlich bis zum Wert $\pm\Delta h_{x,max}$ abnimmt. Beim geraden Dichtungssystem hingegen nimmt $\pm\Delta h_{x,max}$, aufgrund des fehlenden Strömungswiderstandes in x-Richtung den Wert Null an. Dies wird im Berechnungsansatz von Schneider (Gleichung (2.21)) durch $\cos \vartheta$ berücksichtigt. Mit diesem Berechnungsansatz ist im Fall bogenförmiger Dichtungssysteme allerdings keine Berücksichtigung der durch den Anströmwinkel ϑ hervorgerufenen senkrechten und parallel zum Bauwerk bzw. zum Dichtungssystem verlaufenden Strömungskomponenten möglich. Aus diesem Grund wurde auf den Berechnungsansatz von Schneider (Gleichung (2.26)) zurückgegriffen. Dieser Ansatz bezieht sich zum einen auf eine Ellipse und zum anderen auf den von der x-Achse ausgehenden Anströmwinkel α . Vor diesem Hintergrund wird (Gleichung (2.26)) entsprechend der folgenden Überlegungen in Gleichung (5.9) abgewandelt:

- Aufgrund der bogenförmigen Dichtungssysteme (Kreisbogen) wird auf den Anteil der Signumfunktion verzichtet.
- Durch den Bezug des Anströmwinkels ϑ auf die y-Achse sind die Winkelfunktionen entsprechend zu vertauschen.

$$\pm\Delta h_{\vartheta,um} = \sqrt{(\Delta h_{y,max} \cdot \cos \vartheta)^2 + (\Delta h_{x,max} \cdot \sin \vartheta)^2} \quad (5.9)$$

Die vorgenannten analytischen Berechnungsansätze bauen zum einen auf den analytischen Berechnungsansätzen von Schneider auf und berücksichtigen zum anderen die numerischen Ergebnisse der untersuchten bogenförmigen Dichtungssysteme einschließlich der beschriebenen Modellparameter. Sie sollen im Rahmen von Voruntersuchungen oder auch Vorplanungen eine überschlägige Abschätzung der zu erwartenden maximalen Veränderungen der Grundwasserverhältnisse Δh (Aufstau - Δh bzw. Absenkung + Δh) infolge vollkommener bogenförmiger Dichtungssysteme ermöglichen. Vor diesem Hintergrund ist eine schnelle und einfache Handhabung des Berechnungsansatzes mit den entsprechenden Formfaktoren und Faktoren einem rechnerisch präziseren Ergebnis vorzuziehen.

Deshalb sind die im **Anhang Q** aufgeführten Tabellen untereinander entsprechend erneut überprüft worden. An den Formfaktoren $f_{y,(r/s)}$ und $f_{x,(r/s)}$ in Tabelle 1 (vgl. **Anhang Q**) ergaben sich keine Änderungen (siehe Tabelle 5-2).

Tab. 5-2: Formfaktoren $f_{y,(r/s)}$ und $f_{x,(r/s)}$ bei konvexer und konkaver Anströmung

Verhältnis r/s	konvex Anstrom/ Aufstau (-)	konvex Abstrom/ Absenk. (+)	konkav Anstrom/ Aufstau (-)	konkav Abstrom/ Absenk. (+)	konvex = konkav Aufstau (-)	konvex = konkav Absenk. (+)
	$f_{y,(r/s)}$ [-]	$f_{y,(r/s)}$ [-]	$f_{y,(r/s)}$ [-]	$f_{y,(r/s)}$ [-]	$f_{x,(r/s)}$ [-]	$f_{x,(r/s)}$ [-]
0,50	0,61429	1,36095	1,32857	0,67429	0,86286	0,87238
0,55	0,64000	1,17579	1,14105	0,68526	0,90215	0,90543
0,65	0,68625	1,10500	1,07375	0,72375	0,92151	0,92684
1,00	0,76167	1,02167	0,99500	0,79000	0,93301	0,94545
2,00	0,84000	0,96857	0,95143	0,85714	0,89977	0,89977

Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass die Faktoren $f_{y,(H/T)}$ für den Anstrom/Aufstau sowie den Abstrom/die Absenkung bei einer konvexen Anströmung in y-Richtung lediglich bis zu $\pm 3,2\%$ voneinander abweichen. Bei der konkaven Anströmung (y-Richtung) ergibt sich eine Abweichung von bis zu $\pm 3,6\%$. In x-Richtung ergeben sich hingegen Abweichungen von bis zu $\pm 5,3\%$.

Da die Abweichungen für einen analytischen Berechnungsansatz zur überschlägigen Abschätzung als gering einzuschätzen waren, erfolgte eine Zusammenfassung der Faktoren aus den Tabellen 2.1 bis 2.3 (vgl. **Anhang Q**) durch Bildung eines arithmetischen Mittels. Dadurch ergibt sich eine deutliche Vereinfachung ($f_{y,(H/T)} = f_{x,(H/T)}$, konvex = konkav und Aufstau = Absenkung). Die Faktoren $f_{y,(H/T)} = f_{x,(H/T)}$ sind in Tab. 5-3 dargestellt (Zwischenwerte für H/T dürfen interpoliert werden).

Tab. 5-3: Faktoren $f_{y,(H/T)} = f_{x,(H/T)}$ bei konvexer = konkaver Anströmung

Verhältnis H/T	r/s = 0,50	r/s = 0,55	r/s = 0,65	r/s = 1,00	r/s = 2,00
	Aufstau (-)/ Absenk. (+)	Aufstau (-)/ Absenk. (+)	Aufstau (-)/ Absenk. (+)	Aufstau (-)/ Absenk. (+)	Aufstau (-)/ Absenk. (+)
	$f_y = f_x$ [-]	$f_y = f_x$ [-]	$f_y = f_x$ [-]	$f_y = f_x$ [-]	$f_y = f_x$ [-]
0,20	0,78911	0,81620	0,85829	0,91452	0,96809
0,30	0,91409	0,92772	0,94642	0,96853	0,99326
0,50	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,70	1,02513	1,02048	1,01400	1,00880	1,00160
0,80	1,03089	1,02551	1,01929	1,01045	1,00160

Die Überprüfung der Faktoren $f_{y,(d/T)}$ für den Anstrom/Aufstau sowie den Abstrom/die Absenkung bei einer konvexen Anströmung in y-Richtung ergeben Abweichungen von bis zu $\pm 3,5\%$. Bei der konkaven Anströmung in y-Richtung sind Abweichungen von bis zu $\pm 3,75\%$ festgestellt worden. Die Abweichungen in x-Richtung betragen hingegen bis

zu $\pm 5,3\%$. Auch für diesen Faktor war zur Vereinfachung ($f_{y,(d/T)} = f_{x,(d/T)}$, konvex = konkav und Aufstau = Absenkung) des analytischen Berechnungsansatzes eine Zusammenfassung der Faktoren aus den Tabellen 3.1 bis 3.3 (vgl. **Anhang Q**) durch Bildung eines arithmetischen Mittels gerechtfertigt. In Tabelle 5-4 sind die Faktoren $f_{y,(d/T)} = f_{x,(d/T)}$ dargestellt (Zwischenwerte für d/T dürfen interpoliert werden).

Tab. 5-4: Faktoren $f_{y,(d/T)} = f_{x,(d/T)}$ bei konvexer = konkaver Anströmung

Verhältnis d/T	$r/s = 0,50$	$r/s = 0,55$	$r/s = 0,65$	$r/s = 1,00$	$r/s = 2,00$
	Aufstau (-)/ Absenk. (+) $f_y = f_x$ [-]	Aufstau (-)/ Absenk. (+) $f_y = f_x$ [-]	Aufstau (-)/ Absenk. (+) $f_y = f_x$ [-]	Aufstau (-)/ Absenk. (+) $f_y = f_x$ [-]	Aufstau (-)/ Absenk. (+) $f_y = f_x$ [-]
0,02	1,02850	1,02411	1,01539	1,00970	1,00160
0,03	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,04	0,96079	0,96672	0,97739	0,98851	0,99681
0,05	0,91409	0,92772	0,94642	0,96853	0,99326
0,06	0,86423	0,88343	0,91278	0,95019	0,98848
0,07	0,81403	0,83834	0,87634	0,92434	0,98377
0,08	0,76528	0,79329	0,84003	0,90438	0,96533

Abschließend erfolgten die Untersuchungen der Faktoren $f_{y,(k_1/k_2)}$ für den Anstrom/Aufstau sowie den Abstrom/die Absenkung bei einer konvexen Anströmung in y-Richtung. Dabei ist festzustellen, dass die Abweichungen bis zu $\pm 12,72\%$ betragen. Bei der konkaven Anströmung in y-Richtung ergeben sich Abweichungen von bis zu $\pm 7,85\%$. In x-Richtung betragen die Abweichungen lediglich bis zu $\pm 6,25\%$.

Gegenüber den vorgenannten Faktoren sind die Abweichungen deutlich größer, so dass lediglich eine Zusammenfassung der Faktoren aus den Tabellen 4.1 bis 4.3 (vgl. **Anhang Q**) getrennt in y- und x-Richtung durch Bildung eines arithmetischen Mittels erfolgte. Dadurch ergibt sich eine Vereinfachung (konvex = konkav und Aufstau = Absenkung). Die Faktoren $f_{y,(H/T)}$ sind in Tab. 5-5 und die Faktoren $f_{x,(H/T)}$ in Tab. 5-6 dargestellt (Zwischenwerte für k_1/k_2 dürfen interpoliert werden).

Mit dem vorgeschlagenen analytischen Berechnungsansatz gemäß der Gleichungen (5.7) bis (5.9) lassen sich in Verbindung mit den Formfaktoren in Tab. 5-2 und den Faktoren in den Tabellen 5-3 bis 5-6 die zu erwartenden maximalen Veränderungen der Grundwasserverhältnisse Δh (Aufstau - Δh bzw. Absenkung + Δh) infolge vollkommener bogenförmiger Dichtungssysteme überschlägig abschätzen.

Um zu einer ersten Einschätzung hinsichtlich der Genauigkeit des vorgeschlagenen Berechnungsansatzes sowie der Sensitivität bei veränderten Parametern gegenüber

den numerischen Untersuchungen zu gelangen, erfolgt im Abschnitt 5.2.1 anhand von drei Anwendungsbeispielen ein Vergleich zwischen den numerischen und analytischen Ergebnissen.

Tab. 5-5: Faktoren $f_{y,(k1/k2)}$ bei konvexer = konkaver Anströmung

Verhältnis k_1/k_2	$r/s = 0,50$	$r/s = 0,55$	$r/s = 0,65$	$r/s = 1,00$	$r/s = 2,00$
	Aufstau (-)/ Absenk. (+)	Aufstau (-)/ Absenk. (+)	Aufstau (-)/ Absenk. (+)	Aufstau (-)/ Absenk. (+)	Aufstau (-)/ Absenk. (+)
	$f_{y,(k1/k2)}$ [-]	$f_{y,(k1/k2)}$ [-]	$f_{y,(k1/k2)}$ [-]	$f_{y,(k1/k2)}$ [-]	$f_{y,(k1/k2)}$ [-]
100	0,04291	0,05196	0,06245	0,08489	0,13898
250	0,10282	0,12283	0,14790	0,19452	0,29772
1.000	0,32865	0,38061	0,43455	0,51913	0,65401
2.500	0,59248	0,64951	0,69976	0,76591	0,85069
5.000	0,81244	0,84795	0,87514	0,90796	0,94470
7.500	0,92827	0,94366	0,95459	0,96832	0,98023
10.000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
25.000	1,16239	1,12043	1,09357	1,06455	1,03478
100.000	1,26570	1,19241	1,14654	1,10058	1,05373
1.000.000	1,30075	1,21589	1,16399	1,11132	1,05922

Tab. 5-6: Faktoren $f_{x,(k1/k2)}$ bei konvexer = konkaver Anströmung

Verhältnis k_1/k_2	$r/s = 0,50$	$r/s = 0,55$	$r/s = 0,65$	$r/s = 1,00$	$r/s = 2,00$
	Aufstau (-)/ Absenk. (+)	Aufstau (-)/ Absenk. (+)	Aufstau (-)/ Absenk. (+)	Aufstau (-)/ Absenk. (+)	Aufstau (-)/ Absenk. (+)
	$f_{x,(k1/k2)}$ [-]	$f_{x,(k1/k2)}$ [-]	$f_{x,(k1/k2)}$ [-]	$f_{x,(k1/k2)}$ [-]	$f_{x,(k1/k2)}$ [-]
100	0,09440	0,12704	0,15849	0,21851	0,35000
250	0,20637	0,26497	0,31701	0,39737	0,55000
1.000	0,52362	0,59891	0,65707	0,73509	0,82500
2.500	0,76511	0,81488	0,85014	0,89404	0,92500
5.000	0,90670	0,92922	0,94525	0,96026	0,97500
7.500	0,96707	0,97640	0,98271	0,98675	1,00000
10.000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
25.000	1,06476	1,04718	1,03458	1,02649	1,00000
100.000	1,10098	1,07259	1,05764	1,03974	1,02500
1.000.000	1,11415	1,08167	1,06340	1,04640	1,02500

5.1.4 Verlauf der Grundwasserbeeinflussung (Aufstau-/Absenkungskurven)

Mit dem in Abschnitt 5.1.3 vorgeschlagenen analytischen Berechnungsansatz lassen sich lediglich die maximalen Veränderungen der Grundwasserverhältnisse Δh (Aufstau - Δh bzw. Absenkung + Δh) infolge vollkommener bogenförmiger Dichtungssysteme rechnerisch bestimmen. Für einen vom bogenförmigen Dichtungssystem entfernten Ort (x - und y -Koordinate) lässt sich die Veränderung der Grundwasserverhältnisse Δh (Aufstau - Δh bzw. Absenkung + Δh) hingegen nicht bestimmen. Hier besteht weiterführender wissenschaftlicher Untersuchungsbedarf. Eventuell besteht die Möglichkeit, den vorgeschlagenen analytischen Berechnungsansatz (vgl. Gleichungen (5.7) bis (5.9)) auf den bewährten Berechnungsansatz von Schneider (Gleichung (2.20)) zu übertragen.

Bei den zahlreichen durchgeführten numerischen Untersuchungen ergab sich, dass ausgehend von der Mitte des bogenförmigen Dichtungssystems in y -Richtung die jeweils größten Aufstau- und Absenkungswerte auftreten. Ausgehend von dieser Mittelachse (y -Richtung) werden die Aufstau- und Absenkungswerte mit zunehmenden x -Werten zu beiden Rändern hin geringer. Die Grundwassergleichen verhalten sich ausgehend vom vollkommenen bogenförmigen Dichtungssystem ähnlich dem aus dem Grundbau bekannten druckzwiebelartigen Spannungsabbau im Baugrund unter Einzelfundamenten.

Mit dieser Erkenntnis ließ sich für eine vom bogenförmigen Dichtungssystem entfernte Stelle ($x = 0$ und y -Koordinate) die Veränderung der Grundwasserverhältnisse Δh (Aufstau - Δh bzw. Absenkung + Δh) anhand der Berechnungsergebnisse im Abschnitt 4.3.2 bestimmen. In GGU-2D-SSFLOW erfolgte für die nachfolgenden Bogenformen eine Umwandlung der erhaltenen Ergebnisplots in eine dwg-Datei:

- $r/s = 0,50$ (Modell/Bogenform 1)
- $r/s = 0,55$ (Modell/Bogenform 2)
- $r/s = 0,65$ (Modell/Bogenform 3)
- $r/s = 1,00$ (Modell/Bogenform 4)
- $r/s = 2,00$ (Modell/Bogenform 5)

Im CAD-System wurden daraufhin, ausgehend von der Mitte des bogenförmigen Dichtungssystems in y -Richtung, die Abstände y' zu den einzelnen Aufstau- und Absenkungswerten bestimmt. Die Ergebnisse wurden in EXCEL als dimensionslose Wertepaare in der Form Abstand y'/s vom Dichtungssystem bei $x/s = 0$ zum dimensionslosen Aufstau bzw. zur dimensionslosen Absenkung $\Delta h/s \cdot 10^3$ aufgetragen. Daraus ließen sich die im **Anhang R** aufgeführten Aufstau- bzw. Absenkungskurven ableiten.

Diese Aufstau- bzw. Absenkungskurven beziehen sich auf die bekannten Start- bzw. Grundparameter H/T ($= 0,50$), d/T ($= 0,03$) und k_1/k_2 ($= 10^4$). Bei davon abweichenden Parametern sind die entsprechenden Faktoren $f_{(H/T)}$, $f_{(d/T)}$ und $f_{(k_1/k_2)}$ zu bestimmen und zu berücksichtigen. Darüber hinaus sind außerdem das individuelle hydraulische Gefälle i und der Anströmwinkel ϑ zu bedenken.

Die richtige Auswahl und Anwendung der Faktoren sowie der Strömungsgrößen (i und ϑ) wird anhand von Anwendungsbeispielen im Unterkapitel 5.2 erläutert.

5.2 Anwendungsbeispiele und Diskussion

Im Unterkapitel 5.2 wird anhand von drei Anwendungsbeispielen die Genauigkeit des vorgeschlagenen Berechnungsansatzes sowie eine erste Abschätzung der Sensitivität bei veränderten Parametern untersucht. Hierzu erfolgt ein Vergleich zwischen den numerischen und analytischen Ergebnissen. Darüber hinaus wird überprüft, ob anhand der durchgeführten numerischen Untersuchungen eine Übertragung dieser Ergebnisse auch auf andere Bogenformen möglich ist. Abschließend wird noch die Anwendung der Aufstau- bzw. Absenkungskurven (vgl. **Anhang R**) erläutert.

5.2.1 Anwendung des vorgeschlagenen Berechnungsansatzes

Für die Anwendungsbeispiele werden folgende drei Bogenformen ausgewählt:

- $r/s = 0,58$ (Beispiel 1 - Modell/Bogenform 6)
- $r/s = 0,87$ (Beispiel 2 - Modell/Bogenform 7)
- $r/s = 2,63$ (Beispiel 3 - Modell/Bogenform 8)

Die Grunddaten, die Koordinaten der bogenförmigen Dichtwände (Bogenform) und das FE-Netz für die drei vorgenannten Beispielmuster sind in den **Anhängen S bis U** aufgeführt. Die maßgebenden Parameter für diese Anwendungsbeispiele sind in Tabelle 5-7 aufgelistet.

Die Güte der numerischen Berechnungsergebnisse hängt wesentlich von der gewählten Diskretisierung ab (vgl. Abschnitt 4.2.2). Darüber hinaus ist eine Vergleichbarkeit der numerischen Berechnungsergebnisse zwischen verschiedenen Berechnungsmodellen am ehesten gegeben, wenn z. B. eine idealisierte Abstufung der mittleren Flächengröße je Dreieckselement in Zuordnung zum geometrischen Verhältnis von Pfeilhöhe zu Sehne zur Anwendung gelangt. Dazu erfolgte im Abschnitt 4.2.2 eine Festlegung von 2.000 m^2 ($h_p/s = 0,5$) bis 2.300 m^2 ($h_p/s = 0,05$). Vor diesem Hintergrund ist die gewählte Diskretisierung als mittlere Fläche eines Dreieckselementes für jedes Berechnungs-

bzw. Beispielmodell in Zuordnung zum geometrischen Verhältnis von Pfeilhöhe zu Sehne h_p/s in Abbildung 5-2 dargestellt.

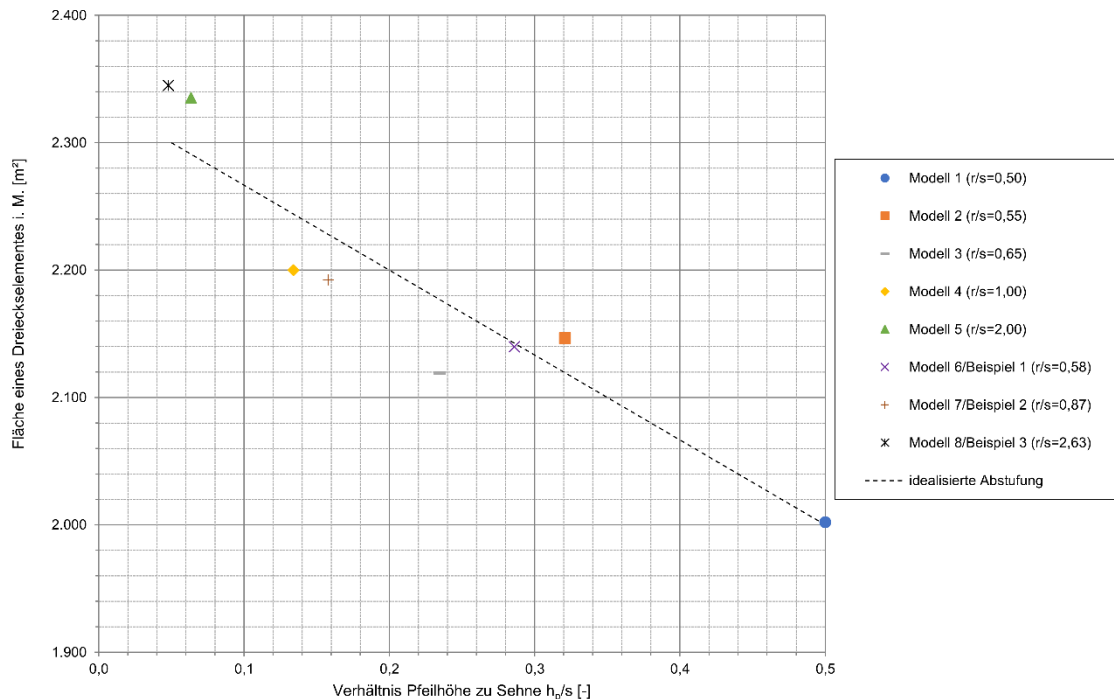


Abb. 5-2: Darstellung der gewählten Diskretisierung der Berechnungs-/Beispielmodelle in Form von mittlerer Fläche eines Dreieckselementes in Zuordnung zum geometrischen Verhältnis h_p/s . Gemäß Abbildung 5-2 entspricht die Diskretisierung des Modells 6 (Beispiel 1/ Bogenform $r/s = 0,58$) nahezu der idealisierten Abstufung. Die Diskretisierungen der Modelle 7 (Beispiel 2/Bogenform $r/s = 0,87$) und 8 (Beispiel 3/Bogenform $r/s = 2,63$) entsprechen in etwa denen der Modelle 4 und 5.

Die in Tab. 5-7 aufgeführten maßgebenden Parameter liefern die Grundlage für die numerischen und analytischen Berechnungen:

- Numerische Berechnung mit GGU-2D-SSFLOW
- Berechnungsvorschlag von Schloth (Gleichungen (5.7) bis (5.9))
- Berechnungsansatz von Schneider (Gleichung (2.21))
- Berechnungsansatz von Schneider (Gleichungen (2.22) bis (2.26))

Um die Berechnungsergebnisse im Detail nachvollziehen zu können, wurden die numerischen Ergebnisplots und die analytischen Berechnungen schrittweise ausgeführt und dargestellt. Dies betraf insbesondere die richtige Auswahl und Anwendung der Formfaktoren sowie Faktoren. Die detaillierten Berechnungen der drei Anwendungsbeispiele sind in den **Anhängen V bis X** aufgeführt.

Tab. 5-7: Maßgebende Parameter der gewählten Anwendungsbeispiele

Parameter	Beispiel 1 (Modell Nr. 6)	Beispiel 2 (Modell Nr. 7)	Beispiel 3 (Modell Nr. 8)
Radius r [m]	754	957	2.367
Sehne s [m]	1.300	1.100	900
Verhältnis r/s [-]	0,58	0,87	2,63
Pfeilhöhe h_p [m]	371,880	173,834	43,169
Verhältnis h_p/s [-]	0,286	0,158	0,048
Modellabmessung [m]	7.800 x 7.800	6.600 x 6.600	5.400 x 5.400
Fläche/ Δ -Element [m ²]	≈ 2.140	≈ 2.192	≈ 2.345
Dichtungssystem	Dichtwand	Spundwand (AU 25)	MIP-Wand
Anströmung	konvex	konkav	konvex & konkav
Dicke d bzw. d_{ers} [m]	0,60	0,24	0,40
Hydr. Gefälle i [‰]	0,75	0,25	1,13
Anströmwinkel ϑ [°]	36,52	72,37	53,46
Verhältnis H/T [-]	0,62	0,28	0,46
Verhältnis d/T [-]	0,024	0,037	0,043
Verhältnis k_1/k_2 [-]	$3,2 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^3$	$4,4 \cdot 10^4$

Bei der Anwendung der Gleichungen und Tabellen gemäß Abschnitt 5.1.3 waren zunächst für die jeweilige Bogenform (z. B. $r/s = 0,58$) die angrenzenden numerisch bestimmten Formfaktoren und Faktoren (z. B. $r/s = 0,55$ und $r/s = 0,65$) zu ermitteln. Dabei wurden bei den Anwendungsbeispielen 1 und 2 zur Bestimmung der Faktoren $f_{(H/T)}$, $f_{(d/T)}$ und $f_{(k_1/k_2)}$ die Zwischenwerte für H/T , d/T und k_1/k_2 interpoliert. Beim Anwendungsbeispiel 3 wurden diese hingegen ausnahmsweise – im Kontext der Zielsetzung der Übertragung auf andere Bogenformen (vgl. Unterkapitel 3.4) – extrapoliert. Anschließend wurden die maximalen Aufstau- und Absenkungswerte in y - und x -Richtung für die numerisch bestimmten Bogenformen (z. B. $r/s = 0,55$ und $r/s = 0,65$) mit den Gleichungen (5.7) und (5.8) berechnet, bevor eine Interpolation auf die jeweilige Bogenform (z. B. $r/s = 0,58$) erfolgte. Mit den interpolierten maximalen Aufstau- und Absenkungswerten in y - und x -Richtung ließen sich dann für den jeweiligen Anströmwinkel ϑ der Aufstau und die Absenkung $\pm \Delta h_{\vartheta,um}$ mit Gleichung (5.9) berechnen.

Sämtliche numerische und analytische Berechnungsergebnisse für den Aufstau - $\Delta h_{\vartheta,um}$ sind in Tabelle 5-8 aufgeführt.

Tab. 5-8: Vergleich der Berechnungsergebnisse der Beispiele 1 bis 3 für den Aufstau - $\Delta h_{\vartheta,um}$

(1) Beispiel (Modell) r/s Anström- ung	(2) Numerisch (GGU-SS- FLOW 2D) $\Delta h_{\vartheta,um}$ [m]	(3) Analytisch (Vorschlag Schloth) $\Delta h_{\vartheta,um}$ [m]	(4) Differenz (2) – (3) [m]	(5) Analytisch (Schneider Gerade) $\Delta h_{\vartheta,um}$ [m]	(6) Differenz (2) – (5) [m]	(7) Analytisch (Schneider Ellipse) $\Delta h_{\vartheta,um}$ [m]	(8) Differenz (2) – (7) [m]
1 (M6) r/s=0,58 konvex	-0,340	-0,321	-0,019	-0,392	0,052	-0,289	-0,051
2 (M7) r/s=0,87 konkav	-0,017	-0,025	0,008	-0,042	0,025	--- *	--- *
3 (M8) r/s=2,63 konvex	-0,229	-0,277	0,048	-0,303	0,074	-0,237	-0,008
3 (M8) r/s=2,63 konkav	-0,254	-0,287	0,033	-0,303	0,049	--- *	--- *

* Der Berechnungsansatz liefert für diesen Anwendungsfall keine sinnvollen Ergebnisse.

Beim Vergleich der Berechnungsergebnisse in Tab. 5-8 ist festzustellen, dass der vom Verfasser vorgeschlagene Berechnungsansatz bei den Anwendungsbeispielen 1 und 2 gegenüber der numerischen Lösung recht gute Ergebnisse mit geringen Abweichungen liefert. Beim Anwendungsbeispiel 3 nimmt die Genauigkeit beim vorgeschlagenen Berechnungsansatz aufgrund der Extrapolation der Formfaktoren entsprechend ab. Für hinreichend genaue Ergebnisse sollte deshalb eine Extrapolation auf Bogenformen bis $r/s \leq 2,50$ begrenzt werden. Der Ansatz von Schneider (1981) für langgestreckte rechteckige Bauwerke liefert eine sehr grobe Abschätzung des Aufstaus vertikaler vollkommener bogenförmiger Dichtungssysteme, dabei ist die Genauigkeit für eine konkave Anströmung deutlich höher als für eine konvexe Anströmung. *Anhand der Ergebnisse in Tab. 5-8 ist davon auszugehen, dass der Ansatz von Schneider (1995) für Bauwerke mit elliptischem Grundriss für flacher werdende Bogenformen $r/s \geq 2,00$ bei konvexer Anströmung sehr gute Ergebnisse für den Aufstau mit sehr geringen Abweichungen liefern kann.* Dies ist bei weiteren Untersuchungen zu prüfen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr durchgeführt werden.

In Tabelle 5-9 sind sämtliche numerische und analytische Berechnungsergebnisse für die Absenkung + $\Delta h_{\vartheta,um}$ aufgeführt.

Tab. 5-9: Vergleich der Berechnungsergebnisse der Beispiele 1 bis 3 für die Absenkung + $\Delta h_{\vartheta,um}$

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Beispiel (Modell)	Numerisch (GGU-SS- FLOW 2D)	Analytisch (Vorschlag Schloth)	Differenz (3) – (2)	Analytisch (Schneider Gerade)	Differenz (5) – (2)	Analytisch (Schneider Ellipse)	Differenz (7) – (2)
r/s	$\Delta h_{\vartheta,um}$	$\Delta h_{\vartheta,um}$	[m]	$\Delta h_{\vartheta,um}$	[m]	$\Delta h_{\vartheta,um}$	[m]
Anström- ung	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1 (M6)							
r/s=0,58	0,567	0,555	-0,012	0,392	-0,175	0,289	-0,278
konvex							
2 (M7)							
r/s=0,87	0,014	0,021	0,007	0,042	0,028	--- *	--- *
konkav							
3 (M8)							
r/s=2,63	0,265	0,290	0,025	0,303	0,038	0,237	-0,028
konvex							
3 (M8)							
r/s=2,63	0,243	0,280	0,037	0,303	0,060	--- *	--- *
konkav							

* Der Berechnungsansatz liefert für diesen Anwendungsfall keine sinnvollen Ergebnisse.

Gemäß der Berechnungsergebnisse in Tabelle 5-9 liefert der vom Verfasser vorgeschlagene Berechnungsansatz auch bei der Ermittlung der Absenkung für die Anwendungsbeispiele 1 und 2 gute Ergebnisse gegenüber der numerischen Lösung mit geringen Abweichungen. Aufgrund der Extrapolation der Formfaktoren beim Anwendungsbeispiel 3 nimmt die Genauigkeit beim vorgeschlagenen Berechnungsansatz entsprechend ab. Somit ist auch hier eine Begrenzung der Extrapolation auf Bogenformen bis $r/s \leq 2,50$ angezeigt. *Der Ansatz von Schneider (1981) für langgestreckte rechteckige Bauwerke liefert erst bei flacher werdenden Bogenformen eine grobe Abschätzung der Absenkung vertikaler vollkommener bogenförmiger Dichtungssysteme.* Ab welcher Bogenform r/s dies eintritt, ist durch weitere Untersuchungen zu verifizieren. Gemäß der Ergebnisse in Tab. 5-9 ist davon auszugehen, dass der Ansatz von Schneider (1995) für Bauwerke mit elliptischem Grundriss erst für flacher werdende Bogenformen $r/s \geq 2,00$ bei konvexer Anströmung gute Ergebnisse für die Absenkung mit geringen Abweichungen gegenüber der numerischen Lösung liefern kann. Dies ist bei weiteren Untersuchungen zu überprüfen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgen können.

Auf der Grundlage der an den drei Anwendungsbeispielen durchgeführten Berechnungen und Auswertungen lassen sich die Thesen aus den vorangegangenen Unterkapiteln und Abschnitten wie folgt bestätigen bzw. entkräften:

- Die Bogenform ändert sich zwischen den r/s -Verhältnissen 0,5 und 0,7 sehr stark, so dass für die numerischen Untersuchungen eine Auswahl der r/s -Werte 0,50, 0,55 und 0,65 erfolgte. Die Kernaussage, dass die Unterschiede bei den numerischen Untersuchungen in diesem Bereich deutlich größer ausfallen als zwischen den r/s -Verhältnissen von 1,0 bzw. 2,0 (vgl. Unterkapitel 3.4) lässt sich aufgrund der Ergebnisse in den Abschnitten 4.3.2 bis 4.3.5 bestätigen.
- Darüber hinaus wurde im Unterkapitel 3.4 davon ausgegangen, dass die numerischen Ergebnisse für die r/s -Verhältnisse von 1,0 bzw. 2,0 am ehesten mit den Ergebnissen des Bemessungsansatzes von Schneider (1981) für eine gerade Dichtwand verglichen werden können. Diese Annahme lässt sich anhand der Ergebnisse in den Tabellen 5-8 und 5-9 nicht bestätigen.
- Von den in Unterkapitel 3.4 festgelegten fünf Bogenformen wurde erwartet, dass auf der Grundlage der durchgeführten Überlegungen, Vorbetrachtungen und numerischen Untersuchungen zum einen eine adäquate Interpolation zwischen den Berechnungsergebnissen möglich ist und zum anderen eine Übertragung auf andere Bogenformen erfolgen kann. Anhand der Ergebnisse in den Tabellen 5-8 und 5-9 ist sowohl eine Interpolation ($0,50 \leq r/s \leq 2,00$) als auch eine begrenzte Extrapolation ($2,01 \leq r/s \leq 2,50$) der Bogenformen möglich.
- Nach Oertel (2009) ist grundsätzlich jede numerische Lösung fehlerbehaftet. Dies resultiert zum einen aus numerischen Fehlern, die infolge der mathematischen Diskretisierung und Rundungsfehlern auf der Rechenanlage (Computer) entstehen, und zum anderen aus Fehlern, die auf dem Einsatz der verwendeten physikalischen Modelle beruhen. Aus diesem Grund muss für jede untersuchte Geometrieklasse (hier Bogenform) die numerische Lösung entweder im Experiment (ggf. mit kalibrierten Grundwassermodellen) oder sofern möglich mit analytischen Lösungen verifiziert werden (vgl. Abschnitt 4.1.2). Hier bietet sich bei flacher werdenden Bogenformen und einer konvexen Anströmung für die Ermittlung des Aufstaus der Ansatz von Schneider (1995) für Bauwerke mit elliptischem Grundriss an. Zur Bestätigung dieser These sind weiterführende Untersuchungen erforderlich.
- In Gleichung (5.5) wurden aufgrund genauerer Erkenntnisse sämtliche Exponenten $k_{(1)}$ bis $k_{(4)}$ zunächst mit dem Wert (= 1) versehen (vgl. Abschnitt 5.1.1). Im Rahmen der drei Anwendungsbeispiele ist festzustellen, dass diese Festlegung in einer ersten Betrachtung keine negative Auswirkung auf die Genauigkeit hervorruft. Eine tief-

greifendere Einschätzung lässt sich allerdings erst auf der Grundlage einer intensiven Sensitivitätsanalyse treffen. Diese stellt einen weiterführenden wissenschaftlichen Untersuchungsauftrag dar.

- Im Abschnitt 5.1.2 wurde der Einfluss der Dicke des Dichtungssystems erörtert. In den numerischen Untersuchungen erfolgte einheitlich eine Verwendung der Referenzdicke d_{ref} ($= 1 \text{ m}$). In den drei Anwendungsbeispielen wurden davon abweichende Bauteildicken d des Dichtungssystems bei der Modellierung verwendet (s. Tab. 5-7). Dabei ist festzustellen, dass dünnere Bauteildicken im Verhältnis zum großen Gesamtmodell aufwendiger zu modellieren und zu diskretisieren sind. Anhand der Berechnungsergebnisse ist davon auszugehen, dass davon abweichende Bauteildicken d hinreichend genau mit den Faktoren $f_{(d/T)}$ und $f_{(k1/k2)}$ berücksichtigt werden.
- Die Genauigkeit des vom Verfasser vorgeschlagenen Berechnungsansatzes sowie die Sensitivität bei veränderten Parametern lässt sich zum derzeitigen Zeitpunkt nicht abschätzen (vgl. Abschnitt 5.1.3). Für eine erste Einschätzung werden dennoch die numerischen und analytischen Ergebnisse verglichen. Danach weicht der Aufstau bei einer konvexen bzw. konkaven Anströmung in einer Größenordnung von etwa -6 % bis +47 % vom numerischen Ergebnis ab. Bei der Absenkung liegt die Abweichung in einer Größenordnung von etwa -2 % bis +50 %. Hierbei führen besonders die Ergebnisse des Anwendungsbeispiels 2 zu hohen prozentualen Abweichungen.

Hierzu ist anzumerken, dass aufgrund der gewählten numerischen *Modellabmessungen* – die Modellbreite bzw. Modelllänge *entspricht der 6-fachen Sehnenlänge der bogenförmigen Dichtwand* – der vorgeschlagene analytische Berechnungsansatz auf einem Strömungsgebiet der vorgenannten Abmessungen beruht, in dem keine anderweitigen grundwasseraufstauenden Bauwerke vorhanden sind. Dies mag für ländlich geprägte Gebiete zutreffen, wird in urbanen Bereichen allerdings eher die Ausnahme sein. Bei der praktischen Anwendung im urbanen Bereich sind für das betreffende Strömungsgebiet zum einen im Vorfeld entsprechende Recherchen anzustellen und zum anderen die erhaltenen Ergebnisse kritisch zu hinterfragen.

Die in den drei Anwendungsbeispielen mit dem vorgeschlagenen Berechnungsansatz erhaltenen Resultate sind im Vergleich zu den numerischen Ergebnissen vielversprechend. Die mit dem analytischen Ansatz berechneten Ergebnisse sollen allerdings nur mit maximal zwei Nachkommastellen angegeben werden. Bis auf die Bogenform $r/s = 0,58$ liegen sämtliche Ergebnisse leicht über den numerischen Ergebnissen, so dass bei einer Anwendung die Abschätzung des maximalen Aufstaus bzw. der

maximalen Absenkung sehr wahrscheinlich „auf der sicheren Seite liegen“ wird. Darüber hinaus ist aufgrund der Formfaktoren und Faktoren eine individuelle Berücksichtigung der projektspezifischen Gegebenheiten möglich.

Dennoch bedarf es weiterführender Untersuchungen, um den vorgeschlagenen Berechnungsansatz abzusichern. Dies betrifft vor allem die zahlreiche Variation der verschiedenen Faktoren und den Ergebnisvergleich zwischen den analytischen und numerischen Berechnungsergebnissen. Darüber hinaus ist eine weiterführende Verifizierung anhand von kalibrierten und validierten Grundwassermodellen sowie Feldmessungen (Grundwassermonitoring) im Rahmen von derzeit in Planung bzw. Bau befindlichen Deichsanierungen unerlässlich.

5.2.2 Anwendung der Diagramme (Aufstau-/Absenkungskurven)

Die Anwendung der Aufstau- bzw. Absenkungskurven (s. **Anhang R**) wird anhand der im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Anwendungsbeispiele 1 und 2 nachfolgend erklärt. Darüber hinaus werden die erhaltenen Ergebnisse diskutiert.

Für jede der fünf numerisch untersuchten Bogenformen wurden sowohl für die konvexe als auch für die konkave Anströmung die dazugehörigen Aufstau- und Absenkungskurven abgeleitet. Somit ist der jeweilige Formfaktor $f_{y,(r/s)}$ im entsprechenden Kurvenverlauf bereits enthalten. Darüber hinaus liegen diesen Diagrammen die bekannten Start- bzw. Grundparameter H/T ($= 0,50$), d/T ($= 0,03$) und k_1/k_2 ($= 10^4$) zugrunde. In den überwiegenden Fällen werden die projektspezifischen Parameter davon abweichen, so dass zusätzlich zur Anwendung der Diagramme die entsprechenden Faktoren $f_{(H/T)}$, $f_{(d/T)}$ und $f_{(k_1/k_2)}$ bestimmt und berücksichtigt werden müssen. Dies trifft ebenfalls auf das hydraulische Gefälle i und den Anströmwinkel ϑ zu.

Bei der Erstellung des Berechnungsmodells im Abschnitt 4.2.1 erfolgte die Festlegung, dass die jeweilige Bogenform in der Modellmitte positioniert wird. Das bogenförmige vollkommene Dichtungssystem wird entsprechend so auf den Koordinatenursprung eingepasst, dass die halbe Sehne ($s/2$) und die halbe Pfeilhöhe ($h_p/2$) der Bogenform mit der Modellmitte des Berechnungsmodells übereinstimmen. Da die Aufstau- und Absenkungskurven allerdings von der Mitte des bogenförmigen Dichtungssystems in y -Richtung bestimmt wurden – da wo die Veränderungen der Grundwasserverhältnisse tatsächlich auftreten – (vgl. Abschnitt 5.1.4), muss zunächst eine Umrechnung von y in y' gemäß Gleichung (5.10) für die Seite des An- und Abstroms erfolgen.

$$y' = y \pm \frac{h_p}{2} \quad (5.10)$$

Im nächsten Schritt ist mit den vorgenannten Werten das Verhältnis y'/s (bei $x/s = 0$) für den An- und Abstrom zu bestimmen. Für das Anwendungsbeispiel 1 mit einer Bogenform von $r/s = 0,58$ und einer *konvexen Anströmung* waren im **Anhang R** die Diagramme mit den darüber bzw. darunter liegenden Bogenformen 2 ($r/s = 0,55$) und 3 ($r/s = 0,65$) auszuwählen. Diesen Diagrammen war mit dem Verhältnis y'/s für den Anstrom die jeweilige Aufstaukurve (konvex oder konkav) zu entnehmen und das dimensionslose Verhältnis bzw. der Faktor $\Delta h/s \cdot 1000$ abzulesen. Mit Auswahl des Verhältnisses y'/s für den Abstrom wurde mit der jeweiligen Absenkkurve (konvex oder konkav) das dimensionslose Verhältnis $\Delta h/s \cdot 1000$ abgelesen. Unter Berücksichtigung der Sehne s wurde mit diesem Faktor der dimensionsbehaftete Grundwert $\Delta h y'$ für den An- und Abstrom nach Gleichung (5.11) ermittelt.

$$\Delta h y' = f(\Delta h/s \cdot 1000) \cdot s/1000 \quad (5.11)$$

Anschließend waren die Faktoren $f_{y(H/T)}$, $f_{y(d/T)}$ und $f_{y(k1/k2)}$ zu bestimmen. Eine genaue Beschreibung ist **Anhang V** zu entnehmen. Zur Bestimmung des maximalen Aufstaus bzw. der maximalen Absenkung in y - Richtung wurde auf Gleichung (5.7) zurückgegriffen.

Aufgrund der vorhergehenden Ausführungen muss Gleichung (5.7) entsprechend abgewandelt werden, so dass die Berechnung nach Gleichung (5.12) erfolgt:

$$\pm \Delta h_{y,max(y';x=0)} = f_{y(H/T)} \cdot f_{y(d/T)} \cdot f_{y(k1/k2)} \cdot i \cdot \Delta h y' \quad (5.12)$$

Das hydraulische Gefälle i ist in Gleichung (5.12) als dimensionsbehaftete Dezimalzahl (z. B. = 1,0 ‰ anstelle 0,001) einzusetzen.

Die erhaltenen Ergebnisse beziehen sich auf die Standard-Bogenformen der ausgewählten Diagramme und müssen noch entsprechend interpoliert werden (s. z. B. **Anhang Y**). Mit dem interpolierten maximalen Aufstau bzw. der interpolierten maximalen Absenkung in y - Richtung wurde abschließend der Aufstau (-) und die Absenkung (+) für den jeweiligen Anströmwinkel nach Gleichung (5.13) berechnet:

$$\pm \Delta h_{\vartheta,um(y';x=0)} = \Delta h_{y,max} \cdot \cos \vartheta \quad (5.13)$$

Da der x -Anteil in der ursprünglichen Gleichung (5.9) entfällt, heben sich der quadrierte y -Anteil und die Wurzel entsprechend auf und Gleichung (5.13) verbleibt.

Die Anwendung der Aufstau- und Absenkungskurven für das **Beispiel 1** ist ausführlich im **Anhang Y** erklärt. In diesem Beispiel wird davon ausgegangen, dass sich im Bereich der Koordinaten ($x=0 / y=+800$) und ($x=0 / y=-1600$) wichtige Bauwerke befinden, für die die Auswirkungen der Änderung des Grundwasserstands infolge der bogenförmigen

vollkommenen Dichtwand zu untersuchen sind. Anhand des Ergebnisplots der numerischen Berechnung im **Anhang Y** lassen sich folgende Werte ablesen:

Standort (x=0 / y=+800): Aufstau $- 0,121 \text{ m} \leq \Delta h_{36,52;um(y';x=0)} \leq - 0,153 \text{ m}$

Standort (x=0 / y=-1600): Absenkung $+ 0,066 \text{ m} \leq \Delta h_{36,52;um(y';x=0)} \leq + 0,098 \text{ m}$

Die Anwendung der Diagramme in Verbindung mit den zuvor beschriebenen analytischen Modifikationen liefert folgende Werte für den jeweiligen Anströmwinkel:

Standort (x=0 / y=+800): Aufstau $\Delta h_{36,52;um(y';x=0)} = - 0,134 \text{ m}$

Standort (x=0 / y=-1600): Absenkung $\Delta h_{36,52;um(y';x=0)} = + 0,093 \text{ m}$

Beim Vergleich der vorgenannten numerischen und analytischen Berechnungsergebnisse ist zu erkennen, dass diese weitestgehend übereinstimmen und die Anwendung der Diagramme in diesem Fall ein hinreichend genaues Ergebnis zur Beantwortung der Fragestellung liefert. Für die praktische Anwendung der Diagramme wird empfohlen, die erhaltenen Ergebnisse mit maximal zwei Nachkommastellen anzugeben.

