

Diplomarbeit

AUSARBEITUNG EINER WASSERQUALITÄTSTESTANLAGE FÜR DIE AUSWERTUNG NEUER ANAEROBER FLUTWASSERAUFBEREITUNGSVERFAHREN

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung
des akademischen Grades Diplom-Ingenieurs

Unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.tehn. Wilhelm HÖFLINGER

Eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

Von

Julien Vereecke
05 26 510
Rue Bois Trélong 54,
6110 Montigny-le-Tilleul
Belgium

Wien, am 23 April

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben. Ich möchte auch der OMV AG für die Möglichkeit danken, diese Arbeit bei ihnen zu bearbeiten.

Besonderer Dank gebührt meinen Eltern, die mir dieses Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben.

Weiters bedanke ich mich bei Herrn Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.tehn. Wilhelm HÖFLINGER, Herrn Ing. Dr. Rainer Kadnar und Herrn Ing. Dr. Nikolaus Philippovich für die Betreuung meiner Diplomarbeit und den zahlreichen wissenschaftlichen Ratschläge, welche stets zur Verbesserung der Arbeit beigetragen haben.

Ein herzliches Dankeschön geht an meinen Mitbewohnern, die mich während der gesamten Diplomarbeitsphase moralisch unterstützt haben.

Inhaltverzeichnis

1.	Erdölförderung bei der OMV	1
1.1.	Wiener Becken.....	1
1.2.	Entstehung von Erdöl und -gas.....	1
1.3.	Aufsuchung	2
1.4.	Förderung	2
1.5.	Von der Sonde bis zum Downstreamprozess.....	5
1.6.	Wasser im Erdöl	6
1.7.	„Matzen neu“ und „Wasserflutanlage neu“ Projekte	8
2.	Problemstellung	10
3.	Ausgewählte Verfahren für die Pilottests	11
3.1.	Liquid/Liquid-Hydrozyklon.....	13
3.1.1.	Funktionsprinzip	13
3.1.2.	Leistung	14
3.1.3.	Pilotanlage	15
3.1.4.	Vor- und Nachteile des Hydrozyklons	15
3.2.	Zentrifugalfлотation	16
3.2.1.	CFU	16
3.2.2.	Vergleich der Zentrifugalfлотation mit anderen Technologien	18
3.2.3.	Pilotanlage	20
3.2.4.	Vor- und Nachteile der Zentrifugalfлотation	22
3.3.	Coalescer	23
3.3.1.	Funktionsprinzip	23
3.3.2.	PhaseSep.....	24
3.3.3.	Pilotanlage	24
3.3.4.	Vor- und Nachteile des Coalescers.....	27
3.4.	Voraxial Separator	28
3.4.1.	Leistung	29
3.4.2.	Vergleich des Voraxial Separator mit Hydrozyklonen	30
3.4.3.	Pilotanlage	30
3.4.4.	Vor- und Nachteile des Voraxial Separators.....	31
3.5.	Nussschalenfilter.....	32
3.5.1.	Funktionsprinzip	32
3.5.2.	Leistung	35
3.5.3.	Pilotanlage	35
3.5.4.	Vorteile.....	35
3.6.	Zusammenfassung.....	35
4.	Wassertestanlage.....	37
4.1.	Leitungssimulation	37
4.1.1.	Theoretische Grundlagen	37
4.1.2.	Dimensionierung des Verweilzeitrohrs.....	40
4.1.3.	Bestimmung der praktischen Verweilzeit.....	42
4.1.4.	Ergebnisse und Interpretation	52
4.2.	Formationssimulation - Kernversuch	53
4.2.1.	Theoretische Grundlagen	53
4.2.2.	Auftretende Phänomene.....	57
4.2.3.	Versuch	57
4.2.4.	Bewertungsvorgang	62
4.2.5.	Abschließender Kommentar.....	68
4.3.	Vorschlag für eine Wassertestanlage.....	69
5.	Anwendung der Stockes'schen Gesetz auf die Ergebnisse der Absetzversuche	72
5.1.	Theoretische Grundlagen.....	72
5.2.	Größenverteilungsbestimmung	73
5.3.	Anaerobe Absetzversuche	75
5.4.	Berechnungsvorgang	77

