

Prof. Burmeier Ingenieurgesellschaft mbH
Auguste-Viktoria-Straße 10-12, 24103 Kiel

TenneT Offshore GmbH
Herrn Felix Baierlein
Bernecker Straße 70
95448 Bayreuth

Ihr Zeichen, Ihre Nachricht

Unsere Zeichen, unsere Nachricht
P 80 726/WE, HP, KK

Datum
09.07.2021

Ergänzende Stellungnahme zum Gutachten „Möglicher Einfluss von Horizontalbohrungen auf Süßwasserlinsen unter Langeoog und Baltrum – Risiko- und Gefährdungsanalyse“ vom 17.06.2021

Sehr Damen und Herren, sehr geehrter Herr Baierlein,

im Fachbehördengespräch zu den potenziellen Beeinträchtigungen der Trinkwasserversorgung/Süßwasserlinsen auf den Inseln Baltrum und Langeoog im Rahmen des Raumordnungsverfahrens Seetrassen 2030 am 29.06.2021 hat sich ein Bedarf ergänzender Erläuterungen zu den Ausführungen im o.g. Gutachten ergeben.

Mit vorliegender Stellungnahme werden zu den folgenden Punkten in Ergänzung zu den Ausführungen in o.g. Gutachten weitergehende Erläuterungen und Berechnungen vorgelegt:

- Veränderung der Strömungsverhältnisse durch Veränderungen in der Durchlässigkeit innerhalb der Süßwasserlinse durch verdämmte Bohrkanäle
- Verlust von Speichervolumen innerhalb der Süßwasserlinse durch verdämmte Bohrkanäle
- Veränderung der Übergangszone bzw. Verschiebung der Grenzschicht zwischen Salzwasser und Süßwasser durch temperaturbedingte Änderungen der Dichte

Zudem ist in Anlage 1 eine Darstellung zur Lage der Trassenkorridore im Schnitt durch die Süßwasserlinse Langeoog (Blick nach Norden) enthalten. Hierbei wird deutlich, dass die Trassenkorridore die östliche Süßwasserlinse in Bereichen geringerer Mächtigkeit kreuzen.

Veränderung der Strömungsverhältnisse durch Veränderungen in der Durchlässigkeit innerhalb der Süßwasserlinse durch verdämmte Bohrkanäle

In Ergänzung zu den Ausführungen im Gutachten wurde der Einfluss der verdämmten Bohrkanäle auf den durchschnittlichen Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert) des Untergrundes berechnet. Zur Berechnung des Einflusses der verdämmten Bohrkanäle auf den durchschnittlichen k_f -Wert des Untergrundes wurden folgende einfachen Abschätzungen gem. *Charles Sumner Slichter Theoretical investigation of the motion of ground waters, 1899* verwendet:

Horizontale Durchlässigkeit:
$$k_{fh} = \frac{\sum_{i=1}^n k_{fi} \times M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}$$

Vertikale Durchlässigkeit:
$$k_{fv} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{\sum_{i=1}^n \frac{M_i}{k_{fi}}}$$

M_i = Schichtmächtigkeiten

k_{fi} = k_f -Wert der Einzelschichten

Es wurde eine Berechnung unter Annahme einer durchschnittlichen Mächtigkeit der Süßwasserlinse von 45,0 m (Variante 1) und eine weitere unter Annahme einer durchschnittlichen Mächtigkeit der Süßwasserlinse von 25,0 m (Variante 2) durchgeführt. Variante 1 stellt hierbei auf der sicheren Seite liegend die Mächtigkeit des westlichen Teils der östlichen Süßwasserlinse und Variante 2 auf der sicheren Seite liegend die Mächtigkeit des östlichen Teils der östlichen Süßwasserlinse dar. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Anlage 2 dargestellt. Selbst unter der Annahme, dass es sich bei den verdämmten Bohrkanälen um eine durchgängige Schicht handelte, was vorliegend nicht der Fall ist, da der Abstand zwischen den einzelnen Bohrtrassen auf einer Ebene zwischen 20 m und 50 m liegt, kann kein signifikanter Einfluss auf die horizontale Durchlässigkeit des Untergrundes festgestellt werden. Da im Untergrund der Inseln von einer weitgehend natürlichen horizontalen Grundwasserströmung auszugehen ist, kann davon ausgegangen werden, dass die vollständig verdämmten und damit praktisch undurchlässigen Bohrkanäle keinen Einfluss auf das Strömungsverhalten haben. Die vertikale Komponente des Durchlässigkeitstensors ist daher hier nicht von Bedeutung.