Die Anwendung der Aufstau- und Absenkungskurven für das **Beispiel 2** erfolgt ausführlich im **Anhang Z**. In diesem Beispiel wurde unterstellt, dass sich im Bereich der Koordinaten (x=0 / y=+480) und (x=0 / y=-380) wichtige Infrastrukturanlagen befinden, für die die Auswirkungen der Änderung des Grundwasserstands infolge der bogenförmigen vollkommenen Spundwand zu untersuchen sind. Der Ergebnisplot der numerischen Berechnung im **Anhang Z** liefert folgende Werte:

Standort (x=0 / y=+480): Absenkung $+ 0,003 \text{ m} \leq \Delta h_{72,37;um(y';x=0)} \leq + 0,005 \text{ m}$

Standort (x=0 / y=-380): Aufstau $- 0,004 \text{ m} \leq \Delta h_{72,37;um(y';x=0)} \leq - 0,005 \text{ m}$

Die Diagramme liefern in Verbindung mit den zuvor beschriebenen analytischen Modifikationen folgende Werte für den jeweiligen Anströmwinkel:

Standort (x=0 / y=+480): Absenkung $\Delta h_{72,37;um(y';x=0)} = + 0,007 \text{ m}$

Standort (x=0 / y=-380): Aufstau $\Delta h_{72,37;um(y';x=0)} = - 0,013 \text{ m}$

Der Vergleich von numerischer und analytischer Lösung zeigt, dass die Anwendung der Diagramme bei sehr geringen Aufstau- und Absenkungswerten zu Ungenauigkeiten führt. Allerdings ist davon auszugehen, dass bei geringen Aufstau- und Absenkungswerten eine derartige Detailuntersuchung im Rahmen der praktischen Anwendung kaum durchzuführen sein wird (vgl. hierzu **Anhang A**). Darüber hinaus liegen bei einem baubegleitenden Grundwassermonitoring die vorgenannten Werte beispielsweise im Rahmen der Messgenauigkeit der eingesetzten Messsysteme und Grundwasser-

messstellen. Vor diesem Hintergrund erscheinen mögliche Ungenauigkeiten bei der Anwendung der Diagramme (Aufstau-/Absenkungskurven) bei sehr geringen Aufstau- und Absenkungswerten akzeptabel.

*Abschließend ist festzuhalten, dass sich mit den im **Anhang R** aufgeführten fünf Diagrammen (Aufstau-/Absenkungskurven) für verschiedene vollkommene bogenförmige Dichtungssysteme die Veränderung der Grundwasserverhältnisse Δh (Aufstau - Δh bzw. Absenkung + Δh) an verschiedenen vom bogenförmigen Dichtungssystem entfernten Stellen (x- und y-Koordinate) näherungsweise bestimmen lässt.*

6 Zusammenfassung

Die Anwendung von Grundwassermodellen (numerische Strömungs- und Transportmodelle) zur Beantwortung von wasserwirtschaftlichen Fragestellungen hat sich als hydrogeologisches Werkzeug – hinsichtlich großräumiger Betrachtungen hydraulischer und hydrogeologischer Systemzusammenhänge – etabliert. Aufgrund der rechtlichen Rahmenbedingungen ist heute für viele Bauwerke die Beeinflussung des Grundwasserstromes zu betrachten. Hierbei werden verstärkt Berechnungen nach der Finiten-Elemente-Methode (FEM) angewendet. Damit lassen sich komplexe Fragestellungen sehr gut beantworten, dies allerdings in einer zeitaufwendigen und kostenintensiven Form.

Vor diesem Hintergrund ist es wünschenswert, dass z. B. für die Vorbemessung oder zur Plausibilitätsprüfung numerischer Ergebnisse geeignete analytische Berechnungsverfahren nutzbar sind. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, für Deichsanierungsmaßnahmen, bei denen bogenförmige Deichlinien vorhanden sind und die im Rahmen der Sanierung mit innenliegenden vollkommenen Dichtungssystemen ertüchtigt werden, den Einfluss auf die Grundwasserströmung anhand eines Berechnungsansatzes bzw. mittels Bemessungsdiagrammen für ausgewählte Fälle überschlägig abzuschätzen.

Im Rahmen der Vorbetrachtungen wurden in **Kapitel 2** zunächst die notwendigen Grundlagen der Hydrologie/ Hydrogeologie, benachbarter Fachgebiete und die vorhandenen analytischen Berechnungsverfahren erläutert. Es wurde festgelegt, dass sich die weiteren Untersuchungen ausschließlich auf Grundwassersysteme mit einem *Porengrundwasserleiter* konzentrieren, bei dem die Grundwasseroberfläche in einem *freien Grundwasserleiter* ansteht. Für die numerischen Untersuchungen wurden die beiden wichtigen Eingangsgrößen effektiver Porenanteil n_{Peff} und Durchlässigkeitsbeiwert k_f identifiziert. Es wurden grafische und rechnerische Verfahren zur Bestimmung des hydraulischen Gefälles i und der Fließrichtung α aus Messdaten von Grundwassermessstellen aufgezeigt.

Für die weiteren Betrachtungen wurden die *niedrigen und mittleren Wasserstände* ausgewählt. Des Weiteren wurde aufgezeigt, welche Dichtwandssysteme bei innenliegenden vollkommenen Dichtungssystemen im Deichbau vorrangig zur Anwendung gelangen und wie sich der Wirkungsgrad des Dichtungssystems in Abhängigkeit der äußeren Randbedingungen abschätzen lässt. Abschließend wurde ein Überblick über die vorhandenen analytischen Berechnungsverfahren gegeben, insbesondere die *Verfahren von Schneider (1981) für langgestreckte rechteckige Bauwerke* und von *Schneider (1995) für Bauwerke mit elliptischem Grundriss*. Diesen Berechnungs-

ansätzen liegt ein *konstanter, isotroper Durchlässigkeitsbeiwert* k_f und die *Gültigkeit des Gesetzes von Darcy* zugrunde.

Im **Kapitel 3** wurde zunächst ein kurzer Überblick über den Rhein und den Flussabschnitt in Nordrhein-Westfalen gegeben. Anschließend wurde das digitale Kartenmaterial für den verzeichneten Flussverlauf in NRW hinsichtlich eines Zusammenhangs mit dem empirischen Ansatz von Leopold et al. (1964) ausgewertet. Es wurden insgesamt 54 Messwerte (Kreisbögen) ermittelt. Die statistische Auswertung zeigte, dass etwa 94 % der Flusskurven ein Verhältnis von Krümmungsradius R zur Flussbreite B (R/B) von 2 bis 10 aufweist. Gegenüber den Untersuchungen von Leopold et al. (1964) ergaben sich entsprechende Abweichungen, die sehr wahrscheinlich auf anthropogene Veränderungen des Flusslaufes des Rheins zurückzuführen sind.

Dennoch liefert der empirische Ansatz von Leopold et al. (1964) eine erste Orientierung. Auf dieser Grundlage wurden für sämtliche Flusskurven anhand der Vereinbarung, dass der Krümmungsradius R der Flusskurve dem zugehörigen Radius r des Kreisbogens ($R = r$) entspricht, mit den geometrischen Zusammenhängen des Kreisbogens die Verhältnisse von Radius r zur Sehne s (r/s) bestimmt und ebenfalls statistisch ausgewertet. Die Ergebnisse zeigten, dass die r/s -Verhältnisse zwischen 0,4 und 2,0 mit einer relativen Häufigkeit von 93 % vertreten sind. Durch die abschließende Korrelationsanalyse zwischen R/B und r/s wurde festgestellt, dass 49 von 54 Flusskurven mit einem Verhältnis $R/B \leq 10$ ein Verhältnis $0,5 \leq r/s \leq 2,0$ aufwiesen. Auf der Grundlage der vorgenannten Ergebnisse wurden die möglichen Bogenformen ($r/s = 0,50; 0,55; 0,65; 1,00$ und $2,00$) für die numerischen Untersuchungen festgelegt.

Die im Rahmen der experimentellen numerischen Untersuchungen angewendete Methodik wurde in **Kapitel 4** dokumentiert. Hierzu zählen die Grundlagen, das verwendete Berechnungsmodell und die Parameterstudie.

Im Zuge der Strömungsanalyse stellte sich heraus, dass sich das Strömungsproblem des bogenförmigen vollkommenen Dichtungssystems durch eine zweidimensionale Modellierung (*2D-Strömung*) abbilden und sich der Strömungsprozess sowie die Fließzustände anhand der vorherrschenden Randbedingungen vereinfacht als *stationäre ungleichförmige Strömung* charakterisieren ließen. Im Rahmen der Modellanwendung eines *quadratischen 2D-Modells* wurden *Prognoseberechnungen mit veränderten Systemparametern sowie verschiedenen Eingangsgrößen* durchgeführt (Methode der Finiten-Elemente mit dem Programmsystem GGU-2D-SSFLOW). Hierbei wurden die Längen und Breiten der *Strömungsgebiete* derart gewählt, dass sie der *6-fachen Sehnenlänge* des bogenförmigen Dichtungssystems entsprechen.

Im Rahmen der Kalibrierung und Validierung konnte anhand des Berechnungsmodells „DW1000“ für eine geradlinige vollkommene Dichtwand mit einer Länge von 1.000 m gezeigt werden, dass die numerische Lösung lediglich 12 % von der analytischen Lösung abweicht und somit das numerische Modell grundsätzlich für die weiteren Untersuchungen geeignet ist. Die möglichen Einflussfaktoren konnten auf die vier dimensionslosen Verhältnisse r/s ; H/T ; d/T und k_1/k_2 eingegrenzt werden, zusätzlich waren die bekannten Einflussfaktoren hydraulisches Gefälle i und Anströmwinkel ϑ zu berücksichtigen.

Für jeden Parametersatz ergab sich der Einfluss auf die Grundwasserverhältnisse in Form eines Aufstaus bzw. einer Absenkung mit resultierender grafischer Darstellung, so dass sich allen untersuchten Einflussfaktoren ein gewisser Anteil an der Veränderung der Grundwasserverhältnisse zuschreiben ließ. Das tatsächliche Ausmaß der einzelnen Einflussfaktoren auf die Veränderung der Grundwasserverhältnisse, konnte im Rahmen der durchgeführten numerischen Untersuchungen nicht quantifiziert werden.

Deshalb wurden in **Kapitel 5** der Formfaktor und weitere Faktoren eingeführt und die zugehörigen Exponenten mit dem Wert (= 1) versehen. Eine Berücksichtigung der individuellen Bauteildicke d des jeweiligen Dichtungssystems kann indirekt erfolgen. Darüber hinaus wurde für die Besonderheit der Spundwand ein Vorschlag in Form einer Ersatzbauteildicke d_{ers} ausgearbeitet.

Zur Bestimmung der Formfaktoren $f_{(r/s)}$ für die fünf untersuchten Bogenformen wurden die numerischen Berechnungsergebnisse zu den analytischen Ergebnissen des Berechnungsansatzes von Schneider (1981) ins Verhältnis gesetzt. Darüber hinaus wurden die im Kapitel 4 erhaltenen Berechnungsergebnisse zu den jeweiligen Start- bzw. Grundparametern ins Verhältnis gesetzt, so dass sich für die Faktoren aussagekräftige Dezimalzahlen ergaben. Durch entsprechende Überlegungen konnten die analytischen Verfahren von Schneider (1981) und (1995) in abgewandelter Form, mit den vorgenannten Faktoren modifiziert und somit ein *Berechnungsansatz zur Abschätzung des maximalen Aufstaus bzw. der maximalen Absenkung für bogenförmige vollkommene Dichtungssysteme* vorgeschlagen werden.

Mit dem vorgenannten Berechnungsansatz lässt sich lediglich die maximale Veränderung der Grundwasserverhältnisse unmittelbar am Dichtungssystem und nicht für einen vom bogenförmigen Dichtungssystem entfernten Ort bestimmen. Deshalb wurden für die entsprechenden Bogenformen die Ergebnisse in CAD-lesbare Ergebnisplots umgewandelt und dimensionslose Aufstau- bzw. Absenkungskurven abgeleitet, die eine Abschätzung des Aufstaus bzw. der Absenkung für eine von der Dichtwand entfernte Stelle y' ermöglichen.

Sowohl die Anwendung des Berechnungsansatzes als auch der Bemessungsdiagramme wurde anhand von drei Anwendungsbeispielen veranschaulicht. Mit diesen Anwendungsbeispielen wurde gezeigt, dass der Berechnungsansatz für Bogenformen $0,50 \leq r/s \leq 2,50$ im Vergleich zu den numerischen Resultaten hinreichend genaue Ergebnisse liefert. Die mit dem analytischen Ansatz *berechneten Ergebnisse* sind lediglich mit *maximal zwei Nachkommastellen* anzugeben. Auch die Anwendung der Bemessungsdiagramme (Aufstau- bzw. Absenkungskurven) liefert akzeptable Ergebnisse für eine erste Abschätzung der Veränderung der Grundwasserverhältnisse im Abstand y' vom Dichtungssystem.

Abschließend ist festzuhalten, dass fast sämtliche Ergebnisse der Anwendungsbeispiele geringfügig über den numerischen Ergebnissen liegen, so dass bei einer Anwendung die Abschätzung des maximalen Aufstaus bzw. der maximalen Absenkung sehr wahrscheinlich „auf der sicheren Seite liegen“ wird. Aufgrund der Formfaktoren und Faktoren ist eine individuelle Berücksichtigung der projektspezifischen Gegebenheiten möglich.

Dennoch bedarf es *weiterführender Untersuchungen* um den vorgeschlagenen Berechnungsansatz abzusichern. Dies betrifft vor allem die zahlreichen Variationen der verschiedenen Faktoren und den Ergebnisvergleich zwischen den analytischen und numerischen Berechnungsergebnissen. Überdies bedarf eine abweichende Festlegung der Exponenten mit dem Wert ($\neq 1$) für den Formfaktor und die weiteren Faktoren einer zeitaufwändigen Sensitivitätsanalyse. Darüber hinaus ist eine *weiterführende Verifizierung* anhand von kalibrierten und validierten Grundwassermodellen sowie Feldmessungen (Grundwassermonitoring) im Rahmen von Deichsanierungen bzw. Deichneubauten unerlässlich.

Quellenverzeichnis

Bücher (Monographie)

Baumann, Eberhard (1999): Einfache Lagemessung und Nivellement. Bd. 1. 5., bearb. und erw. Aufl. Bonn: Dümmler (Dümmlerbuch, 7904).

Becker, Bernhard Peter Josef (2011): Zur gekoppelten numerischen Modellierung von unterirdischem Hochwasser. Aachen: Shaker (Mitteilungen / Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH).

Betz, Albert (1964): Konforme Abbildung. Zweite neubearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg.

Bronštejn, Il'ja N. (1995): Taschenbuch der Mathematik. 2., überarb. u. erw. Aufl. Thun: Deutsch.

Buja, Heinrich-Otto (2007): Praxishandbuch Ramm- und Vibrationstechnik. 1. Aufl. Berlin: Bauwerk.

Chiang, Wen-Hsing; Cordes, C.; Fang, S. Z.; Kinzelbach, Wolfgang; Rausch, Randolph; Sauty, Jean-Pierre; Voss, Axel (1996): Altlastenhandbuch des Landes Niedersachsen Materialienband. Berechnungsverfahren und Modelle. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg.

Dachler, Robert (1936): Grundwasserströmung. Wien: Julius Springer.

DGGT (2006): Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugruben". EAB. 4. Aufl., 2. Nachdruck 2009. Berlin: Ernst.

DGGT (2014): Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik - EANG. Berlin: Wiley.

Fachsektion Hydrogeologie in der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (2010): Hydrogeologische Modelle. Bedeutung des hydrogeologischen a-priori-Wissens. Hannover: Dt. Ges. für Geowiss (Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 70).

Giesecke, Jürgen; Heimerl, Stephan; Mosonyi, Emil (2014): Wasserkraftanlagen. Planung, Bau und Betrieb. 6., aktual. und erw. Aufl. Berlin: Springer Vieweg.

- Görtler, Heinrich (1975): Dimensionsanalyse. Theorie d. physikal. Dimensionen mit Anwendungen/Henry Görtler. Berlin <West>: Springer ((Ingenieurwissenschaftliche Bibliothek)).
- Herth, Walter; Arndts, Erich (1995): Theorie und Praxis der Grundwasserabsenkung. 3. Aufl.
- Höltig, Bernward; Coldewey, Wilhelm Georg (2013): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 8. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Jirka, Gerhard H.; Lang, Cornelia (2009): Einführung in die Gerinnehydraulik. 2. Aufl. Karlsruhe: Universitätsverlag.
- Kinzelbach, Wolfgang; Rausch, Randolph (1995): Grundwassermodellierung. Eine Einführung mit Übungen; mit 223 Abbildungen und 15 Tabellen sowie 2 Disketten. Berlin: Borntraeger.
- Könemann, Frank (1995): Beeinflussung des Grundwasserspiegels durch unterirdische Bauwerke. Zugl.: Essen, Univ., Diss., 1995. Essen: Verl. Glückauf (Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik / Universität, Gesamthochschule, Essen, 20).
- Kozeny, Josef (1953): Hydraulik. Ihre Grundlagen und Praktische Anwendung. Wien: Springer.
- Leopold, Luna Bergere; Wolman, Markley Gordon; Miller, John Preston (1964): Fluvial processes in geomorphology. San Francisco: Freeman (A series of books in geology).
- Liebscher, Hans-Jürgen; Baumgartner, Albert (1996): Lehrbuch der Hydrologie. 2. Aufl. Berlin: Borntraeger.
- Malcherek, Andreas (2019): Fließgewässer. Hydraulik, Hydrologie, Morphologie und Wasserbau (Lehrbuch).
- Mull, Rolf; Holländer, Hartmut (2002): Grundwasserhydraulik und -hydrologie. Eine Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer.

Oertel, Herbert; Böhle, Martin; Dohrmann, Ulrich (2009): Strömungsmechanik. Grundlagen - Grundgleichungen - Lösungsmethoden - Softwarebeispiele. 5., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden (Strömungsmechanik).

Peters, Heinz-Joachim; Balla, Stefan; Hesselbarth, Thorsten (2019): Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung. Handkommentar. 4. Auflage. Baden-Baden: Nomos (NomosKommentar).

Plate, Erich J. (1993): Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure. Mit 59 Tabellen. Berlin: Ernst

Schröder, Wolfgang; Römisch, Klaus (2001): Gewässerregelung - Binnenverkehrswasserbau. 1. Aufl. Düsseldorf: Werner (Werner-Ingenieur-Texte Wasserbau).

Wellmann, Susanne R.; Queitsch, Peter; Fröhlich, Klaus D. (2019): Wasserhaushaltsgesetz. Kommentar. 2. Aufl., rev. Ausg. Wiesbaden: Kommunal- und Schul-Verlag Wiesbaden.

Zienkiewicz, Olgierd Cecil (1984): Methode der finiten Elemente. O. C. Zienkiewicz. 2., erw. u. völlig Neubearb. Aufl. München, Wien: Hanser.

Bücher (Sammelwerk)

Berndt, Frank (2018): Einsatz von Stahlspundwänden im Spezialtiefbau. In: Klaus Eichler, Frank Berndt, Steffan Binde, Gebhard Dausch, Ulrich Höhne, Jens Hölterhoff et al. (Hg.): Spezialtiefbau. Erkundung und Ausführung - Technik und Umwelt - Methoden und Auswirkungen - Baustoffe und Verfahren. 5., neu bearbeitete Auflage. Renningen: expert (Kontakt & Studium, Band 566), S. 26–92.

Dittrich, Andreas; Aberle, Jochen; Koll, Katinka (2009): Kapitel 3 - Berechnungsverfahren naturnah gestalteter Fließgewässer. In: Hans-Peter Hack (Hg.): Flussbau. Hydraulische Berechnung, Wehre und Sohlenbauwerke, Ausleitungsbauwerke, Energieumwandlungsanlagen, Wasserkraftanlagen, Binnenverkehrswasserbau. 2. red. überarb. Aufl. Weimar, Hennef: Univ.-Verl.; DWA, S. 65–94.

Grabe, Jürgen; Kalle, Hans-Uwe; Morgen, Karl (2018): Spundwände. In: Karl Josef Witt (Hg.): Grundbau-Taschenbuch. Teil 3: Gründungen und geotechnische Bauwerke. 8. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn, S. 325–420.

Haugwitz, Hans-Gerd; Pulsfort, Matthias (2018): Pfahlwände, Schlitzwände, Dichtwände. In: Karl Josef Witt (Hg.): Grundbau-Taschenbuch. Teil 3: Gründungen und geotechnische Bauwerke. 8. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn, S. 823–908.

Johannsen, Rolf; Spundflasch, Frank; Zimmermann-Frisch, B. (2009): Kapitel 2 - Flussbau. In: Hans-Peter Hack (Hg.): Flussbau. Hydraulische Berechnung, Wehre und Sohlenbauwerke, Ausleitungsbauwerke, Energieumwandlungsanlagen, Wasserkraftanlagen, Binnenverkehrswasserbau. 2. red. überarb. Aufl. Weimar, Hennef: Univ.-Verl.; DWA, S. 19-64.

Koch, Dietrich (2018): Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten von Bentonit/Zement-Mischungen im Spezialtiefbau. In: Klaus Eichler, Frank Berndt, Steffan Binde, Gebhard Dausch, Ulrich Höhne, Jens Hölterhoff et al. (Hg.): Spezialtiefbau. Erkundung und Ausführung - Technik und Umwelt - Methoden und Auswirkungen - Baustoffe und Verfahren. 5., neu bearbeitete Auflage. Renningen: expert (Kontakt & Studium, Band 566), S. 195–214.

Rehbock, Theodor (1921): Verfahren zur Bestimmung des Brückenstaues bei rein strömendem Wasserdurchfluss. Untersuchungen aus dem Flußbaulaboratorium der Technischen Hochschule zu Karlsruhe. In: W. Sackur, Fr. Engesser, Th. Rehbock, E. Probst, Otto Ammann, K. Hoepfner et al. (Hg.): Festschrift zur Einweihung des Neubaues der Bauingenieur-Abteilung an der Technischen Hochschule „Fridericiana“, Karlsruhe i. B. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, S. 7–13.

Reiss, Martin; Harnischmacher, Stefan (2016): Grundwasser. In: Nicola Fohrer, Helge Bormann, Konrad Miegel, Markus Casper, Axel Bronstert, Andreas Schumann und Markus Weiler (Hg.): Hydrologie. 1. Auflage. Bern: Haupt Verlag (utb basics, 4513), S. 91–108.

Schumann, Andreas; Menzel, Lucas (2016): Hydrologische Extreme. In: Nicola Fohrer, Helge Bormann, Konrad Miegel, Markus Casper, Axel Bronstert, Andreas Schumann und Markus Weiler (Hg.): Hydrologie. 1. Auflage. Bern: Haupt Verlag (utb basics, 4513), S. 211–230.

Hochschulschriften

Brauns, Josef (1978): Wirksamkeit unvollkommener Abdichtungswände unter Staubauwerken. Veröffentlichung. Universität Fridericiana, Karlsruhe. Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik.

Ernst, Christian (1999): Beitrag zur Bestimmung des Grundwasseraufstaus durch Baukörper, die in den Grundwasserstrom hineinreichen sowie die Bewertung von Wasserumleitungen durch Drains. Diplomarbeit. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar. Grundbau.

Haselsteiner, Ronald (2007): Hochwasserschutzdeiche an Fließgewässern und ihre Durchsickerung. Dissertation. Technischen Universität München, München. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft.

Nendza, Helmut; Lehmann, Günter (1978): Untersuchungen über die Veränderung des Grundwasserverlaufs bei Behinderung des Durchflusses. In: Helmut Nendza (Hg.): Grundbau und Bodenmechanik an der Universität Essen - GHS. Ein Überblick zu Lehre, Forschung und praktischer Anwendung. Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen (Heft 4), S. 74–86.

Schneider, H.; Schuler, Ulrich; Kast, Karl; Brauns, Josef (1997): Bewertung der Geotechnischen Sicherheit von Hochwasserschutzdeichen und Grundlagen zur Beurteilung von Sanierungsmassnahmen. Mitteilung. Universität Karlsruhe, Karlsruhe. Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik.

Ulrichs, Karl R. (1978): Maßnahmen zur Erhaltung der Grundwasserströmung bei tiefreichenden und sperrenden Bauwerken. In: Helmut Nendza (Hg.): Grundbau und Bodenmechanik an der Universität Essen - GHS. Ein Überblick zu Lehre, Forschung und praktischer Anwendung. Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen (Heft 4), S. 87–112.

Reports

Himml, Markus; Schäfer, Wolfgang (2010): Hinweise zur Erstellung und Beurteilung von Grundwassermodellen im Altlastenbereich. LANUV-Arbeitsblatt 12. Hg. v. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW). Recklinghausen.

Schloth, Sebastian (2020): Orientierende Abschätzung des Einflusses der Dichtwand auf die Grundwasserverhältnisse im Bereich des Homberger Deiches. Deichsanierung in Duisburg-Homberg, Anhang 4 zum Erläuterungsbericht. Hg. v. Wirtschaftsbetriebe Duisburg - AöR, Öffentlich nicht zugänglich.

WBD (n. d.): Unterlagen zum Deich in Duisburg-Laar. Hg. v. Wirtschaftsbetriebe Duisburg - AöR, Öffentlich nicht zugänglich.

Tagungsbeiträge

Blum, Philipp; Bou Ghannam, Omar.; Leven, Carsten.; Dietrich, Peter (2008): Methoden- und Ergebnisvergleich bei der hydraulischen Durchlässigkeitsbestimmung im Feld. In: Martin Sauter, Thomas Ptak, Ruth Kaufmann-Knoke, Manuela Lodemann und Alfons van den Kerkhof (Hg.): Grundwasserressourcen. Kurzfassungen der Vorträge und Poster ; Tagung der Fachsektion Hydrogeologie in der DGG (FH-DGG) ; Göttingen, 21. bis 25. Mai 2008. Hannover: Dt. Ges. für Geowiss (Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 57), S. 162.

Hauschild, Sarah; Goens, Jochen (2010): Grundwassermodelle - Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung aus Sicht einer Fachbehörde. In: Christian Levin, Peter Grathwohl, Andreas Kappler, Ruth Kaufmann-Knoke und Hermann Rügner (Hg.): Grundwasser für die Zukunft. Kurzfassungen der Vorträge und Poster ; Tagung der Fachsektion Hydrogeologie in der DGG (FH-DGG) ; Tübingen, 12. bis 16. Mai 2010. Hannover: Dt. Ges. für Geowiss (Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 67), S. 89.

Liedl, Rudolf; Tritschler, Felix; Börke, Peter; Schinke, Reinhard; Naumann, Thomas (Hg.) (2016): Umgang mit hohen Grundwasserständen: Planen, Bauen, Vorsorgen. Fachbeiträge zum Workshop vom 07.-09. November 2016 in Dresden. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Grundwasserwirtschaft.

Schöttler, Marc; Schleicher, Jürgen (2010): Direkte Messung der Grundwasserfließdynamik. In: Christian Levin, Peter Grathwohl, Andreas Kappler, Ruth Kaufmann-Knoke und Hermann Rügner (Hg.): Grundwasser für die Zukunft. Kurzfassungen der Vorträge und Poster ; Tagung der Fachsektion Hydrogeologie in der DGG (FH-DGG) ; Tübingen, 12. bis 16. Mai 2010. Hannover: Dt. Ges. für Geowiss (Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 67), S. 189.

Schöttler, Marc; Drews, Michael; Enzmann, Frieder (2012): Strömung des Grundwassers in Grundwassermessstellen - Eine Parameterstudie mittels gekoppelter Navier-Stokes-Brinkman Simulation und Anwendung auf das Design von Durchfluss-Messsonden. In: Rudolf Liedl, Diana Burghardt, Elisabeth Simon, Thomas Reimann und Ruth Kaufmann-Knoke (Hg.): Grundwasserschutz und Grundwassernutzung. Modelle, Analysen und Anwendungen ; Kurzfassungen der Vorträge und Poster ; Tagung der Fachsektion Hydrogeologie in der DGG (FH-DGG) Dresden, 16. - 20. Mai 2012. Hannover: Dt. Ges. für Geowiss. (Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 78).

Technische Regelwerke

DWA (2011): Deiche an Fließgewässern. Dezember 2011. Hennef (Sieg): Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall (DWA-Regelwerk, M 507-1).

DWA (2012a): Dichtungssysteme im Wasserbau. Februar 2012. Hennef (Sieg): Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall (DWA-Regelwerk, M 512-1).

DWA (2012b): Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. August 2012. Hennef: DWA (DWA-Regelwerk, M 552).

DWA (2019): Geodaten in der Fließgewässermodellierung. 1. Auflage, Februar 2019. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA-Regelwerk, 543-1).

Deutsche Norm DIN EN 12063, Februar 1999: Spundwandkonstruktionen.

Webseiten

ArcelorMittal (2019): Stahlspundwände. Gesamtkatalog 2019. Online verfügbar unter http://spundwand.arcelormittal.com/uploads/files/AMCRPS_Gen_Cat_DE_2019_web.pdf, zuletzt geprüft am 10.02.2021.

BfG (2020): FLYS – Flusshydrologischer Webdienst, Öffentlich nicht zugänglich. Online verfügbar unter <https://flys3.bafg.de/wiki/GewaesserInfo/3901>, zuletzt geprüft am 13.11.2020.

Buß, Johann (2017): Handbuch GGU-3D-SSFLOW. Berechnung von Grundwasserströmungen mit Finiten Elementen in dreidimensionalen Systemen. Version 6. Civilserve GmbH. Steinfeld. Online verfügbar unter https://www.ggu-software.com/fileadmin/products/manuals/GGU-3D-SSFLOW_man-d.pdf.

Buß, Johann (2019): Handbuch GGU-2D-SSFLOW. Berechnung von Grundwasserströmungen mit Finiten Elementen in zweidimensionalen Systemen. Version 11. Civilserve GmbH. Steinfeld. Online verfügbar unter https://www.ggu-software.com/fileadmin/products/manuals/GGU-2D-SSFLOW_man-d.pdf.

Geobasis NRW (2018): Digitale Topographische Karte 1:100.000. (DTK 100). Hg. v. Geobasis NRW. Online verfügbar unter <https://www.geoportal.nrw/>, zuletzt geprüft am 18.05.2021.

LANUV NRW (2010): Digitale Gewässerstationierungskarte NRW. Hg. v. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW). Online verfügbar unter <https://www.geoportal.nrw/>, zuletzt geprüft am 18.05.2021.

MULNV NRW (2016): FLUSSGEBIETE NRW. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz. Online verfügbar unter <https://www.flussgebiete.nrw.de/die-flussgebietseinheit-rhein-146>, zuletzt aktualisiert am 16.11.2020.

Runde, Ralf (2015): Statistische Tabellen und Quantile. Uni Siegen, Fakultät III: Statistik und Ökonometrie. Online verfügbar unter https://www.wiwi.uni-siegen.de/stat/runde/material/tabellen_quantile/tabellen_quantile/statistische_tabellen_und_quantile.pdf, zuletzt aktualisiert am 06.02.2015, zuletzt geprüft am 25.11.2020.

Stadt Duisburg (Hg.): GeoPortal - WebOffice, Öffentlich nicht zugänglich. Online verfügbar unter http://ntdu084.stadt-duisburg.de/WebOffice/synserver?project=wo_allgemein&language=de&client=core, zuletzt geprüft am 19.09.2020.

ThyssenKrupp (2007): Spundwandhandbuch. Hg. v. ThyssenKrupp GfT Bautechnik. Online verfügbar unter <http://www.budau.com/unternehmen/downloads/Spundwandhandbuch.pdf>, zuletzt geprüft am 18.05.2021.

Wasserwirtschaftsamt München (Hg.) (2013): Informationen zum Bauen im Grundwasser und zur Bauwasserhaltung. Online verfügbar unter https://www.wwa-m.bayern.de/service/antraege/pdf/bauen_im_gw_2018.pdf, zuletzt geprüft am 15.09.2020.

Zeitschriftenartikel

Ittershagen, Marc (2010): Maßnahmen zur Vermeidung der Barrierewirkung von Baugruben im Grundwasser. In: *Felsbau Magazin* (2), S. 94–102.

Kobus, Helmut (1974): Anwendung der Dimensionsanalyse in der experimentellen Forschung des Bauingenieurwesens. In: *Die Bautechnik* 51 (3), S. 88–94.

Rückert, Horst (1994): Berechnung der Hebung des Grundwasserspiegels bei Anlagen zur Grundwasserdükerung. In: *Bautechnik* 71 (5), S. 282–292.

Schneider, Günter (1981): Berechnung der Beeinflussung des Grundwasserstromes durch Baumaßnahmen. In: *Die Bautechnik* 58 (2), S. 67–69.

Schneider, Günter (1982): Möglichkeit zur Berechnung der Grundwasserspiegelbeeinflussung durch ein sehr langes Bauwerk mit abschnittswisen Durchbrüchen. In: *Die Bautechnik* 59 (10), S. 332–337.

Schneider, Günter (1983a): Beeinflussung des Grundwasserstromes durch Baumaßnahmen mit Grundwasserdurchleitungen bei gleichzeitiger Umströmungsmöglichkeit. In: *Die Bautechnik* 60 (6), S. 189–196.

Schneider, Günter (1983b): Grundwasseraufstau vor Bauwerken bei gleichzeitiger Unter- und Umströmungsmöglichkeit. In: *Die Bautechnik* 60 (11), S. 391–394.

Schneider, Günter (1995): Beeinflussung des Grundwasserstroms durch Bauwerke mit räumlicher Erstreckung. In: *Bautechnik* 72 (5), S. 289–298.

Selbstständigkeitserklärung

Ich, Sebastian Schloth (Matrikelnummer: 117183), erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Thema „Beitrag zum Einfluss bogenförmiger Deichlinien mit innenliegenden vollkommenen Dichtungssystemen auf die Grundwasserströmung“ selbstständig und unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Bei der Auswertung des digitalen Kartenmaterials für den Rheinabschnitt in Nordrhein-Westfalen mit Hilfe eines CAD-Systems hat mich Herr Dipl.-Ing. Christian Manthey (Wirtschaftsbetriebe Duisburg – AöR, Arbeitsgruppe Hochwasserschutz/Gewässer) unterstützt.

Essen, 02.07.2021

gez. Sebastian Schloth

Unterschrift

Übersicht Dokumentation (Anhang)

A	Wasserwirtschaftsamt München – Informationen zum Bauen im Grundwasser und zur Bauwasserhaltung
B	Protokoll der Messwerte „Flusskurven des Rheins in NRW“ (Urliste)
C	Beschreibung des Kolmogorov-Smirnov Test
D	Beschreibung der Schätzung der Parametergüte des Mittelwertes der Grundgesamtheit mit Konfidenzzahlen
E	Beschreibung der Güteschätzung für die Fraktile (mit Konfidenzzahl)
F	Ergebnisse der durchgeführten Prüfverfahren für R/B
G	Modifikation der Urliste zur Bestimmung der r/s-Verhältnisse
H	Ergebnisse der durchgeführten Prüfverfahren für r/s
I	Bestimmung des empirischen Korrelationskoeffizienten zwischen den beiden Zufallsgrößen R/B (= x) und r/s (= y)
J	Berechnungsmodell Nr. 1 (r/s = 0,50)
K	Berechnungsmodell Nr. 2 (r/s = 0,55)
L	Berechnungsmodell Nr. 3 (r/s = 0,65)
M	Berechnungsmodell Nr. 4 (r/s = 1,00)
N	Berechnungsmodell Nr. 5 (r/s = 2,00)
O	Modellaufbau und Diskretisierung am Beispiel „Berechnungsmodell Nr. 1“
P	Berechnungsmodell „DW1000“ zur Kalibrierung/Validierung
Q	Formfaktoren $f_{(r/s)}$ sowie Faktoren $f_{(H/T)}$, $f_{(d/T)}$ und $f_{(k1/k2)}$
R	Aufstau- bzw. Absenkungskurven für die Bogenformen 1 bis 5
S	Beispiel 1 - Berechnungsmodell Nr. 6 (r/s = 0,58)
T	Beispiel 2 - Berechnungsmodell Nr. 7 (r/s = 0,87)
U	Beispiel 3 - Berechnungsmodell Nr. 8 (r/s = 2,63)
V	Detaillierte Berechnungen zum Beispiel 1
W	Detaillierte Berechnungen zum Beispiel 2
X	Detaillierte Berechnungen zum Beispiel 3
Y	Anwendung der Aufstau- und Absenkungskurven (Beispiel 1)
Z	Anwendung der Aufstau- und Absenkungskurven (Beispiel 2)

Anhang A – Informationen zum Bauen im Grundwasser



Informationen zum Bauen im Grundwasser und zur Bauwasserhaltung

1. ALLGEMEINES UND RECHTLICHE GRUNDLAGEN

Der Grundwasserkörper stellt eine entscheidende, die allgemeinen Lebensgrundlagen sicherstellende natürliche Ressource dar. Das Grundwasser bedarf eines besonderen und umfassenden Schutzes. Daher sind Eingriffe nach Möglichkeit zu vermeiden oder zumindest weitestgehend zu minimieren. Bestimmte Eingriffe in das Grundwasser sind als sog. Gewässerbenutzungen nach den Wassergesetzen erlaubnispflichtig.

Erlaubnispflichtig sind folgende Benutzungen:

- eine Bauwasserhaltung, also das Abpumpen und damit Absenken von Grundwasser zur Trockenlegung der Baugrube und Einleiten des geförderten Wassers in das Grundwasser oder im Ausnahmefall in ein oberirdisches Gewässer
- das durch Baukörper oder Baugrubenumschließungen verursachte zeitweise oder andauernde Aufstauen, Umleiten und Absenken von Grundwasser
- das Einbringen von Stoffen in das Grundwasser (Baukörper oder Baustoffe, z.B. Hochdruckinjektionen, Bohrpfähle, Fundamente, Gebäude im Grundwasser)

Die wasserrechtliche Erlaubnis wird durch die örtlich zuständige Kreisverwaltungsbehörde (Landratsamt, in München Referat für Gesundheit und Umwelt – RGU) erteilt.

Die Kreisverwaltungsbehörde entscheidet, ob ein Erlaubnisverfahren mit Zulassungsfiktion nach Art. 70 Bayerisches Wassergesetz (BayWG) oder ein Erlaubnisverfahren mit Erteilung einer beschränkten wasserrechtlichen Erlaubnis nach Art. 15 BayWG durchgeführt wird.

Das wasserrechtliche Erlaubnisverfahren kann auch im Rahmen des Baugenehmigungsverfahrens erfolgen, d.h. der Antrag auf wasserrechtliche Erlaubnis wird zusammen mit dem Bauantrag eingereicht und die wasserrechtliche Erlaubnis in der Baugenehmigung mit ausgesprochen. Die wasserrechtliche Erlaubnis ersetzt keine sonstigen notwendigen Genehmigungen, wie z.B. die Baugenehmigung. Privatrechtliche Verhältnisse bleiben davon ebenfalls unberührt.

Für die Beantragung einer wasserrechtlichen Erlaubnis für eine **vorübergehende Bauwasserhaltung und einen dauerhaften Aufstau des Grundwassers durch tief reichende Bauteile von nicht mehr als ca. 10 cm** sind die in **Nr. 3 a)** dieses Merkblatts aufgeführten Unterlagen vorzulegen.

Wenn der Aufstau des Grundwassers durch tief reichende Bauteile mehr als ca. 10 cm beträgt und/oder Verbaumaßnahmen im Grundwasser geplant sind (z.B. Hochdruckinjektionen, Mixed in Place-MIP-Wände, Bohrpfähle) und/oder das Bauvorhaben in einem Wasser- oder Heilquellenschutzgebiet oder auf einer Altlasten- oder Altlastenverdachtsfläche liegt, dann sind die in **Nr. 3 b)** dieses Merkblatts aufgeführten Antragsunterlagen vorzulegen.

Fortsetzung

Die Kreisverwaltungsbehörde holt im Wasserrechtsverfahren ein Gutachten des amtlichen Sachverständigen ein. Amtlicher Sachverständiger sind in der Regel die „Fachkundigen Stellen für Wasserwirtschaft“ in den Kreisverwaltungsbehörden. Im Ausnahmefall wird das Wasserwirtschaftsamt München beteiligt.

Bei Bedarf empfehlen wir zur Klärung fachlicher oder verfahrenstechnischer Fragen bereits im Vorfeld mit dem amtlichen Sachverständigen in Kontakt zu treten.

2. WASSERWIRTSCHAFTLICHE GRUNDSÄTZE

Damit bei einer Bauwasserhaltung der Grundwasservorrat erhalten bleibt, muss grundsätzlich entnommenes Grundwasser dem Grundwasserkörper durch Versickerung wieder zugeführt werden. Nur in Ausnahmefällen, in denen eine Versickerung nachweislich nicht möglich oder unzumutbar wäre, kann auch in ein oberirdisches Gewässer (Fluss, Bach, Graben) eingeleitet werden.

Voraussetzung für die Versickerung und die Einleitung in ein Oberflächengewässer ist allerdings, dass das einzuleitende Grundwasser nicht nachteilig verändert wurde. Eine nachteilige Veränderung liegt z.B. dann vor, wenn durch die Grundwasserabsenkung Feinteile des Bodens mobilisiert werden, die bei einer Einleitung in ein oberirdisches Gewässer Fische und sonstige Gewässerorganismen schädigen bzw. beeinträchtigen können. Die beste Möglichkeit, die Eintrübungen zu minimieren, ist die Verwendung von außerhalb der Baugrube liegenden Filterbrunnen. Bei den oftmals verwendeten Schachtbrunnen bzw. Pumpensäugbrunnen in der Baugrube besteht insbesondere anfangs und dann durch den Baubetrieb verursacht oft die Gefahr der Eintrübung.

Außerdem muss darauf geachtet werden, dass weder durch Maßnahmen der Bauwasserhaltung noch durch Baukörper im Grundwasser vorhandene Grundwassernutzungen (z.B. Trinkwasserbrunnen, Bewässerungsbrunnen, Wärmepumpenbrunnen) beeinträchtigt werden.

3. NOTWENDIGE ANTRAGSUNTERLAGEN

Bei der örtlich zuständigen Kreisverwaltungsbehörde sind nachfolgende Unterlagen in vierfacher Ausfertigung einzureichen:

a) Vorübergehende Bauwasserhaltung, dauerhafter Grundwasseraufstau von nicht mehr als ca. 10 cm, keine Verbaumaßnahmen im Grundwasser, kein Wasserschutzgebiet, keine Altlasten- und Altlastenverdachtsfläche

1. Formloses Antragsschreiben des Bauherrn/Antragstellers
2. Erläuterung der Maßnahme mit mindestens folgenden Angaben:
 - Geplante Baumaßnahmen mit Angaben zu den grundsätzlichen Auswirkungen auf das Grundwasser
 - Art und Einbindetiefe einer eventuellen Baugrubensicherung
 - Momentaner Grundwasserstand unter Gelände (ggf. Schätzung)

Fortsetzung

- Verwendete Anlagen zur Grundwasserabsenkung (z.B. Filterbrunnen, Schachtbrunnen, Pumpensümpfe, Drainagen) und Versickerung (z.B. Sickerbecken, Sickerschächte) mit Angabe der maximalen beantragten Entnahmemenge in l/s
 - Geplante Höhe der Absenkung des Grundwassers
 - Geplante Dauer der Grundwasserabsenkung mit Angabe der maximalen Gesamtentnahmemenge
 - Flurnummern der Grundstücke, auf denen sich Förder- und Versickerungsanlagen bzw. die Einleitungsstelle in ein oberirdisches Gewässer befinden
 - Zu erwartender Aufstau durch tief reichende Bauteile
 - Geplanter Beginn und Ende der Bauwasserhaltung
3. Übersichtslageplan (M = 1 : 25.000 oder M = 1 : 15.000) mit Markierung des Grundstücks
 4. Lageplan (M = 1 : 1.000) mit Einzeichnung der Förder- und Versickerungsanlagen bzw. der Einleitungsstelle in ein oberirdisches Gewässer

b) In allen übrigen Fällen

Der Umfang der vorzulegenden Unterlagen ist grundsätzlich in der Verordnung über Pläne und Beilagen in wasserrechtlichen Verfahren (WPBV) geregelt.

Üblicherweise sind folgende Unterlagen vorzulegen:

1. Formloses Antragsschreiben des Bauherrn/Antragstellers
2. Erläuterungsbericht mit Angaben über:
 - Geplante Baumaßnahmen mit grundsätzlichen Angaben zu den Auswirkungen auf das Grundwasser
 - Gegenwärtiger, mittlerer und höchster Grundwasserstand (HGW100) in m ü. NN
 - Lage und Mächtigkeit des Aquifers und des Grundwasserstauers
 - Grundwasserfließrichtung
 - Geländeoberkante (vorhanden und geplant) in m ü. NN
 - Bodenprofile des Baugrundes
 - Geplante tiefste Gründungskoten in m ü. NN
 - Tiefste Gründungskoten benachbarter Gebäude in m ü. NN
 - Art und Einbindetiefe der Baugrubensicherung
 - Geplante Anlagen zur Grundwasserabsenkung (z.B. Filterbrunnen, Schachtbrunnen, Pumpensümpfe, Drainagen) und Versickerung (z.B. Sickerbecken, Sickerschächte) mit Angabe der maximal beantragten Entnahmemenge in l/s
 - Voraussichtliche Auswirkungen des Vorhabens auf andere bestehende/geplante Nutzungen einschließlich der Auswirkungen des zu versickernden Wassers auf Dritte
3. Übersichtslageplan (M = 1 : 25.000 oder M = 1 : 15.000)
4. Lageplan (M = 1 : 1.000) mit folgenden zusätzlichen Angaben:
 - Einzeichnung der Grundwasserfließrichtung
 - Kennzeichnung der in das Grundwasser reichenden Bauteile (z. B. durch Schräffur)
 - Koten benachbarter Kellersohlen
 - Förder- und Versickerungsanlagen bzw. der Einleitungsstelle in ein oberirdisches Gewässer (mit Angabe der Flurnummern)

Fortsetzung

5. Grundrisse vom Untergeschoss und Schnitte des Bauvorhabens
6. Hydrotechnische Berechnungen für den Bauzustand mit Angaben über:
 - Art der Bauwasserhaltung mit Begründung für das gewählte Verfahren
 - Dauer der Wasserhaltung
 - Entnahme in l/s und Gesamtentnahmemenge in Kubikmetern
 - Nachweis der Versickerungsanlagen
 - Auswirkungen auf benachbarte Grundstücke und andere Anlagen (Einzelwasserversorgungen etc.)
7. Hydrotechnische Berechnungen für den Endzustand mit Angaben über:
 - Zu erwartender Aufstau, Umleitung, Absenkung
 - Auswirkungen auf benachbarte Grundstücke und andere Anlagen (Einzelwasserversorgungen etc.)
 - Art, Umfang und Bemessung von geplanten Dükern, Horizontaldrains, Grundwasserfenstern
8. Angaben über Bodeninjektionen mit:
 - Umfang und Art; Typ und Zusammensetzung des Injektionsmittels; Entsorgung der Rücklauf suspension
 - Lageplan und Schnitte
9. Eventuell Lage und Art der Beobachtungsmessstellen zur Beweissicherung.