5.5.	Ergebnisse	79
6.	Zusammenfassung	82
7.	Literatur	84
8.	Anhang	86
8.1.	Matzen XII	86
8.1.	Ma XII	87

1. Erdölförderung bei der OMV

Literaturreferenz [01][02][03]

1.1. Wiener Becken

Die OMV fördert Erdöl und Erdgas im Wiener Becken (siehe Abb. 1.1). OMV und RAG teilen sich hier die diesbezüglichen Rechte. Insgesamt gibt es geschätzte Reserven von 15,3 Mio. t Erdöl und 19,6 Mrd. Nm³ Erdgas.



Abb. 1.1: Die Öl- und Gasfelder im Wiener Becken: rot = Ölfeld, grün = Gasfeld

Das Becken enthält noch Reserven für etwa 50 Jahre.

1.2. Entstehung von Erdöl und -gas

Unter Erdöl versteht man ein Gemisch aus flüssigen Kohlenwasserstoffen. Entstanden ist dieser fossile Brennstoff vor 225 bis 65 Millionen Jahren.

Erdöl und Erdgas in heutige Lagerstätten haben sich in der geologischen Geschichte des jeweiligen Gebiets unter ganz bestimmten Bedingungen gebildet. Erdöl und Erdgas sind organische Rückstände früherer Lebewesen, Pflanzen, Bakterien, Algen und anderer Mikroorganismen, die in marinen Sedimenten (Meeresablagerungen) eingebettet und umgewandelt wurden.

1.3. Aufsuchung

Die Wirtschaftlichkeit einer Lagerstätte wird wesentlich von der Porosität und Permeabilität ihres Gesteins und ihrer Gas- und Öldichte bestimmt. Die Suche nach Erdöllagerstätten kann in der Regel durch seismische Untersuchungen der Gesteinsformationen vorgenommen werden. Dabei werden künstliche Schwingungen erzeugt, welche die Schichten der Erdkruste durchlaufen und an den Formationsgrenzen reflektiert werden (siehe Abb. 1.2).

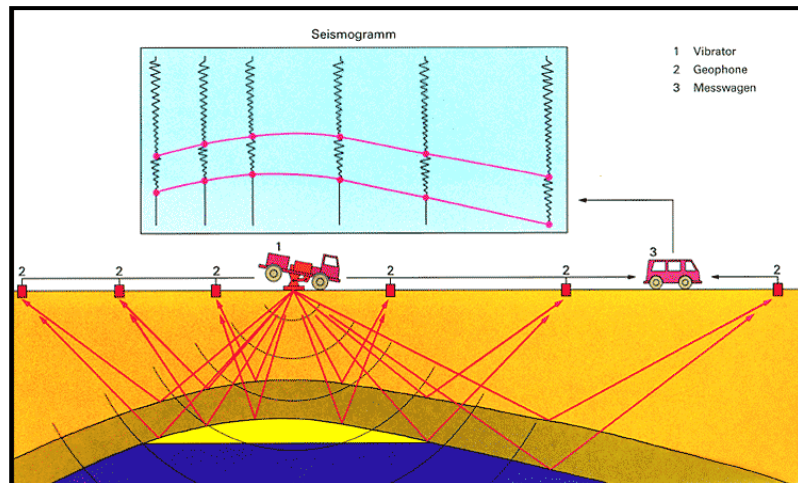


Abb. 1.2: Seismische Messung

Auf diese Weise werden erdöhlöffige Strukturen erkannt und dann durch Aufschlussbohrungen bis in eine Tiefe von 6000 m auf ihren Gehalt an Kohlenwasserstoffen untersucht. Die Fundrate einer solchen Bohrung beträgt etwa 15 %.

1.4. Förderung

Primäre Förderung:

In der ersten Phase fließt das Erdöl aufgrund des natürlichen Lagerstättendrucks, der z.B. in 2500 m Tiefe circa 250 bar beträgt, selbstständig zu den Produktionssonden. Man spricht hier von eruptiver Förderung.