Verlust von Speichervolumen innerhalb der Süßwasserlinse durch verdämmte Bohrkanäle

In Anlage 3 wurde das Aquifervolumen der östlichen Süßwasserlinse auf Langeoog abgeschätzt sowie das Volumen, welches von den verdämmten Bohrkanälen innerhalb der Süßwasserlinse eingenommen wird. Das abgeschätzte Aquifervolumen der östlichen Süßwasserlinse auf Langeoog beträgt ca. 60.693.750 m³ bei Annahme einer durchschnittlichen Mächtigkeit von 45,0 m (Variante 1) und ca. 33.718.750 m³ bei Annahme einer durchschnittlichen Mächtigkeit von 25,0 m (Variante 2). Grundlage der Abschätzung sind die im Gutachten angegebenen Dimensionen zur Ausdehnung der östlichen Süßwasserlinse sowie die beiden genannten angenommenen durchschnittlichen Mächtigkeiten. Anzumerken ist, dass das Volumen mittels zweier Dreiecksprismen berechnet wurde und die Werte damit nur als Anhaltspunkt zu werten sind. Das Volumen der verdämmten Bohrkanäle innerhalb der Süßwasserlinse beträgt ca. 4.408 m³. In beiden Fällen beträgt der Verlust an Aquifervolumen im Untergrund etwa 0,01%. Das nutzbare Speichervolumen (ca. 30% des Aquifervolumens) reduziert sich von ca. 18.208.125 m³ auf ca. 18.206.802 m³ bzw. von ca. 10.115.625 m³ auf ca. 10.114.302 m³. Beide Werte sind somit vernachlässigbar gering.

Veränderung der Übergangszone bzw. Verschiebung der Grenzschicht zwischen Salzwasser und Süßwasser durch temperaturbedingte Änderungen der Dichte

Mittels der Ghyben-Herzberg-Gleichung wurde die Mächtigkeit der Süßwasserlinse unter temperaturbedingter Änderung der Dichte berechnet (Erwärmungsfall). Als Referenz wurde die Mächtigkeit der Süßwasserlinse bei einer Wassertemperatur von 10 °C (Normalfall) herangezogen.

Ghyben-Herzberg-Gleichung:
$$h_{uMS} = \frac{\rho_{süß}}{\rho_{salz} - \rho_{süß}} \times h_{oMS}$$

$\rho_{süß}$ = Dichte des Süßwassers

ρ_{salz} = Dichte des Salzwassers

h_{uMS} = Lage des Süßwassers unterhalb des Meeresspiegels in Metern

h_{oMS} = Höhe des Süßwassers oberhalb des Meeresspiegels in Metern

Für die Erwärmung wurden die im Gutachten *sta-fem GmbH: Ergänzungen zur studie „Magnetische und thermische Eigenschaften von 525 kV-HGÜ-Landkabeltrassen“, Bocholt, 2021* berechneten Werte für das Windlastprofil zu Grunde gelegt (siehe Erläuterungen im Gutachten und nachfolgende Tabelle 1). Die Erwärmung wird hierin für ein Gesamtsystem bestehend aus drei Kabeln (+/-Pole und metallischer Rückleiter) betrachtet. Bei Berücksichtigung des Einflusses aus einem benachbarten System können die Temperaturen geringfügig höher ausfallen.

Tabelle 1: Erwärmung des Untergrunds durch Betrieb der Kabel (Windlastprofil) und Annahmen für Berechnung der Mächtigkeit der Süßwasserlinse unter temperaturbedingter Änderung der Dichte

	Relative Erwärmung	Absolute Erwärmung	Absolute Erwärmung	Annahme für Berechnungen
Normaltemperatur Grundwasser		10 °C	15 °C	10 °C
Erwärmung verdämmter Bereich	+ 11,8 K (kurzzeitig: + 13,1 K)	21,8 °C (kurzzeitig 24,9 °C)	26,8 °C (kurzzeitig: 28,1°C)	+ 11,8 K
Erwärmung 20 m Entfernung zum Leerrohr	+ 2,8 K	12,8 °C	17,8 °C	
Erwärmung bis 8 m Entfernung zum Leerrohr	+ 5...11,8 K	15 – 21,8 °C	20 – 26,8 °C	+ 5 K
Erwärmung ab 8 m bis 53 m Entfernung zum Leerrohr	+ 1...5 K	16 – 15 °C	16 – 20 °C	+ 2,5 K
Erwärmung ab 53 m bis 106 m Entfernung zum Leerrohr	< + 1 K	< 11 °C	< 16 °C	+ 1 K
Erwärmung ab 106 m Entfernung zum Leerrohr				+ 0 K

Die berechnete Mächtigkeit der Süßwasserlinse im Normalfall beträgt unter Annahme von Grundwasserständen zwischen 1,5 m (Mitte) und 0,5 m (Randbereich) zwischen 56,6 m und 18,9 m. Für

den Gesamtaquifer wurde anhand des geologischen Profils eine Mächtigkeit von 200 m (hier unter Meeresspiegel (MS)) angenommen. Somit liegt die Mächtigkeit des salzwassererfüllten Teils des Aquifers zwischen 143,4 m und 181,1 m. Die Dichten des Wassers wurden mittels des *Water Density Calculator der Computer Support Group, Inc. and CSGNetwork.com* (<http://www.csgnetwork.com/h2odenscalc.html>) berechnet.