Anhang B – „Flusskurven des Rheins in NRW“ (Urliste)

Fluss- kurve Nr.	Krümmungs- radius R [m]	Fluss- breite B ₁ [m]	Fluss- breite B ₂ [m]	Breite (B ₁ +B ₂)/2 B [m]	Verhält- nis R / B [-]	Win- kel α [°]	Ortschaft im Bereich der Flusskurve
1	2.000	404,1	444,1	424,1	4,7	29,27	Niederbachem
2	2.800	380,0	368,6	374,3	7,5	60,42	Bonn
3	1.700	412,6	361,0	386,8	4,4	64,24	Bonn-Beuel
4	1.450	381,3	294,7	338,0	4,3	49,63	Bonn-Auerberg
5	2.200	329,8	350,9	340,4	6,5	52,69	Niederkassel
6	1.540	392,4	355,2	373,8	4,1	50,64	Wesseling
7	1.225	384,3	342,1	363,2	3,4	72,81	Lülsdorf
8	3.650	441,6	431,0	436,3	8,4	22,50	Köln-Rodenk.
9	1.200	403,4	351,5	377,4	3,2	146,78	Köln-Porz
10	2.470	384,8	350,4	367,6	6,7	59,88	Köln-Gremberg
11	2.160	357,0	300,3	328,7	6,6	74,81	Köln-Deutz
12	1.250	304,0	349,5	326,8	3,8	90,85	Köln-Nippes
13	1.620	349,6	378,7	364,1	4,4	95,43	Köln-Flittard
14	1.390	385,4	275,7	330,6	4,2	67,49	Köln-Merkenich
15	4.000	299,8	335,2	317,5	12,6	31,51	Köln-Worringen
16	1.100	358,5	317,7	338,1	3,3	122,56	Monheim
17	1.300	357,0	267,4	312,2	4,2	69,77	Dormagen
18	1.900	346,5	306,3	326,4	5,8	67,81	Baumberg
19	835	322,1	261,2	291,6	2,9	123,33	Grind
20	1.000	325,2	264,9	295,0	3,4	110,76	Düsseldorf
21	1.370	341,1	295,7	318,4	4,3	90,81	Neuss
22	1.250	287,9	341,1	314,5	4,0	89,71	Düsseldorf
23	3.400	341,1	374,1	357,6	9,5	39,99	Neuss
24	710	355,1	281,4	318,3	2,2	143,49	Düsseldorf
25	700	359,5	330,7	345,1	2,0	131,40	Düsseldorf
26	2.500	330,7	330,1	330,4	7,6	92,43	Düsseldorf
27	1.400	334,3	354,7	344,5	4,1	85,37	Düsseldorf

Fortsetzung

Fluss- kurve Nr.	Krümmungs- radius R [m]	Fluss- breite B ₁ [m]	Fluss- breite B ₂ [m]	Breite (B ₁ +B ₂)/2 B [m]	Verhält- nis R / B [-]	Win- kel α [°]	Ortschaft im Bereich der Flusskurve
28	2.010	346,3	343,8	345,0	5,8	63,11	Nierst
29	1.120	325,3	301,1	313,2	3,6	105,10	Mündelheim
30	3.000	367,1	349,2	358,1	8,4	28,94	Friemersheim
31	2.460	359,0	305,1	332,0	7,4	69,02	Duisburg
32	1.680	305,7	344,1	324,9	5,2	81,71	Duisburg
33	1.400	328,8	351,7	340,3	4,1	102,26	Duisburg
34	1.000	423,6	306,4	365,0	2,7	107,04	Duisburg
35	1.250	441,1	390,1	415,6	3,0	97,72	Binsheim
36	1.500	440,3	327,6	383,9	3,9	62,68	Duisburg
37	1.500	366,2	337,7	351,9	4,3	89,18	Rheinberg
38	1.265	365,9	302,9	334,4	3,8	117,39	Mehrum
39	7.600	294,6	346,4	320,5	23,7	29,88	Wallach
40	1.640	323,7	290,9	307,3	5,3	59,58	Emmelsum
41	1.730	309,2	436,3	372,8	4,6	124,07	Büderich
42	1.900	401,3	320,0	360,7	5,3	40,43	Flüren
43	2.380	320,0	407,5	363,8	6,5	34,08	Ginderich
44	2.000	341,3	383,7	362,5	5,5	73,95	Bislich
45	2.000	446,3	361,8	404,0	5,0	44,10	Wardt
46	1.150	413,1	334,5	373,8	3,1	109,42	Lohr-Wardt
47	1.520	402,7	404,2	403,5	3,8	117,52	Niedermörnter
48	2.240	319,0	346,1	332,6	6,7	48,47	Esserden
49	3.800	358,8	502,4	430,6	8,8	38,01	Grieth
50	4.500	463,9	371,7	417,8	10,8	17,83	Dornick
51	2.970	355,5	427,7	391,6	7,6	29,56	Huisberden
52	3.800	396,7	512,5	454,6	8,4	33,34	Emmerich
53	3.800	459,6	468,9	464,2	8,2	22,77	Griethausen
54	3.700	468,9	430,0	449,4	8,2	52,45	Keeken

Anhang C – Beschreibung des Kolmogorov-Smirnov Test

Kolmogorov-Smirnov Test

nach Plate (1993)

Der Kolmogorov-Smirnov Test ist ein Anpassungstest und ist nach den beiden russischen Statistikern, die diesen Test entwickelt und eingeführt haben, benannt. Der Test beruht auf der Überlegung, dass zunächst die relative Häufigkeitssumme einer Stichprobe betrachtet und anschließend mit der theoretischen Wahrscheinlichkeit $F_x(x)$ verglichen wird. In einer der Größe nach geordneten Stichprobe von n Daten x_k , $k = 1, 2 \dots n$ mit $k = 1$ dem größten Wert, muss auch die Wahrscheinlichkeit für die Unterschreitung des Wertes x_k , d. h. die relative Größe $(n - k)/n$, dann exakt gleich $F_x(x_k)$ sein, wenn der Wert x_k genau auf der theoretischen Kurve der Normalverteilung liegt. Somit ist die Abweichung nach Gleichung (1.1) ein Maß für die Güte der Anpassung der theoretischen Verteilung $F_x(x)$ an die experimentellen Messdaten.

$$c_k = |F_x(x_k) - (n - k)/n| \quad (1.1)$$

Ihr Maximalwert $\max c_k$ ist eine Zufallsvariable mit der Verteilungsfunktion $F_k(\max c_k)$. Sie ist allerdings nur wenig von der Form der Verteilungsfunktion $F_x(x)$ abhängig und völlig unabhängig von k . Sie hängt lediglich von der Anzahl n der Stichprobe ab. Der Streubereich von $\max c_k$ ist umso größer, je kleiner die Signifikanz der Anpassung ist. Deshalb kann für bekannte $F_k(\max c_k)$ die Konfidenzgrenze $c(\alpha, n)$ als Funktion von n und der Signifikanzzahl α tabelliert werden. Eine solche Tabelle ist in den Tabellen von Runde (2015) enthalten und anschließend beigefügt. Sie ist für normalverteilte Daten mit bekannten Gesamtheitsparametern entwickelt worden, praktisch jedoch unabhängig von der Verteilungsfunktion $F_x(x)$.

Der Test für die Anpassung erfolgt über die Nullhypothese. Das heißt, dass die Anpassung auf dem Signifikanzniveau α akzeptiert wird, wenn die Testgröße nach Gleichung (1.2) erfüllt ist.

$$d(\alpha, n) = c(\alpha, n) - \max c_k > 0 \quad (1.2)$$

Die Anwendung des Tests erfolgt in fünf Schritten:

1. Ordnen der Datenpunkte der Größe nach. Es wird die Folge x_k $k = 1, 2, 3, \dots, n$, erhalten, wobei x_k bei $k = 1$ der größte Wert ist.
2. Annahme, dass die Parameter der Verteilung $F_x(x)$ bekannt sind (im vorliegenden Fall $N(k_x, \sigma_x)$) und Berechnung für jedes x_k :
 - a. die theoretische Wahrscheinlichkeit $F_x(x_k)$
 - b. die relative Häufigkeit $1 - k/n$

Fortsetzung

3. Bestimmung der Abweichung:

$$c_k = \left| F_x(x_k) - \left(1 - \frac{k}{n}\right) \right|$$

4. Wahl eines Signifikanzniveaus α und Ermittlung des zugehörigen Wertes $c(\alpha, n)$ aus der Tabelle.

5. Bilden der Testgröße

$$d(\alpha, n) = c(\alpha, n) - \max c_k$$

Falls $d(\alpha, n) < 0$ ist, wird die Hypothese: „die Daten entstammen der Verteilung $F_x(x)$ “ auf dem Signifikanzniveau α verworfen. Andernfalls entstammen die Daten der Verteilung $F_x(x)$ auf dem Signifikanzniveau α .

Fortsetzung

Quantile $K_{n;1-\alpha/2}$ für den zweiseitigen Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

n	$\alpha = 0,2$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,02$	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,005$
1	0,9000	0,9500	0,9750	0,9900	0,9950	0,9975
2	0,6838	0,7764	0,8419	0,8100	0,9293	0,9410
3	0,5648	0,6360	0,7076	0,7845	0,8290	0,8642
4	0,4927	0,5652	0,6239	0,6888	0,7342	0,7763
5	0,4470	0,5094	0,5633	0,6272	0,6685	0,7053
6	0,4104	0,4680	0,5193	0,5774	0,6166	0,6528
7	0,3815	0,4361	0,4834	0,5384	0,5758	0,6097
8	0,3583	0,4096	0,4543	0,5065	0,5417	0,5742
9	0,3391	0,3875	0,4300	0,4796	0,5133	0,5444
10	0,3226	0,3687	0,4092	0,4566	0,4889	0,5186
11	0,3083	0,3524	0,3912	0,4367	0,4677	0,4963
12	0,2957	0,3381	0,3754	0,4192	0,4490	0,4766
13	0,2847	0,3255	0,3614	0,4036	0,4324	0,4591
14	0,2748	0,3142	0,3489	0,3897	0,4176	0,4435
15	0,2689	0,3040	0,3376	0,3771	0,4042	0,4293
16	0,2577	0,2947	0,3273	0,3657	0,3920	0,4164
17	0,2504	0,2863	0,3180	0,3553	0,3808	0,4046
18	0,2436	0,2785	0,3094	0,3457	0,3706	0,3937
19	0,2373	0,2714	0,3014	0,3368	0,3611	0,3837
20	0,2315	0,2647	0,2941	0,3286	0,3524	0,3745
21	0,2261	0,2586	0,2872	0,3210	0,3442	0,3658
22	0,2211	0,2528	0,2809	0,3139	0,3366	0,3578
23	0,2164	0,2475	0,2749	0,3073	0,3295	0,3502
24	0,2120	0,2424	0,2693	0,3010	0,3228	0,3431
25	0,2079	0,2377	0,2640	0,2952	0,3165	0,3365
26	0,2040	0,2332	0,2591	0,2896	0,3106	0,3302
27	0,2003	0,2290	0,2544	0,2844	0,3050	0,3242
28	0,1968	0,2250	0,2500	0,2794	0,2999	0,3186
29	0,1934	0,2212	0,2457	0,2747	0,2946	0,3132
30	0,1903	0,2176	0,2417	0,2702	0,2898	0,3081
31	0,1873	0,2141	0,2379	0,2660	0,2853	0,3033
32	0,1844	0,2108	0,2342	0,2619	0,2809	0,2987
33	0,1817	0,2077	0,2308	0,2580	0,2768	0,2942
34	0,1791	0,2047	0,2274	0,2543	0,2728	0,2900
35	0,1766	0,2018	0,2242	0,2507	0,2690	0,2860

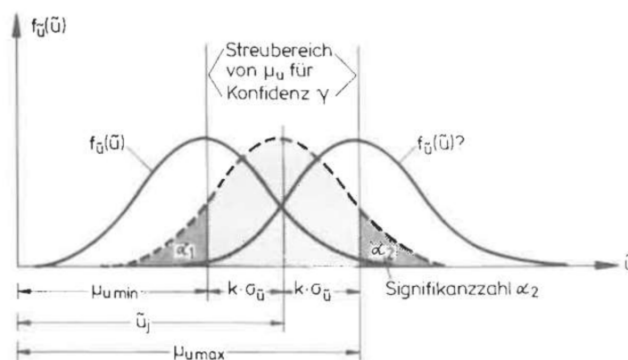
Grobe Approximation für $n > 35$: $K_{n;1-\alpha/2} = \frac{\sqrt{\ln(\frac{2}{\alpha})}}{\sqrt{2n}}$.

Anhang D – Beschreibung der Schätzung der Parametergüte

Schätzung der Parametergüte mit Konfidenzzahlen

nach Plate (1993)

Konfidenzzahlen sind ein Maß für den Streubereich, den ein Parameter mit Wahrscheinlichkeit γ haben kann. Bei praktischen Anwendungsfällen liegt ein Stichprobenparameter u_j vor, der Parameter u_g der Grundgesamtheit ist hingegen nicht bekannt. Um diesen zu bestimmen, wird zunächst von der Annahme ausgegangen, dass $u_g = E\{u_j\} = \mu_u$ ist. Anschließend wird der Bereich $u_{\min} < \mu_u < u_{\max}$ ermittelt, in welchem μ_u liegen kann. Diese Situation ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:



Zur Definition der Lage des Gesamtheitsmittels μ_u relativ zur Lage des geschätzten Parameters \tilde{u}_j

Gemäß der Abbildung ist zu erkennen, dass der Streubereich symmetrisch um den gemessenen Stichprobenwert liegen muss. Solange keine Kenntnis über die Lage von u vorliegt, muss angenommen werden, dass μ_u mit gleicher Wahrscheinlichkeit links wie rechts vom gemessenen Wert \tilde{u}_j liegen kann. Mit der Konfidenzzahl kann die Abweichung des unbekannten Parameters μ_u vom Stichprobenparameter \tilde{u}_j ermittelt werden.

In der Abbildung ist darüber hinaus noch der Teil der Verteilungsfunktion dargestellt, der außerhalb des Konfidenzbereiches liegt. Die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten sind mit α_1 und α_2 bezeichnet. Sie heißen Signifikanzzahlen. Da die Dichte $f_u(u)$ nicht bekannt ist, muss sie geschätzt werden. Nur für eine große Anzahl von Stichproben gilt nach dem zentralen Grundsatz, dass $f_u(u)$ normalverteilt ist um den Mittelwert $\mu_u(u)$. Es wird demnach bei dieser Schätzung von der Annahme ausgegangen, dass die Grundgesamtheit normalverteilt ist.

Wenn die Varianz der Grundgesamtheit nicht bekannt ist, dann muss der Streubereich von μ_x mit Hilfe der Schätzungen \bar{x} und \tilde{s}_x^2 aus der Stichprobe ermittelt werden. Die Testgröße (Gleichung 1.1) lautet:

$$t_y = \frac{\bar{x} - \mu_{x\min}}{\tilde{s}_x} \cdot \sqrt{n} \quad (1.1)$$

Fortsetzung

Hierbei ist der Schätzer \tilde{s}_x^2 ebenfalls eine Zufallsvariable. Die zugehörige Wahrscheinlichkeitsverteilung ergibt sich durch die Bedingung, dass \bar{x} normalverteilt ist, während die Summe $\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2$ eine χ^2 -Verteilung mit n Freiheitsgraden besitzt. Wird diese Summe durch die Schätzung $(n - 1) \cdot \tilde{s}_x^2$ ersetzt, dann sind die Variablen $x_i - \bar{x}$ nicht mehr stochastisch unabhängig, so dass die Variable t eine Verteilung mit Dichte $f_t(t, m)$ mit Freiheitsgrad $m = n - 1$ hat. Die Quantilen t_γ dieser Funktion hängen nicht mehr von der Konfidenzzahl γ ab, sondern vom Umfang der Stichprobe, ausgedrückt durch den Freiheitsgrad m. Für einige typische Konfidenzzahlen γ sind solche Quantilen in Tabellen aufgeführt. Eine solche t-Tabelle ist in den Tabellen von Runde (2015) enthalten und anschließend beigefügt. Hierbei ist Gleichung (1.2) zu beachten:

$$\frac{1}{2}(1 + \gamma) = 1 - \alpha \quad (1.2)$$

Der Konfidenzbereich für μ_x berechnet sich mit Gleichung (1.3).

$$\bar{x} - t_\gamma \cdot \tilde{s}_x < \mu_x < \bar{x} + t_\gamma \cdot \tilde{s}_x \quad (1.3)$$

Die Schätzung erfolgt in vier Schritten:

1. Berechnung von \bar{x} und \tilde{s}_x^2 aus den Daten.
2. Wahl einer Konfidenzzahl γ und damit $F_t(t_\gamma) = \frac{1}{2}(1+\gamma)$.
3. Ermittlung des Freiheitsgrades $m = n - 1$ und mit γ ablesen des dimensionslosen Quantile t_γ aus der t-Tabelle:

$$t_\gamma = \frac{\bar{x} - \mu_x}{\tilde{s}_x} \cdot \sqrt{n}$$

4. Bestimmung der oberen / unteren Konfidenzgrenze aus t_γ und Gleichung (1.3)

$$\mu_{xmax} = \bar{x} + t_\gamma \cdot \frac{\tilde{s}_x}{\sqrt{n}}$$

$$\mu_{xmin} = \bar{x} - t_\gamma \cdot \frac{\tilde{s}_x}{\sqrt{n}}$$

Fortsetzung

Quantile $t_{1-\alpha; n}$ der t-Verteilung

(n = Anzahl der Freiheitsgrade)

n	$1 - \alpha$							
	0.900	0.950	0.975	0.990	0.995	0.9975	0.999	0.9995
1	3.0777	6.3138	12.7062	31.8205	63.6567	127.3213	318.3088	636.6192
2	1.8856	2.9200	4.3027	6.9646	9.9248	14.0890	22.3271	31.5991
3	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8409	7.4533	10.2145	12.9240
4	1.5332	2.1318	2.7764	3.7470	4.6041	5.5976	7.1732	8.6103
5	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0322	4.7733	5.8934	6.8688
6	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074	4.3168	5.2076	5.9588
7	1.4149	1.8946	2.3646	2.9980	3.4995	4.0293	4.7853	5.4079
8	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554	3.8325	4.5008	5.0413
9	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498	3.6897	4.2968	4.7809
10	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693	3.5814	4.1437	4.5869
11	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058	3.4966	4.0247	4.4370
12	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0545	3.4284	3.9296	4.3178
13	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123	3.3725	3.8520	4.2208
14	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768	3.3257	3.7874	4.1405
15	1.3406	1.7531	2.1314	2.6025	2.9467	3.2860	3.7328	4.0728
16	1.3368	1.7459	2.1199	2.5835	2.9208	3.2520	3.6862	4.0150
17	1.3334	1.7396	2.1098	2.5669	2.8982	3.2224	3.6458	3.9651
18	1.3304	1.7341	2.1009	2.5524	2.8784	3.1966	3.6105	3.9216
19	1.3277	1.7291	2.0930	2.5395	2.8609	3.1737	3.5794	3.8834
20	1.3253	1.7247	2.0860	2.5280	2.8453	3.1534	3.5518	3.8495
21	1.3232	1.7207	2.0796	2.5176	2.8314	3.1352	3.5272	3.8193
22	1.3212	1.7171	2.0739	2.5083	2.8188	3.1188	3.5050	3.7921
23	1.3195	1.7139	2.0687	2.4999	2.8073	3.1040	3.4850	3.7676
24	1.3178	1.7109	2.0639	2.4922	2.7969	3.0905	3.4668	3.7454
25	1.3163	1.7081	2.0595	2.4851	2.7874	3.0782	3.4502	3.7251
26	1.3150	1.7056	2.0555	2.4786	2.7787	3.0669	3.4350	3.7066
27	1.3137	1.7033	2.0518	2.4727	2.7707	3.0565	3.4210	3.6896
28	1.3125	1.7011	2.0484	2.4671	2.7633	3.0469	3.4082	3.6739
29	1.3114	1.6991	2.0452	2.4620	2.7564	3.0380	3.3962	3.6594
30	1.3104	1.6973	2.0423	2.4573	2.7500	3.0298	3.3852	3.6460
40	1.3031	1.6839	2.0211	2.4233	2.7045	2.9712	3.3069	3.5510
50	1.2987	1.6759	2.0086	2.4033	2.6778	2.9370	3.2614	3.4960
60	1.2958	1.6706	2.0003	2.3901	2.6603	2.9146	3.2317	3.4602
70	1.2938	1.6669	1.9944	2.3808	2.6479	2.8987	3.2108	3.4350
80	1.2922	1.6641	1.9901	2.3739	2.6387	2.8870	3.1953	3.4163
90	1.2910	1.6620	1.9867	2.3685	2.6316	2.8779	3.1833	3.4019
100	1.2901	1.6602	1.9840	2.3642	2.6259	2.8707	3.1737	3.3905
120	1.2886	1.6577	1.9799	2.3578	2.6174	2.8599	3.1595	3.3735
140	1.2876	1.6558	1.9771	2.3533	2.6114	2.8522	3.1495	3.3614
160	1.2869	1.6544	1.9749	2.3499	2.6069	2.8465	3.1419	3.3524
180	1.2863	1.6534	1.9732	2.3472	2.6034	2.8421	3.1361	3.3454
200	1.2858	1.6525	1.9719	2.3451	2.6006	2.8385	3.1315	3.3398
500	1.2832	1.6479	1.9647	2.3338	2.5857	2.8195	3.1066	3.3101
1000	1.2824	1.6464	1.9623	2.3301	2.5808	2.8133	3.0984	3.3003
∞	1.2816	1.6449	1.9600	2.3263	2.5758	2.8070	3.0902	3.2905

Anhang E – Beschreibung der Güteschätzung der Fraktile

Güteschätzung für die Fraktile (mit Konfidenzzahl)

nach Plate (1993)

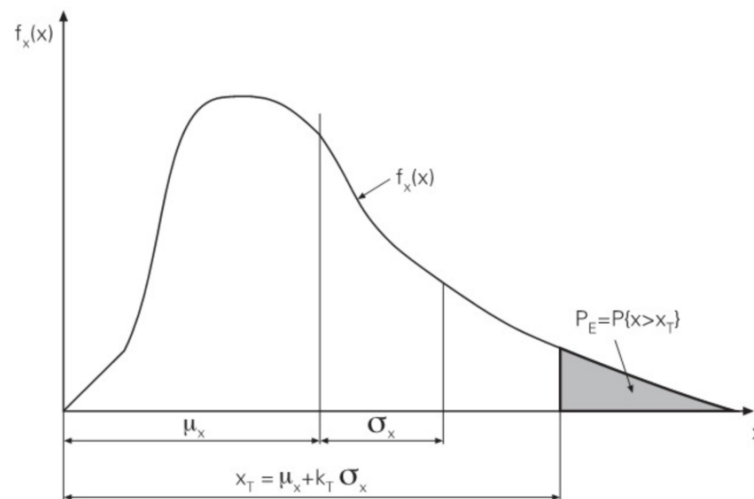
Bei dieser Güteschätzung geht es darum, die Extrapolation zu seltenen Werten, d. h. zu den Fraktile x_T genauer zu betrachten. Mit x_T wird die Fraktile der Zufallsvariable mit der Überschreitungswahrscheinlichkeit $P_E = 1/T$ bezeichnet. Die Fraktile einer Stichprobe sind gemäß Gleichung (1.1) definiert, wobei sowohl \bar{x} als auch \tilde{s}_x^2 und K_T Zufallsvariablen sind, deren optimalen Wert es zu schätzen gilt.

$$x_T = g(\bar{x}, \tilde{s}_x^2, K_T) = \bar{x} + K_T \cdot \tilde{s}_x \quad (1.1)$$

Hierbei ist K_T die standardisierte Variable der gewählten Verteilungsfunktion und somit eine Funktion der Überschreitungswahrscheinlichkeit $1/T$ (Ermittlung gemäß beigefügter Tabelle der Standardnormalverteilung). Darüber hinaus kann K_T jedoch auch von weiteren Parametern mit zufälliger Variabilität, z. B. dem Schiefekoeffizienten C_{sx} abhängen. Der x_T -Wert für die Gesamtheit bzw. Grundgesamtheit stellt letztlich den Mittelwert μ_{xT} dar, der gemäß Gleichung (1.2) über die Parameter der Gesamtheit definiert wird.

$$\mu_{xT} = \mu_x + K_T \cdot \sigma_x \quad (1.2)$$

Diese Zusammenhänge sind auch in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:



Vereinfacht wird nachfolgend davon ausgegangen, dass der Koeffizient K_T genau ist und keiner wesentlichen Variabilität unterliegt. Somit gilt für eine Stichprobe folgender Schätzwert \bar{x}_T für μ_{xT} (s. Gleichung (1.3)).

$$\bar{x}_T \approx \bar{x} + K_T \cdot \tilde{s}_x \quad (1.3)$$

Fortsetzung

Die zweite Vereinfachung beruht auf der Annahme, dass die Abweichungen der aus Daten berechneten Parameter von μ_{x_T} klein sind, so dass die Größe x_T um den Gesamtheitswert μ_{x_T} in einer Taylorreihe entwickelt werden kann, deren Glieder von höherer als zweiter Ordnung vernachlässigt werden dürfen. Dadurch wird die Varianz $\sigma_{x_T}^2$ der Größe x_T erhalten, die als linearisierte Näherung vereinfacht gemäß Gleichung (1.4) dargestellt ist.

$$\sigma_{x_T}^2 = \frac{\sigma_x^2}{n} \left[1 + K_T \cdot C_{sx} + \frac{K_T^2}{4} (K_x - 1) \right] \quad (1.4)$$

Unter der Annahme, dass bei der Schätzung des Streubereiches x_T die Varianz $\sigma_{x_T}^2$ in Gleichung (1.4) mit $s_{x_T}^2$ gleichgesetzt wird und die bekannten Konfidenzgrenzen über die t-Verteilung ermittelt werden, kann eine Ermittlung nach Gleichung (1.5) erfolgen.

$$x_T(\gamma) = \bar{x}_T + \tilde{s}_{x_T} [1 + 1/n]^{1/2} \cdot t_{T,n-1} \quad (1.5)$$

Hierbei ist $t_{T,m}$ die t Variable mit Freiheitsgrad $m = n - 1$. Diese kann mit der Tabelle im Anhang D ermittelt werden.

Fortsetzung

Verteilungsfunktion $\Phi(z)$ der Standardnormalverteilung

$\Phi(z)$ für $0 \leq z < 4.0$

z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.00	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.10	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.20	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.30	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.40	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.50	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.60	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.70	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.80	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.90	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1.00	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.10	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.20	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
1.30	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
1.40	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
1.50	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
1.60	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
1.70	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
1.80	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
1.90	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
2.00	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
2.10	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
2.20	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
2.30	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
2.40	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
2.50	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
2.60	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
2.70	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
2.80	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
2.90	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
3.00	0.9987	0.9987	0.9987	0.9988	0.9988	0.9989	0.9989	0.9989	0.9990	0.9990
3.10	0.9990	0.9991	0.9991	0.9991	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992	0.9993	0.9993
3.20	0.9993	0.9993	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9995	0.9995	0.9995
3.30	0.9995	0.9995	0.9995	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9997
3.40	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9998
3.50	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998
3.60	0.9998	0.9998	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
3.70	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
3.80	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
3.90	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Hinweis: $\Phi(-z) = 1 - \Phi(z)$

Anhang F – Ergebnisse der durchgeführten Prüfverfahren (R/B)

Kolmogorov-Smirnov Test

Anzahl n = 54
 Mittelwert = 5,8
 Standardabweichung = 3,4

Testgröße: $d(\alpha, n) = c(\alpha, n) - \max c_k$
 wenn $d(\alpha, n) > 0$, dann ist die Nullhypothese erfüllt
 wenn $d(\alpha, n) < 0$, dann ist die Nullhypothese nicht erfüllt

Alpha α = 0,01 (Signifikanzniveau)

$c(\alpha, n) = K_{n;1-\alpha/2}$ (Quantil)

$c(\alpha, n) = 0,221492$

$\max c_k = 0,146634$

$d(\alpha, n) = 0,074858 > 0$

Bei Stichproben $n > 35$ liefert die nachfolgende Gleichung eine grobe Approximation für das Quantil:

$$K_{n;1-\alpha/2} = \sqrt{\ln\left(\frac{2}{\alpha}\right)} / \sqrt{2n}$$

k	x _k (R/B)	F _x (x _k)	1-k/n	c _k
1	23,7	1,000000	0,981481	0,018518
2	12,6	0,978878	0,962963	0,015915
3	10,8	0,931560	0,944444	0,012884
4	9,5	0,866884	0,925926	0,059042
5	8,8	0,818184	0,907407	0,089224
6	8,4	0,780919	0,888889	0,107970
7	8,4	0,779918	0,870370	0,090452
8	8,4	0,779375	0,851852	0,072476
9	8,2	0,768070	0,833333	0,065263
10	8,2	0,763720	0,814815	0,051095
11	7,6	0,705246	0,796296	0,091050
12	7,6	0,703445	0,777778	0,074333
13	7,5	0,694548	0,759259	0,064711
14	7,4	0,686972	0,740741	0,053769
15	6,7	0,612984	0,722222	0,109238
16	6,7	0,611160	0,703704	0,092544
17	6,6	0,594234	0,685185	0,090951
18	6,5	0,590864	0,666667	0,075802
19	6,5	0,581653	0,648148	0,066495
20	5,8	0,506561	0,629630	0,123068
21	5,8	0,505986	0,611111	0,105125
22	5,5	0,469983	0,592593	0,122610
23	5,3	0,448788	0,574074	0,125286
24	5,3	0,440606	0,555556	0,114949
25	5,2	0,429233	0,537037	0,107804
26	5,0	0,403646	0,518519	0,114872
27	4,7	0,376886	0,500000	0,123114
28	4,6	0,368465	0,481481	0,113016
29	4,4	0,347132	0,462963	0,115831
30	4,4	0,341278	0,444444	0,103166
31	4,3	0,331251	0,425926	0,094675
32	4,3	0,329826	0,407407	0,077581
33	4,3	0,326872	0,388889	0,062017
34	4,2	0,320743	0,370370	0,049628
35	4,2	0,316398	0,351852	0,035454
36	4,1	0,311761	0,333333	0,021572
37	4,1	0,311164	0,314815	0,003651
38	4,1	0,305910	0,296296	0,009614
39	4,0	0,296635	0,277778	0,018858
40	3,9	0,289693	0,259259	0,030434
41	3,8	0,281464	0,240741	0,040724
42	3,8	0,277221	0,222222	0,054999
43	3,8	0,275668	0,203704	0,071964
44	3,6	0,256928	0,185185	0,071743
45	3,4	0,239411	0,166667	0,072745
46	3,4	0,237895	0,148148	0,089747
47	3,3	0,227069	0,129630	0,097439
48	3,2	0,220441	0,111111	0,109330
49	3,1	0,211502	0,092593	0,118909
50	3,0	0,205616	0,074074	0,131542
51	2,9	0,193619	0,055556	0,138063
52	2,7	0,183671	0,037037	0,146634
53	2,2	0,146204	0,018519	0,127686
54	2,0	0,132853	0,000000	0,132853

Fortsetzung

Schätzung der Parametereigenschaften mit Konfidenzzahlen

Konfidenzbereich für den Mittelwert bei unbekanntem Mittelwert und unbekannter Varianz

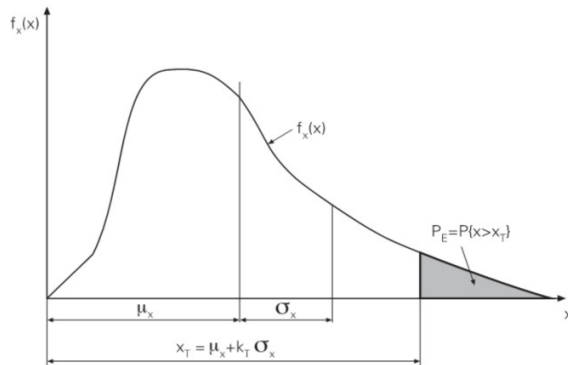
Anzahl n =	54	$\mu_{\text{max}} =$	<table border="1"><tr><td>6,9</td></tr></table>	6,9
6,9				
Mittelwert =	5,8	$\mu_{\text{min}} =$	<table border="1"><tr><td>4,7</td></tr></table>	4,7
4,7				
Standardabweichung =	3,4			
Alpha $\alpha =$	0,010 (Signifikanzniveau)			
Konfidenzzahl $\gamma =$	0,980			
$F_t(t_\gamma) =$	0,990			
Freiheitsgrad m =	53			
$t_\gamma =$	2,3993 vgl. Tabelle t-Verteilung			

		Konfidenzbereich	
		$\bar{x} - t_\gamma \cdot \bar{s}_x < \mu_x < \bar{x} + t_\gamma \cdot \bar{s}_x$	
		<table border="1"><tr><td>4,7 < μ_x < 6,9</td></tr></table>	4,7 < μ_x < 6,9
4,7 < μ_x < 6,9			

Güteschätzung für die Fraktile (mit Konfidenzzahl)

Anzahl n =	54
Varianz =	11,3
Schiefekoeffizient =	2,6
Kurtosis =	13,4
Koeffizient $K_T =$	2,33 vgl. Tabelle Normalverteilung $\Phi(z) = z$ d.h. $\Phi(0,9901) = 2,33$
Varianz $s^2_{xT} =$	<u>5,0</u>
Standardabw. $s_{xT} =$	2,2
Mittelwert $x_T =$	5,8
Alpha $\alpha =$	0,010 (Signifikanzniveau)
Konfidenzzahl $\gamma =$	0,980
$F_t(t_{T,m}) =$	0,990
Freiheitsgrad m = n-1 =	53
$t_{T,m} =$	2,3993 vgl. Tabelle t-Verteilung

$x_T(0,98) =$	$x_{T,\text{max}} =$	<table border="1"><tr><td>8,5</td></tr></table>	8,5
8,5			
$x_T(0,98) =$	$x_{T,\text{min}} =$	<table border="1"><tr><td>3,0</td></tr></table>	3,0
3,0			



$$x_T(\gamma) = \bar{x}_T + \bar{s}_{xT} [1 + 1/n]^{1/2} \cdot t_{T,n-1} \quad (\text{max})$$

$$x_T(\gamma) = \bar{x}_T - \bar{s}_{xT} [1 + 1/n]^{1/2} \cdot t_{T,n-1} \quad (\text{min})$$

Anhang G – Modifikation der Urliste zur Bestimmung von r/s

Fluss- kurve Nr.	Radius r [m]	Sehne s [m]	Verhältnis r/s [-]	Fluss- kurve Nr.	Radius r [m]	Sehne s [m]	Verhältnis r/s [-]
1	2.000	1.010,6	1,98	28	2.010	2.103,7	0,96
2	2.800	2.817,8	0,99	29	1.120	1.778,3	0,63
3	1.700	1.807,8	0,94	30	3.000	1.499,2	2,00
4	1.450	1.217,1	1,19	31	2.460	2.787,4	0,88
5	2.200	1.952,6	1,13	32	1.680	2.197,9	0,76
6	1.540	1.317,2	1,17	33	1.400	2.180,0	0,64
7	1.225	1.454,0	0,84	34	1.000	1.608,1	0,62
8	3.650	1.424,2	2,56	35	1.250	1.882,8	0,66
9	1.200	2.299,9	0,52	36	1.500	1.560,3	0,96
10	2.470	2.465,5	1,00	37	1.500	2.106,1	0,71
11	2.160	2.624,2	0,82	38	1.265	2.161,7	0,59
12	1.250	1.780,8	0,70	39	7.600	3.918,7	1,94
13	1.620	2.397,0	0,68	40	1.640	1.629,6	1,01
14	1.390	1.544,3	0,90	41	1.730	3.056,0	0,57
15	4.000	2.172,2	1,84	42	1.900	1.313,1	1,45
16	1.100	1.929,4	0,57	43	2.380	1.394,9	1,71
17	1.300	1.487,0	0,87	44	2.000	2.405,9	0,83
18	1.900	2.119,7	0,90	45	2.000	1.501,7	1,33
19	835	1.469,9	0,57	46	1.150	1.877,3	0,61
20	1.000	1.645,9	0,61	47	1.520	2.599,2	0,58
21	1.370	1.951,1	0,70	48	2.240	1.839,0	1,22
22	1.250	1.763,3	0,71	49	3.800	2.474,9	1,54
23	3.400	2.325,2	1,46	50	4.500	1.394,7	3,23
24	710	1.348,5	0,53	51	2.970	1.515,3	1,96
25	700	1.276,0	0,55	52	3.800	2.180,1	1,74
26	2.500	3.609,7	0,69	53	3.800	1.500,2	2,53
27	1.400	1.898,3	0,74	54	3.700	3.270,0	1,13

Anhang H – Ergebnisse der durchgeführten Prüfverfahren (r/s)

Kolmogorov-Smirnov Test

Anzahl n = 54
 Mittelwert = 1,1
 Standardabweichung = 0,6

Testgröße: $d(\alpha, n) = c(\alpha, n) - \max c_k$
 wenn $d(\alpha, n) > 0$, dann ist die Nullhypothese erfüllt
 wenn $d(\alpha, n) < 0$, dann ist die Nullhypothese nicht erfüllt

Alpha α = 0,01 (Signifikanzniveau)
 $c(\alpha, n) = 0,221492$
 $\max c_k = 0,186412$
 $d(\alpha, n) = 0,035080 > 0$

$c(\alpha, n) = K_{n;1-\alpha/2}$ (Quantil)

Bei Stichproben $n > 35$ liefert die nachfolgende Gleichung eine grobe Approximation für das Quantil:

$$K_{n;1-\alpha/2} = \sqrt{\ln\left(\frac{2}{\alpha}\right)} / \sqrt{2n}$$

k	xk (r/s)	Fx (xk)	1-k/n	ck
1	3,23	0,999820	0,981481	0,018339
2	2,56	0,993031	0,962963	0,030068
3	2,53	0,991995	0,944444	0,047551
4	2,00	0,935700	0,925926	0,009774
5	1,98	0,930929	0,907407	0,023522
6	1,96	0,926612	0,888889	0,037723
7	1,94	0,921717	0,870370	0,051346
8	1,84	0,894888	0,851852	0,043036
9	1,74	0,861794	0,833333	0,028460
10	1,71	0,847782	0,814815	0,032968
11	1,54	0,770765	0,796296	0,025531
12	1,46	0,732084	0,777778	0,045694
13	1,45	0,723618	0,759259	0,035641
14	1,33	0,655856	0,740741	0,084885
15	1,22	0,583562	0,722222	0,138660
16	1,19	0,566054	0,703704	0,137649
17	1,17	0,551386	0,685185	0,133799
18	1,13	0,526416	0,666667	0,140250
19	1,13	0,523230	0,648148	0,124918
20	1,01	0,443218	0,629630	0,186412
21	1,00	0,440198	0,611111	0,170913
22	0,99	0,434850	0,592593	0,157742
23	0,96	0,413656	0,574074	0,160418
24	0,96	0,409831	0,555556	0,145724
25	0,94	0,400080	0,537037	0,136957
26	0,90	0,374297	0,518519	0,144222
27	0,90	0,371928	0,500000	0,128072
28	0,88	0,363228	0,481481	0,118254
29	0,87	0,358033	0,462963	0,104930
30	0,84	0,338412	0,444444	0,106032
31	0,83	0,331608	0,425926	0,094318
32	0,82	0,326661	0,407407	0,080747
33	0,76	0,292060	0,388889	0,096829
34	0,74	0,276837	0,370370	0,093534
35	0,71	0,262873	0,351852	0,088979
36	0,71	0,261067	0,333333	0,072267
37	0,70	0,257417	0,314815	0,057398
38	0,70	0,257287	0,296296	0,039010
39	0,69	0,252275	0,277778	0,025503
40	0,68	0,243432	0,259259	0,015827
41	0,66	0,237227	0,240741	0,003514
42	0,64	0,226161	0,222222	0,003939
43	0,63	0,219982	0,203704	0,016278
44	0,62	0,216056	0,185185	0,030871
45	0,61	0,211542	0,166667	0,044875
46	0,61	0,209137	0,148148	0,060989
47	0,59	0,198545	0,129630	0,068915
48	0,58	0,198357	0,111111	0,087246
49	0,57	0,191605	0,092593	0,099012
50	0,57	0,190658	0,074074	0,116584
51	0,57	0,189769	0,055556	0,134214
52	0,55	0,181941	0,037037	0,144904
53	0,53	0,172344	0,018519	0,153825
54	0,52	0,170335	0,000000	0,170335

Fortsetzung

Schätzung der Parametergüte mit Konfidenzzahlen

Konfidenzbereich für den Mittelwert bei unbekanntem Mittelwert und unbekannter Varianz

Anzahl n =	54	$\mu_{\max} =$	<table border="1"><tr><td>1,3</td></tr></table>	1,3
1,3				
Mittelwert =	1,1	$\mu_{\min} =$	<table border="1"><tr><td>0,9</td></tr></table>	0,9
0,9				
Standardabweichung =	0,6			
Alpha $\alpha =$	0,010 (Signifikanzniveau)			
Konfidenzzahl $\gamma =$	0,980			
Ft (t_γ) =	0,990			
Freiheitsgrad m =	53			
$t_\gamma =$	2,3993 vgl. Tabelle t-Verteilung			

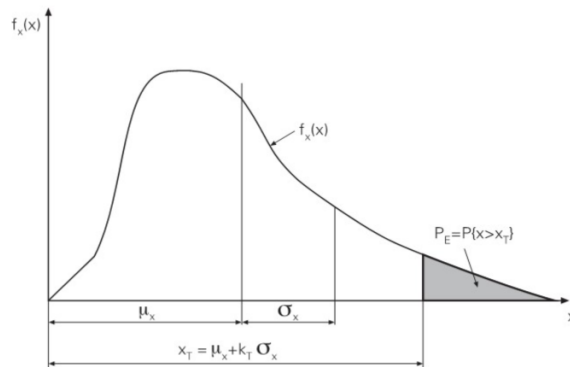
Konfidenzbereich

$$\bar{x} - t_\gamma \cdot \bar{s}_x < \mu_x < \bar{x} + t_\gamma \cdot \bar{s}_x$$

0,9	$< \mu_x <$	1,3
-----	-------------	-----

Güteschätzung für die Fraktile (mit Konfidenzzahl)

Anzahl n =	54	
Varianz =	0,4	
Schiefekoeffizient =	1,6	
Kurtosis =	5,6	
Koeffizient $K_T =$	2,33 vgl. Tabelle Normalverteilung $\Phi(z) = z$ d.h. $\Phi(0,9901) = 2,33$	
Varianz $s^2_{xT} =$	<u>0,1</u>	
Standardabw. $s_{xT} =$	0,3	
Mittelwert $x_T =$	1,1	
Alpha $a =$	0,010 (Signifikanzniveau)	
Konfidenzzahl $\gamma =$	0,980	
Ft ($t_{T,m}$) =	0,990	
Freiheitsgrad m = n-1 =	53	
$t_{T,m} =$	2,3993 vgl. Tabelle t-Verteilung	
$x_T(0,98) =$	$x_{T,\max} =$ <table border="1"><tr><td>1,4</td></tr></table>	1,4
1,4		
$x_T(0,98) =$	$x_{T,\min} =$ <table border="1"><tr><td>0,8</td></tr></table>	0,8
0,8		



$$x_T(\gamma) = \bar{x}_T + \bar{s}_{xT} [1 + 1/n]^{1/2} \cdot t_{T,n-1} \quad (\max)$$

$$x_T(\gamma) = \bar{x}_T - \bar{s}_{xT} [1 + 1/n]^{1/2} \cdot t_{T,n-1} \quad (\min)$$

Anhang I – Bestimmung empirischer Korrelationskoeffizienten

Ermittlung des empirischen Korrelationskoeffizienten

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} \cdot S_{yy}}} = 0,63572 \quad \text{wobei } r_{xy} = \begin{cases} 0 & \text{keinerlei,} \\ 1 & \text{volle gleichsinnige,} \\ -1 & \text{volle ungleichsinnige Abhängigkeit} \end{cases}$$