Wenn der Lagerstättendruck nicht mehr reicht, benutzt man entweder Tiefpumpen, die in das Bohrloch eingesetzt werden, oder einen Gasauftrieb (Gas Lift). Mit Hilfe von Turboverdichtern wird das Gas in unterschiedlicher Tiefe und mit unterschiedlichem Druck in das Steigrohr des Bohrlochs gepresst, um das Gewicht der Ölsäule zu verringern. Das bewirkt – durch die Abnahme der Flüssigkeitsdichte – eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit. Tiefpumpen werden meistens verwendet, wenn der Wassergehalt sehr hoch ist (siehe Abb. 1.3).

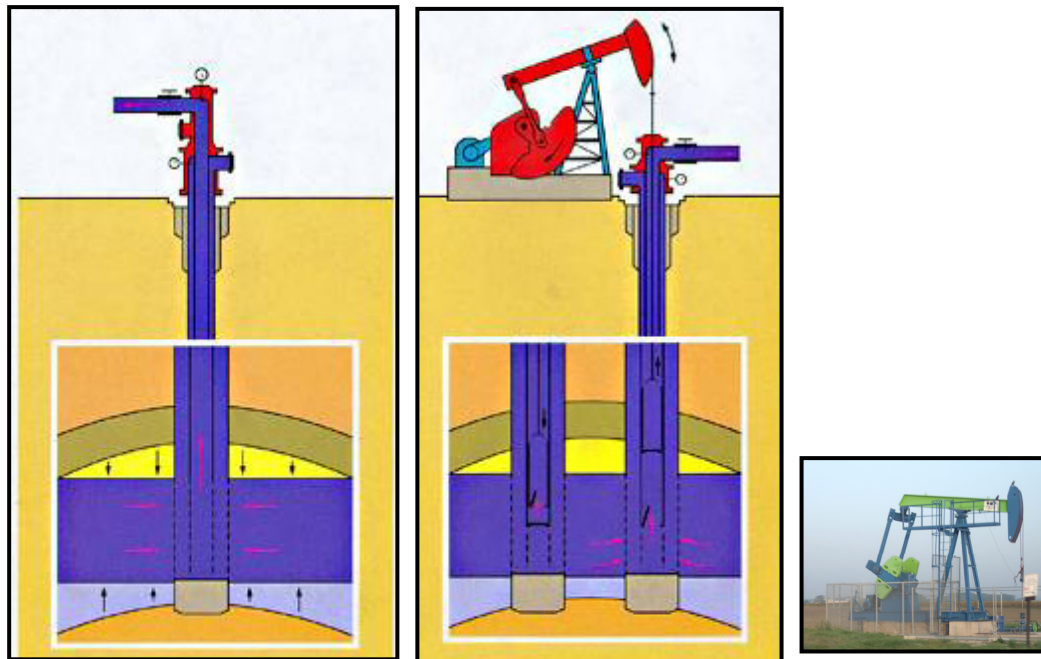


Abb. 1.3: Primäre Förderung: selbstständige Förderung (l.) und Förderung mit Tiefpumpe (m. u. r.)

Die Ölmenge, die sich aus einem bestimmten Feld mit einem gewissen wirtschaftlichem Einsatz fördern lässt, wird durch geologische und physikalische Bedingungen begrenzt. Deshalb kann die theoretisch mögliche Ölfördermenge nie zu 100 % erreicht werden. WissenschaftlerInnen und IngenieurInnen suchen unablässig nach Methoden, die Förderfähigkeit zu erhöhen und die Förderraten zu steigern.

Sekundäre Förderung:

Bessere Produktionsbedingungen werden durch einen außereinwirkenden Druck erreicht und dadurch wird die Fördermenge aufrechterhalten. Eine Methode ist das Wasserfluten, bei dem fortlaufend Wasser in das Speichergestein eingepresst wird, um den Lagerstättendruck zu erhöhen oder aufrechtzuerhalten (siehe Abb. 1.4). Gefördertes Erdöl enthält Wasser. Dieses Wasser wird gesammelt und in einer Wasserflutanlage aufbereitet. Die Aufgabe der Anlage ist das Reinigen des produzierten Wassers, um es wiedereinpresen zu können. Um die Lagerstätte nicht zu schädigen, ist eine Reduktion des Öl- und Feststoffgehaltes notwendig. Ziel ist das Erreichen der optimalen Qualität.