Insgesamt wurden 3 Fälle betrachtet:

- Schnitt 1: vertikal durch Leerrohre in der Mitte der Süßwasserlinse bei Verlauf der Bohrungen mittig durch die Süßwasserlinse
- Schnitt 2: vertikal durch Leerrohre im Randbereich der Süßwasserlinse bei Verlauf der Bohrungen mittig durch die Süßwasserlinse (Bereich Übertritt der Bohrung von Salz- in Süßwasser bzw. von Süß- in Salzwasser)
- Schnitt 3: vertikal durch Leerrohre in der Mitte der Süßwasserlinse bei Verlauf der Bohrungen 8 m unterhalb der Süßwasserlinse

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Anlage 4 beigefügt. Eine erläuternde Skizze enthält Anlage 5. Die rechnerisch abgeschätzte Änderung der Mächtigkeit der Süßwasserlinse im Erwärmungsfall bezogen auf den Normalfall liegt zwischen -0,1 m und -0,5 m (Verringerung der Mächtigkeit) im Falle mittig durch die Süßwasserlinse verlaufender Bohrungen. Im Falle 8 m unterhalb der Süßwasserlinse verlaufender Bohrungen beträgt die rechnerisch abgeschätzte Änderung +0,2 m (Vergrößerung der Mächtigkeit). Insgesamt können die Änderungen in beiden Fällen als vernachlässigbar gering angesehen werden.

In diesem Zusammenhang ist nochmals zu erwähnen, dass mit der Ghyben-Herzberg-Gleichung nur eine grobe Abschätzung vorgenommen werden kann, da diese ausschließlich drei Parameter für die Abschätzung der Mächtigkeit einbezieht, in der Realität jedoch die Mächtigkeit und Ausgestaltung der Süßwasserlinse von einer Vielzahl an Parametern beeinflusst wird.

Allgemeines zur Veränderlichkeit der Süßwasserlinse

Wie bereits ausführlich im Bericht dargestellt entstehen Süßwasserlinsen unterhalb von Inseln als Resultat eines hydrostatischen Gleichgewichtszustandes zwischen versickerndem Niederschlagswasser und meerwassererfülltem Grundwasser. Die Ausbildung und damit auch die Veränderlichkeit der Süßwasserlinse ist abhängig von einer Vielzahl von Faktoren, wie z.B. den hydrogeologischen Verhältnissen, vgl. dazu *Th. J. Beukeboom: The Hydology of the Frisian Islands, 1976* sowie der Morphologie der Erdoberfläche. Es gilt je größer die Mächtigkeit der Dünen umso höher der Grundwasserstand und umso mächtiger die Süßwasserlinse. Eine Veränderung in den Höhenverhältnissen der Dünenlandschaft geht damit einher mit einer Veränderung der Süßwasserlinse. Bezogen auf die ständige morphogenetische Entwicklung der Dünenlandschaft auf den ostfriesischen Inseln dürften sich auch die Süßwasserlinsen über Jahrzehnte betrachtet in einer ständigen Veränderung befinden.

Einen weiteren Einfluss auf die Ausbildung der Süßwasserlinsen haben hydrologische und hydraulische Faktoren, vgl. dazu auch *DVGW: Geogene Grundwasserversalzung in den Poren-Grundwasserleitern Norddeutschlands und ihre Bedeutung für die Wasserwirtschaft, 2000*. Als hydrologischer Faktor sei hier in erster Linie die Höhe der Grundwasserneubildung, also die Menge an versickerndem Niederschlagswasser, genannt. Bei den Süßwasserlinsen handelt es sich um oberflächennahe Grundwasservorkommen, deren Wasserstände mit den Niederschlagsereignissen korrespondieren.

Trockene Jahre machen sich in sinkenden, geringen Grundwasserständen bemerkbar und andererseits feuchte Jahren mit vergleichsweise höheren Grundwasserständen. Entsprechend dürfte in/nach trockenen Jahren und niedrigen Grundwasserständen die Mächtigkeit der Süßwasserlinse geringer sein als in feuchten Perioden.

Hydraulische Faktoren, die die Ausbildung der Süßwasserlinse beeinflussen, sind z.B. der Tidenhub, die Meeresspiegelhöhe und die Druckverhältnisse im Grundwasserleiter. Durch den klimawandelbedingten Meeresspiegelanstieg können die Süßwasserlinsen auf den ostfriesischen Inseln versalzen, vgl. hierzu das Projekt *FLIN (Freshwater Lens Investigations) durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)*.