Nr.	R/B = x	r/s = y	$v_x = x - \bar{x}$	$v_y = y - \bar{y}$	$s_{xyi} = v_{xi} \cdot v_{yi}$	$s_{xxi} = v_{xi}^2$	$s_{yyi} = v_{yi}^2$
1	4,7	1,98	-1,05	0,89	-0,94	1,11	0,79
2	7,5	0,99	1,71	-0,10	-0,17	2,93	0,01
3	4,4	0,94	-1,38	-0,15	0,21	1,89	0,02
4	4,3	1,19	-1,48	0,10	-0,15	2,19	0,01
5	6,5	1,13	0,69	0,03	0,02	0,48	0,00
6	4,1	1,17	-1,65	0,08	-0,13	2,72	0,01
7	3,4	0,84	-2,40	-0,25	0,60	5,75	0,06
8	8,4	2,56	2,60	1,47	3,82	6,74	2,16
9	3,2	0,52	-2,59	-0,57	1,48	6,71	0,32
10	6,7	1,00	0,95	-0,09	-0,09	0,90	0,01
11	6,6	0,82	0,80	-0,27	-0,22	0,64	0,07
12	3,8	0,70	-1,94	-0,39	0,76	3,78	0,15
13	4,4	0,68	-1,32	-0,42	0,55	1,75	0,17
14	4,2	0,90	-1,57	-0,19	0,30	2,45	0,04
15	12,6	1,84	6,83	0,75	5,12	46,63	0,56
16	3,3	0,57	-2,52	-0,52	1,31	6,33	0,27
17	4,2	0,87	-1,61	-0,22	0,35	2,58	0,05
18	5,8	0,90	0,05	-0,20	-0,01	0,00	0,04
19	2,9	0,57	-2,91	-0,52	1,52	8,45	0,27
20	3,4	0,61	-2,38	-0,48	1,15	5,67	0,23
21	4,3	0,70	-1,47	-0,39	0,57	2,15	0,15
22	4,0	0,71	-1,80	-0,38	0,69	3,22	0,15
23	9,5	1,46	3,74	0,37	1,38	13,97	0,14
24	2,2	0,53	-3,54	-0,57	2,00	12,53	0,32
25	2,0	0,55	-3,74	-0,54	2,03	14,00	0,30
26	7,6	0,69	1,80	-0,40	-0,72	3,23	0,16
27	4,1	0,74	-1,71	-0,35	0,60	2,91	0,13
28	5,8	0,96	0,06	-0,14	-0,01	0,00	0,02
29	3,6	0,63	-2,19	-0,46	1,01	4,82	0,21
30	8,4	2,00	2,61	0,91	2,37	6,79	0,83
31	7,4	0,88	1,64	-0,21	-0,34	2,68	0,04
32	5,2	0,76	-0,60	-0,33	0,20	0,36	0,11
33	4,1	0,64	-1,66	-0,45	0,74	2,74	0,20
34	2,7	0,62	-3,03	-0,47	1,42	9,19	0,22
35	3,0	0,66	-2,76	-0,43	1,18	7,63	0,18
36	3,9	0,96	-1,86	-0,13	0,24	3,47	0,02
37	4,3	0,71	-1,51	-0,38	0,57	2,27	0,14
38	3,8	0,59	-1,99	-0,51	1,01	3,95	0,26
39	23,7	1,94	17,94	0,85	15,21	321,96	0,72
40	5,3	1,01	-0,43	-0,09	0,04	0,19	0,01
41	4,6	0,57	-1,13	-0,53	0,59	1,28	0,28
42	5,3	1,45	-0,50	0,36	-0,18	0,25	0,13
43	6,5	1,71	0,77	0,61	0,47	0,60	0,38
44	5,5	0,83	-0,25	-0,26	0,07	0,06	0,07
45	5,0	1,33	-0,82	0,24	-0,20	0,67	0,06
46	3,1	0,61	-2,69	-0,48	1,29	7,26	0,23
47	3,8	0,58	-2,00	-0,51	1,02	4,01	0,26
48	6,7	1,22	0,97	0,13	0,12	0,93	0,02
49	8,8	1,54	3,05	0,44	1,35	9,33	0,20
50	10,8	3,23	5,00	2,13	10,68	25,01	4,56
51	7,6	1,96	1,81	0,87	1,57	3,29	0,75
52	8,4	1,74	2,59	0,65	1,69	6,70	0,42
53	8,2	2,53	2,42	1,44	3,48	5,83	2,08
54	8,2	1,13	2,46	0,04	0,10	6,07	0,00

$$\bar{x} = 5,8 \quad \bar{y} = 1,1 \quad \sum_{i=1}^n = 67,77 \quad 599,09 \quad 18,97$$

Anhang J – Berechnungsmodell Nr. 1 (r/s = 0,50)**Grunddaten - Achse der bogenförmigen Dichtwand:**

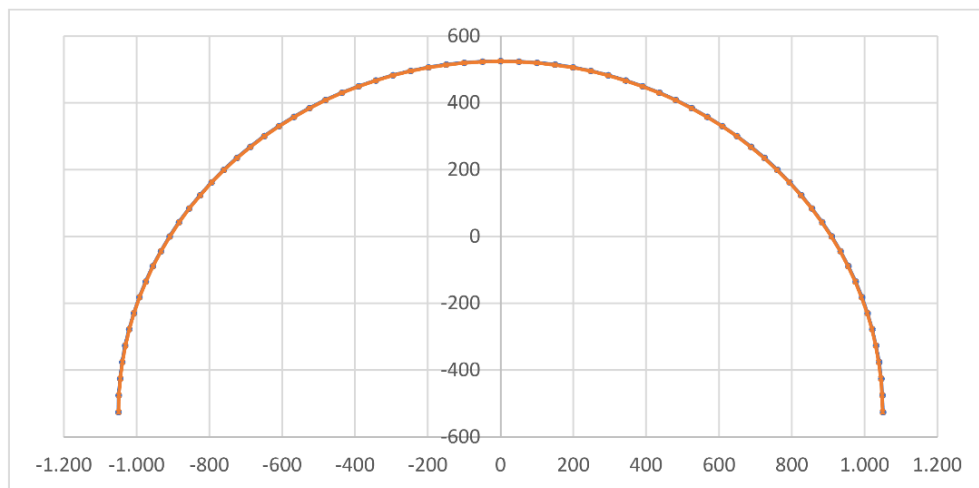
Sehne s	Verhältnis r/s	Radius r	Winkel α	Bogenl. b
2.100 m	0,50	1.050 m	180,0000 °	3.298,672 m
Bogenteile n	Bogenl. b_i	Winkel α_i	Pfeilh. h_P	halbe Pfeilh.
66	49,980 m	2,7273 °	1.050,000 m	525,000 m
d DW	x Mittelp.	y Mittelp.	x Mittel. NEU	y Mittel. NEU
1,000 m	0,000 m	0,000 m	0,000 m	-525,000 m

Koordinaten der bogenförmigen Dichtwand (d \approx 1,0 m):

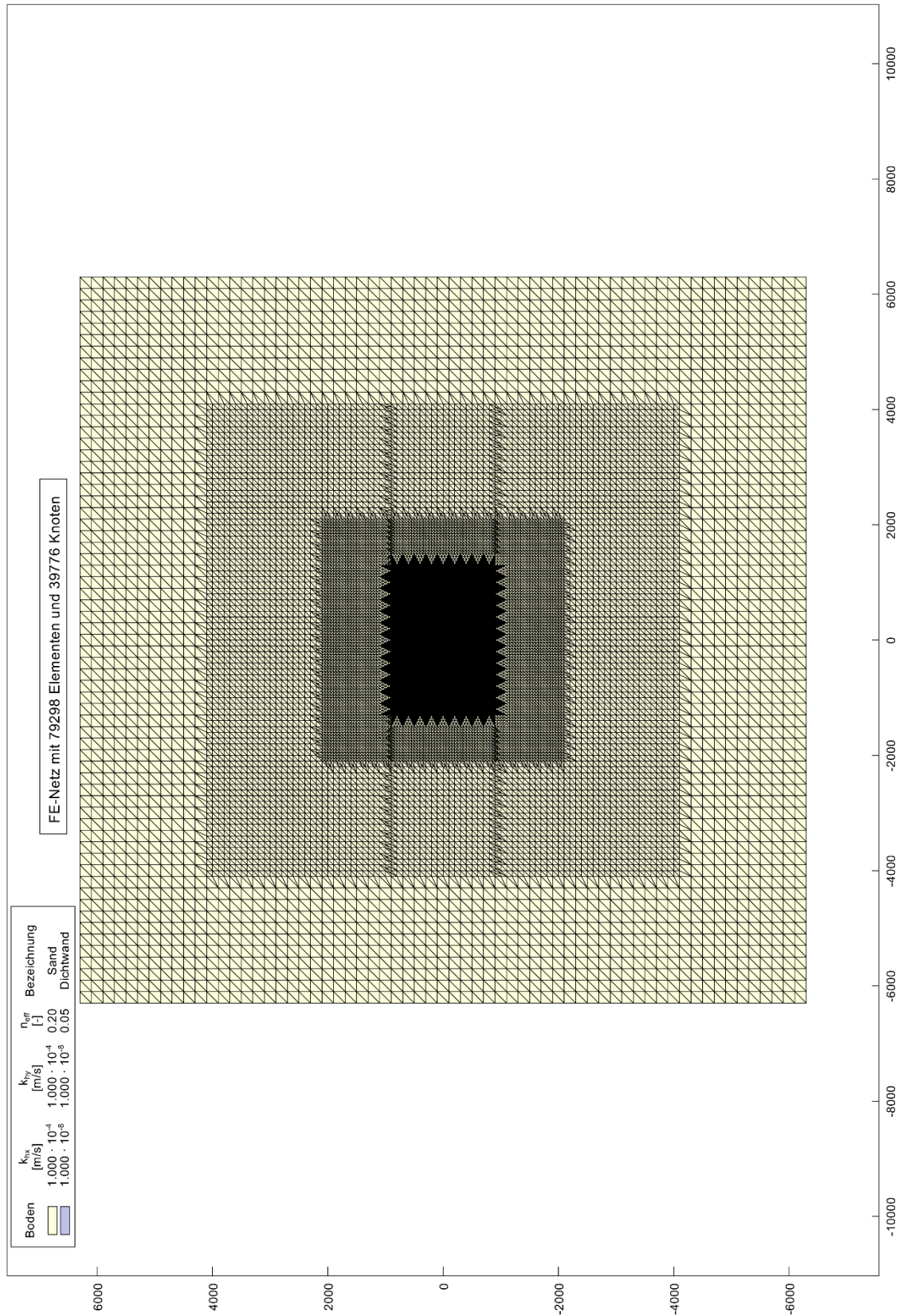
Bogen (oben)			Bogen (unten)		
Pkt.-Nr.	x	y	Pkt.-Nr.	x	y
1	-1.050,500 m	-525,000 m	68	-1.049,500 m	-525,000 m
2	-1.049,310 m	-475,015 m	69	-1.048,311 m	-475,063 m
3	-1.045,743 m	-425,144 m	70	-1.044,748 m	-425,239 m
4	-1.039,807 m	-375,498 m	71	-1.038,818 m	-375,641 m
5	-1.031,516 m	-326,192 m	72	-1.030,534 m	-326,381 m
6	-1.020,888 m	-277,335 m	73	-1.019,916 m	-277,571 m
7	-1.007,947 m	-229,040 m	74	-1.006,988 m	-229,322 m
8	-992,723 m	-181,415 m	75	-991,778 m	-181,742 m
9	-975,251 m	-134,569 m	76	-974,322 m	-134,940 m
10	-955,568 m	-88,607 m	77	-954,659 m	-89,022 m
11	-933,722 m	-43,633 m	78	-932,833 m	-44,091 m
12	-909,760 m	0,250 m	79	-908,894 m	-0,250 m
13	-883,737 m	42,943 m	80	-882,896 m	42,403 m
14	-855,712 m	84,350 m	81	-854,897 m	83,770 m
15	-825,749 m	124,376 m	82	-824,963 m	123,758 m
16	-793,915 m	162,931 m	83	-793,159 m	162,276 m
17	-760,283 m	199,928 m	84	-759,559 m	199,238 m
18	-724,928 m	235,283 m	85	-724,238 m	234,559 m
19	-687,931 m	268,915 m	86	-687,276 m	268,159 m
20	-649,376 m	300,749 m	87	-648,758 m	299,963 m
21	-609,350 m	330,712 m	88	-608,770 m	329,897 m
22	-567,943 m	358,737 m	89	-567,403 m	357,896 m
23	-525,250 m	384,760 m	90	-524,750 m	383,894 m
24	-481,367 m	408,722 m	91	-480,909 m	407,833 m
25	-436,393 m	430,568 m	92	-435,978 m	429,659 m
26	-390,431 m	450,251 m	93	-390,060 m	449,322 m
27	-343,585 m	467,723 m	94	-343,258 m	466,778 m
28	-295,960 m	482,947 m	95	-295,678 m	481,988 m
29	-247,665 m	495,888 m	96	-247,429 m	494,916 m
30	-198,808 m	506,516 m	97	-198,619 m	505,534 m
31	-149,502 m	514,807 m	98	-149,359 m	513,818 m
32	-99,856 m	520,743 m	99	-99,761 m	519,748 m
33	-49,985 m	524,310 m	100	-49,937 m	523,311 m
34	0,000 m	525,500 m	101	0,000 m	524,500 m

Fortsetzung

35	49,985 m	524,310 m	102	49,937 m	523,311 m
36	99,856 m	520,743 m	103	99,761 m	519,748 m
37	149,502 m	514,807 m	104	149,359 m	513,818 m
38	198,808 m	506,516 m	105	198,619 m	505,534 m
39	247,665 m	495,888 m	106	247,429 m	494,916 m
40	295,960 m	482,947 m	107	295,678 m	481,988 m
41	343,585 m	467,723 m	108	343,258 m	466,778 m
42	390,431 m	450,251 m	109	390,060 m	449,322 m
43	436,393 m	430,568 m	110	435,978 m	429,659 m
44	481,367 m	408,722 m	111	480,909 m	407,833 m
45	525,250 m	384,760 m	112	524,750 m	383,894 m
46	567,943 m	358,737 m	113	567,403 m	357,896 m
47	609,350 m	330,712 m	114	608,770 m	329,897 m
48	649,376 m	300,749 m	115	648,758 m	299,963 m
49	687,931 m	268,915 m	116	687,276 m	268,159 m
50	724,928 m	235,283 m	117	724,238 m	234,559 m
51	760,283 m	199,928 m	118	759,559 m	199,238 m
52	793,915 m	162,931 m	119	793,159 m	162,276 m
53	825,749 m	124,376 m	120	824,963 m	123,758 m
54	855,712 m	84,350 m	121	854,897 m	83,770 m
55	883,737 m	42,943 m	122	882,896 m	42,403 m
56	909,760 m	0,250 m	123	908,894 m	-0,250 m
57	933,722 m	-43,633 m	124	932,833 m	-44,091 m
58	955,568 m	-88,607 m	125	954,659 m	-89,022 m
59	975,251 m	-134,569 m	126	974,322 m	-134,940 m
60	992,723 m	-181,415 m	127	991,778 m	-181,742 m
61	1.007,947 m	-229,040 m	128	1.006,988 m	-229,322 m
62	1.020,888 m	-277,335 m	129	1.019,916 m	-277,571 m
63	1.031,516 m	-326,192 m	130	1.030,534 m	-326,381 m
64	1.039,807 m	-375,498 m	131	1.038,818 m	-375,641 m
65	1.045,743 m	-425,144 m	132	1.044,748 m	-425,239 m
66	1.049,310 m	-475,015 m	133	1.048,311 m	-475,063 m
67	1.050,500 m	-525,000 m	134	1.049,500 m	-525,000 m



Fortsetzung



Anhang K – Berechnungsmodell Nr. 2 (r/s = 0,55)**Grunddaten - Achse der bogenförmigen Dichtwand:**

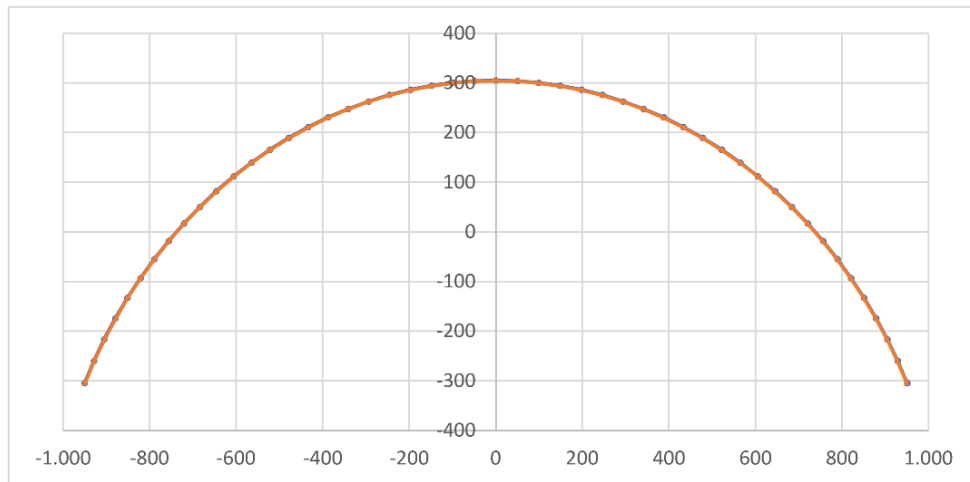
Sehne s	Verhältnis r/s	Radius r	Winkel α	Bogenl. b
1.900 m	0,55	1.045 m	130,7600 °	2.384,892 m
Bogenteile n	Bogenl. b_i	Winkel α_i	Pfeilh. h_P	halbe Pfeilh.
48	49,685 m	2,7242 °	609,655 m	304,828 m
d DW	x Mittelp.	y Mittelp.	x Mittel. NEU	y Mittel. NEU
1,000 m	0,000 m	-435,345 m	0,000 m	-740,172 m

Koordinaten der bogenförmigen Dichtwand (d \approx 1,0 m):

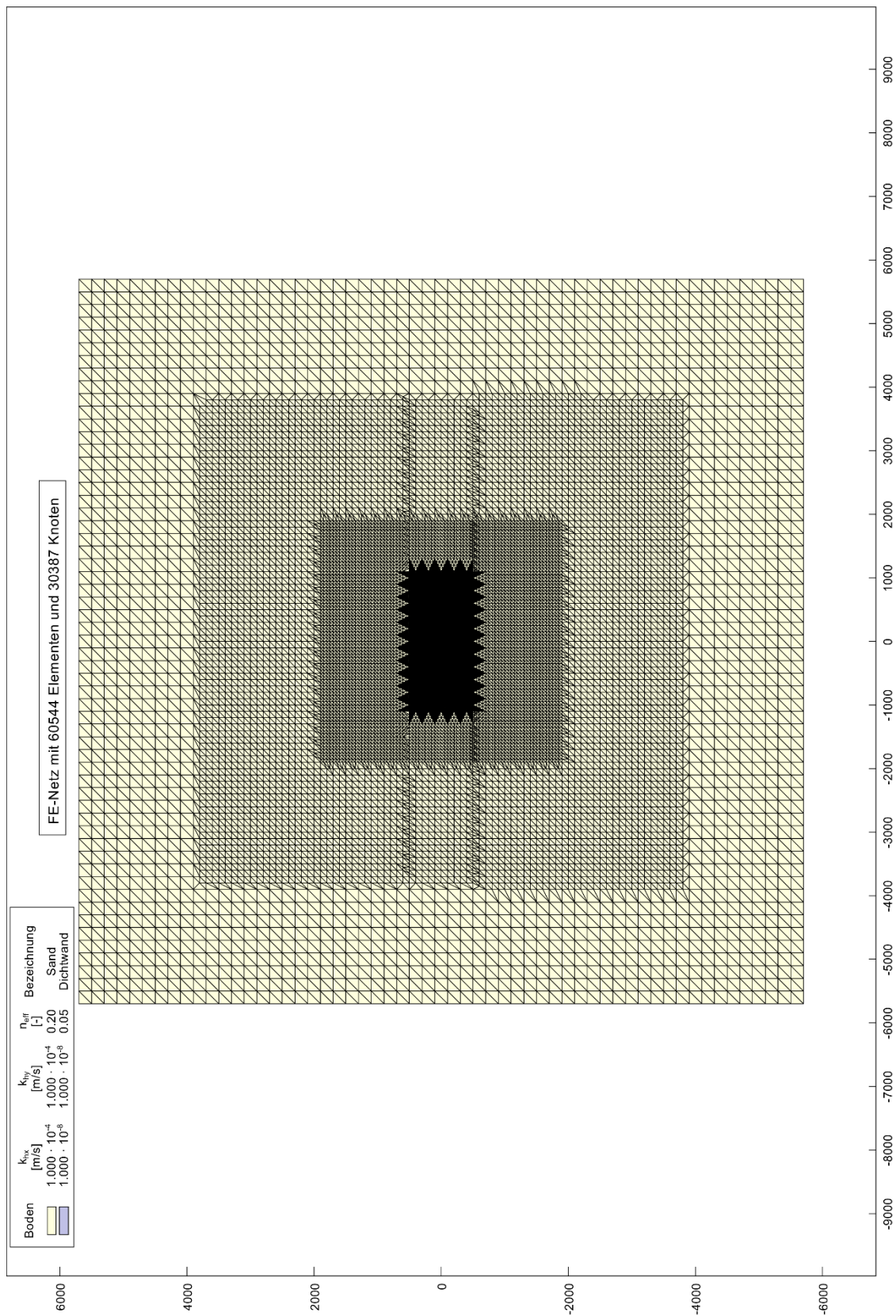
Bogen (oben)			Bogen (unten)		
Pkt.-Nr.	x	y	Pkt.-Nr.	x	y
1	-950,455 m	-304,619 m	50	-949,545 m	-305,036 m
2	-928,680 m	-259,939 m	51	-927,791 m	-260,398 m
3	-904,806 m	-216,343 m	52	-903,940 m	-216,844 m
4	-878,887 m	-173,932 m	53	-878,046 m	-174,473 m
5	-850,981 m	-132,800 m	54	-850,167 m	-133,381 m
6	-821,153 m	-93,041 m	55	-820,367 m	-93,660 m
7	-789,468 m	-54,745 m	56	-788,713 m	-55,401 m
8	-755,999 m	-17,998 m	57	-755,276 m	-18,689 m
9	-720,821 m	17,117 m	58	-720,132 m	16,393 m
10	-684,014 m	50,520 m	59	-683,360 m	49,764 m
11	-645,662 m	82,136 m	60	-645,044 m	81,350 m
12	-605,849 m	111,894 m	61	-605,270 m	111,079 m
13	-564,668 m	139,726 m	62	-564,128 m	138,884 m
14	-522,210 m	165,569 m	63	-521,711 m	164,702 m
15	-478,572 m	189,365 m	64	-478,114 m	188,476 m
16	-433,852 m	211,060 m	65	-433,438 m	210,150 m
17	-388,152 m	230,605 m	66	-387,781 m	229,676 m
18	-341,575 m	247,956 m	67	-341,248 m	247,011 m
19	-294,225 m	263,073 m	68	-293,944 m	262,114 m
20	-246,211 m	275,923 m	69	-245,975 m	274,952 m
21	-197,640 m	286,477 m	70	-197,451 m	285,495 m
22	-148,622 m	294,710 m	71	-148,480 m	293,720 m
23	-99,268 m	300,604 m	72	-99,173 m	299,609 m
24	-49,690 m	304,146 m	73	-49,643 m	303,147 m
25	0,000 m	305,328 m	74	0,000 m	304,328 m
26	49,690 m	304,146 m	75	49,643 m	303,147 m
27	99,268 m	300,604 m	76	99,173 m	299,609 m
28	148,622 m	294,710 m	77	148,480 m	293,720 m
29	197,640 m	286,477 m	78	197,451 m	285,495 m
30	246,211 m	275,923 m	79	245,975 m	274,952 m
31	294,225 m	263,073 m	80	293,944 m	262,114 m
32	341,575 m	247,956 m	81	341,248 m	247,011 m
33	388,152 m	230,605 m	82	387,781 m	229,676 m
34	433,852 m	211,060 m	83	433,438 m	210,150 m

Fortsetzung

35	478,572 m	189,365 m	84	478,114 m	188,476 m
36	522,210 m	165,569 m	85	521,711 m	164,702 m
37	564,668 m	139,726 m	86	564,128 m	138,884 m
38	605,849 m	111,894 m	87	605,270 m	111,079 m
39	645,662 m	82,136 m	88	645,044 m	81,350 m
40	684,014 m	50,520 m	89	683,360 m	49,764 m
41	720,821 m	17,117 m	90	720,132 m	16,393 m
42	755,999 m	-17,998 m	91	755,276 m	-18,689 m
43	789,468 m	-54,745 m	92	788,713 m	-55,401 m
44	821,153 m	-93,041 m	93	820,367 m	-93,660 m
45	850,981 m	-132,800 m	94	850,167 m	-133,381 m
46	878,887 m	-173,932 m	95	878,046 m	-174,473 m
47	904,806 m	-216,343 m	96	903,940 m	-216,844 m
48	928,680 m	-259,939 m	97	927,791 m	-260,398 m
49	950,455 m	-304,619 m	98	949,545 m	-305,036 m



Fortsetzung



Anhang L – Berechnungsmodell Nr. 3 (r/s = 0,65)**Grunddaten - Achse der bogenförmigen Dichtwand:**

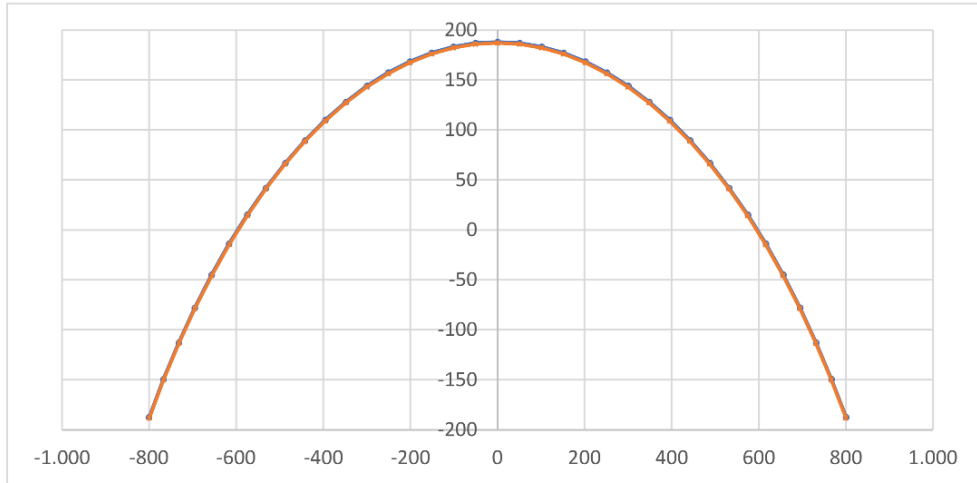
Sehne s	Verhältnis r/s	Radius r	Winkel α	Bogenl. b
1.600 m	0,65	1.040 m	100,5697 °	1.825,484 m
Bogenteile n	Bogenl. b_i	Winkel α_i	Pfeilh. h_P	halbe Pfeilh.
36	50,708 m	2,7936 °	375,470 m	187,735 m
d DW	x Mittelp.	y Mittelp.	x Mittel. NEU	y Mittel. NEU
1,000 m	0,000 m	-664,530 m	0,000 m	-852,265 m

Koordinaten der bogenförmigen Dichtwand (d \approx 1,0 m):

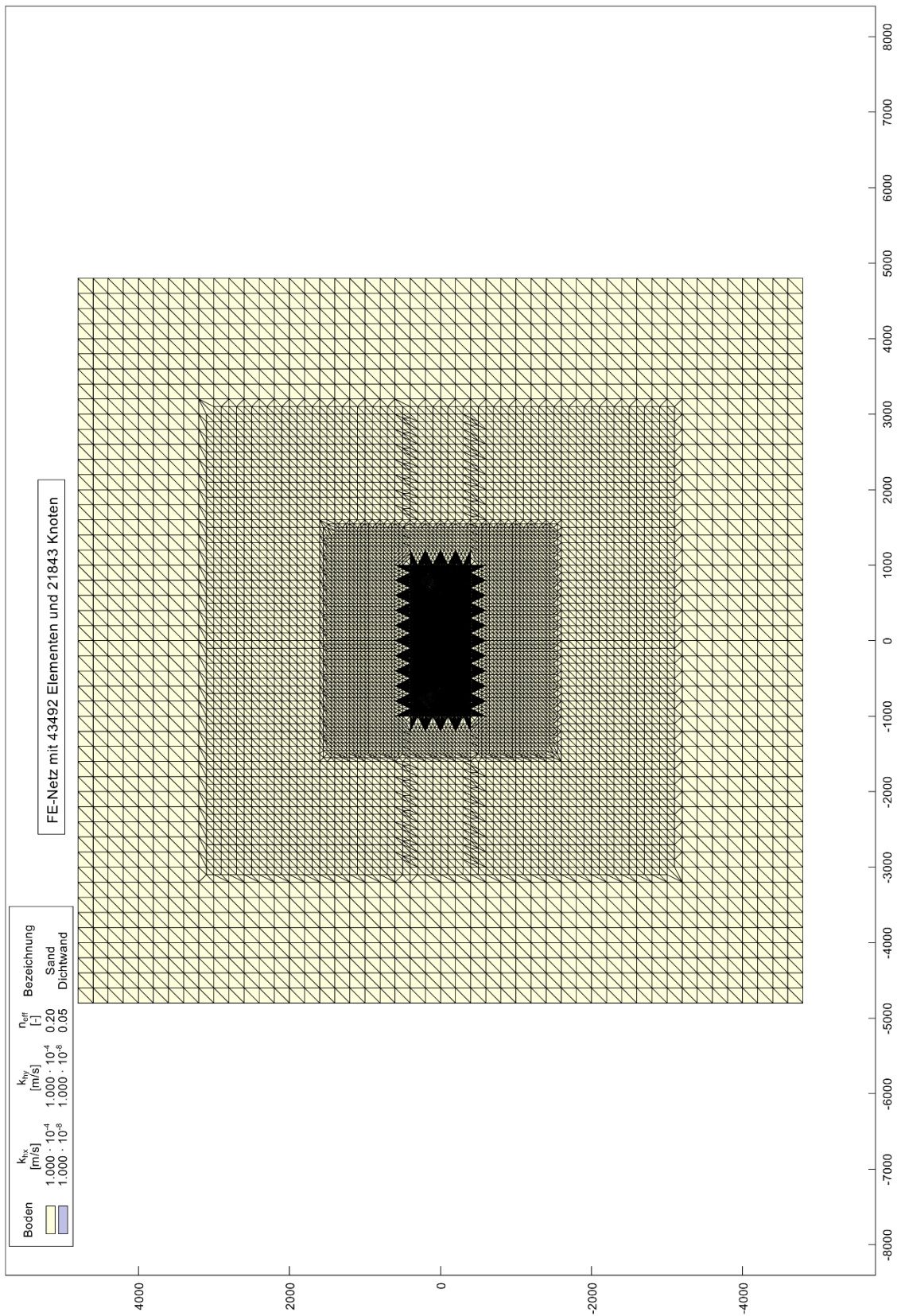
Bogen (oben)			Bogen (unten)		
Pkt.-Nr.	x	y	Pkt.-Nr.	x	y
1	-800,385 m	-187,416 m	38	-799,615 m	-188,055 m
2	-767,030 m	-149,196 m	39	-766,293 m	-149,872 m
3	-731,852 m	-112,648 m	40	-731,149 m	-113,359 m
4	-694,935 m	-77,858 m	41	-694,267 m	-78,602 m
5	-656,365 m	-44,908 m	42	-655,735 m	-45,684 m
6	-616,236 m	-13,878 m	43	-615,644 m	-14,683 m
7	-574,642 m	15,160 m	44	-574,090 m	14,327 m
8	-531,683 m	42,136 m	45	-531,172 m	41,277 m
9	-487,459 m	66,987 m	46	-486,991 m	66,103 m
10	-442,077 m	89,652 m	47	-441,652 m	88,747 m
11	-395,644 m	110,079 m	48	-395,264 m	109,154 m
12	-348,271 m	128,218 m	49	-347,937 m	127,276 m
13	-300,070 m	144,027 m	50	-299,782 m	143,070 m
14	-251,156 m	157,468 m	51	-250,915 m	156,498 m
15	-201,645 m	168,509 m	52	-201,451 m	167,528 m
16	-151,655 m	177,124 m	53	-151,509 m	176,134 m
17	-101,304 m	183,292 m	54	-101,206 m	182,297 m
18	-50,712 m	186,998 m	55	-50,663 m	186,000 m
19	0,000 m	188,235 m	56	0,000 m	187,235 m
20	50,712 m	186,998 m	57	50,663 m	186,000 m
21	101,304 m	183,292 m	58	101,206 m	182,297 m
22	151,655 m	177,124 m	59	151,509 m	176,134 m
23	201,645 m	168,509 m	60	201,451 m	167,528 m
24	251,156 m	157,468 m	61	250,915 m	156,498 m
25	300,070 m	144,027 m	62	299,782 m	143,070 m
26	348,271 m	128,218 m	63	347,937 m	127,276 m
27	395,644 m	110,079 m	64	395,264 m	109,154 m
28	442,077 m	89,652 m	65	441,652 m	88,747 m
29	487,459 m	66,987 m	66	486,991 m	66,103 m
30	531,683 m	42,136 m	67	531,172 m	41,277 m
31	574,642 m	15,160 m	68	574,090 m	14,327 m
32	616,236 m	-13,878 m	69	615,644 m	-14,683 m
33	656,365 m	-44,908 m	70	655,735 m	-45,684 m
34	694,935 m	-77,858 m	71	694,267 m	-78,602 m

Fortsetzung

35	731,852 m	-112,648 m	72	731,149 m	-113,359 m
36	767,030 m	-149,196 m	73	766,293 m	-149,872 m
37	800,385 m	-187,416 m	74	799,615 m	-188,055 m



Fortsetzung



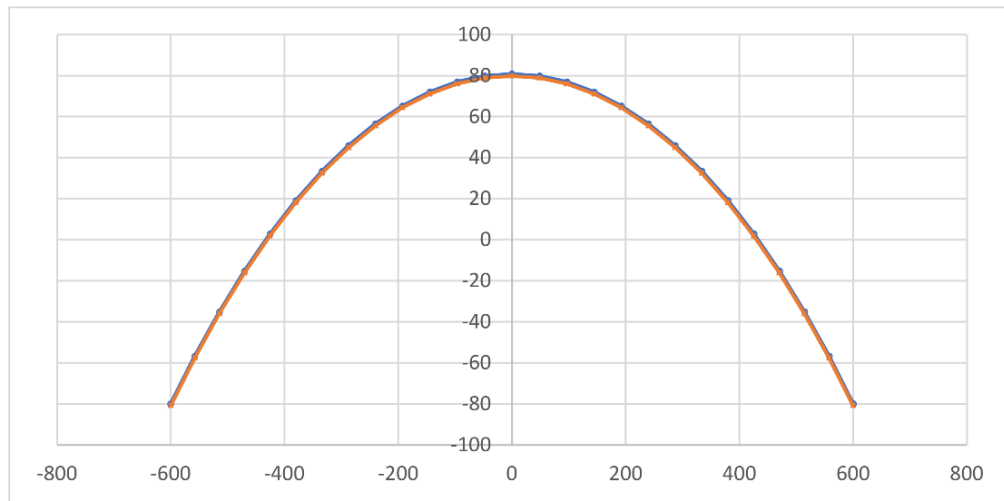
Anhang M – Berechnungsmodell Nr. 4 (r/s = 1,00)**Grunddaten - Achse der bogenförmigen Dichtwand:**

Sehne s	Verhältnis r/s	Radius r	Winkel α	Bogenl. b
1.200 m	1,00	1.200 m	60,0000 °	1.256,637 m
Bogenteile n	Bogenl. b_i	Winkel α_i	Pfeilh. h_P	halbe Pfeilh.
26	48,332 m	2,3077 °	160,770 m	80,385 m
d DW	x Mittelp.	y Mittelp.	x Mittel. NEU	y Mittel. NEU
1,000 m	0,000 m	-1.039,230 m	0,000 m	-1.119,615 m

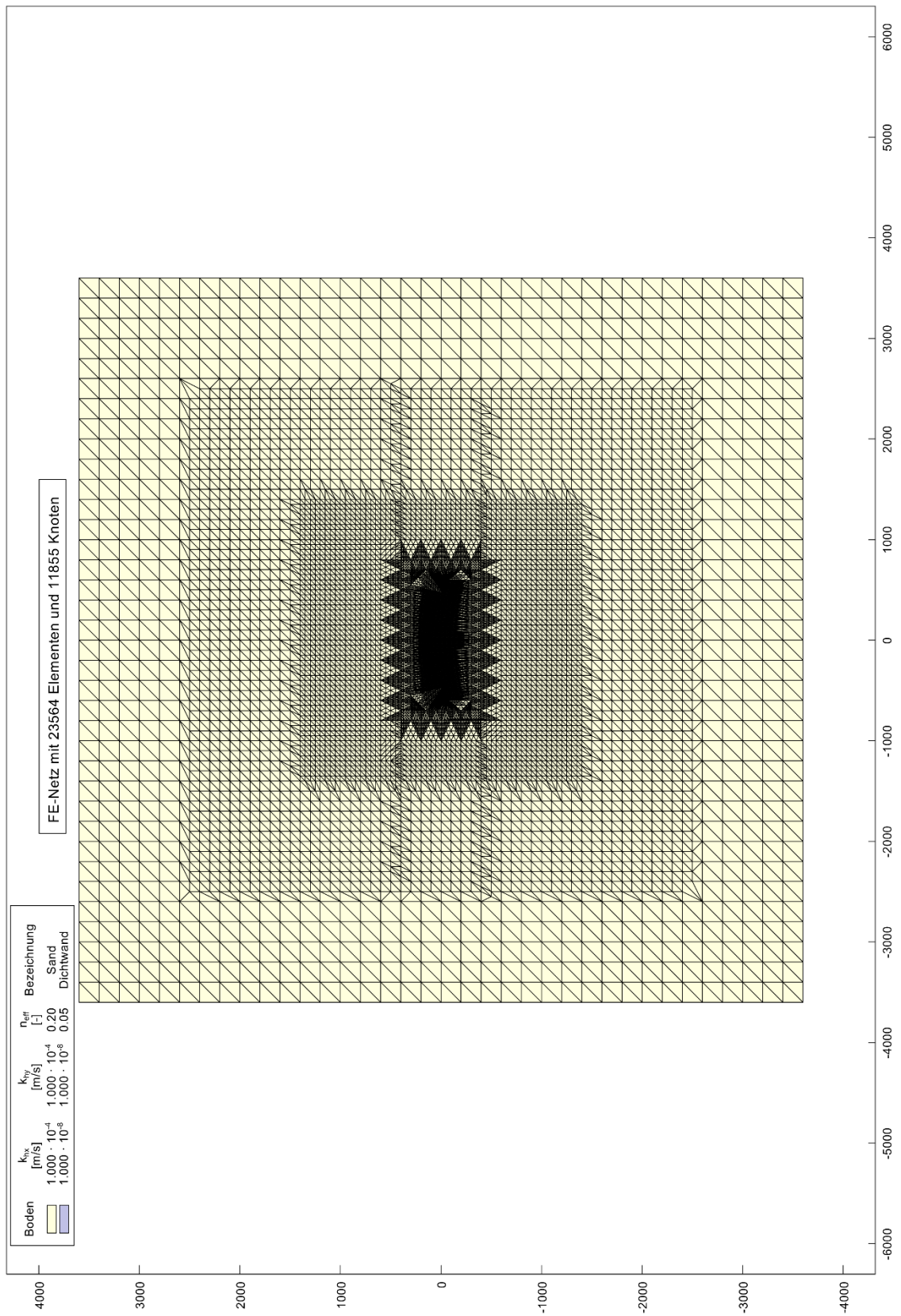
Koordinaten der bogenförmigen Dichtwand (d \approx 1,0 m):

Bogen (oben)			Bogen (unten)		
Pkt.-Nr.	x	y	Pkt.-Nr.	x	y
1	-600,250 m	-79,952 m	43	-599,750 m	-80,818 m
2	-557,900 m	-56,625 m	44	-557,435 m	-57,511 m
3	-514,645 m	-35,023 m	45	-514,217 m	-35,926 m
4	-470,556 m	-15,180 m	46	-470,164 m	-16,100 m
5	-425,703 m	2,872 m	47	-425,349 m	1,937 m
6	-380,160 m	19,103 m	48	-379,843 m	18,154 m
7	-334,000 m	33,487 m	49	-333,722 m	32,526 m
8	-287,298 m	46,000 m	50	-287,059 m	45,029 m
9	-240,131 m	56,623 m	51	-239,931 m	55,644 m
10	-192,574 m	65,339 m	52	-192,413 m	64,352 m
11	-144,704 m	72,132 m	53	-144,584 m	71,139 m
12	-96,600 m	76,992 m	54	-96,520 m	75,995 m
13	-48,339 m	79,911 m	55	-48,299 m	78,912 m
14	0,000 m	80,885 m	56	0,000 m	79,885 m
15	48,339 m	79,911 m	57	48,299 m	78,912 m
16	96,600 m	76,992 m	58	96,520 m	75,995 m
17	144,704 m	72,132 m	59	144,584 m	71,139 m
18	192,574 m	65,339 m	60	192,413 m	64,352 m
19	240,131 m	56,623 m	61	239,931 m	55,644 m
20	287,298 m	46,000 m	62	287,059 m	45,029 m
21	334,000 m	33,487 m	63	333,722 m	32,526 m
22	380,160 m	19,103 m	64	379,843 m	18,154 m
23	425,703 m	2,872 m	65	425,349 m	1,937 m
24	470,556 m	-15,180 m	66	470,164 m	-16,100 m
25	514,645 m	-35,023 m	67	514,217 m	-35,926 m
26	557,900 m	-56,625 m	68	557,435 m	-57,511 m
27	600,250 m	-79,952 m	69	599,750 m	-80,818 m

Fortsetzung



Fortsetzung



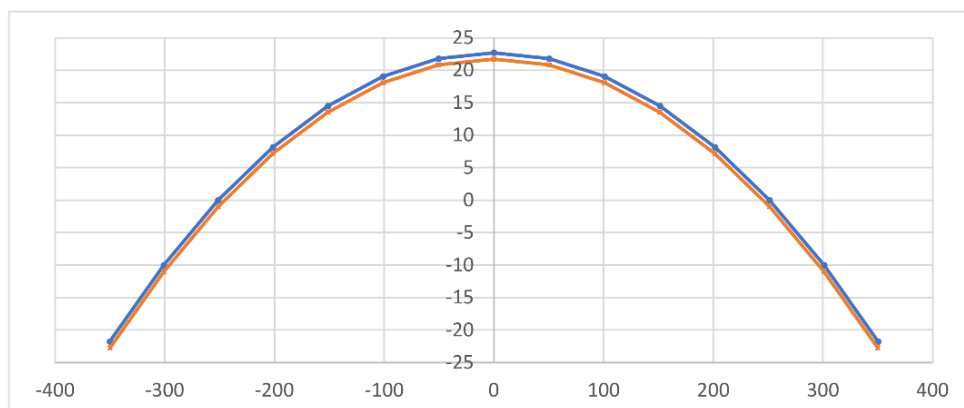
Anhang N – Berechnungsmodell Nr. 5 (r/s = 2,00)

Grunddaten - Achse der bogenförmigen Dichtwand:

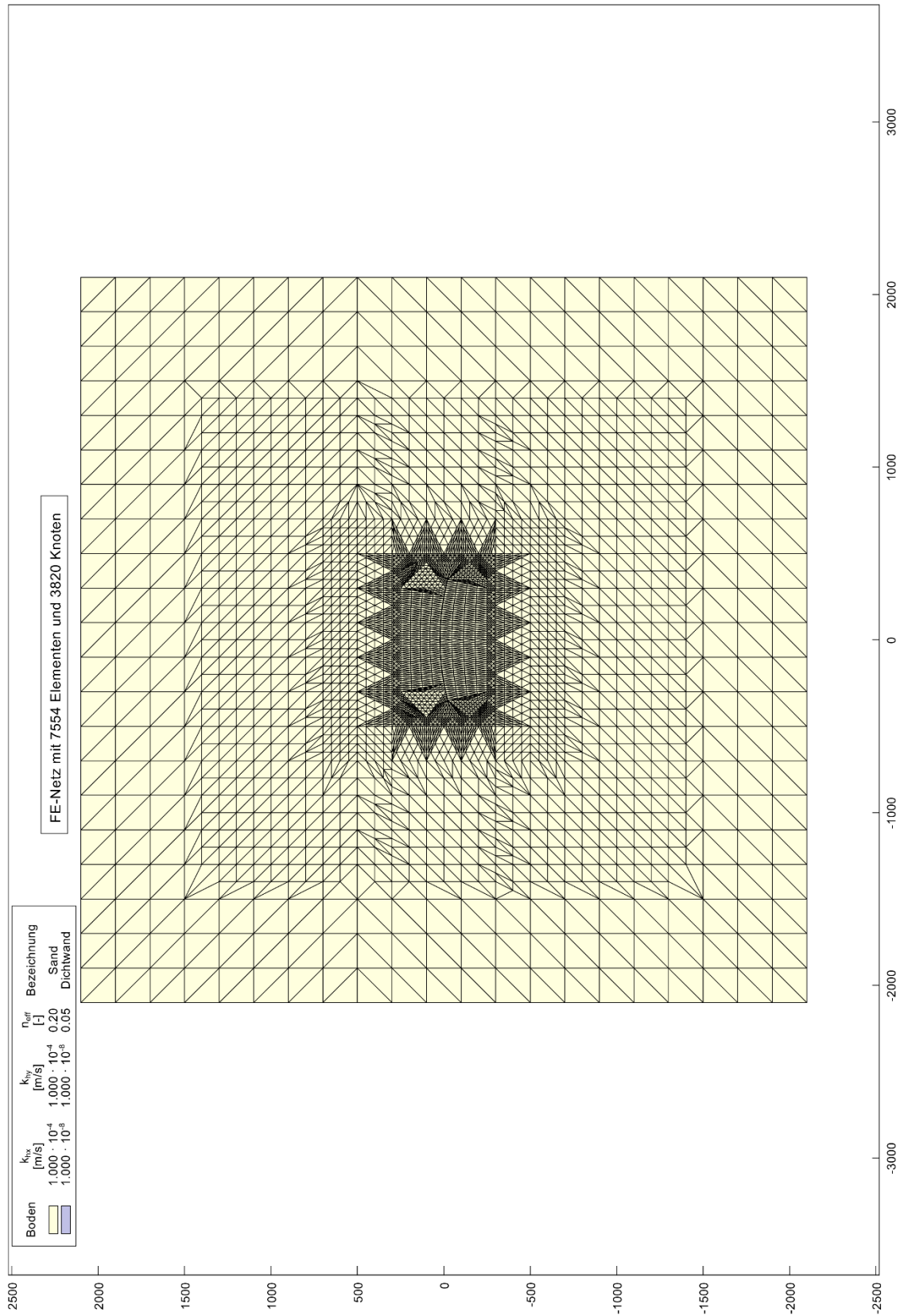
Sehne s	Verhältnis r/s	Radius r	Winkel α	Bogenl. b
700 m	2,00	1.400 m	28,9550 °	707,505 m
Bogenteile n	Bogenl. b_i	Winkel α_i	Pfeilh. h_P	halbe Pfeilh.
14	50,536 m	2,0682 °	44,456 m	22,228 m
d DW	x Mittelp.	y Mittelp.	x Mittel. NEU	y Mittel. NEU
1,000 m	0,000 m	-1.355,544 m	0,000 m	-1.377,772 m

Koordinaten der bogenförmigen Dichtwand (d \approx 1,0 m):

Bogen (oben)			Bogen (unten)		
Pkt.-Nr.	x	y	Pkt.-Nr.	x	y
1	-350,125 m	-21,744 m	16	-349,875 m	-22,712 m
2	-300,959 m	-9,991 m	17	-300,744 m	-10,968 m
3	-251,400 m	-0,021 m	18	-251,221 m	-1,005 m
4	-201,514 m	8,154 m	19	-201,371 m	7,165 m
5	-151,366 m	14,524 m	20	-151,258 m	13,530 m
6	-101,020 m	19,080 m	21	-100,948 m	18,082 m
7	-50,543 m	21,816 m	22	-50,507 m	20,816 m
8	0,000 m	22,728 m	23	0,000 m	21,728 m
9	50,543 m	21,816 m	24	50,507 m	20,816 m
10	101,020 m	19,080 m	25	100,948 m	18,082 m
11	151,366 m	14,524 m	26	151,258 m	13,530 m
12	201,514 m	8,154 m	27	201,371 m	7,165 m
13	251,400 m	-0,021 m	28	251,221 m	-1,005 m
14	300,959 m	-9,991 m	29	300,744 m	-10,968 m
15	350,125 m	-21,744 m	30	349,875 m	-22,712 m



Fortsetzung

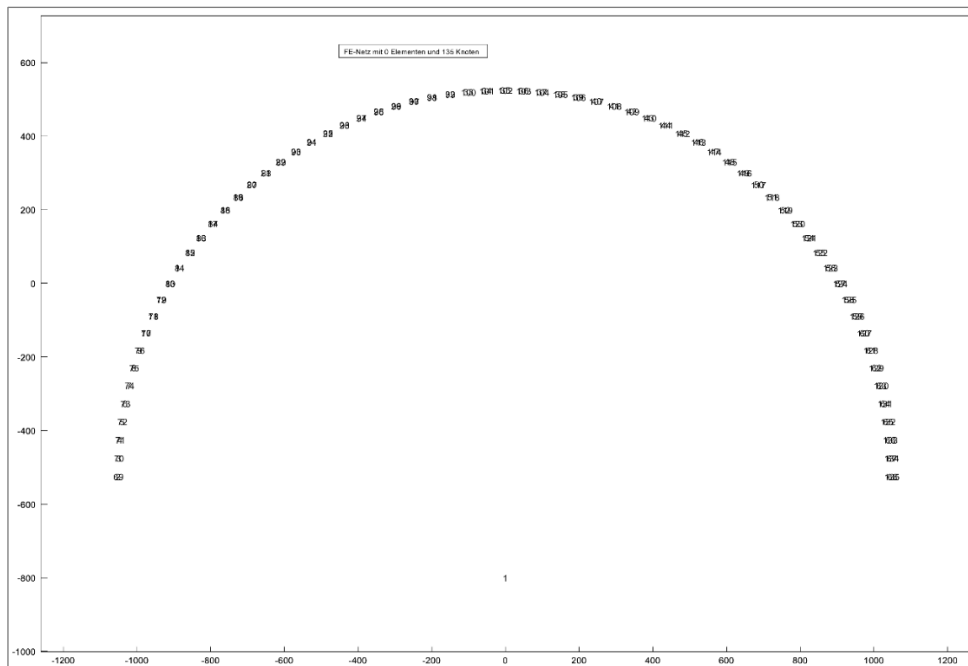


Anhang O – Modellaufbau und Diskretisierung am Modell Nr. 1

Modellaufbau und Diskretisierung am Beispiel „Berechnungsmodell Nr. 1“

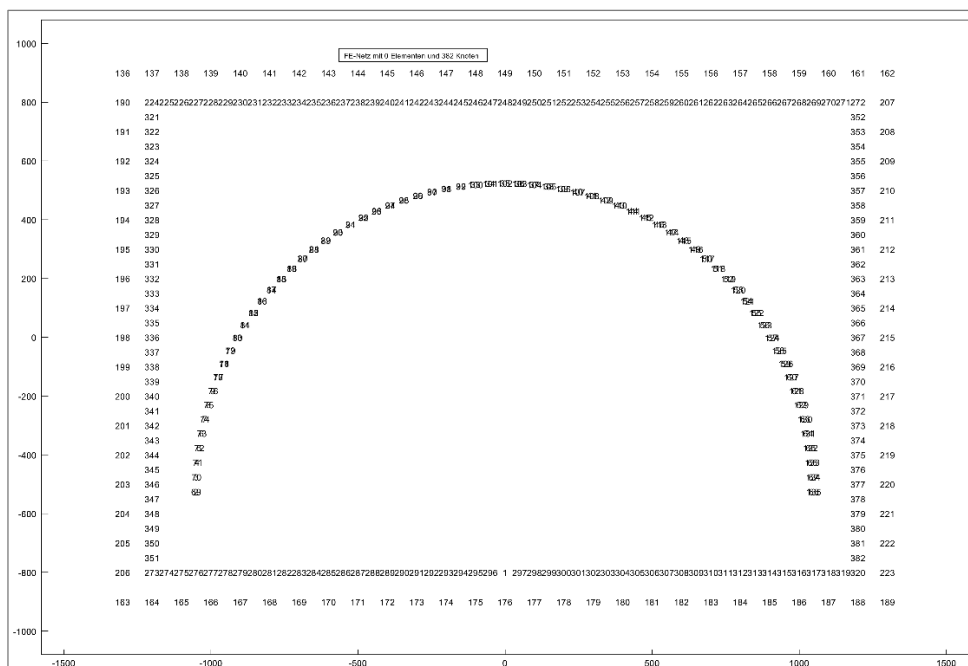
Schritt 1:

Eingabe der Koordinaten des oberen/ unteren Bogens der Dichtwand (siehe **Anhang J**).



Schritt 2:

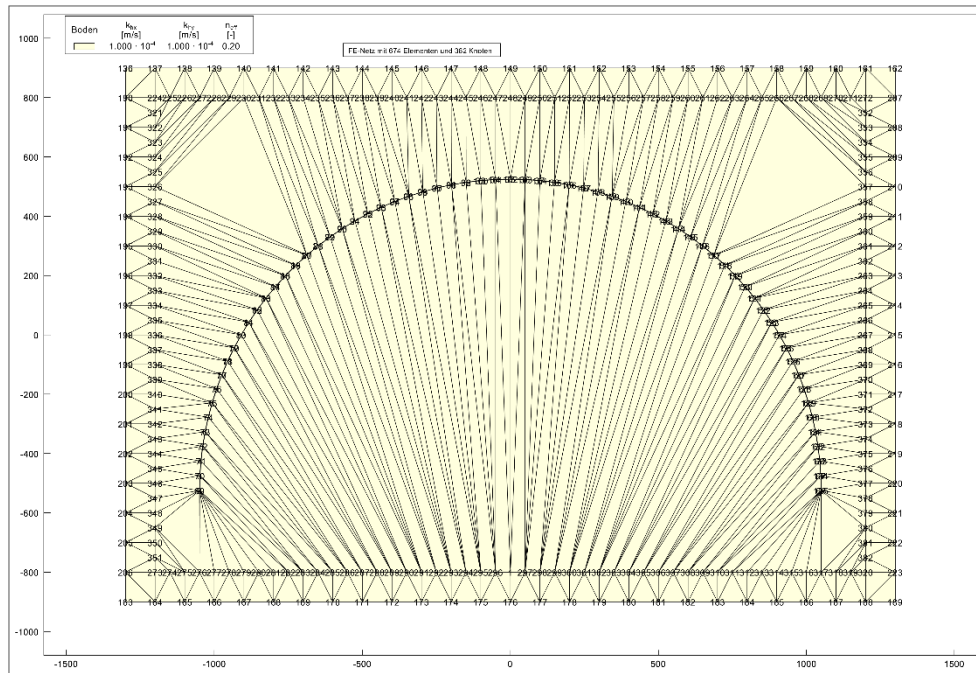
Eingabe eines Linienrasters mit $a = 100$ m (außen) und $a = 50$ m (innen) im Abstand von etwa 150 m bis 300 m von den Außenabmessungen der Dichtwand (Angleichungsnetz).



Fortsetzung

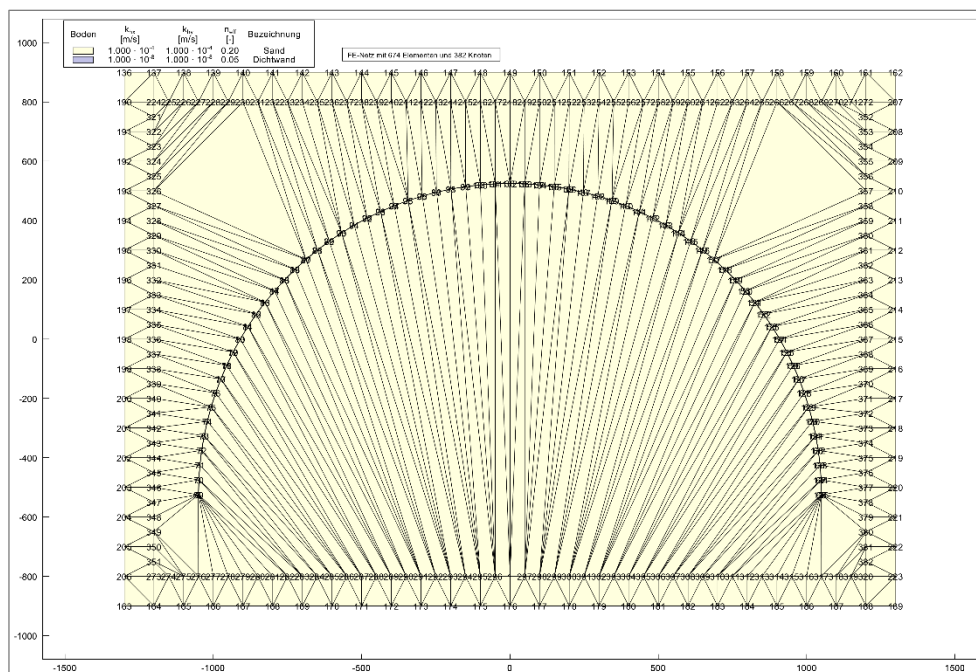
Schritt 3:

Automatische Netzgenerierung.



Schritt 4:

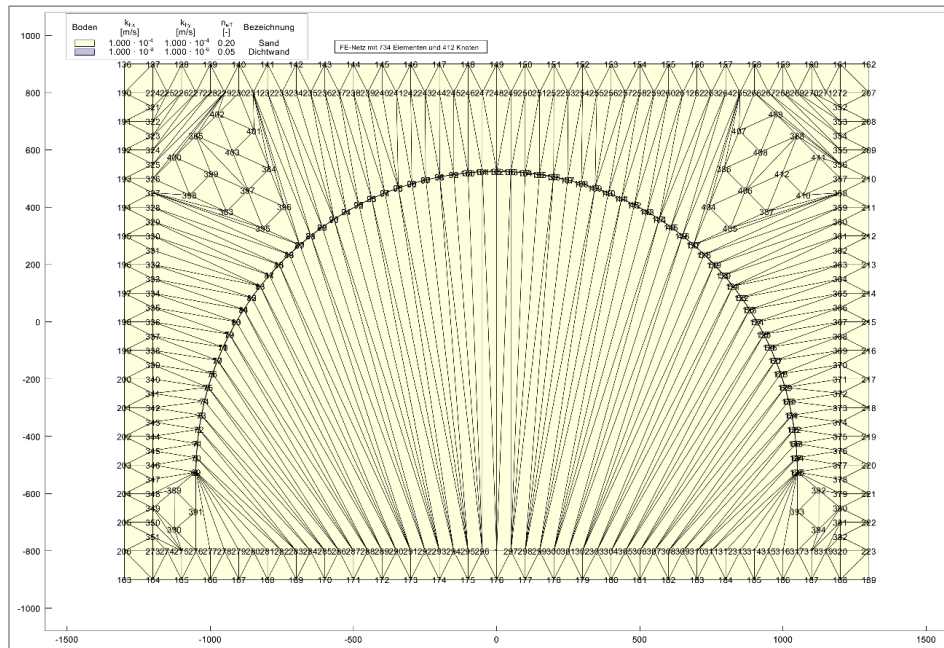
Dem Dichtwand-Netz schrittweise manuell die „Bodenart 2“ zuweisen.



Fortsetzung

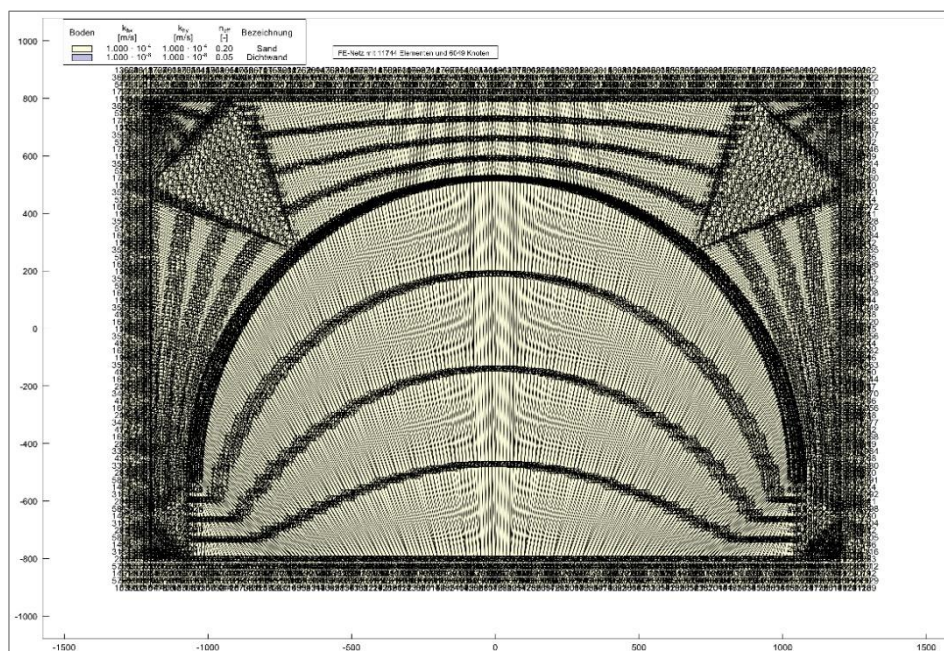
Schritt 5:

Grobe Dreiecke manuell nach „Verfahren 3“ verdichten, d.h. im angeklickten Dreieckselement wird in den Seitenhalbierenden ein Neues eingefügt und die Angrenzenden werden halbiert.



Schritt 6:

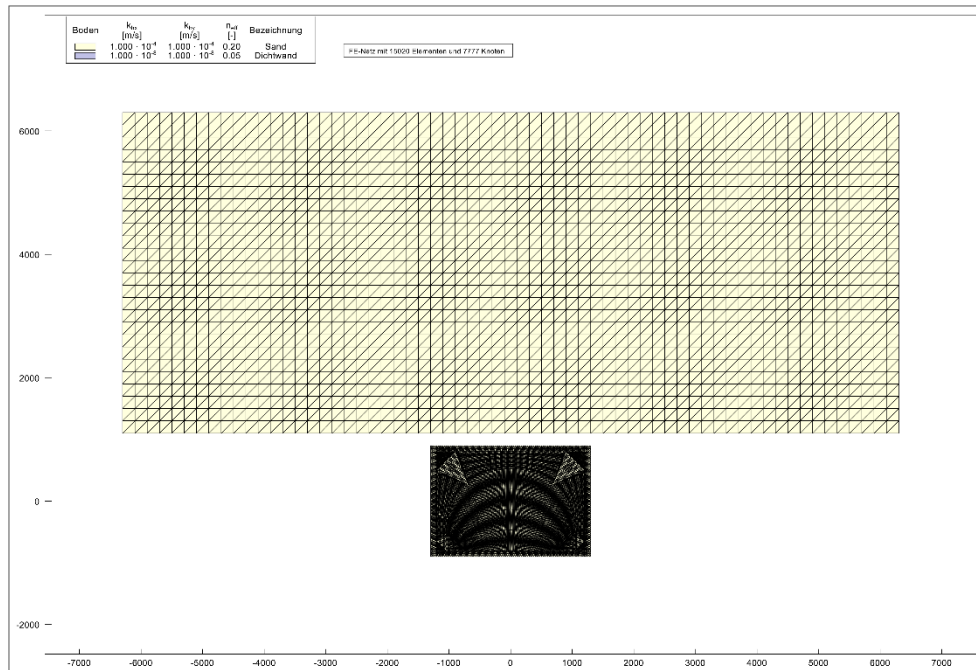
Gesamtes Netz zweimal (bei kleinen Netzen, wie Modell 4 und 5, nur einmal) nach „Verfahren 3“ verdichten. Das FE-Netz testen (Knotenabstände und Überlappung).



Fortsetzung

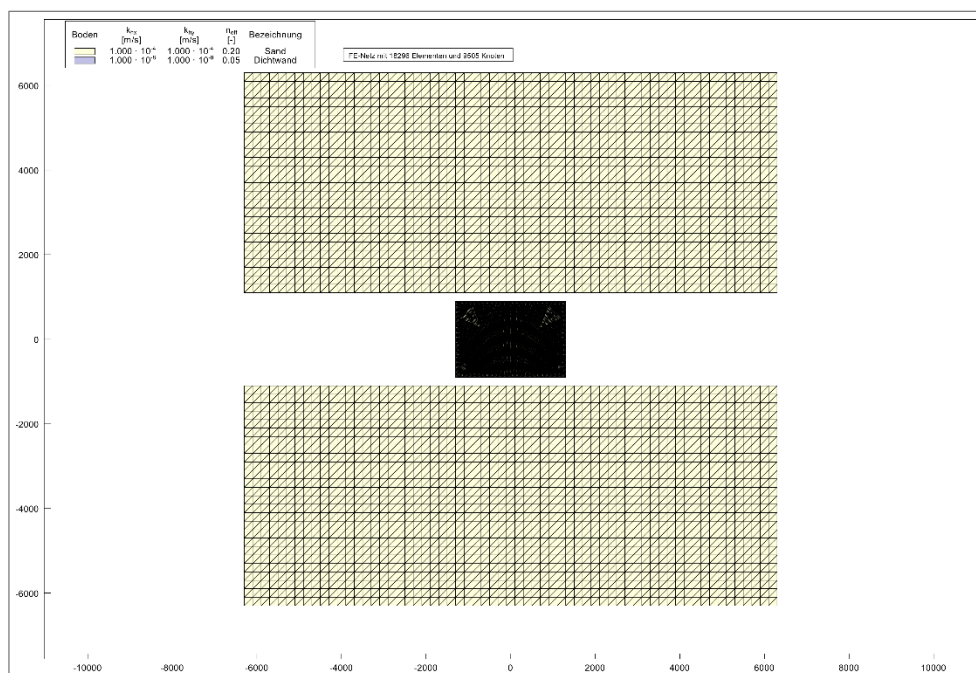
Schritt 7:

Netz (oben) mit einem Rechteckraster $a_x = a_y = 200$ m und $r_{\min/\max} = 2,41 < 5$ einfügen.



Schritt 8:

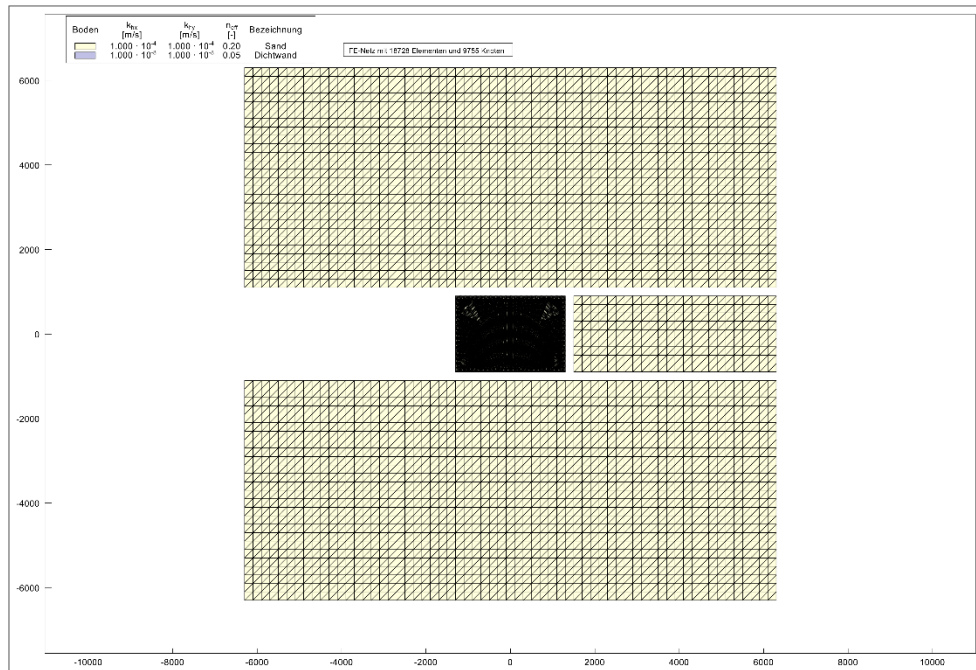
Netz (unten) mit einem Rechteckraster $a_x = a_y = 200$ m und $r_{\min/\max} = 2,41 < 5$ einfügen.



Fortsetzung

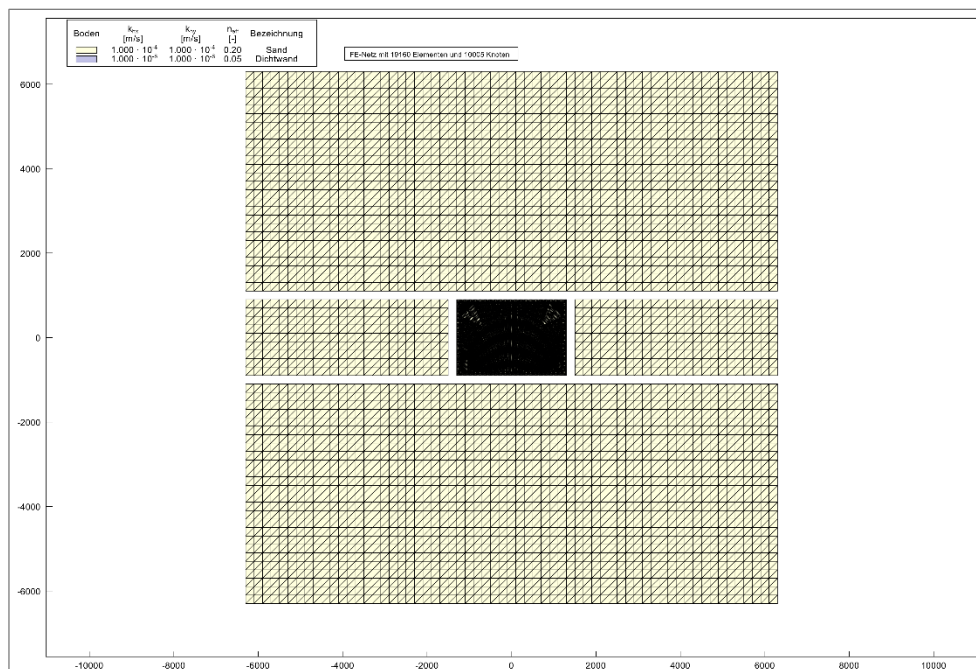
Schritt 9:

Netz (rechts) mit einem Rechteckraster $a_x = a_y = 200$ m und $r_{\min/\max} = 2,41 < 5$ einfügen.



Schritt 10:

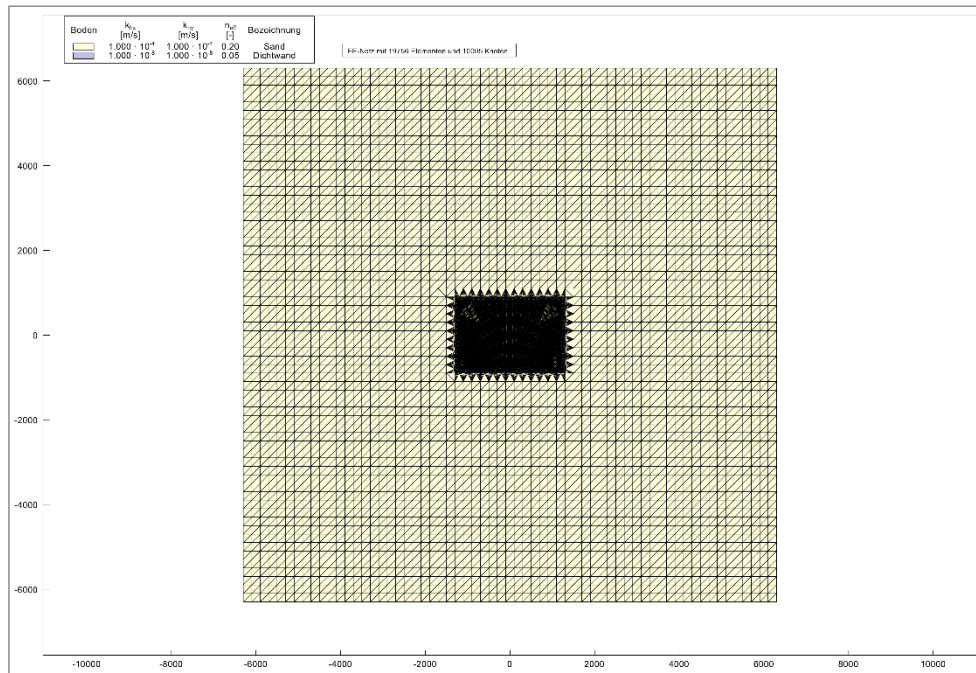
Netz (links) mit einem Rechteckraster $a_x = a_y = 200$ m und $r_{\min/\max} = 2,41 < 5$ einfügen.



Fortsetzung

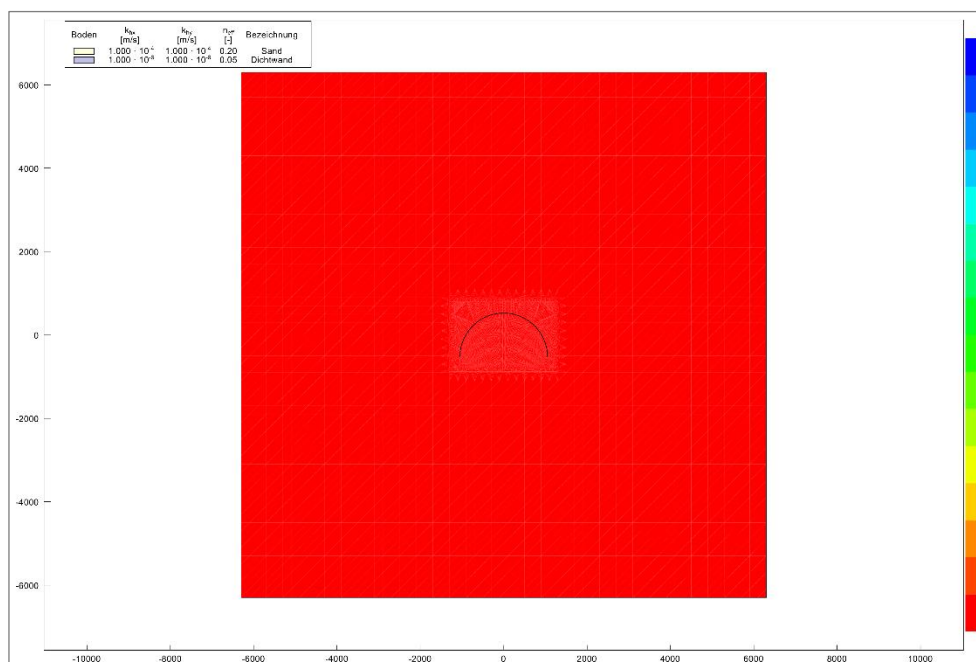
Schritt 11:

Knoten der fünf Netze durch automatische Netzgenerierung (vorhandenes Netz ergänzen) verbinden und anschließend FE-Netz testen (Knotenabstände und Überlappung).



Schritt 12:

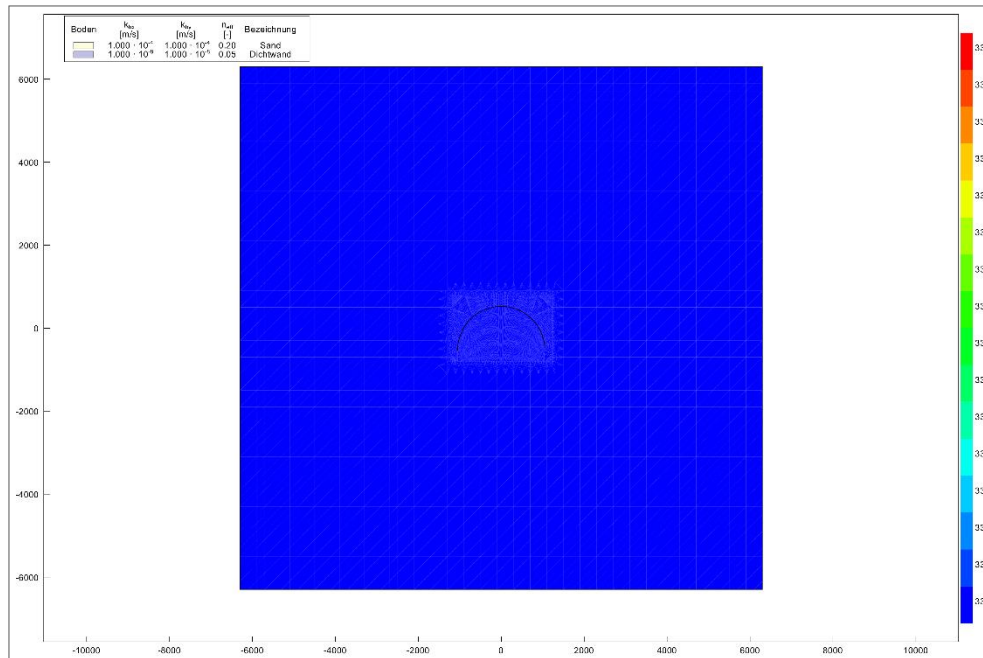
Unterkante des Grundwasserleiters $T_u = 0$ m festlegen.



Fortsetzung

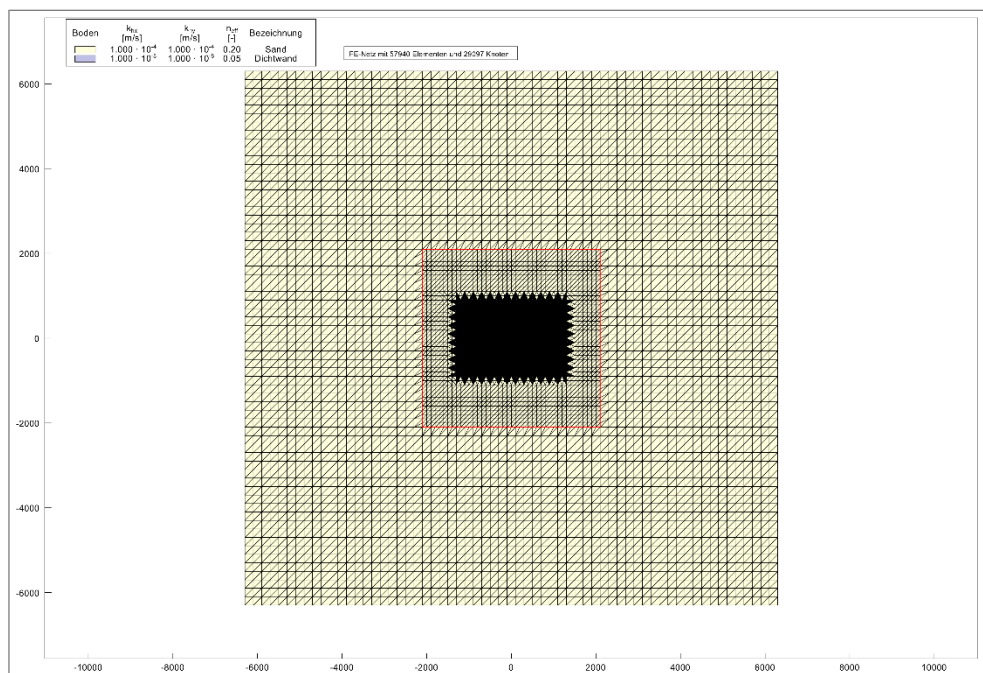
Schritt 13:

Oberkante des Grundwasserleiters $T_0 = 33,333$ m festlegen.



Schritt 14:

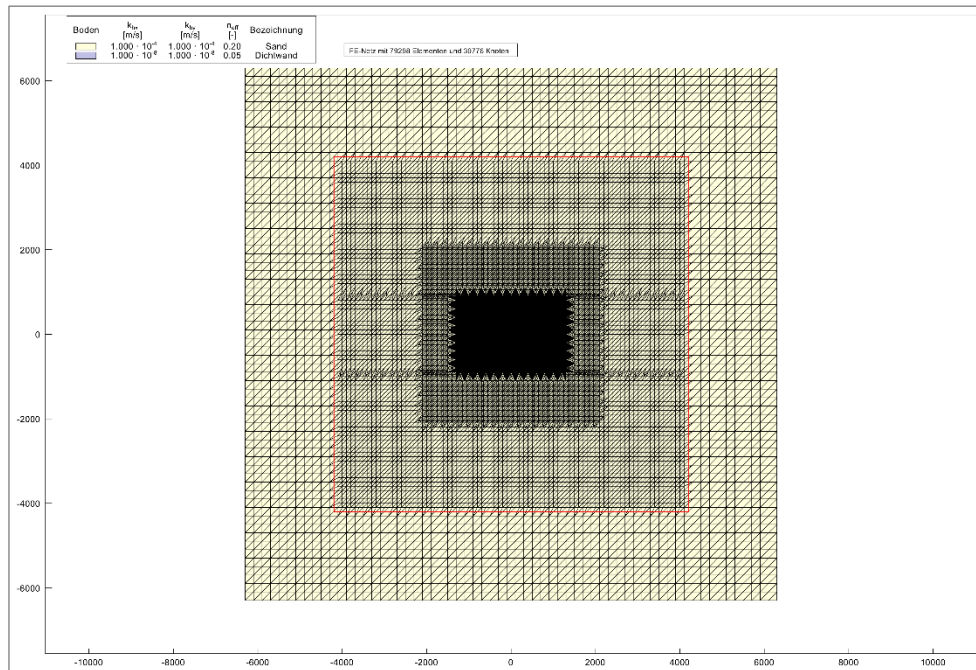
1/3 des Gesamtnetzes nach „Verfahren 3“ verdichten (siehe rote Umrandung).



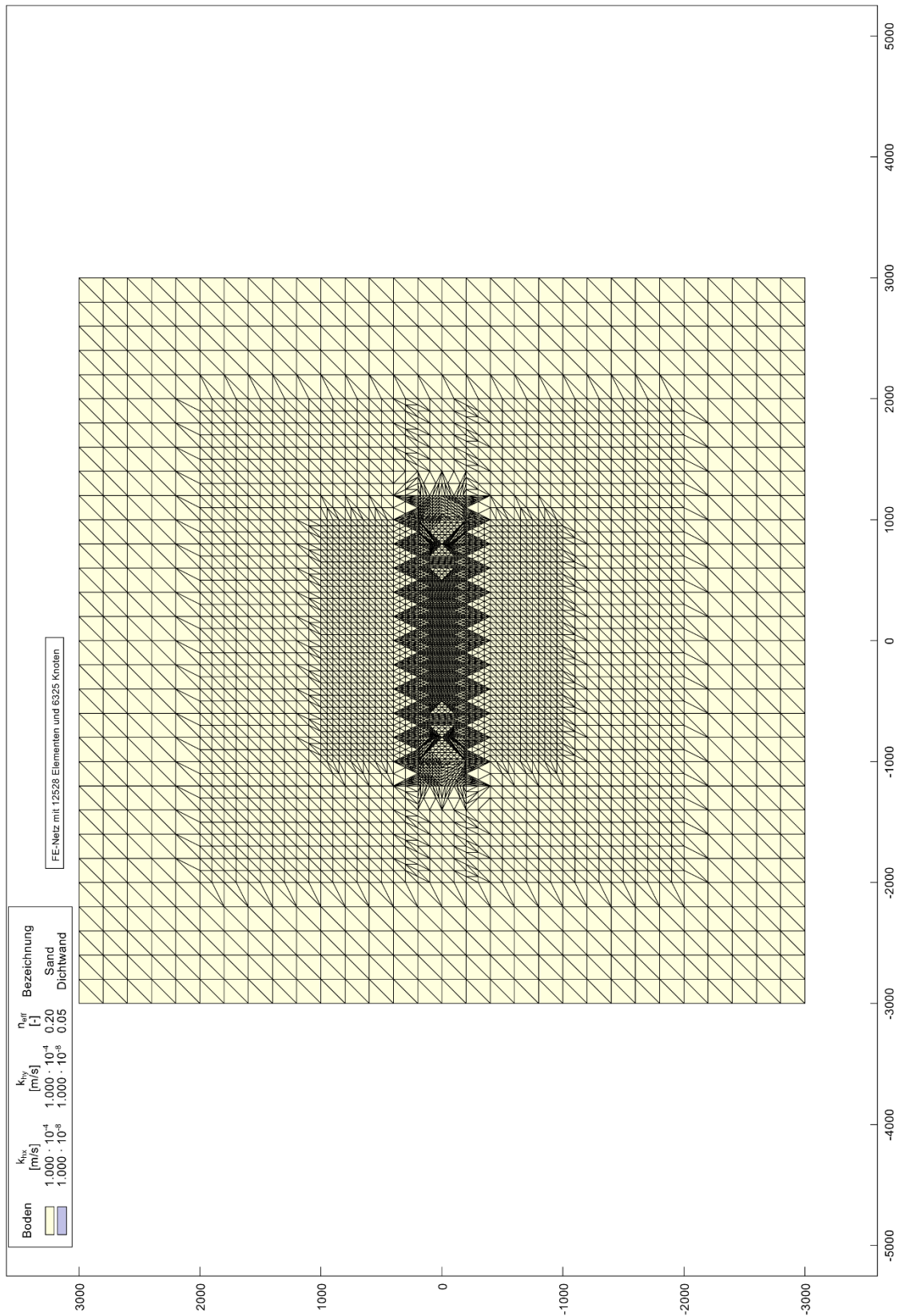
Fortsetzung

Schritt 15:

2/3 des Gesamtnetzes nach „Verfahren 3“ verdichten (siehe rote Umrandung). Die Verdichtung erfolgt hierbei allerdings nur im Bereich zwischen roter Umrandung und schwarzem Kern.