Weiterhin können anthropogene Faktoren die Süßwasserlinse beeinflussen. Hierunter fallen z.B. Grundwasserentnahmen, wasserbauliche Maßnahmen sowie Entwässerungsmaßnahmen. Insbesondere Grundwasserentnahmen und Entwässerungsmaßnahmen haben einen großen Einfluss auf die Mächtigkeit der Grenzschicht zwischen Süßwasserlinse und umgebenden Salzwasser, die sogenannte „interface“. Das Gleichgewicht zwischen Salz- und Süßwasser und damit auch die Grenzschicht ist sehr empfindlich gegenüber Störungen. Durch die Entnahme von Grundwasser wird der Grundwasserstand im Brunnen abgesenkt, es bildet sich ein radialer Absenktrichter aus. Entsprechend der Ghyben-Herzberg-Gleichung wird durch den abgesenkten Grundwasserstand die Grenzschicht unter dem Brunnen angehoben und die Mächtigkeit der Süßwasserlinse verkleinert. Wird zu viel Süßwasser durch Brunnen entnommen, kann es im schlimmsten Fall zum Nachströmen von Salzwasser kommen. Um dieses Szenario zu verdeutlichen: die Absenkung des Grundwasserstandes um 1 m bedeutet einen Anstieg der Süß-/Salzwassergrenze um ca. 38 m. Um die Wasserversorgung zu gewährleisten, muss ein Gleichgewicht zwischen Verbrauch und Grundwasserneubildung gewährleistet sein. Um das Eindringen von Salzwasser zu vermeiden wird z.B. die Wassergewinnung von Langeoog intermittierend über viele kleine und flache Brunnen mit kleiner Fördermenge betrieben.

Die natürlichen und anthropogenen Faktoren, die die Süßwasserlinse beeinflussen, sind somit um ein Vielfaches höher als der zusätzliche Einfluss durch die Horizontalbohrungen bzw. den Betrieb der Kabel.

Mit freundlichen Grüßen

Prof. Burmeier Ingenieurgesellschaft mbH



Dr. Winfried Entenmann



Dipl.-Geol. Hilke Pulkowski



Katharina Kippert, M.Sc.

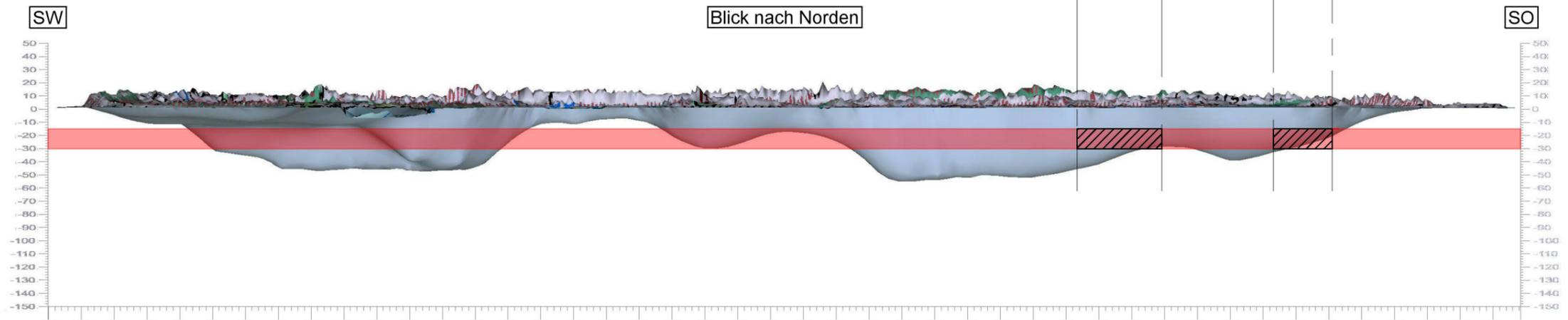
Anlage 1: Lageplan und Schnitt Trassenkorridore Langeoog

Anlage 2: Berechnung Veränderung der Strömungsverhältnisse durch Veränderungen in der Durchlässigkeit durch verdämmte Bohrkanäle

Anlage 3: Berechnung Verlust von Speichervolumen im Untergrund durch verdämmte Bohrkanäle

Anlage 4: Berechnung Mächtigkeit der Süßwasserlinse mit Ghyben-Herzberg-Gleichung

Anlage 5: Skizzen zur Berechnung Mächtigkeit der Süßwasserlinse mit Ghyben-Herzberg-Gleichung



Legende:

- Seetrassen 2030 (Vorzugsvariant n)
- Seetrassen 2030 (Untersuchungsraum)
- Korridorbreite bei max. Anzahl an ONAS
- Süßwasserlinse
- Bohreintrittspunkt
- Bohraustrittspunkt
- Watt
- Horizontalbohrung
- Nearshore
- durchschnittl. Tiefenbereich der Bohrungen bei einer durchschnittl. Überdeckung von 25 m (Pole) bzw. 30 m (metall. Rückleiter) u. einer GOK zw. 0 - 10m NHN
- Trassenkorridor/Querung Süßwasserlinse

Plangrundlage: 3D-Modell Langeoog, NIBIS Kartenserver LBEG



Prof. Burmeier Ingenieurgesellschaft mbH
Auguste-Viktoria-Straße 10-12, 24103 Kiel

Auftraggeber	TenneT Offshore GmbH Bernecker Starße 70, 95448 Bayreuth	Anlage 1
Projekt	Seetrassen 2030: Einfluss von Horizontalbohrungen auf Süßwasserlinsen unter Langeoog und Baltrum	
Titel	Lageplan und Schnitt Trassenkorridore Langeoog	
Datum	Plangröße	Bearbeiter
08.07.2021	DIN A3	KK/IB
	Projektnummer	Maßstab
	80 726	ohne