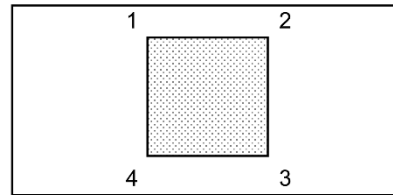
Anhang P – Modell „DW1000“ zur Kalibrierung/Validierung



Fortsetzung

Angaben zum Modell:

Länge DW L 1.000 m
 Modelllänge M_L 6.000 m
 Modellbreite M_B 6.000 m
 $M_L/2$ 3.000 m
 $M_B/2$ 3.000 m
 Gefälle i 0,001
 GW-Leiter: T 33,333 m
 GW-Mitte: H 16,667 m



0,001 0,001 0,001 0,001 0,001 0,001 0,001

Anströmwinkel	0	15	30	45	60	75	90
Modell-Punkt	Randpotenziale						
1	19,6667	20,3409	20,7647	20,9093	20,7647	20,3409	19,6667
2	19,6667	18,7880	17,7647	16,6667	15,5686	14,5453	13,6667
3	13,6667	12,9924	12,5686	12,4240	12,5686	12,9924	13,6667
4	13,6667	14,5453	15,5686	16,6667	17,7647	18,7880	19,6667
i	0,00100	0,00122	0,00137	0,00141	0,00137	0,00122	0,00100

Anhang Q – Formfaktoren $f_{(r/s)}$ sowie Faktoren $f_{(H/T)}$, $f_{(d/T)}$ und $f_{(k1/k2)}$

Tabelle 1:

Formfaktoren $f_{y,(r/s)}$ und $f_{x,(r/s)}$

Verhältnis r/s	konvex	konvex	konkav	konkav	konvex =	konvex =
	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	konkav Aufstau (-)	konkav Absenk. (+)
	$f_{y,(r/s)}$ [-]	$f_{y,(r/s)}$ [-]	$f_{y,(r/s)}$ [-]	$f_{y,(r/s)}$ [-]	$f_{x,(r/s)}$ [-]	$f_{x,(r/s)}$ [-]
0,50	0,61429	1,36095	1,32857	0,67429	0,86286	0,87238
0,55	0,64000	1,17579	1,14105	0,68526	0,90215	0,90543
0,65	0,68625	1,10500	1,07375	0,72375	0,92151	0,92684
1,00	0,76167	1,02167	0,99500	0,79000	0,93301	0,94545
2,00	0,84000	0,96857	0,95143	0,85714	0,89977	0,89977

Fortsetzung

Tabelle 2.1:

Faktoren $f_{y,(H/T)}$ bei konvexer Anströmung

Verhältnis H/T	r/s = 0,50	r/s = 0,50	r/s = 0,55	r/s = 0,55	r/s = 0,65	r/s = 0,65
	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)
	$f_{y,(H/T)}$ [-]	$f_{y,(H/T)}$ [-]	$f_{y,(H/T)}$ [-]	$f_{y,(H/T)}$ [-]	$f_{y,(H/T)}$ [-]	$f_{y,(H/T)}$ [-]
0,20	0,76124	0,78307	0,78783	0,81110	0,82878	0,85520
0,30	0,89147	0,90973	0,90625	0,92390	0,92714	0,94570
0,50	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,70	1,04341	1,02869	1,03454	1,02238	1,02732	1,01584
0,80	1,05581	1,03569	1,04441	1,02775	1,03279	1,01923

Fortsetzung

Verhältnis H/T	r/s = 1,00	r/s = 1,00	r/s = 2,00	r/s = 2,00
	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)
	$f_{y,(H/T)}$ [-]	$f_{y,(H/T)}$ [-]	$f_{y,(H/T)}$ [-]	$f_{y,(H/T)}$ [-]
0,20	0,88621	0,91354	0,94898	0,97345
0,30	0,95405	0,96900	0,97959	0,99115
0,50	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,70	1,01751	1,00653	1,00680	1,00000
0,80	1,02188	1,00816	1,00680	1,00000

Fortsetzung

Tabelle 2.2:

Faktoren $f_{y,(H/T)}$ bei konkaver Anströmung

Verhältnis H/T	r/s = 0,50	r/s = 0,50	r/s = 0,55	r/s = 0,55	r/s = 0,65	r/s = 0,65
	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)
	$f_{y,(H/T)}$ [-]	$f_{y,(H/T)}$ [-]	$f_{y,(H/T)}$ [-]	$f_{y,(H/T)}$ [-]	$f_{y,(H/T)}$ [-]	$f_{y,(H/T)}$ [-]
0,20	0,77276	0,79944	0,79705	0,82335	0,83586	0,86528
0,30	0,90108	0,92232	0,91328	0,93241	0,93132	0,95164
0,50	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,70	1,03441	1,01977	1,03044	1,01843	1,02212	1,01209
0,80	1,04373	1,02401	1,03782	1,02151	1,02910	1,01554

Fortsetzung

Verhältnis H/T	r/s = 1,00	r/s = 1,00	r/s = 2,00	r/s = 2,00
	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)
	$f_{y,(H/T)}$ [-]	$f_{y,(H/T)}$ [-]	$f_{y,(H/T)}$ [-]	$f_{y,(H/T)}$ [-]
0,20	0,88777	0,91983	0,94895	0,97333
0,30	0,95645	0,97468	0,98198	0,99333
0,50	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,70	1,01340	1,00633	1,00601	1,00000
0,80	1,01843	1,00844	1,00601	1,00000

Fortsetzung

Tabelle 2.3:

Faktoren $f_{x,(H/T)}$ bei konvexer und konkaver Anströmung

Verhältnis H/T	r/s = 0,50	r/s = 0,50	r/s = 0,55	r/s = 0,55	r/s = 0,65	r/s = 0,65
	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)
	$f_{x,(H/T)}$ [-]	$f_{x,(H/T)}$ [-]	$f_{x,(H/T)}$ [-]	$f_{x,(H/T)}$ [-]	$f_{x,(H/T)}$ [-]	$f_{x,(H/T)}$ [-]
0,20	0,79249	0,80568	0,82182	0,83333	0,86705	0,87356
0,30	0,91611	0,92795	0,93091	0,94203	0,95376	0,95402
0,50	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,70	1,02208	1,01528	1,01455	1,01449	1,01156	1,00575
0,80	1,02649	1,01747	1,01818	1,01812	1,01734	1,01149

Fortsetzung

Verhältnis H/T	r/s = 1,00	r/s = 1,00	r/s = 2,00	r/s = 2,00
	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)
	$f_{x,(H/T)}$ [-]	$f_{x,(H/T)}$ [-]	$f_{x,(H/T)}$ [-]	$f_{x,(H/T)}$ [-]
0,20	0,93333	0,92105	0,95000	1,00000
0,30	0,97333	0,97368	1,00000	1,00000
0,50	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,70	1,01333	1,00000	1,00000	1,00000
0,80	1,01333	1,00000	1,00000	1,00000

Fortsetzung

Tabelle 3.1:

Faktoren $f_{y,(d/T)}$ bei konvexer Anströmung

Verhältnis d/T	r/s = 0,50	r/s = 0,50	r/s = 0,55	r/s = 0,55	r/s = 0,65	r/s = 0,65
	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)
	$f_{y,(d/T)}$ [-]	$f_{y,(d/T)}$ [-]	$f_{y,(d/T)}$ [-]	$f_{y,(d/T)}$ [-]	$f_{y,(d/T)}$ [-]	$f_{y,(d/T)}$ [-]
0,02	1,04961	1,03289	1,04112	1,02507	1,03097	1,01810
0,03	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,04	0,94574	0,95801	0,95559	0,96509	0,96539	0,97624
0,05	0,89147	0,90973	0,90625	0,92390	0,92714	0,94570
0,06	0,83721	0,85864	0,85855	0,88004	0,88889	0,91176
0,07	0,78605	0,80756	0,81086	0,83438	0,84882	0,87443
0,08	0,73798	0,75927	0,76645	0,78872	0,80874	0,83710

Fortsetzung

Verhältnis d/T	r/s = 1,00	r/s = 1,00	r/s = 2,00	r/s = 2,00
	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)
	$f_{y,(d/T)}$ [-]	$f_{y,(d/T)}$ [-]	$f_{y,(d/T)}$ [-]	$f_{y,(d/T)}$ [-]
0,02	1,01969	1,00816	1,00680	1,00000
0,03	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,04	0,97812	0,98695	0,98980	0,99705
0,05	0,95405	0,96900	0,97959	0,99115
0,06	0,92779	0,94943	0,96599	0,98525
0,07	0,89934	0,92496	0,95578	0,97640
0,08	0,87090	0,90049	0,94218	0,96755

Fortsetzung

Tabelle 3.2:

Faktoren $f_{y,(d/T)}$ bei konkaver Anströmung

Verhältnis d/T	r/s = 0,50	r/s = 0,50	r/s = 0,55	r/s = 0,55	r/s = 0,65	r/s = 0,65
	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)
	$f_{y,(d/T)}$ [-]	$f_{y,(d/T)}$ [-]	$f_{y,(d/T)}$ [-]	$f_{y,(d/T)}$ [-]	$f_{y,(d/T)}$ [-]	$f_{y,(d/T)}$ [-]
0,02	1,03943	1,02260	1,03413	1,01997	1,02561	1,01382
0,03	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,04	0,95269	0,96610	0,95849	0,97081	0,96740	0,97927
0,05	0,90108	0,92232	0,91328	0,93241	0,93132	0,95164
0,06	0,84875	0,87429	0,86624	0,89094	0,89406	0,91883
0,07	0,79785	0,82345	0,81919	0,84485	0,85448	0,88256
0,08	0,74982	0,77542	0,77491	0,80031	0,81607	0,84629

Fortsetzung

Verhältnis d/T	r/s = 1,00	r/s = 1,00	r/s = 2,00	r/s = 2,00
	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)
	$f_{y,(d/T)}$ [-]	$f_{y,(d/T)}$ [-]	$f_{y,(d/T)}$ [-]	$f_{y,(d/T)}$ [-]
0,02	1,01675	1,00633	1,00601	1,00000
0,03	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,04	0,97990	0,98945	0,99099	0,99667
0,05	0,95645	0,97468	0,98198	0,99333
0,06	0,92965	0,95359	0,96997	0,98667
0,07	0,90285	0,93249	0,95796	0,98000
0,08	0,87437	0,90717	0,94294	0,97000

Fortsetzung

Tabelle 3.3:

Faktoren $f_{x,(d/T)}$ bei konvexer und konkaver Anströmung

Verhältnis d/T	r/s = 0,50	r/s = 0,50	r/s = 0,55	r/s = 0,55	r/s = 0,65	r/s = 0,65
	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)
	$f_{x,(d/T)}$ [-]	$f_{x,(d/T)}$ [-]	$f_{x,(d/T)}$ [-]	$f_{x,(d/T)}$ [-]	$f_{x,(d/T)}$ [-]	$f_{x,(d/T)}$ [-]
0,02	1,02428	1,01747	1,01818	1,01812	1,01156	1,00575
0,03	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,04	0,96247	0,96943	0,96727	0,97464	0,98266	0,98276
0,05	0,91611	0,92795	0,93091	0,94203	0,95376	0,95402
0,06	0,86755	0,87991	0,88727	0,89855	0,91908	0,92529
0,07	0,81678	0,83188	0,84364	0,85507	0,88439	0,89080
0,08	0,76821	0,78166	0,79636	0,81159	0,84971	0,85632

Fortsetzung

Verhältnis d/T	r/s = 1,00	r/s = 1,00	r/s = 2,00	r/s = 2,00
	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)
	$f_{x,(d/T)}$ [-]	$f_{x,(d/T)}$ [-]	$f_{x,(d/T)}$ [-]	$f_{x,(d/T)}$ [-]
0,02	1,01333	1,00000	1,00000	1,00000
0,03	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,04	1,00000	0,98684	1,00000	1,00000
0,05	0,97333	0,97368	1,00000	1,00000
0,06	0,96000	0,96053	1,00000	1,00000
0,07	0,93333	0,93421	1,00000	1,00000
0,08	0,92000	0,92105	0,95000	1,00000

Fortsetzung

Tabelle 4.1:

Faktoren $f_{y,(k1/k2)}$ bei konvexer Anströmung

Verhältnis k_1/k_2	$r/s = 0,50$	$r/s = 0,50$	$r/s = 0,55$	$r/s = 0,55$	$r/s = 0,65$	$r/s = 0,65$
	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)
	$f_{y,(k1/k2)}$ [-]	$f_{y,(k1/k2)}$ [-]	$f_{y,(k1/k2)}$ [-]	$f_{y,(k1/k2)}$ [-]	$f_{y,(k1/k2)}$ [-]	$f_{y,(k1/k2)}$ [-]
100	0,04496	0,03989	0,05263	0,05103	0,06193	0,06222
250	0,10698	0,09657	0,12336	0,12086	0,14754	0,14706
1.000	0,33798	0,31491	0,38322	0,37511	0,43534	0,43100
2.500	0,60155	0,57873	0,65296	0,64369	0,70128	0,69683
5.000	0,81705	0,80406	0,85033	0,84423	0,87614	0,87330
7.500	0,93023	0,92512	0,94408	0,94181	0,95446	0,95475
10.000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
25.000	1,15659	1,17215	1,11842	1,12355	1,09290	1,09502
100.000	1,25581	1,28272	1,18914	1,19785	1,14572	1,14932
1.000.000	1,28992	1,32050	1,21217	1,22202	1,16211	1,16742

Fortsetzung

Verhältnis k_1/k_2	$r/s = 1,00$	$r/s = 1,00$	$r/s = 2,00$	$r/s = 2,00$
	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)
	$f_{y,(k1/k2)}$ [-]	$f_{y,(k1/k2)}$ [-]	$f_{y,(k1/k2)}$ [-]	$f_{y,(k1/k2)}$ [-]
100	0,08534	0,08483	0,13946	0,13864
250	0,19475	0,19413	0,29932	0,29794
1.000	0,52079	0,51713	0,65646	0,65192
2.500	0,76805	0,76346	0,85034	0,84956
5.000	0,90810	0,90701	0,94558	0,94395
7.500	0,96937	0,96737	0,97959	0,97935
10.000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
25.000	1,06346	1,06525	1,03401	1,03540
100.000	1,10066	1,10114	1,05442	1,05310
1.000.000	1,11160	1,11256	1,05782	1,05900

Fortsetzung

Tabelle 4.2:

Faktoren $f_{y,(k1/k2)}$ bei konkaver Anströmung

Verhältnis k_1/k_2	$r/s = 0,50$	$r/s = 0,50$	$r/s = 0,55$	$r/s = 0,55$	$r/s = 0,65$	$r/s = 0,65$
	Anstrom/ Aufstau (-) $f_{y,(k1/k2)}$ [-]	Abstrom/ Absenk. (+) $f_{y,(k1/k2)}$ [-]	Anstrom/ Aufstau (-) $f_{y,(k1/k2)}$ [-]	Abstrom/ Absenk. (+) $f_{y,(k1/k2)}$ [-]	Anstrom/ Aufstau (-) $f_{y,(k1/k2)}$ [-]	Abstrom/ Absenk. (+) $f_{y,(k1/k2)}$ [-]
100	0,04301	0,04379	0,05351	0,05069	0,06519	0,06045
250	0,10323	0,10452	0,12731	0,11982	0,15367	0,14335
1.000	0,33262	0,32910	0,38930	0,37481	0,44354	0,42832
2.500	0,59785	0,59181	0,65775	0,64363	0,70664	0,69430
5.000	0,81649	0,81215	0,85240	0,84485	0,87893	0,87219
7.500	0,92975	0,92797	0,94557	0,94316	0,95576	0,95337
10.000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
25.000	1,15699	1,16384	1,11531	1,12442	1,08964	1,09672
100.000	1,25591	1,26836	1,18450	1,19816	1,14086	1,15026
1.000.000	1,28889	1,30367	1,20664	1,22273	1,15716	1,16926

Fortsetzung

Verhältnis k_1/k_2	$r/s = 1,00$	$r/s = 1,00$	$r/s = 2,00$	$r/s = 2,00$
	Anstrom/ Aufstau (-) $f_{y,(k1/k2)}$ [-]	Abstrom/ Absenk. (+) $f_{y,(k1/k2)}$ [-]	Anstrom/ Aufstau (-) $f_{y,(k1/k2)}$ [-]	Abstrom/ Absenk. (+) $f_{y,(k1/k2)}$ [-]
100	0,08710	0,08228	0,14114	0,13667
250	0,19933	0,18987	0,30030	0,29333
1.000	0,52596	0,51266	0,65766	0,65000
2.500	0,77052	0,76160	0,85285	0,85000
5.000	0,90955	0,90717	0,94595	0,94333
7.500	0,96817	0,96835	0,98198	0,98000
10.000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
25.000	1,06198	1,06751	1,03303	1,03667
100.000	1,09715	1,10338	1,05405	1,05333
1.000.000	1,10720	1,11392	1,06006	1,06000

Fortsetzung

Tabelle 4.3:

Faktoren $f_{x,(k1/k2)}$ bei konvexer und konkaver Anströmung

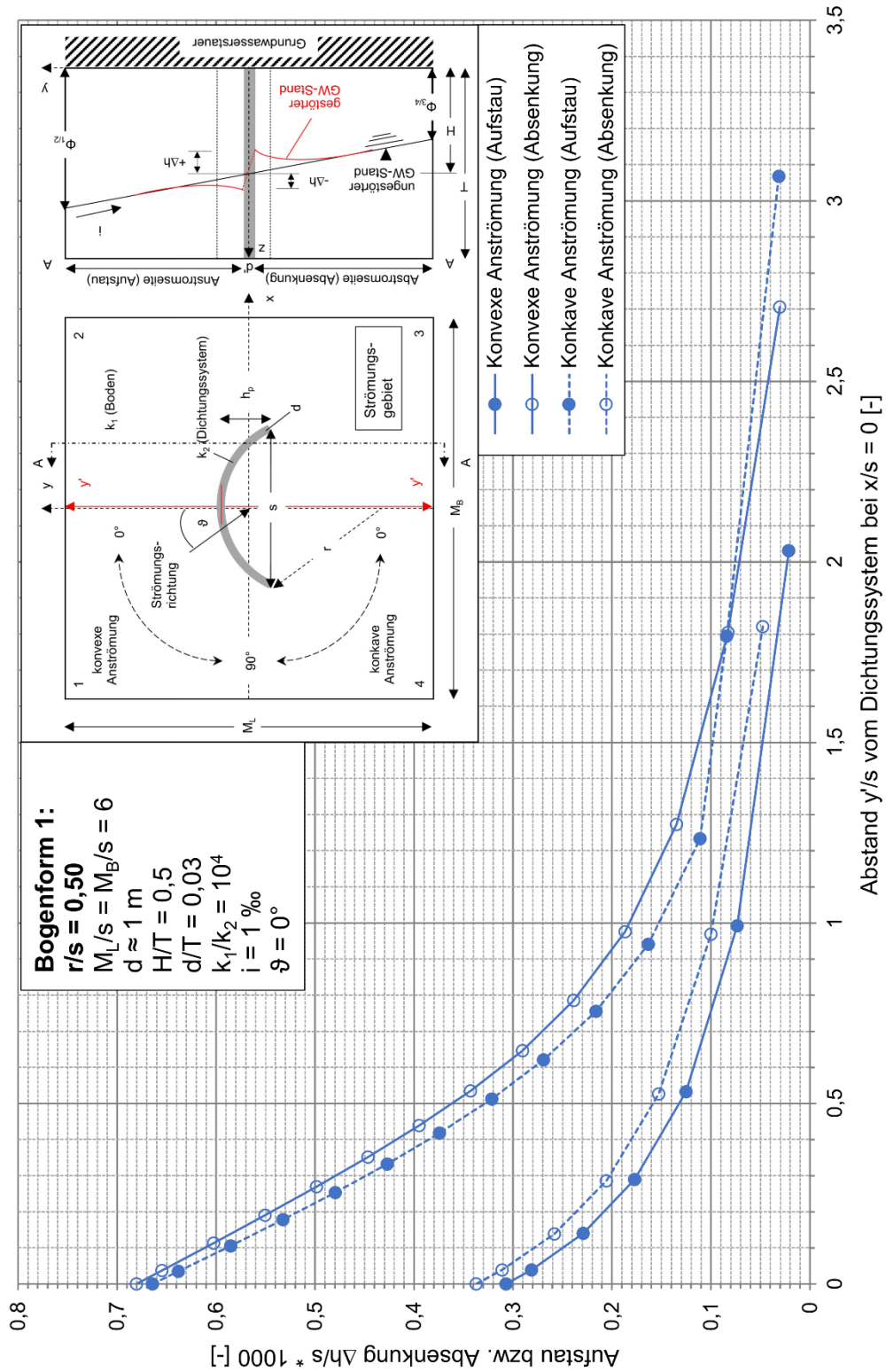
Verhältnis k_1/k_2	$r/s = 0,50$	$r/s = 0,50$	$r/s = 0,55$	$r/s = 0,55$	$r/s = 0,65$	$r/s = 0,65$
	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)
	$f_{x,(k1/k2)}$ [-]	$f_{x,(k1/k2)}$ [-]	$f_{x,(k1/k2)}$ [-]	$f_{x,(k1/k2)}$ [-]	$f_{x,(k1/k2)}$ [-]	$f_{x,(k1/k2)}$ [-]
100	0,09492	0,09389	0,12727	0,12681	0,15607	0,16092
250	0,20751	0,20524	0,26545	0,26449	0,31792	0,31609
1.000	0,52759	0,51965	0,60000	0,59783	0,65896	0,65517
2.500	0,76821	0,76201	0,81455	0,81522	0,84971	0,85057
5.000	0,90728	0,90611	0,92727	0,93116	0,94798	0,94253
7.500	0,96689	0,96725	0,97455	0,97826	0,98266	0,98276
10.000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
25.000	1,06402	1,06550	1,04364	1,05072	1,03468	1,03448
100.000	1,09934	1,10262	1,06909	1,07609	1,05780	1,05747
1.000.000	1,11258	1,11572	1,08000	1,08333	1,06358	1,06322

Fortsetzung

Verhältnis k_1/k_2	$r/s = 1,00$	$r/s = 1,00$	$r/s = 2,00$	$r/s = 2,00$
	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)	Anstrom/ Aufstau (-)	Abstrom/ Absenk. (+)
	$f_{x,(k1/k2)}$ [-]	$f_{x,(k1/k2)}$ [-]	$f_{x,(k1/k2)}$ [-]	$f_{x,(k1/k2)}$ [-]
100	0,21333	0,22368	0,35000	0,35000
250	0,40000	0,39474	0,55000	0,55000
1.000	0,73333	0,73684	0,80000	0,85000
2.500	0,89333	0,89474	0,90000	0,95000
5.000	0,96000	0,96053	0,95000	1,00000
7.500	0,98667	0,98684	1,00000	1,00000
10.000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
25.000	1,02667	1,02632	1,00000	1,00000
100.000	1,04000	1,03947	1,00000	1,05000
1.000.000	1,05333	1,03947	1,00000	1,05000

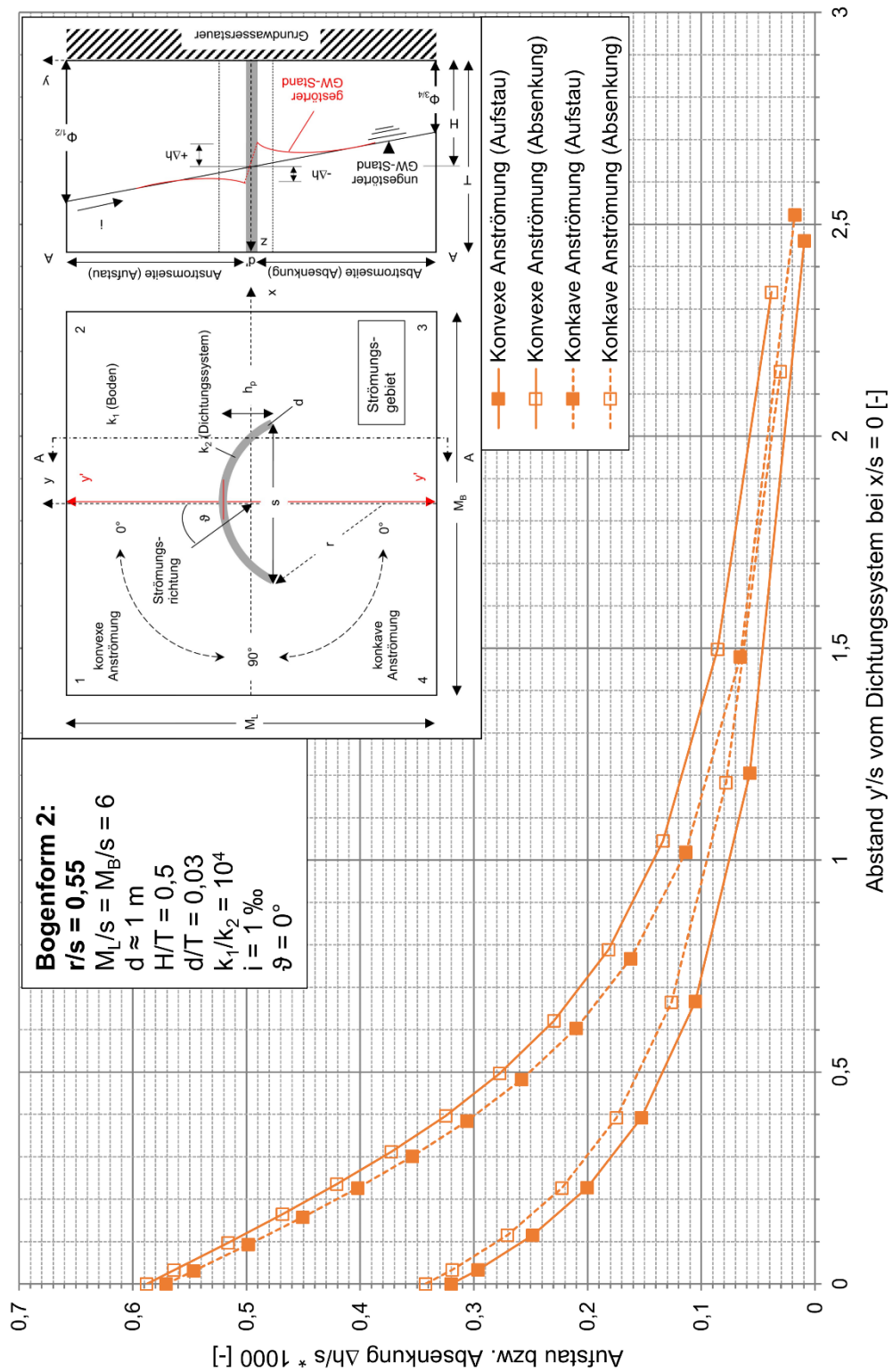
Anhang R – Aufstau- bzw. Absenkungskurven (Bogenform 1 - 5)

Aufstau- bzw. Absenkungskurven (Berechnungsmodell/Bogenform Nr. 1 ($r/s = 0,50$))



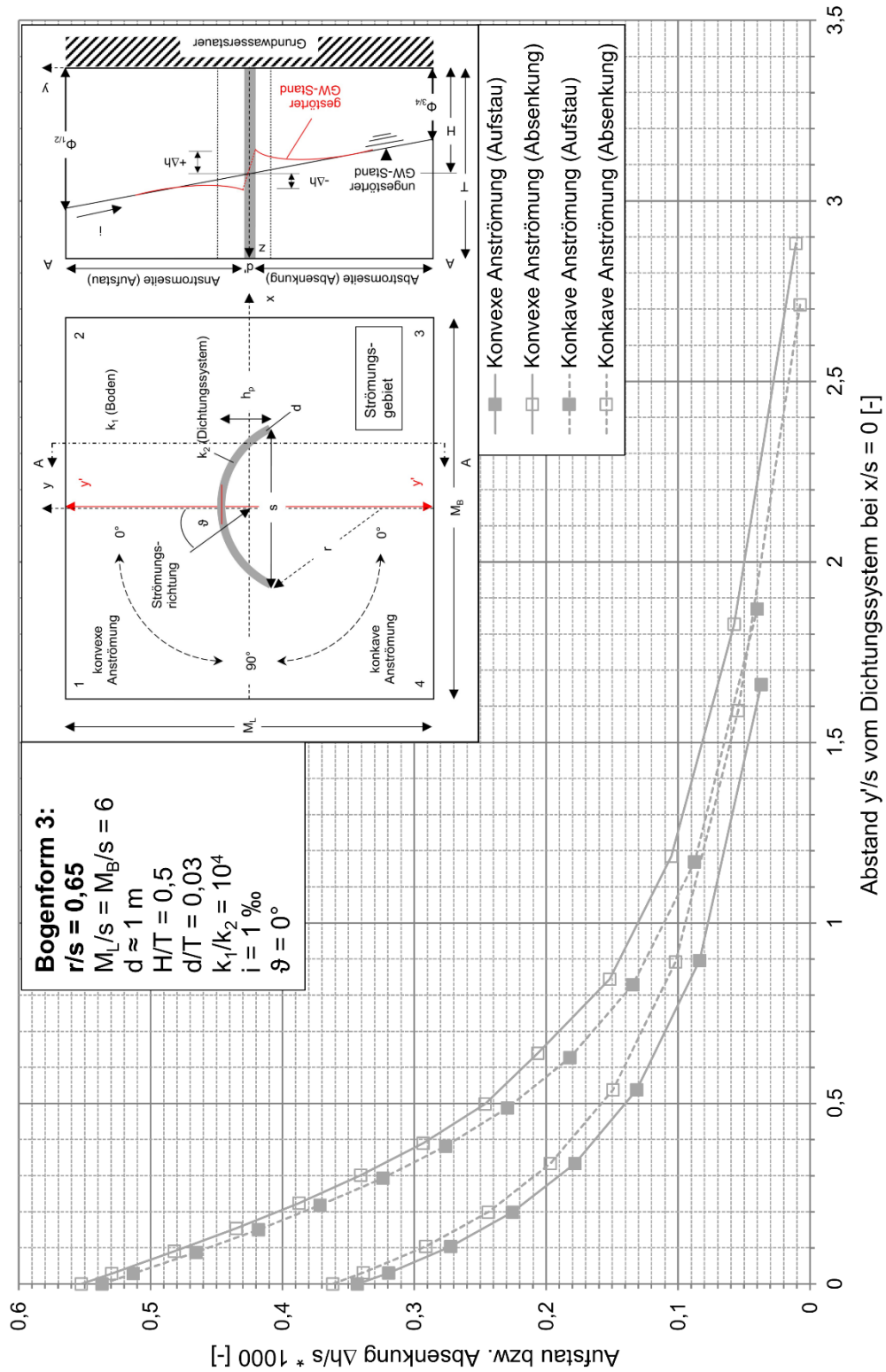
Fortsetzung

Aufstau- bzw. Absenkungskurven (Berechnungsmodell/Bogenform Nr. 2 ($r/s = 0,55$))



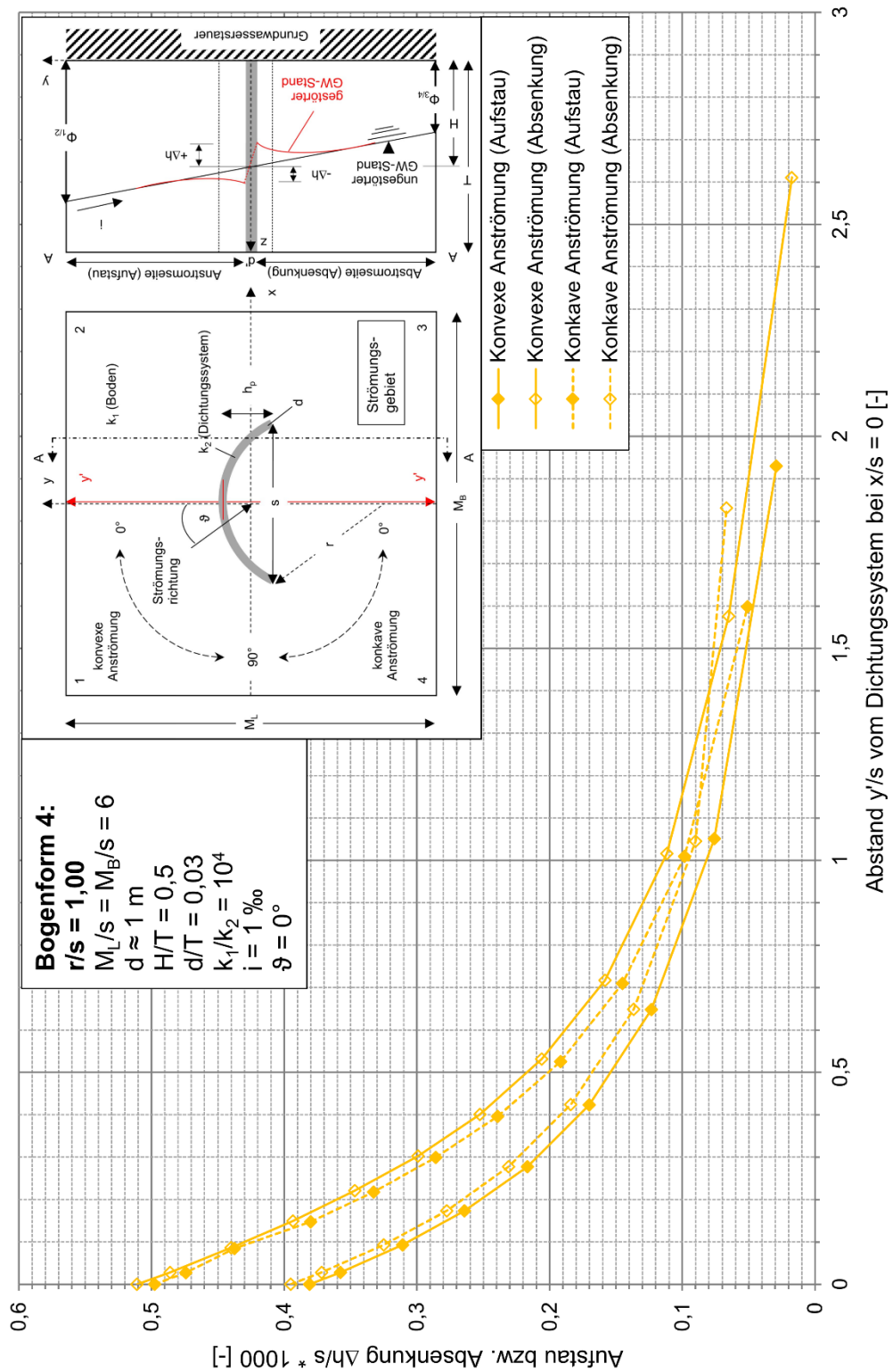
Fortsetzung

Aufstau- bzw. Absenkungskurven (Berechnungsmodell/Bogenform Nr. 3 ($r/s = 0,65$))



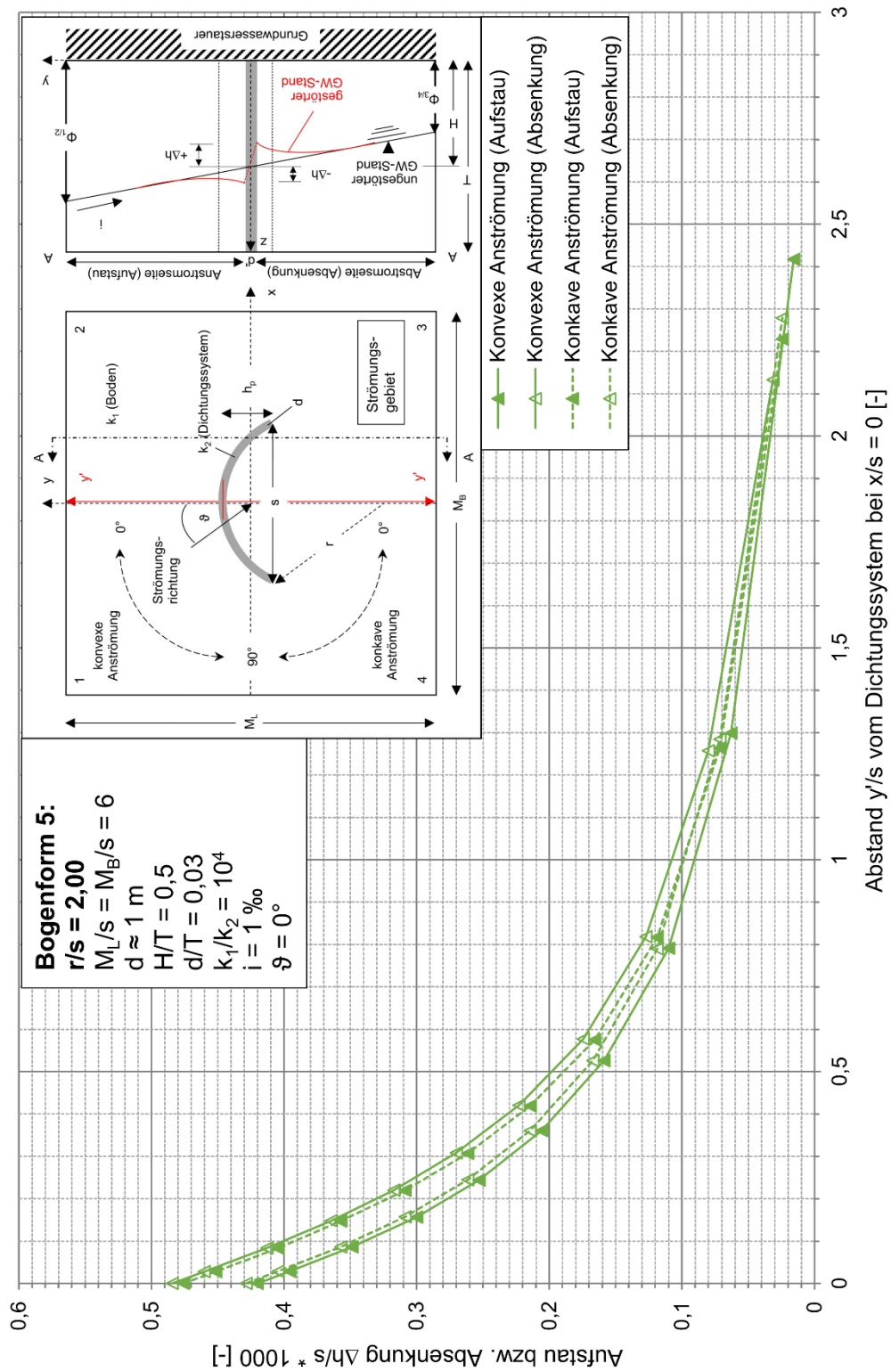
Fortsetzung

Aufstau- bzw. Absenkungskurven (Berechnungsmodell/Bogenform Nr. 4 ($r/s = 1,00$))



Fortsetzung

Aufstau- bzw. Absenkungskurven (Berechnungsmodell/Bogenform Nr. 5 ($r/s = 2,00$))



Anhang S – Beispiel 1 - Berechnungsmodell Nr. 6 (r/s = 0,58)

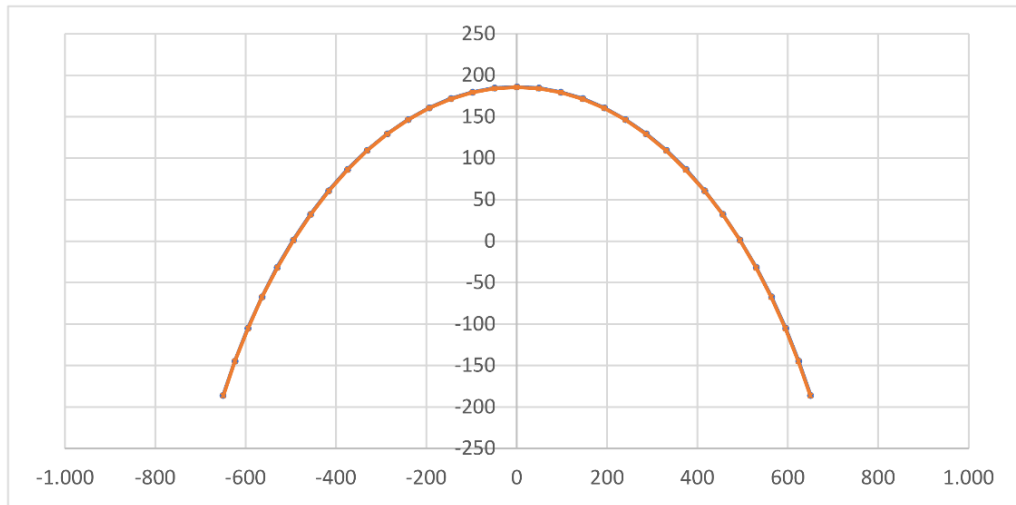
Grunddaten - Achse der bogenförmigen Dichtwand:

Sehne s	Verhältnis r/s	Radius r	Winkel α	Bogenl. b
1.300 m	0,58	754 m	119,0994 °	1.567,322 m
Bogenteile n	Bogenl. b_i	Winkel α_i	Pfeilh. h_P	halbe Pfeilh.
32	48,979 m	3,7219 °	371,880 m	185,940 m
d DW	x Mittelp.	y Mittelp.	x Mittel. NEU	y Mittel. NEU
0,600 m	0,000 m	-382,120 m	0,000 m	-568,060 m

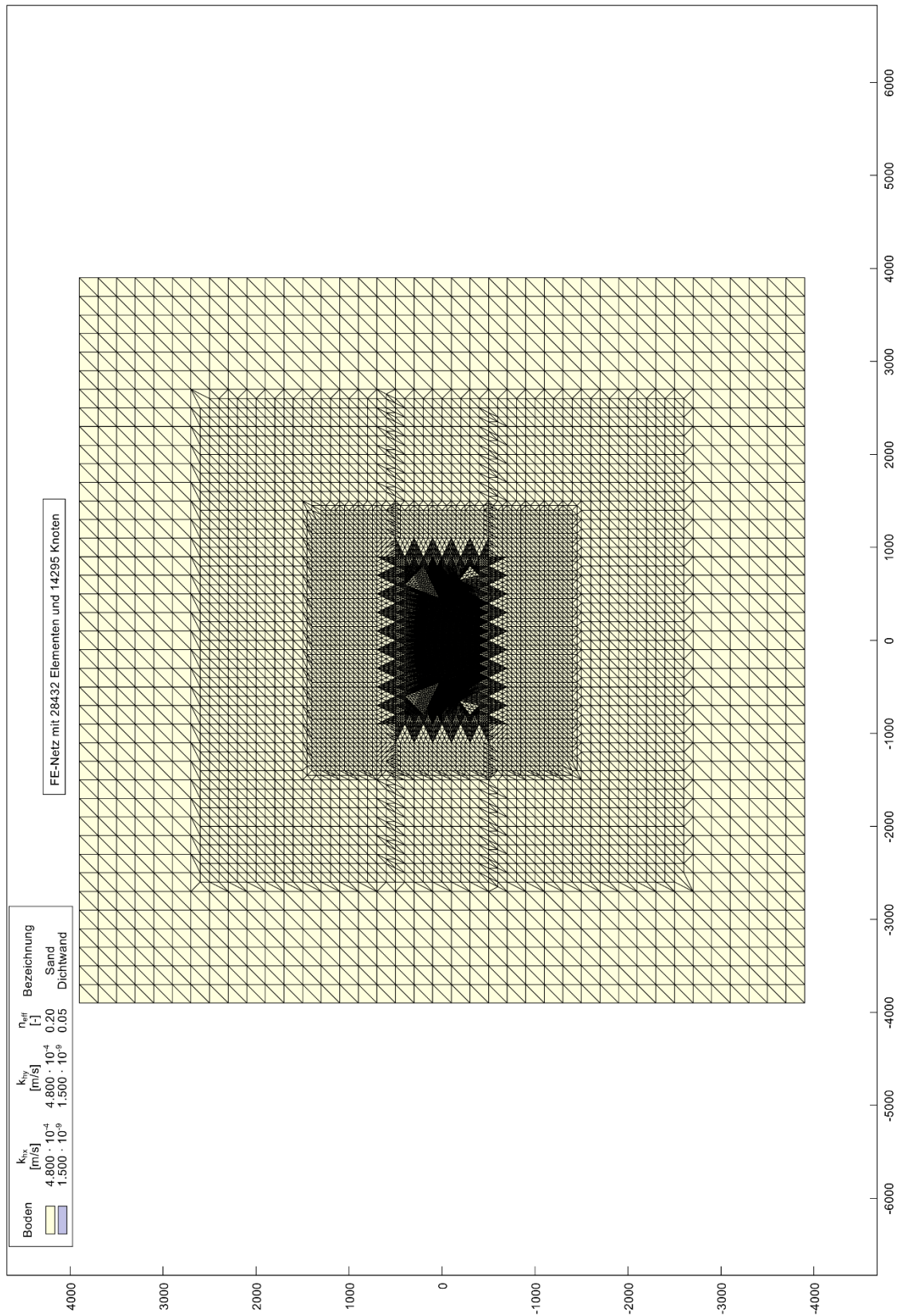
Koordinaten der bogenförmigen Dichtwand (d \approx 0,60 m):

Bogen (oben)			Bogen (unten)		
Pkt.-Nr.	x	y	Pkt.-Nr.	x	y
1	-650,259 m	-185,788 m	34	-649,741 m	-186,092 m
2	-624,073 m	-144,384 m	35	-623,576 m	-144,721 m
3	-595,254 m	-104,767 m	36	-594,781 m	-105,135 m
4	-563,925 m	-67,104 m	37	-563,477 m	-67,503 m
5	-530,217 m	-31,555 m	38	-529,796 m	-31,982 m
6	-494,273 m	1,732 m	39	-493,880 m	1,278 m
7	-456,244 m	32,615 m	40	-455,881 m	32,137 m
8	-416,290 m	60,964 m	41	-415,959 m	60,464 m
9	-374,580 m	86,660 m	42	-374,282 m	86,139 m
10	-331,290 m	109,594 m	43	-331,027 m	109,055 m
11	-286,603 m	129,670 m	44	-286,375 m	129,115 m
12	-240,707 m	146,803 m	45	-240,515 m	146,234 m
13	-193,795 m	160,920 m	46	-193,641 m	160,340 m
14	-146,066 m	171,962 m	47	-145,950 m	171,374 m
15	-97,721 m	179,883 m	48	-97,643 m	179,288 m
16	-48,964 m	184,649 m	49	-48,925 m	184,050 m
17	0,000 m	186,240 m	50	0,000 m	185,640 m
18	48,964 m	184,649 m	51	48,925 m	184,050 m
19	97,721 m	179,883 m	52	97,643 m	179,288 m
20	146,066 m	171,962 m	53	145,950 m	171,374 m
21	193,795 m	160,920 m	54	193,641 m	160,340 m
22	240,707 m	146,803 m	55	240,515 m	146,234 m
23	286,603 m	129,670 m	56	286,375 m	129,115 m
24	331,290 m	109,594 m	57	331,027 m	109,055 m
25	374,580 m	86,660 m	58	374,282 m	86,139 m
26	416,290 m	60,964 m	59	415,959 m	60,464 m
27	456,244 m	32,615 m	60	455,881 m	32,137 m
28	494,273 m	1,732 m	61	493,880 m	1,278 m
29	530,217 m	-31,555 m	62	529,796 m	-31,982 m
30	563,925 m	-67,104 m	63	563,477 m	-67,503 m
31	595,254 m	-104,767 m	64	594,781 m	-105,135 m
32	624,073 m	-144,384 m	65	623,576 m	-144,721 m
33	650,259 m	-185,788 m	66	649,741 m	-186,092 m

Fortsetzung



Fortsetzung



Anhang T – Beispiel 2 - Berechnungsmodell Nr. 7 (r/s = 0,87)

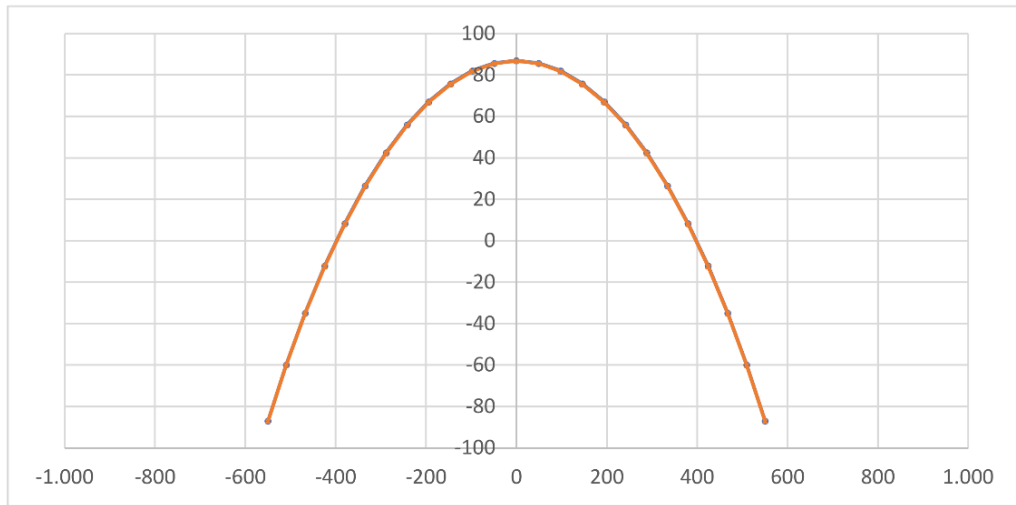
Grunddaten - Achse der bogenförmigen Dichtwand:

Sehne s	Verhältnis r/s	Radius r	Winkel α	Bogenl. b
1.100 m	0,87	957 m	70,1590 °	1.171,852 m
Bogenteile n	Bogenl. b_i	Winkel α_i	Pfeilh. h_P	halbe Pfeilh.
24	48,827 m	2,9233 °	173,834 m	86,917 m
d DW	x Mittelp.	y Mittelp.	x Mittel. NEU	y Mittel. NEU
0,240 m	0,000 m	-783,166 m	0,000 m	-870,083 m

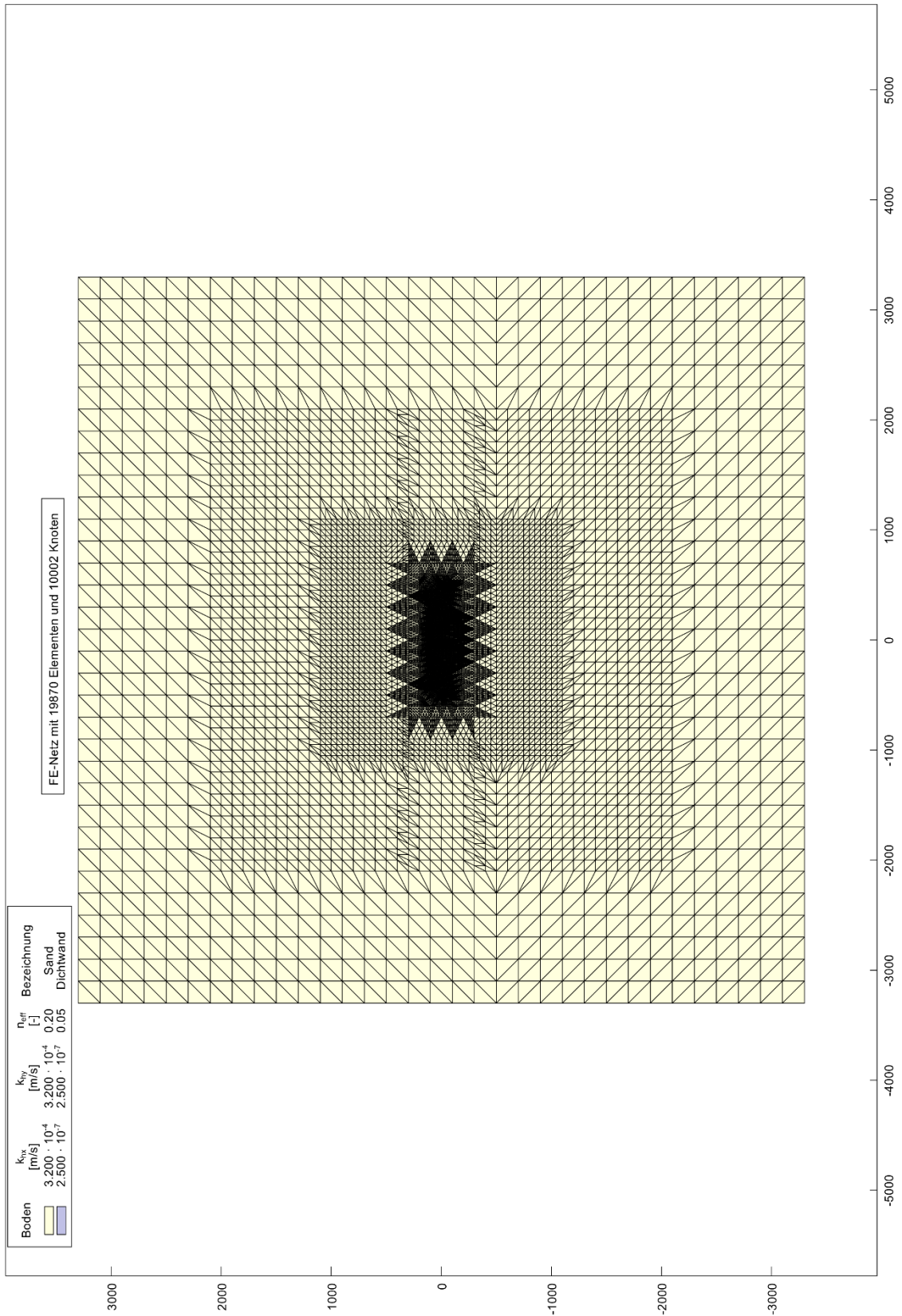
Koordinaten der bogenförmigen Dichtwand (d ≈ 0,24 m):

Bogen (oben)			Bogen (unten)		
Pkt.-Nr.	x	y	Pkt.-Nr.	x	y
1	-550,069 m	-86,819 m	26	-549,931 m	-87,015 m
2	-509,408 m	-59,785 m	27	-509,280 m	-59,988 m
3	-467,420 m	-34,860 m	28	-467,303 m	-35,070 m
4	-424,217 m	-12,109 m	29	-424,110 m	-12,324 m
5	-379,909 m	8,409 m	30	-379,814 m	8,189 m
6	-334,612 m	26,641 m	31	-334,528 m	26,416 m
7	-288,445 m	42,539 m	32	-288,373 m	42,310 m
8	-241,527 m	56,061 m	33	-241,466 m	55,829 m
9	-193,980 m	67,174 m	34	-193,931 m	66,939 m
10	-145,929 m	75,847 m	35	-145,892 m	75,610 m
11	-97,497 m	82,058 m	36	-97,473 m	81,820 m
12	-48,812 m	85,792 m	37	-48,800 m	85,552 m
13	0,000 m	87,037 m	38	0,000 m	86,797 m
14	48,812 m	85,792 m	39	48,800 m	85,552 m
15	97,497 m	82,058 m	40	97,473 m	81,820 m
16	145,929 m	75,847 m	41	145,892 m	75,610 m
17	193,980 m	67,174 m	42	193,931 m	66,939 m
18	241,527 m	56,061 m	43	241,466 m	55,829 m
19	288,445 m	42,539 m	44	288,373 m	42,310 m
20	334,612 m	26,641 m	45	334,528 m	26,416 m
21	379,909 m	8,409 m	46	379,814 m	8,189 m
22	424,217 m	-12,109 m	47	424,110 m	-12,324 m
23	467,420 m	-34,860 m	48	467,303 m	-35,070 m
24	509,408 m	-59,785 m	49	509,280 m	-59,988 m
25	550,069 m	-86,819 m	50	549,931 m	-87,015 m

Fortsetzung



Fortsetzung



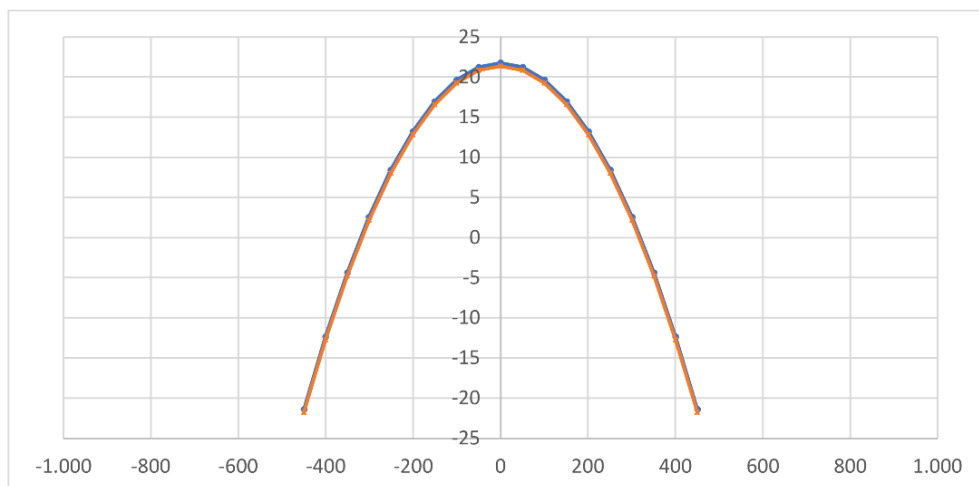
Anhang U – Beispiel 3 - Berechnungsmodell Nr. 8 (r/s = 2,63)

Grunddaten - Achse der bogenförmigen Dichtwand:

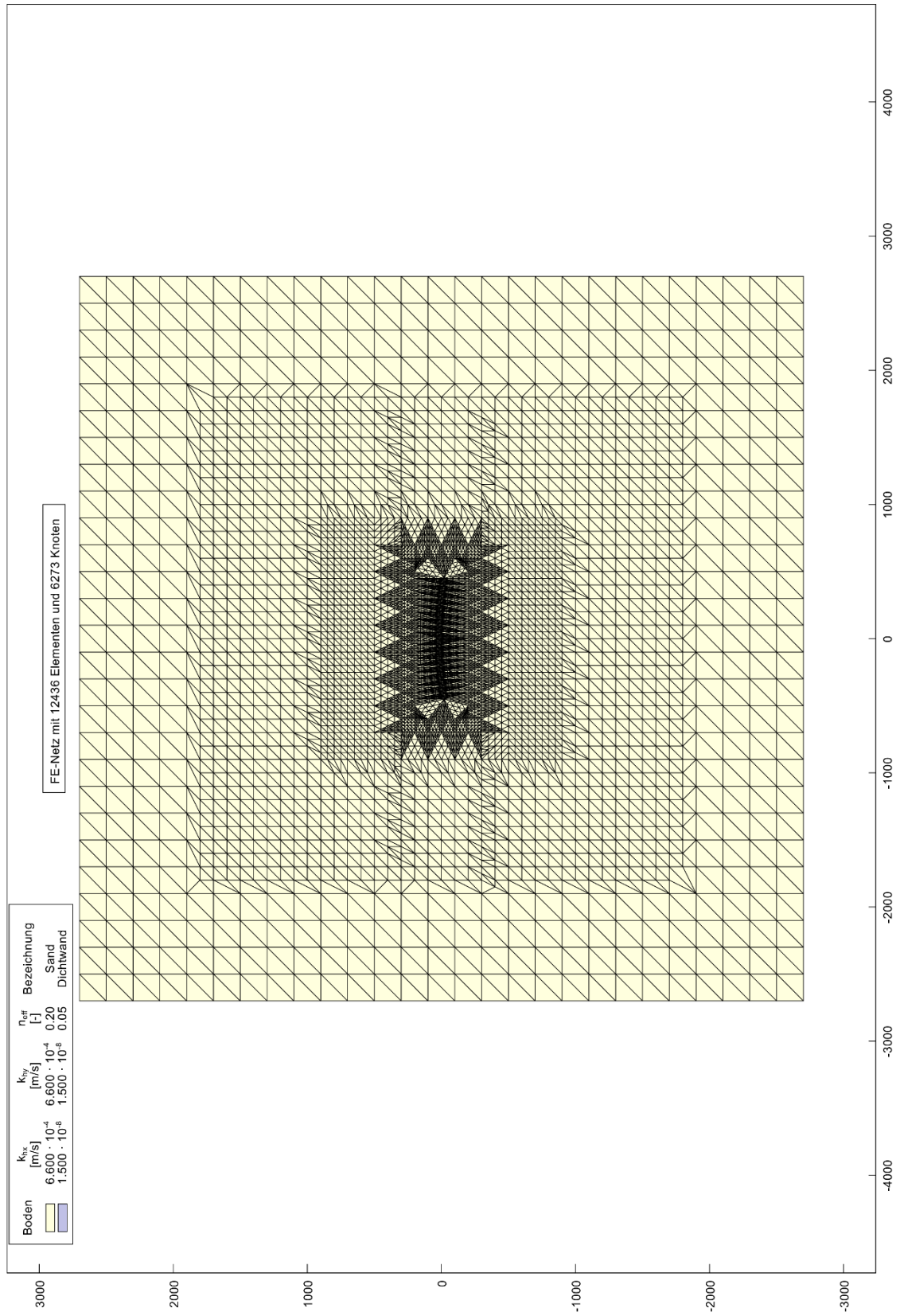
Sehne s	Verhältnis r/s	Radius r	Winkel α	Bogenl. b
900 m	2,63	2.367 m	21,9189 °	905,512 m
Bogenteile n	Bogenl. b_i	Winkel α_i	Pfeilh. h_P	halbe Pfeilh.
18	50,306 m	1,2177 °	43,169 m	21,585 m
d DW	x Mittelp.	y Mittelp.	x Mittel. NEU	y Mittel. NEU
0,400 m	0,000 m	-2.323,831 m	0,000 m	-2.345,415 m

Koordinaten der bogenförmigen Dichtwand (d ≈ 0,40 m):

Bogen (oben)			Bogen (unten)		
Pkt.-Nr.	x	y	Pkt.-Nr.	x	y
1	-450,038 m	-21,388 m	20	-449,962 m	-21,781 m
2	-400,547 m	-12,349 m	21	-400,480 m	-12,743 m
3	-350,875 m	-4,364 m	22	-350,816 m	-4,759 m
4	-301,045 m	2,564 m	23	-300,994 m	2,167 m
5	-251,079 m	8,432 m	24	-251,037 m	8,034 m
6	-200,999 m	13,236 m	25	-200,966 m	12,837 m
7	-150,829 m	16,975 m	26	-150,804 m	16,575 m
8	-100,591 m	19,646 m	27	-100,574 m	19,247 m
9	-50,307 m	21,250 m	28	-50,298 m	20,850 m
10	0,000 m	21,785 m	29	0,000 m	21,385 m
11	50,307 m	21,250 m	30	50,298 m	20,850 m
12	100,591 m	19,646 m	31	100,574 m	19,247 m
13	150,829 m	16,975 m	32	150,804 m	16,575 m
14	200,999 m	13,236 m	33	200,966 m	12,837 m
15	251,079 m	8,432 m	34	251,037 m	8,034 m
16	301,045 m	2,564 m	35	300,994 m	2,167 m
17	350,875 m	-4,364 m	36	350,816 m	-4,759 m
18	400,547 m	-12,349 m	37	400,480 m	-12,743 m
19	450,038 m	-21,388 m	38	449,962 m	-21,781 m

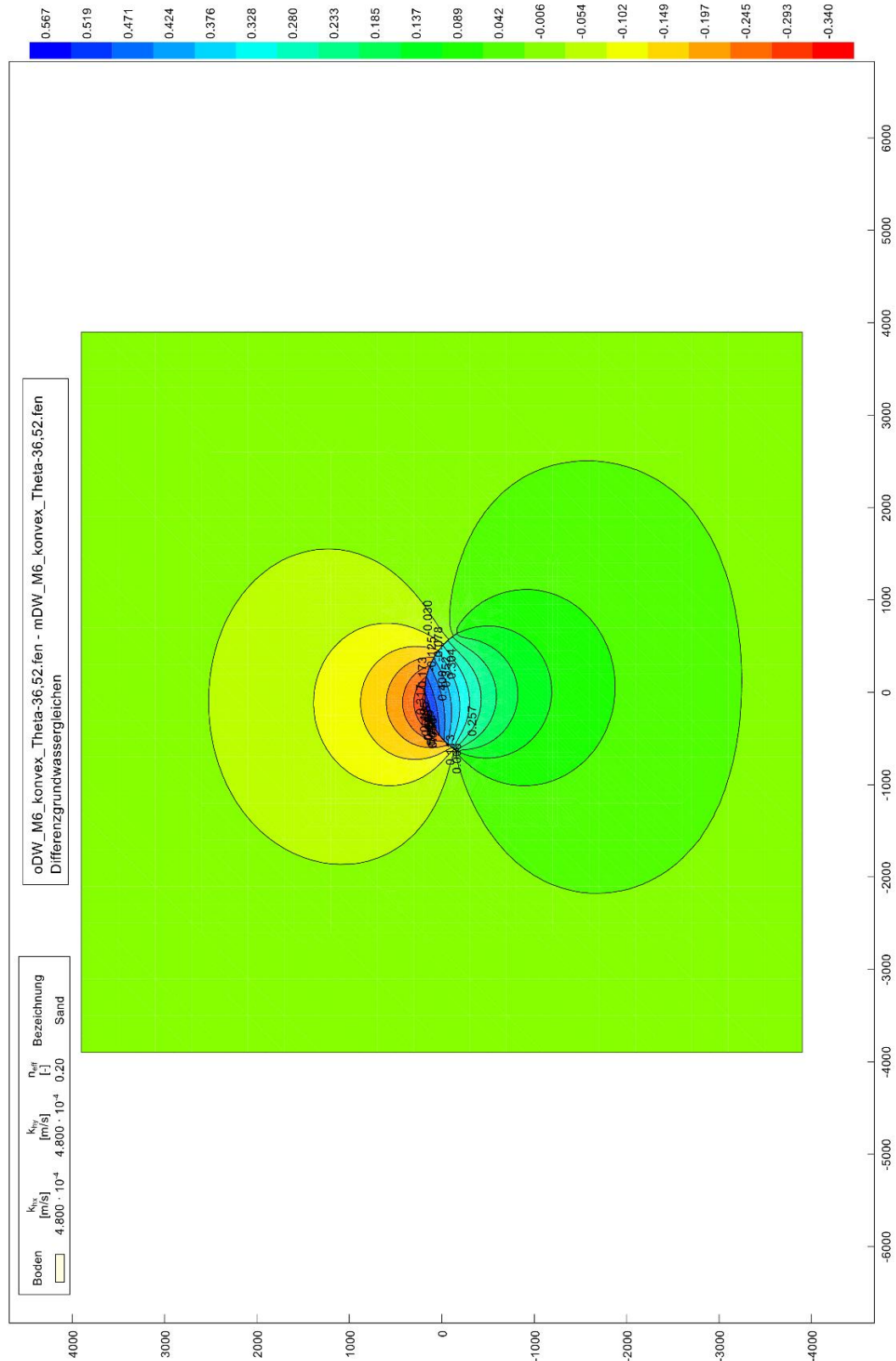


Fortsetzung



Anhang V – Detaillierte Berechnungen zum Beispiel 1

Numerische Berechnung mit GGU-2D-SSFLOW:



Fortsetzung

Berechnungsvorschlag von Schloth (Gleichungen (5.7) bis (5.9)):

1) Ablesen der Formfaktoren $f_{(r/s)}$ aus Tabelle 5-2 ($r/s = 0,58$; **konvex**):

Anstrom/Aufstau

$$f_{y(r/s)} = 0,64000 \quad (r/s = 0,55)$$

$$f_{x(r/s)} = 0,90215 \quad (r/s = 0,55)$$

$$f_{y(r/s)} = 0,68625 \quad (r/s = 0,65)$$

$$f_{x(r/s)} = 0,92151 \quad (r/s = 0,65)$$

Abstrom/Absenkung

$$f_{y(r/s)} = 1,17579 \quad (r/s = 0,55)$$

$$f_{x(r/s)} = 0,90543 \quad (r/s = 0,55)$$

$$f_{y(r/s)} = 1,10500 \quad (r/s = 0,65)$$

$$f_{x(r/s)} = 0,92684 \quad (r/s = 0,65)$$

2) Bestimmung der Faktoren $f_{(H/T)}$ mit Tabelle 5-3 ($r/s = 0,58$; $H/T = 0,62$):

konvex = konkav, Aufstau = Absenkung und $f_y = f_x$

$$f_{y(H/T)} = f_{x(H/T)} = 1 + \frac{(0,62-0,50)}{(0,70-0,50)} \cdot (1,02048 - 1) = 1,01229 \quad (r/s = 0,55)$$

$$f_{y(H/T)} = f_{x(H/T)} = 1 + \frac{(0,62-0,50)}{(0,70-0,50)} \cdot (1,014 - 1) = 1,00840 \quad (r/s = 0,65)$$

3) Bestimmung der Faktoren $f_{(d/T)}$ mit Tabelle 5-4 ($r/s = 0,58$; $d/T = 0,024$):

konvex = konkav, Aufstau = Absenkung und $f_y = f_x$

$$f_{y(d/T)} = f_{x(d/T)} = 1,02411 + \frac{(0,024-0,02)}{(0,03-0,02)} \cdot (1 - 1,02411) = 1,01447 \quad (r/s = 0,55)$$

$$f_{y(d/T)} = f_{x(d/T)} = 1,01539 + \frac{(0,024-0,02)}{(0,03-0,02)} \cdot (1 - 1,01539) = 1,00923 \quad (r/s = 0,65)$$

4) Bestimmung der Faktoren $f_{(k_1/k_2)}$ mit Tabellen 5-5 und 5-6 ($r/s = 0,58$; $k_1/k_2 = 3,2 \cdot 10^5$):

konvex = konkav und Aufstau = Absenkung

$$f_{y(k_1/k_2)} = 1,19241 + \frac{(3,2 \cdot 10^5 - 10^5)}{(10^6 - 10^5)} \cdot (1,21589 - 1,19241) = 1,19815 \quad (r/s = 0,55)$$

$$f_{y(k_1/k_2)} = 1,14654 + \frac{(3,2 \cdot 10^5 - 10^5)}{(10^6 - 10^5)} \cdot (1,16399 - 1,14654) = 1,15081 \quad (r/s = 0,65)$$

Fortsetzung

$$f_{x(k1/k2)} = 1,07259 + \frac{(3,2 \cdot 10^5 - 10^5)}{(10^6 - 10^5)} \cdot (1,08167 - 1,07259) = 1,07481 \quad (r/s = 0,55)$$

$$f_{x(k1/k2)} = 1,05764 + \frac{(3,2 \cdot 10^5 - 10^5)}{(10^6 - 10^5)} \cdot (1,06340 - 1,05764) = 1,05905 \quad (r/s = 0,65)$$

5) Bestimmung des maximalen Aufstaus bzw. der maximalen Absenkung in y- und x-Richtung (i = 0,75 ‰; s = 1.300 m; h_p = 371,880 m):

$$\pm \Delta h_{y,max} = f_{y,(r/s)} \cdot f_{y,(H/T)} \cdot f_{y,(d/T)} \cdot f_{y(k1/k2)} \cdot i \cdot \frac{s}{2}$$

$$\pm \Delta h_{x,max} = f_{x,(r/s)} \cdot f_{x,(H/T)} \cdot f_{x,(d/T)} \cdot f_{x(k1/k2)} \cdot i \cdot \frac{h_p}{2}$$

Anstrom/Aufstau

$$\Delta h_{y,max} = (0,64000 \cdot 1,01229 \cdot 1,01447 \cdot 1,19815) \cdot \frac{0,75}{1.000} \cdot \frac{1.300}{2} = 0,384 \text{ m} \quad (r/s = 0,55)$$

$$\Delta h_{y,max} = (0,68625 \cdot 1,00840 \cdot 1,00923 \cdot 1,15081) \cdot \frac{0,75}{1.000} \cdot \frac{1.300}{2} = 0,392 \text{ m} \quad (r/s = 0,65)$$

$$\Delta h_{y,max} = 0,384 + \frac{(0,58 - 0,55)}{(0,65 - 0,55)} \cdot (0,392 - 0,384) = \mathbf{0,386 \text{ m}} \quad (r/s = 0,58)$$

$$\Delta h_{x,max} = (0,90215 \cdot 1,01229 \cdot 1,01447 \cdot 1,07481) \cdot \frac{0,75}{1.000} \cdot \frac{371,880}{2} = 0,139 \text{ m} \quad (r/s = 0,55)$$

$$\Delta h_{x,max} = (0,92151 \cdot 1,00840 \cdot 1,00923 \cdot 1,05905) \cdot \frac{0,75}{1.000} \cdot \frac{371,880}{2} = 0,139 \text{ m} \quad (r/s = 0,65)$$

$$\Delta h_{x,max} = 0,139 + \frac{(0,58 - 0,55)}{(0,65 - 0,55)} \cdot (0,139 - 0,139) = \mathbf{0,139 \text{ m}} \quad (r/s = 0,58)$$

Abstrom/Absenkung

$$\Delta h_{y,max} = (1,17579 \cdot 1,01229 \cdot 1,01447 \cdot 1,19815) \cdot \frac{0,75}{1.000} \cdot \frac{1.300}{2} = 0,705 \text{ m} \quad (r/s = 0,55)$$

$$\Delta h_{y,max} = (1,10500 \cdot 1,00840 \cdot 1,00923 \cdot 1,15081) \cdot \frac{0,75}{1.000} \cdot \frac{1.300}{2} = 0,631 \text{ m} \quad (r/s = 0,65)$$

$$\Delta h_{y,max} = 0,705 + \frac{(0,58 - 0,55)}{(0,65 - 0,55)} \cdot (0,631 - 0,705) = \mathbf{0,683 \text{ m}} \quad (r/s = 0,58)$$

$$\Delta h_{x,max} = (0,90543 \cdot 1,01229 \cdot 1,01447 \cdot 1,07481) \cdot \frac{0,75}{1.000} \cdot \frac{371,880}{2} = 0,139 \text{ m} \quad (r/s = 0,55)$$

$$\Delta h_{x,max} = (0,92684 \cdot 1,00840 \cdot 1,00923 \cdot 1,05905) \cdot \frac{0,75}{1.000} \cdot \frac{371,880}{2} = 0,139 \text{ m} \quad (r/s = 0,65)$$

$$\Delta h_{x,max} = 0,139 + \frac{(0,58 - 0,55)}{(0,65 - 0,55)} \cdot (0,139 - 0,139) = \mathbf{0,139 \text{ m}} \quad (r/s = 0,58)$$

Fortsetzung

6) Bestimmung des Aufstaus (-) und der Absenkung (+) für $\vartheta = 36,52^\circ$:

$$\pm \Delta h_{\vartheta,um} = \sqrt{(\Delta h_{y,max} \cdot \cos \vartheta)^2 + (\Delta h_{x,max} \cdot \sin \vartheta)^2}$$

Anstrom/Aufstau

$$\Delta h_{36,52;um} = -\sqrt{(0,386 \cdot \cos 36,52^\circ)^2 + (0,139 \cdot \sin 36,52^\circ)^2} = \mathbf{-0,321 \text{ m}}$$

Abstrom/Absenkung

$$\Delta h_{36,52;um} = +\sqrt{(0,683 \cdot \cos 36,52^\circ)^2 + (0,139 \cdot \sin 36,52^\circ)^2} = \mathbf{+0,555 \text{ m}}$$

Berechnungsansatz von Schneider (Gleichung (2.21)):

Bestimmung des maximalen Aufstaus (-) bzw. der maximalen Absenkung (+) mit den Parametern ($i = 0,75 \text{ ‰}$; $s = 1.300 \text{ m}$; $\vartheta = 36,52^\circ$):

$$\Delta h_{um} = \pm \frac{0,75}{1.000} \cdot \frac{1.300}{2} \cdot \cos 36,52^\circ = \mathbf{\pm 0,392 \text{ m}}$$

Fortsetzung

Berechnungsansatz von Schneider (Gleichungen (2.22) bis (2.26)):

Bestimmung des maximalen Aufstaus (-) bzw. der maximalen Absenkung (+) mit den Parametern ($i = 0,75 \text{ ‰}$; $s = 1.300 \text{ m} \Rightarrow x_0 = s/2$; $h_p = 371,88 \text{ m} \Rightarrow y_0 = h_p/2$; $\vartheta = 36,52^\circ$):

Bauwerk mit elliptischem Grundriß

$x_0 = s/2 =$	650 m
$y_0 = h_p/2 =$	185,94 m
$i(x) = i(y) =$	0,75 ‰
$\vartheta =$	36,52 °

Iterative Ermittlung von t (Parallelströmung in x-Richtung)

t =	580,424 (Iterationsfeld)
t =	580,424 m

Ermittlung der max. Wasserspiegeländerung (Parallelströmung in x-Richtung)

x =	650,000 m
y =	0,000 m
$\Delta h(x) =$	<u>0,159 m</u>

Iterative Ermittlung von t (Parallelströmung in y-Richtung)

t =	521,629 (Iterationsfeld)
$x_0 =$	650,000 m
Differenz	0,000

Ermittlung der max. Wasserspiegeländerung (Parallelströmung in y-Richtung)

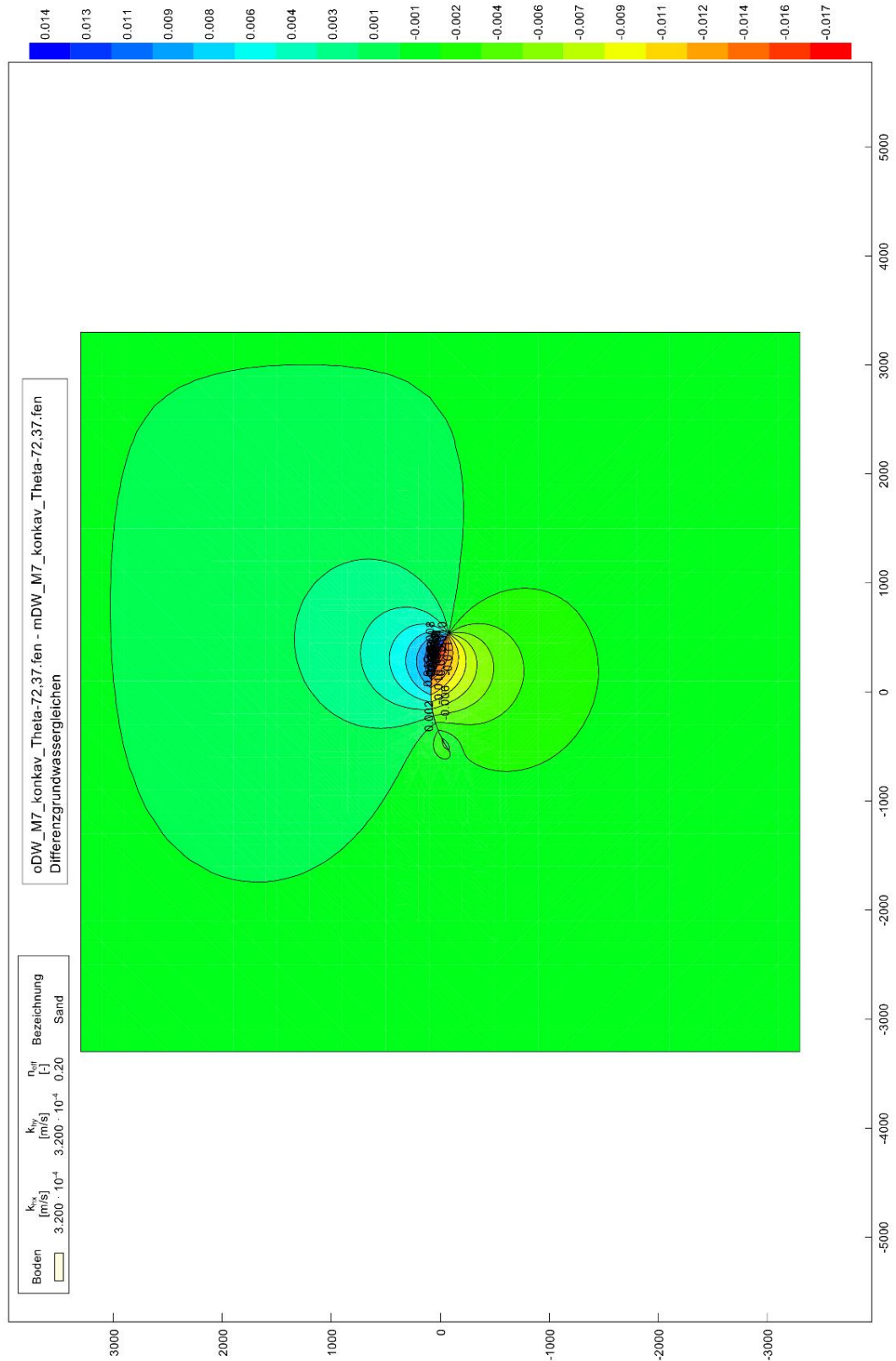
x =	0,000 m
y =	185,940 m
$\Delta h_{\text{anteilig}} =$	293,955 m
arctan =	-0,68484 (wenn < 0, dann $+\pi$)
	2,45676
$\Delta h(y) =$	<u>0,542 m</u>

Ermittlung der Wasserspiegeländerung (schräg angeströmtes Bauwerk)

$\alpha = 90 - \vartheta =$	53,48 °
$\cos \alpha =$	0,59510
$\sin \alpha =$	0,80365
$\Delta h(x) =$	0,159 m
$\Delta h(y) =$	0,542 m
$\Delta h(x,y) =$	0,289 m

Anhang W – Detaillierte Berechnungen zum Beispiel 2

Numerische Berechnung mit GGU-2D-SSFLOW:



Fortsetzung

Berechnungsvorschlag von Schloth (Gleichungen (5.7) bis (5.9)):

1) Ablesen der Formfaktoren $f_{(r/s)}$ aus Tabelle 5-2 ($r/s = 0,87$; **konkav**):

Anstrom/Aufstau

$$f_{y(r/s)} = 1,07375 \quad (r/s = 0,65)$$

$$f_{x(r/s)} = 0,92151 \quad (r/s = 0,65)$$

$$f_{y(r/s)} = 0,99500 \quad (r/s = 1,00)$$

$$f_{x(r/s)} = 0,93301 \quad (r/s = 1,00)$$

Abstrom/Absenkung

$$f_{y(r/s)} = 0,72375 \quad (r/s = 0,65)$$

$$f_{x(r/s)} = 0,92684 \quad (r/s = 0,65)$$

$$f_{y(r/s)} = 0,79000 \quad (r/s = 1,00)$$

$$f_{x(r/s)} = 0,94545 \quad (r/s = 1,00)$$

2) Bestimmung der Faktoren $f_{(H/T)}$ mit Tabelle 5-3 ($r/s = 0,87$; $H/T = 0,28$):

konvex = konkav, Aufstau = Absenkung und $f_y = f_x$

$$f_{y(H/T)} = f_{x(H/T)} = 0,85829 + \frac{(0,28-0,20)}{(0,30-0,20)} \cdot (0,94642 - 0,85829) = 0,92879 \quad (r/s = 0,65)$$

$$f_{y(H/T)} = f_{x(H/T)} = 0,91452 + \frac{(0,28-0,20)}{(0,30-0,20)} \cdot (0,96853 - 0,91452) = 0,95773 \quad (r/s = 1,00)$$

3) Bestimmung der Faktoren $f_{(d/T)}$ mit Tabelle 5-4 ($r/s = 0,87$; $d/T = 0,037$):

konvex = konkav, Aufstau = Absenkung und $f_y = f_x$

$$f_{y(d/T)} = f_{x(d/T)} = 1 + \frac{(0,037-0,03)}{(0,04-0,03)} \cdot (0,97739 - 1) = 0,98417 \quad (r/s = 0,65)$$

$$f_{y(d/T)} = f_{x(d/T)} = 1 + \frac{(0,037-0,03)}{(0,04-0,03)} \cdot (0,98851 - 1) = 0,99196 \quad (r/s = 1,00)$$

4) Bestimmung der Faktoren $f_{(k_1/k_2)}$ mit Tabellen 5-5 und 5-6 ($r/s = 0,87$; $k_1/k_2 = 1,3 \cdot 10^3$):

konvex = konkav und Aufstau = Absenkung

$$f_{y(k_1/k_2)} = 0,43455 + \frac{(1,3 \cdot 10^3 - 10^3)}{(2,5 \cdot 10^3 - 10^3)} \cdot (0,69976 - 0,43455) = 0,48759 \quad (r/s = 0,65)$$

$$f_{y(k_1/k_2)} = 0,51913 + \frac{(1,3 \cdot 10^3 - 10^3)}{(2,5 \cdot 10^3 - 10^3)} \cdot (0,76591 - 0,51913) = 0,56849 \quad (r/s = 1,00)$$

Fortsetzung

$$f_{x(k1/k2)} = 0,65707 + \frac{(1,3 \cdot 10^3 - 10^3)}{(2,5 \cdot 10^3 - 10^3)} \cdot (0,85014 - 0,65707) = 0,69568 \quad (r/s = 0,65)$$

$$f_{x(k1/k2)} = 0,73509 + \frac{(1,3 \cdot 10^3 - 10^3)}{(2,5 \cdot 10^3 - 10^3)} \cdot (0,89404 - 0,73509) = 0,76688 \quad (r/s = 1,00)$$

5) Bestimmung des maximalen Aufstaus bzw. der maximalen Absenkung in y- und x-Richtung (i = 0,25 ‰; s = 1.100 m; h_p = 173,834 m):

$$\pm \Delta h_{y,max} = f_{y,(r/s)} \cdot f_{y,(H/T)} \cdot f_{y,(d/T)} \cdot f_{y(k1/k2)} \cdot i \cdot \frac{s}{2}$$

$$\pm \Delta h_{x,max} = f_{x,(r/s)} \cdot f_{x,(H/T)} \cdot f_{x,(d/T)} \cdot f_{x(k1/k2)} \cdot i \cdot \frac{h_p}{2}$$

Anstrom/Aufstau

$$\Delta h_{y,max} = (1,07375 \cdot 0,92879 \cdot 0,98417 \cdot 0,48759) \cdot \frac{0,25}{1.000} \cdot \frac{1.100}{2} = 0,066 \text{ m} \quad (r/s = 0,65)$$

$$\Delta h_{y,max} = (0,99500 \cdot 0,95773 \cdot 0,99196 \cdot 0,56849) \cdot \frac{0,25}{1.000} \cdot \frac{1.100}{2} = 0,074 \text{ m} \quad (r/s = 1,00)$$

$$\Delta h_{y,max} = 0,066 + \frac{(0,87-0,65)}{(1,00-0,65)} \cdot (0,074 - 0,066) = \mathbf{0,071 \text{ m}} \quad (r/s = 0,87)$$

$$\Delta h_{x,max} = (0,92151 \cdot 0,92879 \cdot 0,98417 \cdot 0,69568) \cdot \frac{0,25}{1.000} \cdot \frac{173,834}{2} = 0,013 \text{ m} \quad (r/s = 0,65)$$

$$\Delta h_{x,max} = (0,93301 \cdot 0,95773 \cdot 0,99196 \cdot 0,76688) \cdot \frac{0,25}{1.000} \cdot \frac{173,834}{2} = 0,015 \text{ m} \quad (r/s = 1,00)$$

$$\Delta h_{x,max} = 0,013 + \frac{(0,87-0,65)}{(1,00-0,65)} \cdot (0,015 - 0,013) = \mathbf{0,014 \text{ m}} \quad (r/s = 0,87)$$

Abstrom/Absenkung

$$\Delta h_{y,max} = (0,72375 \cdot 0,92879 \cdot 0,98417 \cdot 0,48759) \cdot \frac{0,25}{1.000} \cdot \frac{1.100}{2} = 0,044 \text{ m} \quad (r/s = 0,65)$$

$$\Delta h_{y,max} = (0,79000 \cdot 0,95773 \cdot 0,99196 \cdot 0,56849) \cdot \frac{0,25}{1.000} \cdot \frac{1.100}{2} = 0,059 \text{ m} \quad (r/s = 1,00)$$

$$\Delta h_{y,max} = 0,044 + \frac{(0,87-0,65)}{(1,00-0,65)} \cdot (0,059 - 0,044) = \mathbf{0,053 \text{ m}} \quad (r/s = 0,87)$$

$$\Delta h_{x,max} = (0,92684 \cdot 0,92879 \cdot 0,98417 \cdot 0,69568) \cdot \frac{0,25}{1.000} \cdot \frac{173,834}{2} = 0,013 \text{ m} \quad (r/s = 0,65)$$

$$\Delta h_{x,max} = (0,94545 \cdot 0,95773 \cdot 0,99196 \cdot 0,76688) \cdot \frac{0,25}{1.000} \cdot \frac{173,834}{2} = 0,015 \text{ m} \quad (r/s = 1,00)$$

$$\Delta h_{x,max} = 0,013 + \frac{(0,87-0,65)}{(1,00-0,65)} \cdot (0,015 - 0,013) = \mathbf{0,014 \text{ m}} \quad (r/s = 0,87)$$

Fortsetzung

6) Bestimmung des Aufstaus (-) und der Absenkung (+) für $\vartheta = 72,37^\circ$:

$$\pm \Delta h_{\vartheta, um} = \sqrt{(\Delta h_{y, max} \cdot \cos \vartheta)^2 + (\Delta h_{x, max} \cdot \sin \vartheta)^2}$$

Anstrom/Aufstau

$$\Delta h_{72,37; um} = -\sqrt{(0,071 \cdot \cos 72,37^\circ)^2 + (0,014 \cdot \sin 72,37^\circ)^2} = -\mathbf{0,025\ m}$$

Abstrom/Absenkung

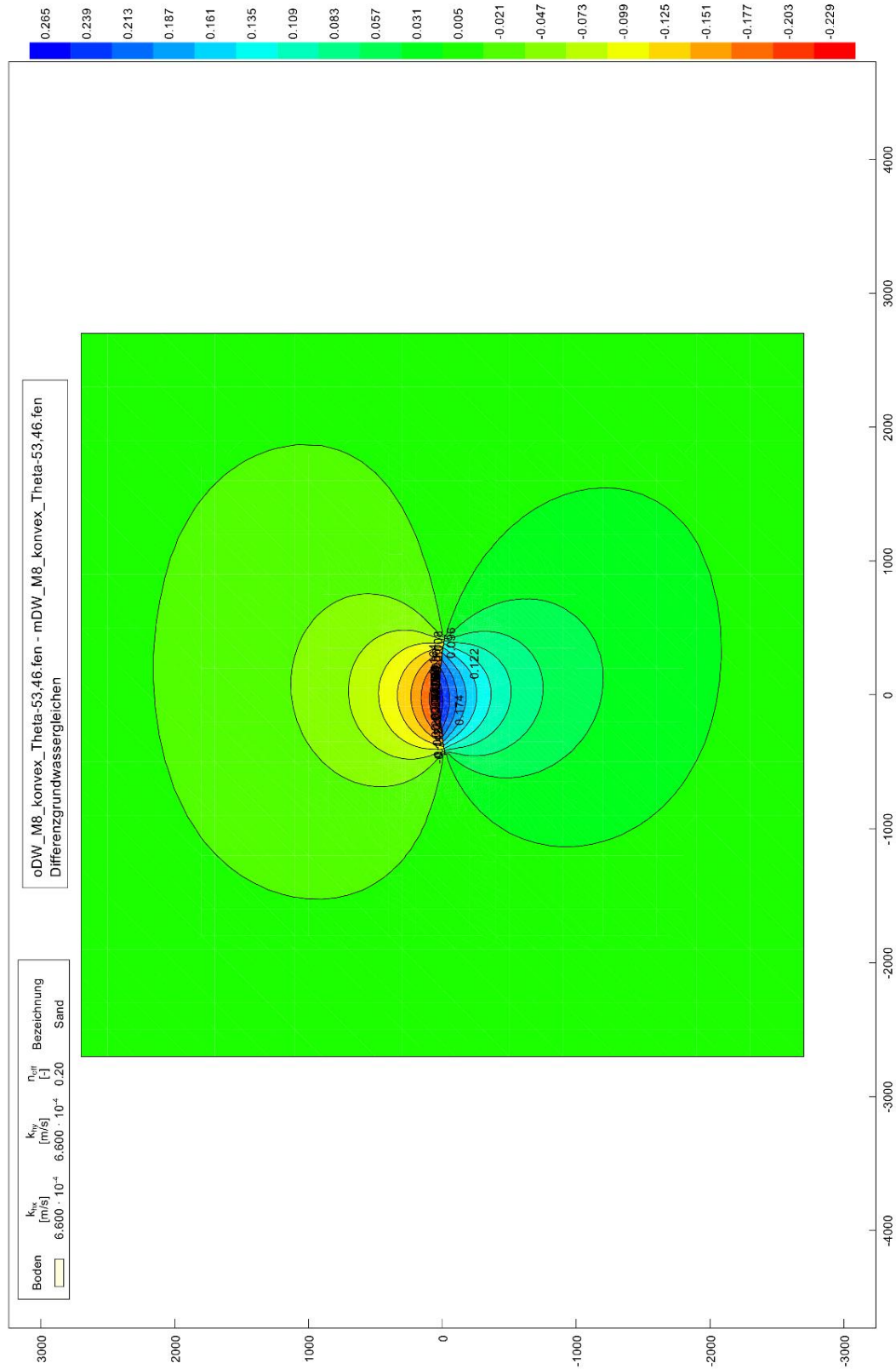
$$\Delta h_{72,37; um} = +\sqrt{(0,053 \cdot \cos 72,37^\circ)^2 + (0,014 \cdot \sin 72,37^\circ)^2} = +\mathbf{0,021\ m}$$

Berechnungsansatz von Schneider (Gleichung (2.21)):Bestimmung des maximalen Aufstaus (-) bzw. der maximalen Absenkung (+) mit den Parametern ($i = 0,25\ ‰$; $s = 1.100\ \text{m}$; $\vartheta = 72,37^\circ$):

$$\Delta h_{um} = \pm \frac{0,25}{1.000} \cdot \frac{1.100}{2} \cdot \cos 72,37^\circ = \pm \mathbf{0,042\ m}$$

Anhang X – Detaillierte Berechnungen zum Beispiel 3

Numerische Berechnung mit GGU-2D-SSFLOW (konvex):



Fortsetzung

Berechnungsvorschlag von Schloth (Gleichungen (5.7) bis (5.9)):1) Ablesen der Formfaktoren $f_{(r/s)}$ aus Tabelle 5-2 ($r/s = 2,63$; **konvex**):

Anstrom/Aufstau

$$f_{y(r/s)} = 0,76167 \quad (r/s = 1,00)$$

$$f_{x(r/s)} = 0,93301 \quad (r/s = 1,00)$$

$$f_{y(r/s)} = 0,84000 \quad (r/s = 2,00)$$

$$f_{x(r/s)} = 0,89977 \quad (r/s = 2,00)$$

Abstrom/Absenkung

$$f_{y(r/s)} = 1,02167 \quad (r/s = 1,00)$$

$$f_{x(r/s)} = 0,94545 \quad (r/s = 1,00)$$

$$f_{y(r/s)} = 0,96857 \quad (r/s = 2,00)$$

$$f_{x(r/s)} = 0,89977 \quad (r/s = 2,00)$$

2) Bestimmung der Faktoren $f_{(H/T)}$ mit Tabelle 5-3 ($r/s = 2,63$; $H/T = 0,46$):konvex = konkav, Aufstau = Absenkung und $f_y = f_x$

$$f_{y(H/T)} = f_{x(H/T)} = 0,96853 + \frac{(0,46-0,30)}{(0,50-0,30)} \cdot (1 - 0,96853) = 0,99371 \quad (r/s = 1,00)$$

$$f_{y(H/T)} = f_{x(H/T)} = 0,99326 + \frac{(0,46-0,30)}{(0,50-0,30)} \cdot (1 - 0,99326) = 0,99865 \quad (r/s = 2,00)$$

3) Bestimmung der Faktoren $f_{(d/T)}$ mit Tabelle 5-4 ($r/s = 2,63$; $d/T = 0,043$):konvex = konkav, Aufstau = Absenkung und $f_y = f_x$

$$f_{y(d/T)} = f_{x(d/T)} = 0,98851 + \frac{(0,043-0,04)}{(0,05-0,04)} \cdot (0,96853 - 0,98851) = 0,98252 \quad (r/s = 1,00)$$

$$f_{y(d/T)} = f_{x(d/T)} = 0,99681 + \frac{(0,043-0,04)}{(0,05-0,04)} \cdot (0,99326 - 0,99681) = 0,99575 \quad (r/s = 2,00)$$

4) Bestimmung der Faktoren $f_{(k_1/k_2)}$ mit Tabellen 5-5 und 5-6 ($r/s = 2,63$; $k_1/k_2 = 4,4 \cdot 10^4$):

konvex = konkav und Aufstau = Absenkung

$$f_{y(k_1/k_2)} = 1,06455 + \frac{(4,4 \cdot 10^4 - 2,5 \cdot 10^4)}{(10^5 - 2,5 \cdot 10^4)} \cdot (1,10058 - 1,06455) = 1,07368 \quad (r/s = 1,00)$$

$$f_{y(k_1/k_2)} = 1,03478 + \frac{(4,4 \cdot 10^4 - 2,5 \cdot 10^4)}{(10^5 - 2,5 \cdot 10^4)} \cdot (1,05373 - 1,03478) = 1,03958 \quad (r/s = 2,00)$$

Fortsetzung

$$f_{x(k1/k2)} = 1,02649 + \frac{(4,4 \cdot 10^4 - 2,5 \cdot 10^4)}{(10^5 - 2,5 \cdot 10^4)} \cdot (1,03974 - 1,02649) = 1,02985 \quad (r/s = 1,00)$$

$$f_{x(k1/k2)} = 1 + \frac{(4,4 \cdot 10^4 - 2,5 \cdot 10^4)}{(10^5 - 2,5 \cdot 10^4)} \cdot (1,025 - 1) = 1,00633 \quad (r/s = 2,00)$$