Berechnung Veränderung der Strömungsverhältnisse durch Veränderungen in der Durchlässigkeit durch verdämmte Bohrkanäle

Variante 1

Annahmen

durchschnittliche Mächtigkeit östliche Süßwasserlinse	45 m
O-W Ausdehnung östliche Süßwasserlinse	4.150 m
N-S-Ausdehnung östliche Süßwasserlinse	650 m
Anzahl Bohrungen (5*3+3*3)	24
Durchmesser Bohrungen	0,6 m
Länge Bohrungen	1.500,0 m

ohne verdämmte Bohrkanälen

	k_f [m/s]	Mächtigkeit [m]
Anstehender Sandboden	1,0000E-05	45,0
gesamt k_{fh}	1,0000E-05	

mit verdämmten Bohrkanälen (als durchgehende Schicht berechnet)

	k_f [m/s]	Mächtigkeit [m]
Anstehender Sandboden	1,0000E-05	43,8
Verdämmter Bohrbereich (Höhenlage Pole)	1,0000E-12	0,6
Verdämmter Bohrbereich (Höhenlage metallischer Rückleiter)	1,0000E-12	0,6
gesamt k_{fh} [m/s]	9,7333E-06	

Variante 2

Annahmen

durchschnittliche Mächtigkeit östliche Süßwasserlinse	25 m
O-W Ausdehnung östliche Süßwasserlinse	4.150 m
N-S-Ausdehnung östliche Süßwasserlinse	650 m
Anzahl Bohrungen (5*3+3*3)	24
Durchmesser Bohrungen	0,6 m
Länge Bohrungen	1.500,0 m

ohne verdämmte Bohrkanälen

	k_f [m/s]	Mächtigkeit [m]
Anstehender Sandboden	1,0000E-05	25,0
gesamt k_{fh}	1,0000E-05	

mit verdämmten Bohrkanälen (als durchgehende Schicht berechnet)

	k_f [m/s]	Mächtigkeit [m]
Anstehender Sandboden	1,0000E-05	23,8
Verdämmter Bohrbereich (Höhenlage Pole)	1,0000E-12	0,6
Verdämmter Bohrbereich (Höhenlage metallischer Rückleiter)	1,0000E-12	0,6
gesamt k_{fh} [m/s]	9,5200E-06	

Berechnung Verlust von Speichervolumen im Untergrund durch verdämmte Bohrkanäle

<i>Variante 1</i>	
Annahmen	
durchschnittliche Mächtigkeit östliche Süßwasserlinse	45,0 m
O-W Ausdehnung östliche Süßwasserlinse	4.150,0 m
N-S-Ausdehnung östliche Süßwasserlinse	650,0 m
Anzahl Bohrungen (5*3+3*3)	24,0 m
Durchmesser Bohrungen	0,6 m
Länge Bohrungen (größer N-S-Ausdehnung der Linse)	1.500,0 m
Aquifervolumen Süßwasserlinse (berechnet als zwei Dreiecksprismen)	60.693.750,0 m³
Nutzbares Speichervolumen Süßwasserlinse	18.208.125,0 m³
Volumen verdämmte Bohrkanäle	4.408,6 m³
Nutzbares Speichervolumen verdämmte Bohrkanäle	1.322,6 m³
Verlust an effektivem Speichervolumen	0,0073 %

<i>Variante 2</i>	
Annahmen	
durchschnittliche Mächtigkeit östliche Süßwasserlinse	25,0 m
O-W Ausdehnung östliche Süßwasserlinse	4.150,0 m
N-S-Ausdehnung östliche Süßwasserlinse	650,0 m
Anzahl Bohrungen (5*3+3*3)	24,0 m
Durchmesser Bohrungen	0,6 m
Länge Bohrungen (größer N-S-Ausdehnung der Linse)	1.500,0 m
Aquifervolumen Süßwasserlinse (berechnet als zwei Dreiecksprismen)	33.718.750,0 m³
Nutzbares Speichervolumen Süßwasserlinse	10.115.625,0 m³
Volumen verdämmte Bohrkanäle	4.408,6 m³
Nutzbares Speichervolumen verdämmte Bohrkanäle	1.322,6 m³
Verlust an effektivem Speichervolumen	0,0131 %

Berechnung Mächtigkeit der Süßwasserlinse mit Ghyben-Herzberg-Gleichung

Schnitt 1: vertikal durch Leerrohre in der Mitte der Süßwasserlinse bei Verlauf der Bohrungen mittig durch die Süßwasserlinse

Normalfall: Grundwasser durchgängig 10°C

Dichte Salzwasser (3,5%) bei 10°C	1,0270 g/cm ³
Dichte Süßwasser (0,1%) bei 10°C	1,0005 g/cm ³
GW-Stand über MS (hoMS)	1,5 m
Mächtigkeit der Süßwasserlinse unter MS (huMS)	56,6 m

Erwärmungsfall: Salzwasser 10-12,5°C, Süßwasser 12,5-21,8°C

Erwärmung am Leerrohr: +11,8 K (Bereich von wenigen Dezimetern, asymptotische Abnahme)

Erwärmung bis 8 m Entfernung zum Leerrohr: +5...11,8 K --> Mittelwert: +5 K

Erwärmung ab 8 m bis 53 m Entfernung zum Leerrohr: +1...5 K --> Mittelwert: +2,5 K

Erwärmung ab 53 m bis 106 m Entfernung zum Leerrohr: +1 K

Erwärmung ab 106 m Entfernung zum Leerrohr: +0 K

Dichte Salzwasser (3,5%) bei 10°C	1,0270 g/cm ³
Dichte Süßwasser (0,1%) bei 10°C	1,0005 g/cm ³
Dichte Salzwasser (3,5%) bei 11°C	1,0268 g/cm ³
Dichte Süßwasser (0,1%) bei 11°C	1,0004 g/cm ³
Dichte Salzwasser (3,5%) bei 12,5°C	1,0265 g/cm ³
Dichte Süßwasser (0,1%) bei 12,5°C	1,0002 g/cm ³
Dichte Salzwasser (3,5%) bei 15,0°C	1,0260 g/cm ³
Dichte Süßwasser (0,1%) bei 15,0°C	0,9999 g/cm ³
durchschnittliche Dichte Salzwasser (3,5%)	1,0268 g/cm ³
durchschnittliche Dichte Süßwasser (0,1%)	1,0001 g/cm ³
Mächtigkeit der Süßwasserlinse unter MS (huMS)	56,1 m
Differenz zur Mächtigkeit der Süßwasserlinse im Normalfall:	-0,5 m

bezogen auf Mächtigkeit des Grundwasserleiters von 200 m
bezogen auf Mächtigkeit im Normalfall

Berechnung Mächtigkeit der Süßwasserlinse mit Ghyben-Herzberg-Gleichung

Schnitt 2: vertikal durch Leerrohre im Randbereich der Süßwasserlinse bei Verlauf der Bohrungen mittig durch die Süßwasserlinse

Bereich Übertritt der Bohrung von Salz- in Süßwasser bzw. Süß- in Salzwasser

Normalfall: Grundwasser durchgängig 10°C

Dichte Salzwasser (3,5%) bei 10°C	1,0270 g/cm ³
Dichte Süßwasser (0,1%) bei 10°C	1,0005 g/cm ³
GW-Stand über MS (hoMS)	0,5 m
Mächtigkeit der Süßwasserlinse unter MS (huMS)	18,9 m

Erwärmungsfall: Salzwasser 10-21,8°C, Süßwasser 12,5-21,8°C

Erwärmung am Leerrohr: +11,8 K (Bereich von wenigen Dezimetern, asymptotische Abnahme)

Erwärmung bis 8 m Entfernung zum Leerrohr: +5...11,8 K --> Mittelwert: +5 K

Erwärmung ab 8 m bis 53 m Entfernung zum Leerrohr: +1...5 K --> Mittelwert: +2,5 K

Erwärmung ab 53 m bis 106 m Entfernung zum Leerrohr: +1 K

Erwärmung ab 106 m Entfernung zum Leerrohr: +0 K

unterhalb Leerrohr: Salzwasser, oberhalb Leerrohr: Süßwasser

Dichte Salzwasser (3,5%) bei 10°C	1,0270 g/cm ³
Dichte Süßwasser (0,1%) bei 10°C	1,0005 g/cm ³
Dichte Salzwasser (3,5%) bei 11°C	1,0268 g/cm ³
Dichte Süßwasser (0,1%) bei 11°C	1,0004 g/cm ³
Dichte Salzwasser (3,5%) bei 12,5°C	1,0265 g/cm ³
Dichte Süßwasser (0,1%) bei 12,5°C	1,0002 g/cm ³
Dichte Salzwasser (3,5%) bei 15,0°C	1,0260 g/cm ³
Dichte Süßwasser (0,1%) bei 15,0°C	0,9999 g/cm ³
durchschnittliche Dichte Salzwasser (3,5%)	1,0268 g/cm ³
durchschnittliche Dichte Süßwasser (0,1%)	1,0001 g/cm ³
Mächtigkeit der Süßwasserlinse unter MS (huMS)	18,7 m
Differenz zur Mächtigkeit der Süßwasserlinse im Normalfall:	-0,1 m

bezogen auf Mächtigkeit des Grundwasserleiters von 200 m

bezogen auf Mächtigkeit im Normalfall

Berechnung Mächtigkeit der Süßwasserlinse mit Ghyben-Herzberg-Gleichung

Schnitt 3: vertikal durch Leerrohre in der Mitte der Süßwasserlinse bei Verlauf der Bohrungen 8 m unterhalb der Süßwasserlinse