5) Bestimmung des maximalen Aufstaus bzw. der maximalen Absenkung in y- und x-Richtung (i = 1,13 ‰; s = 900 m; h_p = 43,169 m):

$$\pm \Delta h_{y,max} = f_{y,(r/s)} \cdot f_{y,(H/T)} \cdot f_{y,(d/T)} \cdot f_{y(k1/k2)} \cdot i \cdot \frac{s}{2}$$

$$\pm \Delta h_{x,max} = f_{x,(r/s)} \cdot f_{x,(H/T)} \cdot f_{x,(d/T)} \cdot f_{x(k1/k2)} \cdot i \cdot \frac{h_p}{2}$$

Anstrom/Aufstau

$$\Delta h_{y,max} = (0,76167 \cdot 0,99371 \cdot 0,98252 \cdot 1,07368) \cdot \frac{1,13}{1.000} \cdot \frac{900}{2} = 0,406 \text{ m} \quad (r/s = 1,00)$$

$$\Delta h_{y,max} = (0,84000 \cdot 0,99865 \cdot 0,99575 \cdot 1,03958) \cdot \frac{1,13}{1.000} \cdot \frac{900}{2} = 0,442 \text{ m} \quad (r/s = 2,00)$$

$$\Delta h_{y,max} = 0,406 + \frac{(2,63-1,00)}{(2,00-1,00)} \cdot (0,442 - 0,406) = \mathbf{0,465 \text{ m}} \quad (r/s = 2,63)$$

$$\Delta h_{x,max} = (0,93301 \cdot 0,99371 \cdot 0,98252 \cdot 1,02985) \cdot \frac{1,13}{1.000} \cdot \frac{43,169}{2} = 0,023 \text{ m} \quad (r/s = 1,00)$$

$$\Delta h_{x,max} = (0,89977 \cdot 0,99865 \cdot 0,99575 \cdot 1,00633) \cdot \frac{1,13}{1.000} \cdot \frac{43,169}{2} = 0,022 \text{ m} \quad (r/s = 2,00)$$

$$\Delta h_{x,max} = 0,023 + \frac{(2,63-1,00)}{(2,00-1,00)} \cdot (0,022 - 0,023) = \mathbf{0,021 \text{ m}} \quad (r/s = 2,63)$$

Abstrom/Absenkung

$$\Delta h_{y,max} = (1,02167 \cdot 0,99371 \cdot 0,98252 \cdot 1,07368) \cdot \frac{1,13}{1.000} \cdot \frac{900}{2} = 0,545 \text{ m} \quad (r/s = 1,00)$$

$$\Delta h_{y,max} = (0,96857 \cdot 0,99865 \cdot 0,99575 \cdot 1,03958) \cdot \frac{1,13}{1.000} \cdot \frac{900}{2} = 0,509 \text{ m} \quad (r/s = 2,00)$$

$$\Delta h_{y,max} = 0,545 + \frac{(2,63-1,00)}{(2,00-1,00)} \cdot (0,509 - 0,545) = \mathbf{0,486 \text{ m}} \quad (r/s = 2,63)$$

$$\Delta h_{x,max} = (0,94545 \cdot 0,99371 \cdot 0,98252 \cdot 1,02985) \cdot \frac{1,13}{1.000} \cdot \frac{43,169}{2} = 0,023 \text{ m} \quad (r/s = 1,00)$$

$$\Delta h_{x,max} = (0,89977 \cdot 0,99865 \cdot 0,99575 \cdot 1,00633) \cdot \frac{1,13}{1.000} \cdot \frac{43,169}{2} = 0,022 \text{ m} \quad (r/s = 2,00)$$

$$\Delta h_{x,max} = 0,023 + \frac{(2,63-1,00)}{(2,00-1,00)} \cdot (0,022 - 0,023) = \mathbf{0,021 \text{ m}} \quad (r/s = 2,63)$$

Fortsetzung

6) Bestimmung des Aufstaus (-) und der Absenkung (+) für $\vartheta = 53,46^\circ$:

$$\pm \Delta h_{\vartheta, um} = \sqrt{(\Delta h_{y, max} \cdot \cos \vartheta)^2 + (\Delta h_{x, max} \cdot \sin \vartheta)^2}$$

Anstrom/Aufstau

$$\Delta h_{53,46; um} = -\sqrt{(0,465 \cdot \cos 53,46^\circ)^2 + (0,021 \cdot \sin 53,46^\circ)^2} = -\mathbf{0,277\ m}$$

Abstrom/Absenkung

$$\Delta h_{53,46; um} = +\sqrt{(0,486 \cdot \cos 53,46^\circ)^2 + (0,021 \cdot \sin 53,46^\circ)^2} = +\mathbf{0,290\ m}$$

Berechnungsansatz von Schneider (Gleichung (2.21)):

Bestimmung des maximalen Aufstaus (-) bzw. der maximalen Absenkung (+) mit den Parametern ($i = 1,13\ ‰$; $s = 900\ \text{m}$; $\vartheta = 53,46^\circ$):

$$\Delta h_{um} = \pm \frac{1,13}{1.000} \cdot \frac{900}{2} \cdot \cos 53,46^\circ = \pm \mathbf{0,303\ m}$$

Fortsetzung

Berechnungsansatz von Schneider (Gleichungen (2.22) bis (2.26)):

Bestimmung des maximalen Aufstaus (-) bzw. der maximalen Absenkung (+) mit den Parametern ($i = 1,13 \text{ ‰}$; $s = 900 \text{ m} \Rightarrow x_0 = s/2$; $h_p = 43,169 \text{ m} \Rightarrow y_0 = h_p/2$; $\vartheta = 53,46^\circ$):

Bauwerk mit elliptischem Grundriß

$$\begin{aligned} x_0 &= 450 \text{ m} \\ y_0 &= 21,5845 \text{ m} \\ i(x) = i(y) &= 1,13 \text{ ‰} \\ \vartheta &= 53,46^\circ \end{aligned}$$

Iterative Ermittlung von t (Parallelströmung in x-Richtung)

$$\begin{aligned} t &= 448,619 \text{ (Iterationsfeld)} \\ t &= 448,619 \text{ m} \end{aligned}$$

Ermittlung der max. Wasserspiegeländerung (Parallelströmung in x-Richtung)

$$\begin{aligned} x &= 450,000 \text{ m} \\ y &= 0,000 \text{ m} \\ \Delta h(x) &= \underline{0,010 \text{ m}} \end{aligned}$$

Iterative Ermittlung von t (Parallelströmung in y-Richtung)

$$\begin{aligned} t &= 374,721 \text{ (Iterationsfeld)} \\ x_0 &= 450,000 \text{ m} \\ \text{Differenz} &= 0,000 \end{aligned}$$

Ermittlung der max. Wasserspiegeländerung (Parallelströmung in y-Richtung)

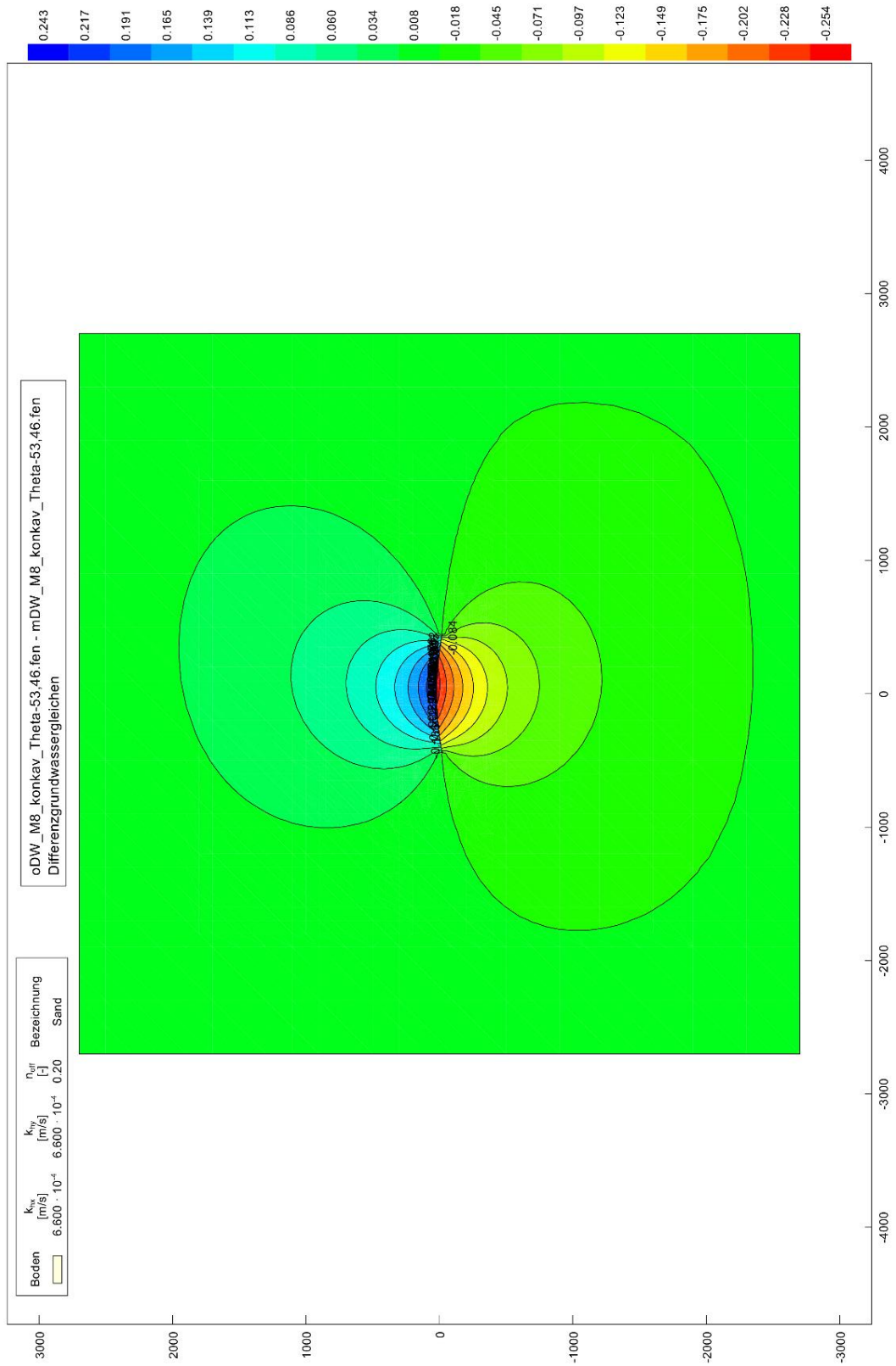
$$\begin{aligned} x &= 0,000 \text{ m} \\ y &= 21,585 \text{ m} \\ \Delta h, \text{anteilig} &= 187,982 \text{ m} \\ \arctan &= -0,11508 \text{ (wenn } < 0, \text{ dann } +\pi) \\ &= 3,02652 \\ \Delta h(y) &= \underline{0,643 \text{ m}} \end{aligned}$$

Ermittlung der Wasserspiegeländerung (schräg angeströmtes Bauwerk)

$$\begin{aligned} \alpha = 90 - \vartheta &= 36,54^\circ \\ \cos \alpha &= 0,80344 \\ \sin \alpha &= 0,59538 \\ \Delta h(x) &= 0,010 \text{ m} \\ \Delta h(y) &= 0,643 \text{ m} \\ \Delta h(x,y) &= \mathbf{0,237 \text{ m}} \end{aligned}$$

Fortsetzung

Numerische Berechnung mit GGU-2D-SSFLOW (konkav):



Fortsetzung

Berechnungsvorschlag von Schloth (Gleichungen (5.7) bis (5.9)):

1) Ablesen der Formfaktoren $f_{(r/s)}$ aus Tabelle 5-2 ($r/s = 2,63$; **konkav**):

Anstrom/Aufstau

$$f_{y(r/s)} = 0,99500 \quad (r/s = 1,00)$$

$$f_{x(r/s)} = 0,93301 \quad (r/s = 1,00)$$

$$f_{y(r/s)} = 0,95143 \quad (r/s = 2,00)$$

$$f_{x(r/s)} = 0,89977 \quad (r/s = 2,00)$$

Abstrom/Absenkung

$$f_{y(r/s)} = 0,79000 \quad (r/s = 1,00)$$

$$f_{x(r/s)} = 0,94545 \quad (r/s = 1,00)$$

$$f_{y(r/s)} = 0,85714 \quad (r/s = 2,00)$$

$$f_{x(r/s)} = 0,89977 \quad (r/s = 2,00)$$

Schritte 2) bis 4):

Die Faktoren $f_{(H/T)}$, $f_{(d/T)}$ und $f_{(k1/k2)}$ brauchen aufgrund der Konventionen **konvex = konkav** und **Aufstau = Absenkung** nicht erneut bestimmt zu werden, sondern können direkt aus dem Beispiel 3 mit konvexer Anströmung übernommen werden.

5) Bestimmung des maximalen Aufstaus bzw. der maximalen Absenkung in y- und x-Richtung ($i = 1,13 \text{ ‰}$; $s = 900 \text{ m}$; $h_p = 43,169 \text{ m}$):

$$\pm \Delta h_{y,max} = f_{y,(r/s)} \cdot f_{y,(H/T)} \cdot f_{y,(d/T)} \cdot f_{y,(k1/k2)} \cdot i \cdot \frac{s}{2}$$

$$\pm \Delta h_{x,max} = f_{x,(r/s)} \cdot f_{x,(H/T)} \cdot f_{x,(d/T)} \cdot f_{x,(k1/k2)} \cdot i \cdot \frac{h_p}{2}$$

Durch die Konvention **konvex = konkav** bei den Faktoren $f_{x,(r/s)}$ in Tabelle 5-2 und den zuvor beschriebenen Vereinfachungen, können die Werte $\Delta h_{x,max}$ direkt aus dem Beispiel 3 mit konvexer Anströmung übernommen werden.

Anstrom/Aufstau

$$\Delta h_{y,max} = (0,99500 \cdot 0,99371 \cdot 0,98252 \cdot 1,07368) \cdot \frac{1,13}{1.000} \cdot \frac{900}{2} = 0,530 \text{ m} \quad (r/s = 1,00)$$

$$\Delta h_{y,max} = (0,95143 \cdot 0,99865 \cdot 0,99575 \cdot 1,03958) \cdot \frac{1,13}{1.000} \cdot \frac{900}{2} = 0,500 \text{ m} \quad (r/s = 2,00)$$

Fortsetzung

$$\Delta h_{y,max} = 0,530 + \frac{(2,63-1,00)}{(2,00-1,00)} \cdot (0,500 - 0,530) = \mathbf{0,481\ m} \quad (r/s = 2,63)$$

Abstrom/Absenkung

$$\Delta h_{y,max} = (0,79000 \cdot 0,99371 \cdot 0,98252 \cdot 1,07368) \cdot \frac{1,13}{1,000} \cdot \frac{900}{2} = 0,421\ \text{m} \quad (r/s = 1,00)$$

$$\Delta h_{y,max} = (0,85714 \cdot 0,99865 \cdot 0,99575 \cdot 1,03958) \cdot \frac{1,13}{1,000} \cdot \frac{900}{2} = 0,451\ \text{m} \quad (r/s = 2,00)$$

$$\Delta h_{y,max} = 0,421 + \frac{(2,63-1,00)}{(2,00-1,00)} \cdot (0,451 - 0,421) = \mathbf{0,470\ m} \quad (r/s = 2,63)$$

6) Bestimmung des Aufstaus (-) und der Absenkung (+) für $\vartheta = 53,46^\circ$:

$$\pm \Delta h_{\vartheta,um} = \sqrt{(\Delta h_{y,max} \cdot \cos \vartheta)^2 + (\Delta h_{x,max} \cdot \sin \vartheta)^2}$$

Anstrom/Aufstau

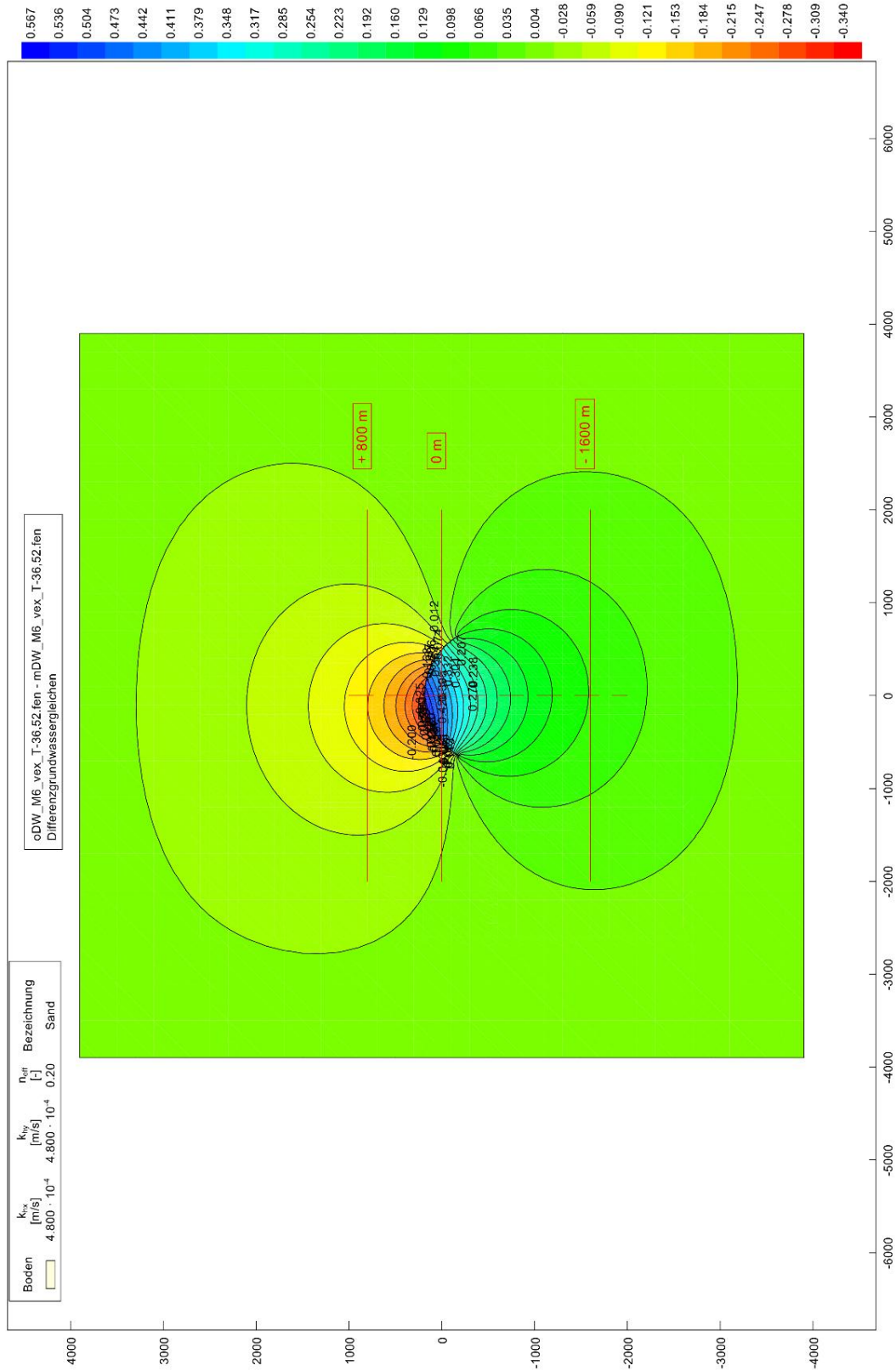
$$\Delta h_{53,46;um} = -\sqrt{(0,481 \cdot \cos 53,46^\circ)^2 + (0,021 \cdot \sin 53,46^\circ)^2} = \mathbf{-0,287\ m}$$

Abstrom/Absenkung

$$\Delta h_{53,46;um} = +\sqrt{(0,470 \cdot \cos 53,46^\circ)^2 + (0,021 \cdot \sin 53,46^\circ)^2} = \mathbf{+0,280\ m}$$

Anhang Y – Anwendung Aufstau-/Absenkungskurven (Bsp. 1)

Numerische Berechnung mit GGU-2D-SSFLOW (konvex):



Fortsetzung

Anwendungsvorschlag von Schloth (Diagramme Anhang R/ Gleichungen (5.10) - (5.13)):

1) Bestimmung des Wertes y' für den An- und Abstrom ($h_p = 371,880$ m):

$$y' = y \pm \frac{h_p}{2}$$

Anstrom/Aufstau

$$y' = 800 - \frac{371,880}{2} = 614,06 \text{ m}$$

Abstrom/Absenkung

$$y' = 1.600 + \frac{371,880}{2} = 1.785,94 \text{ m}$$

2) Bestimmung der Verhältnisse y'/s (bei $x/s = 0$) für den An- und Abstrom ($s = 1.300$ m):

Anstrom/Aufstau

$$y'/s = \frac{614,06 \text{ m}}{1.300 \text{ m}} = 0,47$$

Abstrom/Absenkung

$$y'/s = \frac{1.785,94 \text{ m}}{1.300 \text{ m}} = 1,37$$

3) Ablesen der Verhältnisse bzw. Faktoren $\Delta h/s \cdot 1000$ aus den Diagrammen (Bogenform 2 und 3) im **Anhang R** ($r/s = 0,58$; **konvex**):

Anstrom/Aufstau (s. grüne Pfeile in den Diagrammen)

$$\Delta h/s \cdot 1000 = 0,139 \quad (r/s = 0,55)$$

$$\Delta h/s \cdot 1000 = 0,146 \quad (r/s = 0,65)$$

Abstrom/Absenkung (s. blaue Pfeile in den Diagrammen)

$$\Delta h/s \cdot 1000 = 0,100 \quad (r/s = 0,55)$$

$$\Delta h/s \cdot 1000 = 0,092 \quad (r/s = 0,65)$$

Fortsetzung

Diagramm der Bogenform 2:

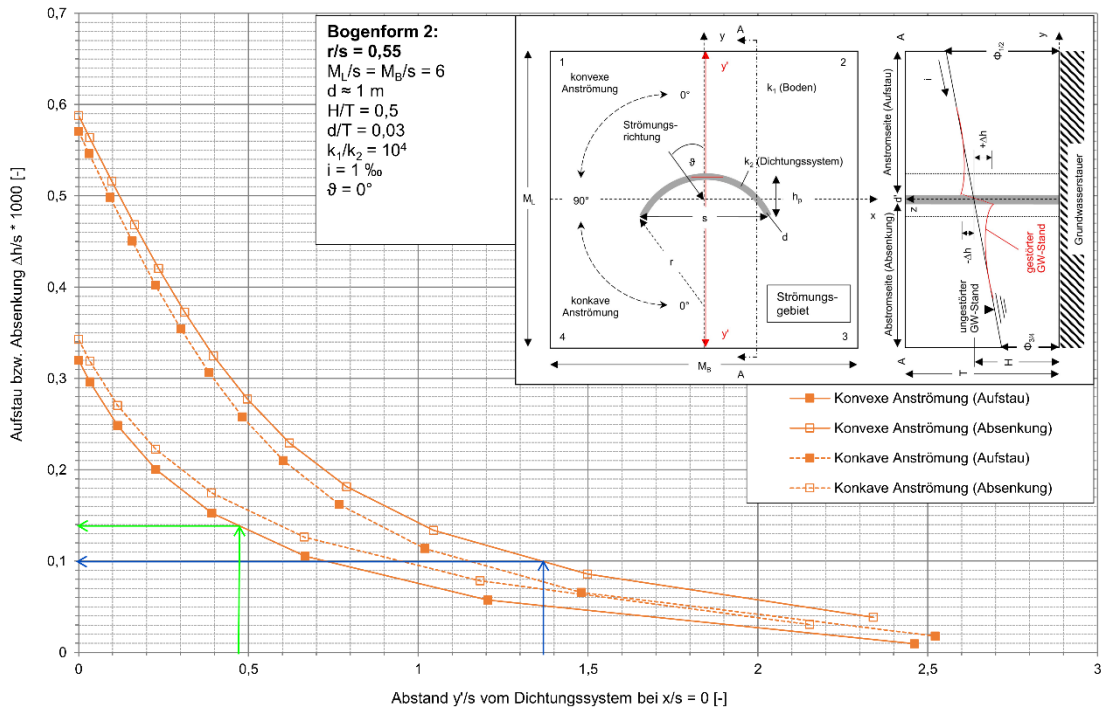
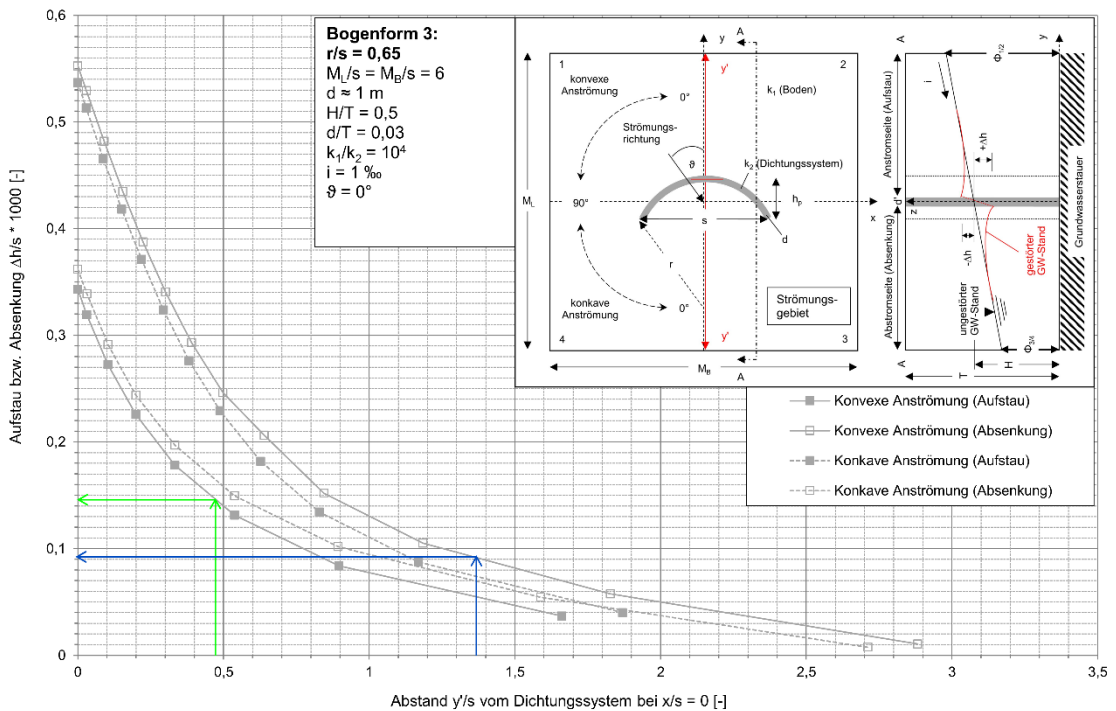


Diagramm der Bogenform 3:



Fortsetzung

4) Bestimmung des Wertes $\Delta h_{y'}$ für den An- und Abstrom ($s = 1.300 \text{ m}$):

$$\Delta h_{y'} = f(\Delta h/s \cdot 1000) \cdot s/1000$$

Anstrom/Aufstau (s. grüne Pfeile in den Diagrammen)

$$\Delta h_{y'} = 0,139 \cdot 1.300 \text{ m}/1000 = 0,181 \text{ m} \quad (r/s = 0,55)$$

$$\Delta h_{y'} = 0,146 \cdot 1.300 \text{ m}/1000 = 0,190 \text{ m} \quad (r/s = 0,65)$$

Abstrom/Absenkung (s. blaue Pfeile in den Diagrammen)

$$\Delta h_{y'} = 0,100 \cdot 1.300 \text{ m}/1000 = 0,130 \text{ m} \quad (r/s = 0,55)$$

$$\Delta h_{y'} = 0,092 \cdot 1.300 \text{ m}/1000 = 0,120 \text{ m} \quad (r/s = 0,65)$$

5) Bestimmung der Faktoren $f_{y(H/T)}$, $f_{y(d/T)}$ und $f_{y(k1/k2)}$ gemäß **Anhang V**:

Anstrom/Aufstau = Abstrom/Absenkung

$$f_{y(H/T)} = 1,01229 \quad (r/s = 0,55)$$

$$f_{y(d/T)} = 1,01447 \quad (r/s = 0,55)$$

$$f_{y(k1/k2)} = 1,19815 \quad (r/s = 0,55)$$

$$f_{y(H/T)} = 1,00840 \quad (r/s = 0,65)$$

$$f_{y(d/T)} = 1,00923 \quad (r/s = 0,65)$$

$$f_{y(k1/k2)} = 1,15081 \quad (r/s = 0,65)$$

Fortsetzung

6) Bestimmung des maximalen Aufstaus bzw. der maximalen Absenkung in y- Richtung ($i = 0,75 \text{ ‰}$):

$$\pm \Delta h_{y,max(y';x=0)} = f_{y(H/T)} \cdot f_{y(d/T)} \cdot f_{y(k1/k2)} \cdot i \cdot \Delta h_{y'}$$

Anstrom/Aufstau

$$\Delta h_{y,max(y';x=0)} = (1,01229 \cdot 1,01447 \cdot 1,19815) \cdot 0,75 \cdot 0,181 \text{ m} = 0,167 \text{ m} \quad (r/s = 0,55)$$

$$\Delta h_{y,max(y';x=0)} = (1,00840 \cdot 1,00923 \cdot 1,15081) \cdot 0,75 \cdot 0,190 \text{ m} = 0,167 \text{ m} \quad (r/s = 0,65)$$

$$\Delta h_{y,max(y';x=0)} = 0,167 + \frac{(0,58-0,55)}{(0,65-0,55)} \cdot (0,167 - 0,167) = \mathbf{0,167 \text{ m}} \quad (r/s = 0,58)$$

Fortsetzung

Abstrom/Absenkung

$$\Delta h_{y,max(y';x=0)} = (1,01229 \cdot 1,01447 \cdot 1,19815) \cdot 0,75 \cdot 0,130 \text{ m} = 0,120 \text{ m} \quad (r/s = 0,55)$$

$$\Delta h_{y,max(y';x=0)} = (1,00840 \cdot 1,00923 \cdot 1,15081) \cdot 0,75 \cdot 0,120 \text{ m} = 0,105 \text{ m} \quad (r/s = 0,65)$$

$$\Delta h_{y,max(y';x=0)} = 0,120 + \frac{(0,58-0,55)}{(0,65-0,55)} \cdot (0,105 - 0,120) = \mathbf{0,116 \text{ m}} \quad (r/s = 0,58)$$

7) Bestimmung des Aufstaus (-) und der Absenkung (+) für $\vartheta = 36,52^\circ$:

$$\pm \Delta h_{\vartheta,um(y';x=0)} = \Delta h_{y,max} \cdot \cos \vartheta$$

Anstrom/Aufstau

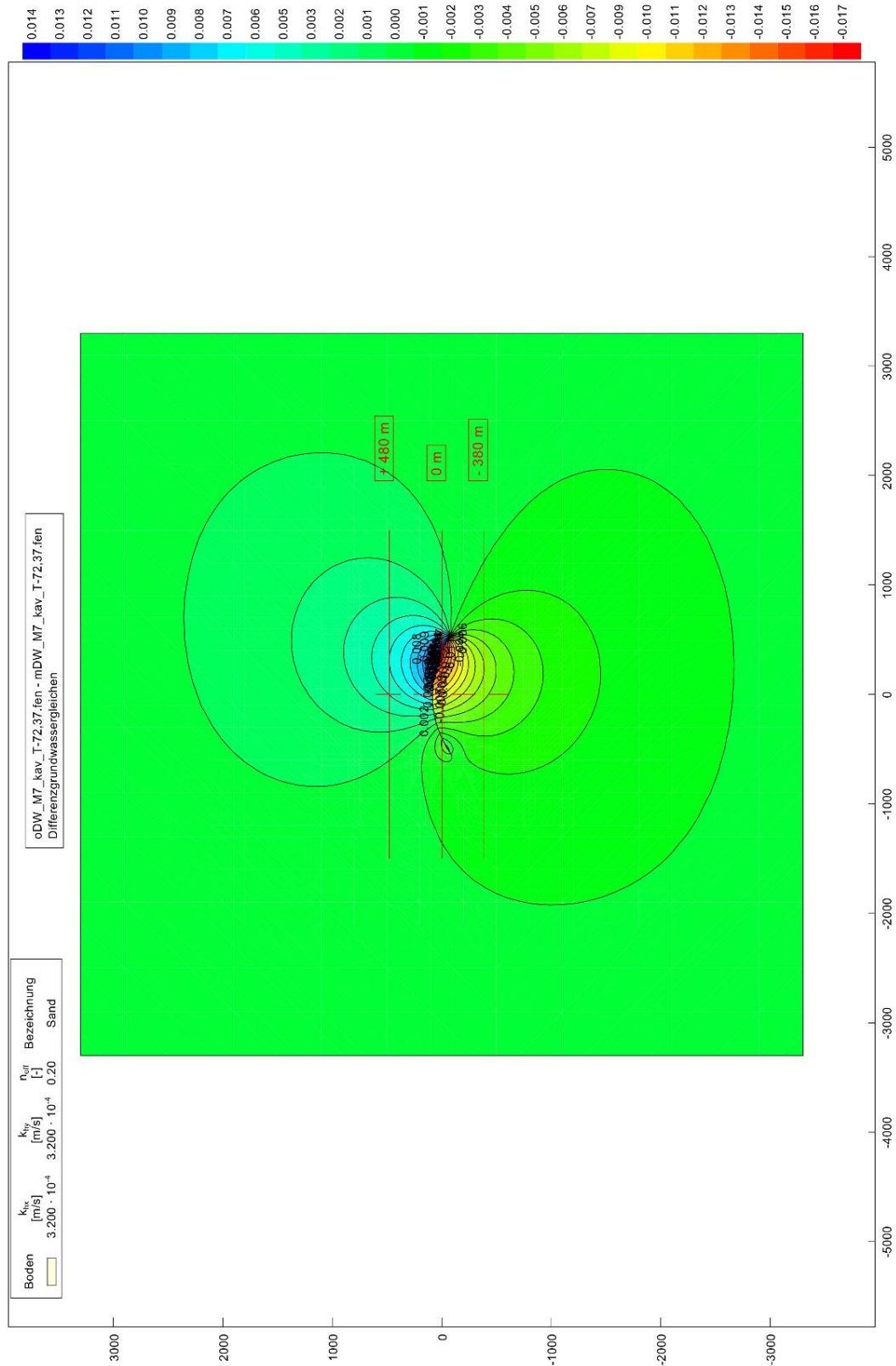
$$\Delta h_{36,52;um(y';x=0)} = -0,167 \cdot \cos 36,52^\circ = \mathbf{-0,134 \text{ m}}$$

Abstrom/Absenkung

$$\Delta h_{36,52;um(y';x=0)} = +0,116 \cdot \cos 36,52^\circ = \mathbf{+0,093 \text{ m}}$$

Anhang Z – Anwendung Aufstau-/Absenkungskurven (Bsp. 2)

Numerische Berechnung mit GGU-2D-SSFLOW (konkav):



Fortsetzung

Anwendungsvorschlag von Schloth (Diagramme Anhang R/ Gleichungen (5.10) - (5.13)):

1) Bestimmung des Wertes y' für den An- und Abstrom ($h_p = 173,834$ m):

$$y' = y \pm \frac{h_p}{2}$$

Anstrom/Aufstau

$$y' = 380 - \frac{173,834}{2} = 293,08 \text{ m}$$

Abstrom/Absenkung

$$y' = 480 + \frac{173,834}{2} = 566,92 \text{ m}$$

2) Bestimmung der Verhältnisse y'/s (bei $x/s = 0$) für den An- und Abstrom ($s = 1.100$ m):

Anstrom/Aufstau

$$y'/s = \frac{293,08 \text{ m}}{1.100 \text{ m}} = 0,27$$

Abstrom/Absenkung

$$y'/s = \frac{566,92 \text{ m}}{1.100 \text{ m}} = 0,52$$

3) Ablesen der Verhältnisse bzw. Faktoren $\Delta h/s \cdot 1000$ aus den Diagrammen (Bogenform 3 und 4) im **Anhang R** ($r/s = 0,87$; **konkav**):

Anstrom/Aufstau (s. grüne Pfeile in den Diagrammen)

$$\Delta h/s \cdot 1000 = 0,340 \quad (r/s = 0,65)$$

$$\Delta h/s \cdot 1000 = 0,302 \quad (r/s = 1,00)$$

Abstrom/Absenkung (s. blaue Pfeile in den Diagrammen)

$$\Delta h/s \cdot 1000 = 0,152 \quad (r/s = 0,65)$$

$$\Delta h/s \cdot 1000 = 0,162 \quad (r/s = 1,00)$$

Fortsetzung

Diagramm der Bogenform 3:

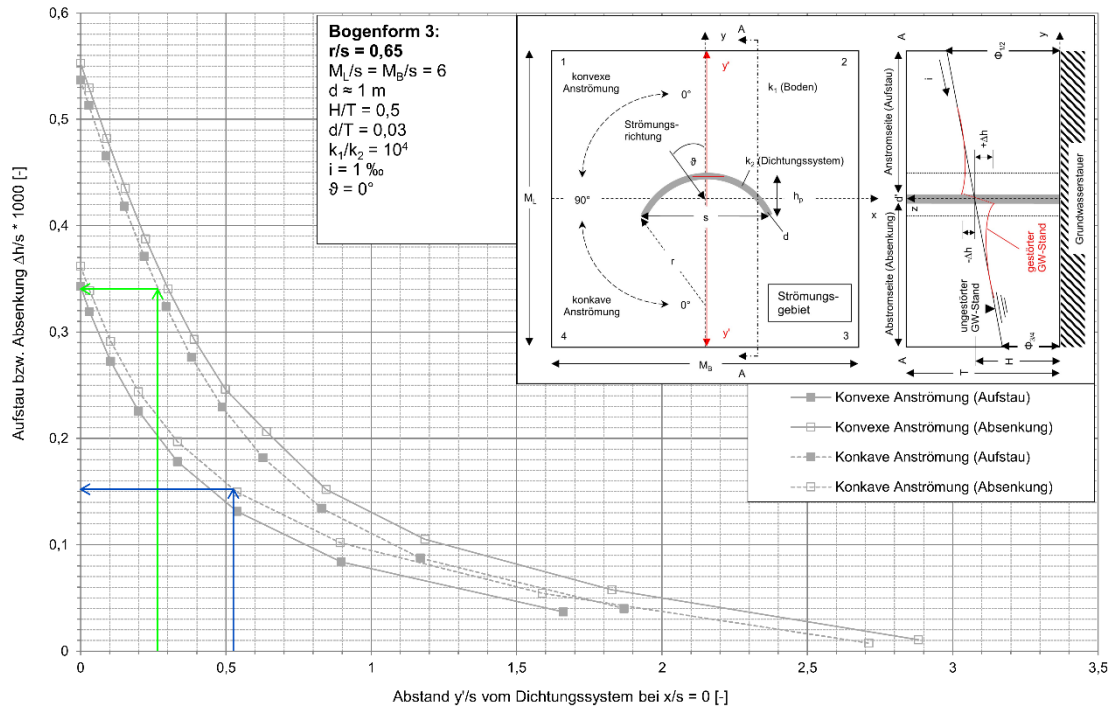
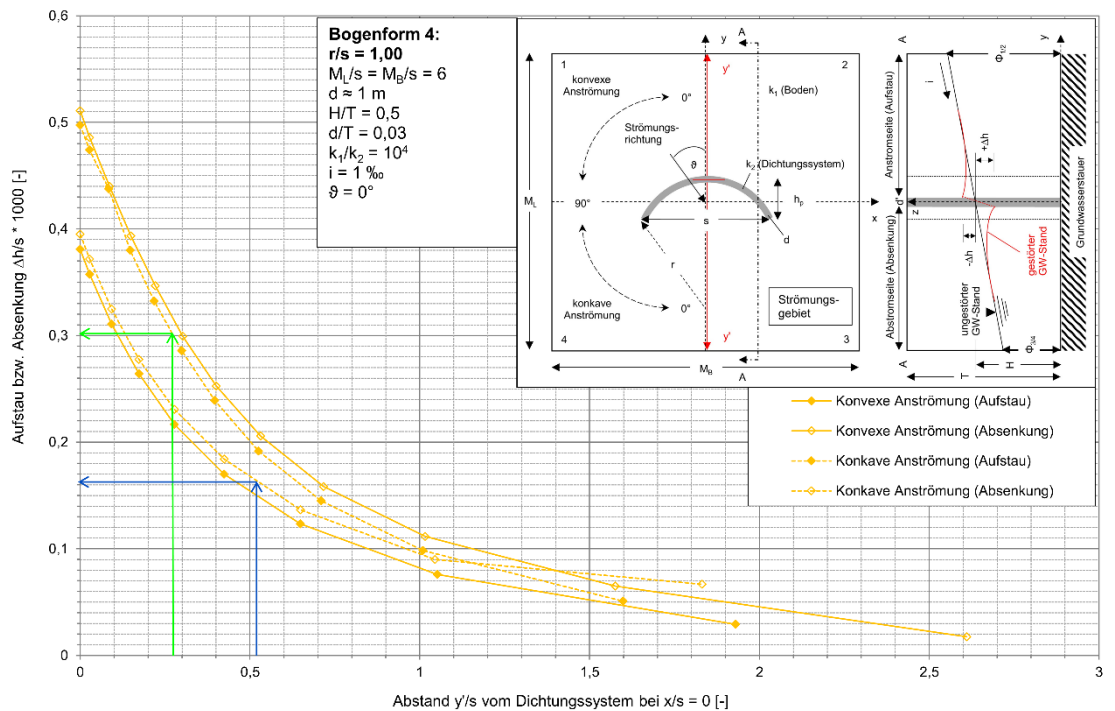


Diagramm der Bogenform 4:



Fortsetzung

4) Bestimmung des Wertes $\Delta h_{y'}$ für den An- und Abstrom ($s = 1.100 \text{ m}$):

$$\Delta h_{y'} = f(\Delta h/s \cdot 1000) \cdot s/1000$$

Anstrom/Aufstau (s. grüne Pfeile in den Diagrammen)

$$\Delta h_{y'} = 0,340 \cdot 1.100 \text{ m}/1000 = 0,374 \text{ m} \quad (r/s = 0,65)$$

$$\Delta h_{y'} = 0,302 \cdot 1.100 \text{ m}/1000 = 0,332 \text{ m} \quad (r/s = 1,00)$$

Abstrom/Absenkung (s. blaue Pfeile in den Diagrammen)

$$\Delta h_{y'} = 0,152 \cdot 1.100 \text{ m}/1000 = 0,167 \text{ m} \quad (r/s = 0,65)$$

$$\Delta h_{y'} = 0,162 \cdot 1.100 \text{ m}/1000 = 0,178 \text{ m} \quad (r/s = 1,00)$$

5) Bestimmung der Faktoren $f_{y(H/T)}$, $f_{y(d/T)}$ und $f_{y(k1/k2)}$ gemäß **Anhang W**:

Anstrom/Aufstau = Abstrom/Absenkung

$$f_{y(H/T)} = 0,92879 \quad (r/s = 0,65)$$

$$f_{y(d/T)} = 0,98417 \quad (r/s = 0,65)$$

$$f_{y(k1/k2)} = 0,48759 \quad (r/s = 0,65)$$

$$f_{y(H/T)} = 0,95773 \quad (r/s = 1,00)$$

$$f_{y(d/T)} = 0,99196 \quad (r/s = 1,00)$$

$$f_{y(k1/k2)} = 0,56849 \quad (r/s = 1,00)$$

Fortsetzung

6) Bestimmung des maximalen Aufstaus bzw. der maximalen Absenkung in y- Richtung ($i = 0,25 \text{ ‰}$):

$$\pm \Delta h_{y,max(y';x=0)} = f_{y(H/T)} \cdot f_{y(d/T)} \cdot f_{y(k1/k2)} \cdot i \cdot \Delta h_{y'}$$

Anstrom/Aufstau

$$\Delta h_{y,max(y';x=0)} = (0,92879 \cdot 0,98417 \cdot 0,48759) \cdot 0,25 \cdot 0,374 \text{ m} = 0,042 \text{ m} \quad (r/s = 0,65)$$

$$\Delta h_{y,max(y';x=0)} = (0,95773 \cdot 0,99196 \cdot 0,56849) \cdot 0,25 \cdot 0,332 \text{ m} = 0,045 \text{ m} \quad (r/s = 1,00)$$

$$\Delta h_{y,max(y';x=0)} = 0,042 + \frac{(0,87-0,65)}{(1,00-0,65)} \cdot (0,045 - 0,042) = \mathbf{0,044 \text{ m}} \quad (r/s = 0,87)$$

Fortsetzung

Abstrom/Absenkung

$$\Delta h_{y,max(y';x=0)} = (0,92879 \cdot 0,98417 \cdot 0,48759) \cdot 0,25 \cdot 0,167 \text{ m} = 0,019 \text{ m} \quad (r/s = 0,65)$$

$$\Delta h_{y,max(y';x=0)} = (0,95773 \cdot 0,99196 \cdot 0,56849) \cdot 0,25 \cdot 0,178 \text{ m} = 0,024 \text{ m} \quad (r/s = 1,00)$$

$$\Delta h_{y,max(y';x=0)} = 0,019 + \frac{(0,58-0,55)}{(0,65-0,55)} \cdot (0,024 - 0,019) = \mathbf{0,022 \text{ m}} \quad (r/s = 0,87)$$

7) Bestimmung des Aufstaus (-) und der Absenkung (+) für $\vartheta = 72,37^\circ$:

$$\pm \Delta h_{\vartheta,um(y';x=0)} = \Delta h_{y,max} \cdot \cos \vartheta$$

Anstrom/Aufstau

$$\Delta h_{72,37;um(y';x=0)} = -0,044 \cdot \cos 72,37^\circ = \mathbf{-0,013 \text{ m}}$$

Abstrom/Absenkung

$$\Delta h_{72,37;um(y';x=0)} = +0,022 \cdot \cos 72,37^\circ = \mathbf{+0,007 \text{ m}}$$