Normalfall: Grundwasser durchgängig 10°C

Dichte Salzwasser (3,5%) bei 10°C	1,0270 g/cm ³
Dichte Süßwasser (0,1%) bei 10°C	1,0005 g/cm ³
GW-Stand über MS (hoMS)	1,5 m
Mächtigkeit der Süßwasserlinse unter MS (huMS)	56,6 m

Variante 1

Erwärmungsfall: Salzwasser 10-21,8°C, Süßwasser 11-21,8°C

Erwärmung am Leerrohr: +11,8 K (Bereich von wenigen Dezimetern, asymptotische Abnahme)

Erwärmung bis 8 m Entfernung zum Leerrohr: +5...11,8 K --> Mittelwert: +5 K

Erwärmung ab 8 m bis 53 m Entfernung zum Leerrohr: +1...5 K --> Mittelwert: +2,5 K

Erwärmung ab 53 m bis 106 m Entfernung zum Leerrohr: +1 K

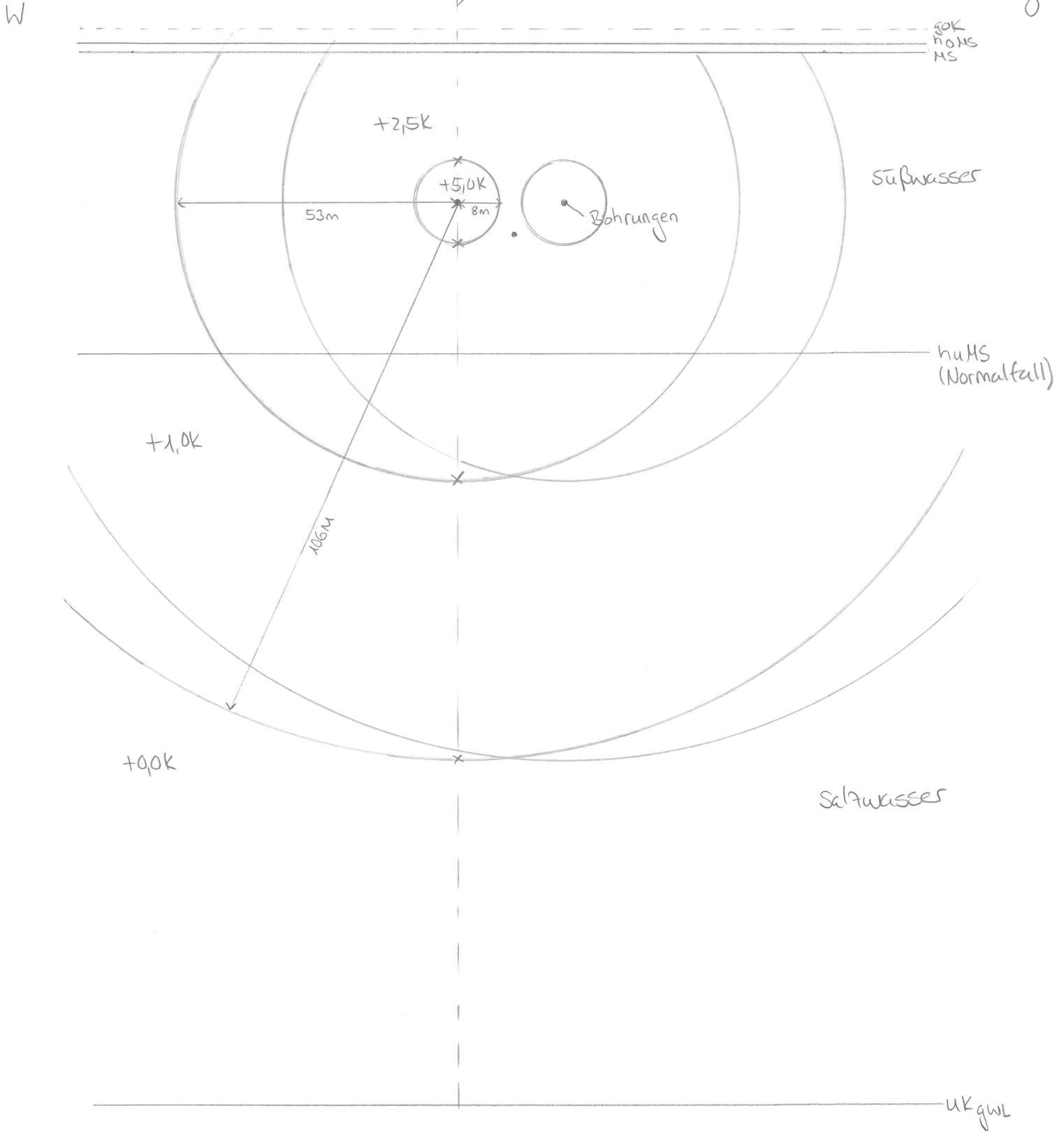
Erwärmung ab 106 m Entfernung zum Leerrohr: +0 K

Dichte Salzwasser (3,5%) bei 10°C	1,0270 g/cm ³
Dichte Süßwasser (0,1%) bei 10°C	1,0005 g/cm ³
Dichte Salzwasser (3,5%) bei 11°C	1,0268 g/cm ³
Dichte Süßwasser (0,1%) bei 11°C	1,0004 g/cm ³
Dichte Salzwasser (3,5%) bei 12,5°C	1,0265 g/cm ³
Dichte Süßwasser (0,1%) bei 12,5°C	1,0002 g/cm ³
Dichte Salzwasser (3,5%) bei 15,0°C	1,0260 g/cm ³
Dichte Süßwasser (0,1%) bei 15,0°C	0,9999 g/cm ³
durchschnittliche Dichte Salzwasser (3,5%)	1,0267 g/cm ³
durchschnittliche Dichte Süßwasser (0,1%)	1,0002 g/cm ³
Mächtigkeit der Süßwasserlinse unter MS (huMS)	56,8 m
Differenz zur Mächtigkeit der Süßwasserlinse im Normalfall:	0,2 m

bezogen auf Mächtigkeit des Grundwasserleiters von 200 m

bezogen auf Mächtigkeit im Normalfall

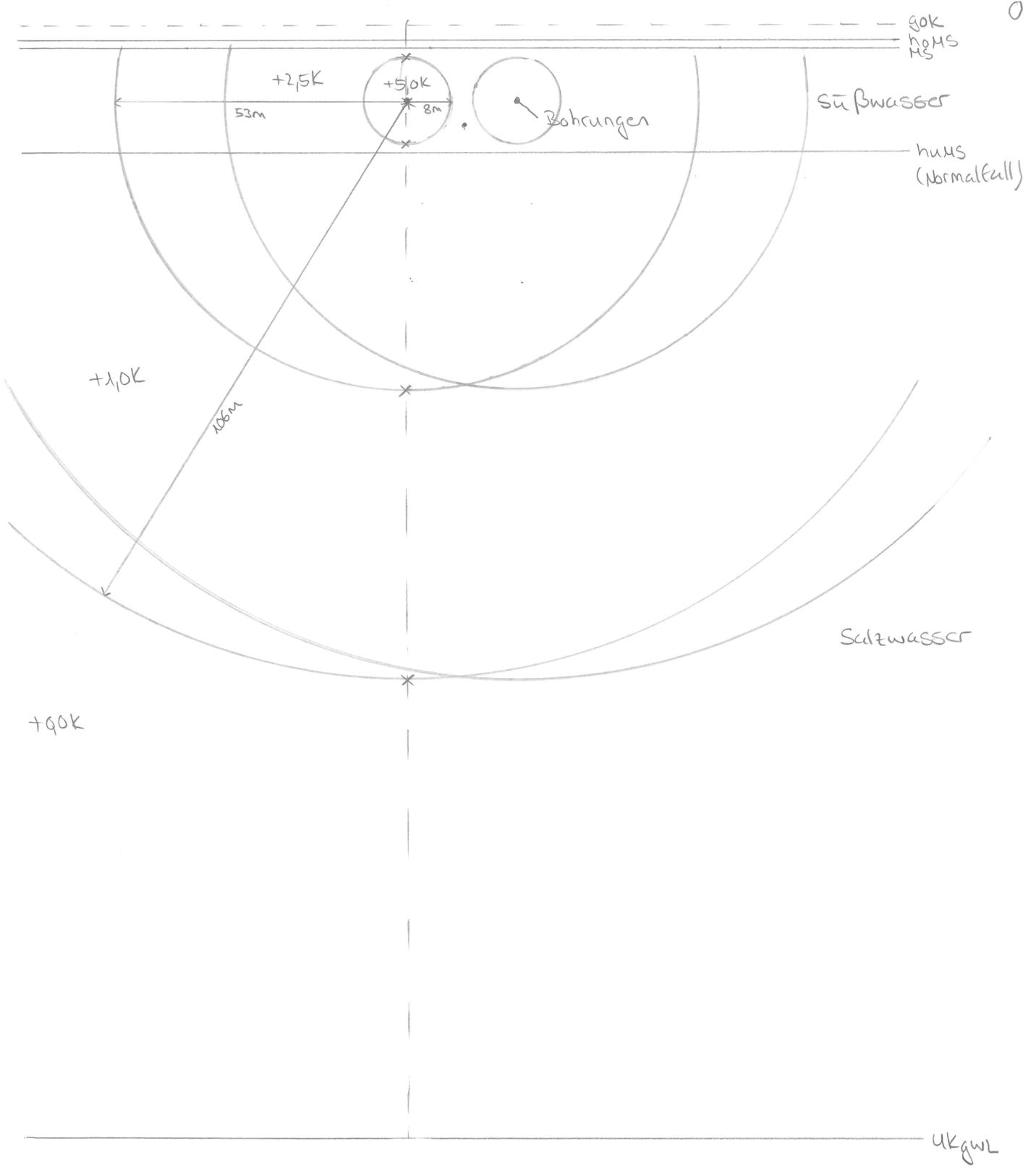
Schnitt 1



Schnitt 2

W

Betrachtungssachse



Schnitt 3