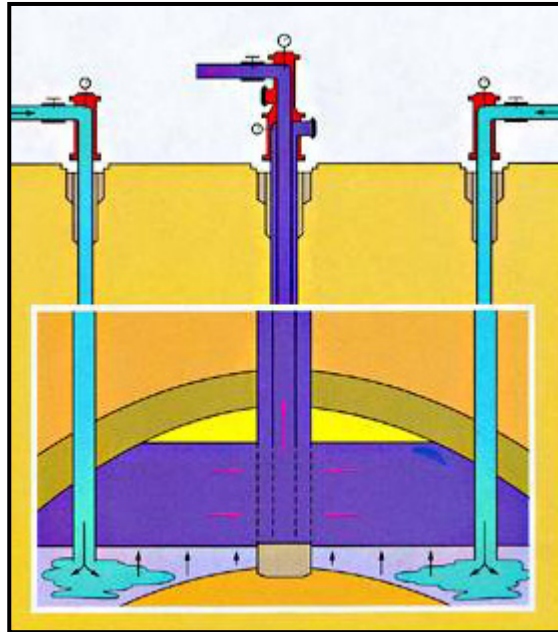


Abb. 1.4: Sekundäre Förderung durch Wasserfluten

Es gibt auch die tertiäre Förderung und Enhanced Oil Recovery (siehe Abb. 1.5). Diese Förderung wirkt durch die Verwendung von Wärme oder Chemikalien, die auch Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften des Öls haben. Da tertiäre Förderverfahren und Enhanced Oil Recovery äußerst kostenintensiv sind, lassen sie sich nur bei einem ausreichend hohen Ölpreisniveau durchführen.

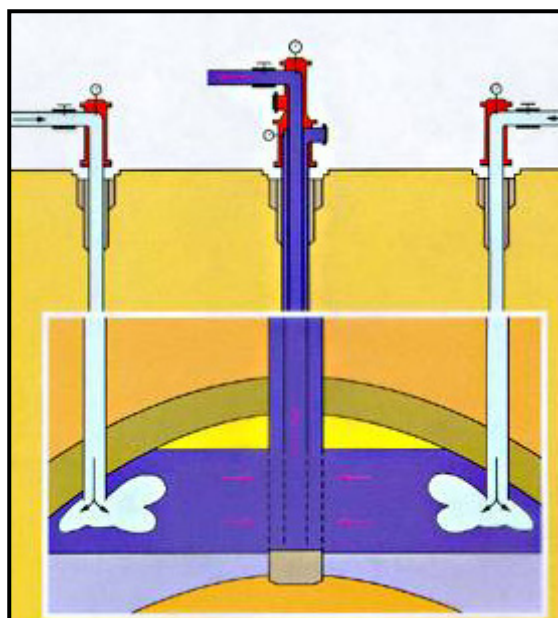


Abb. 1.5: Tertiäre Förderung: verbesserte Entölung durch Dampf- oder chemische Zusätze

1.5. Von der Sonde bis zum Downstreamprozess

Die OMV besitzt 833 Fördersonden. Im Allgemeinen kommt aus einer Sonde eine Dreiphasenmischung, die aus Erdöl, Erdgas und Wasser besteht. Um die Transportkosten zu reduzieren, sollten die drei Phasen so früh wie möglich voneinander getrennt werden. Dafür werden mehrere Sondenströmungen zu einer Gewinnungsstation (die OMV arbeitet mit insgesamt 14 Gewinnungsstationen) geleitet. Dort werden die Ströme zusammengeführt. Wenn die Mischung eine ausreichende Menge an Erdöl enthält, wird sie in einem Dreiphasenseparator getrennt. Am Ausgang wird jeder Strom zum entsprechenden Downstreamprozess geleitet (siehe Abb. 1.6). Wenn der Gehalt an Kohlenwasserstoffen nicht hoch genug ist, wird nur ein Zweiphasenseparator angewendet. In diesem Fall wird das Erdöl, das mit Wasser gemischt ist, in der Wasserflutanlage zurückgewonnen.

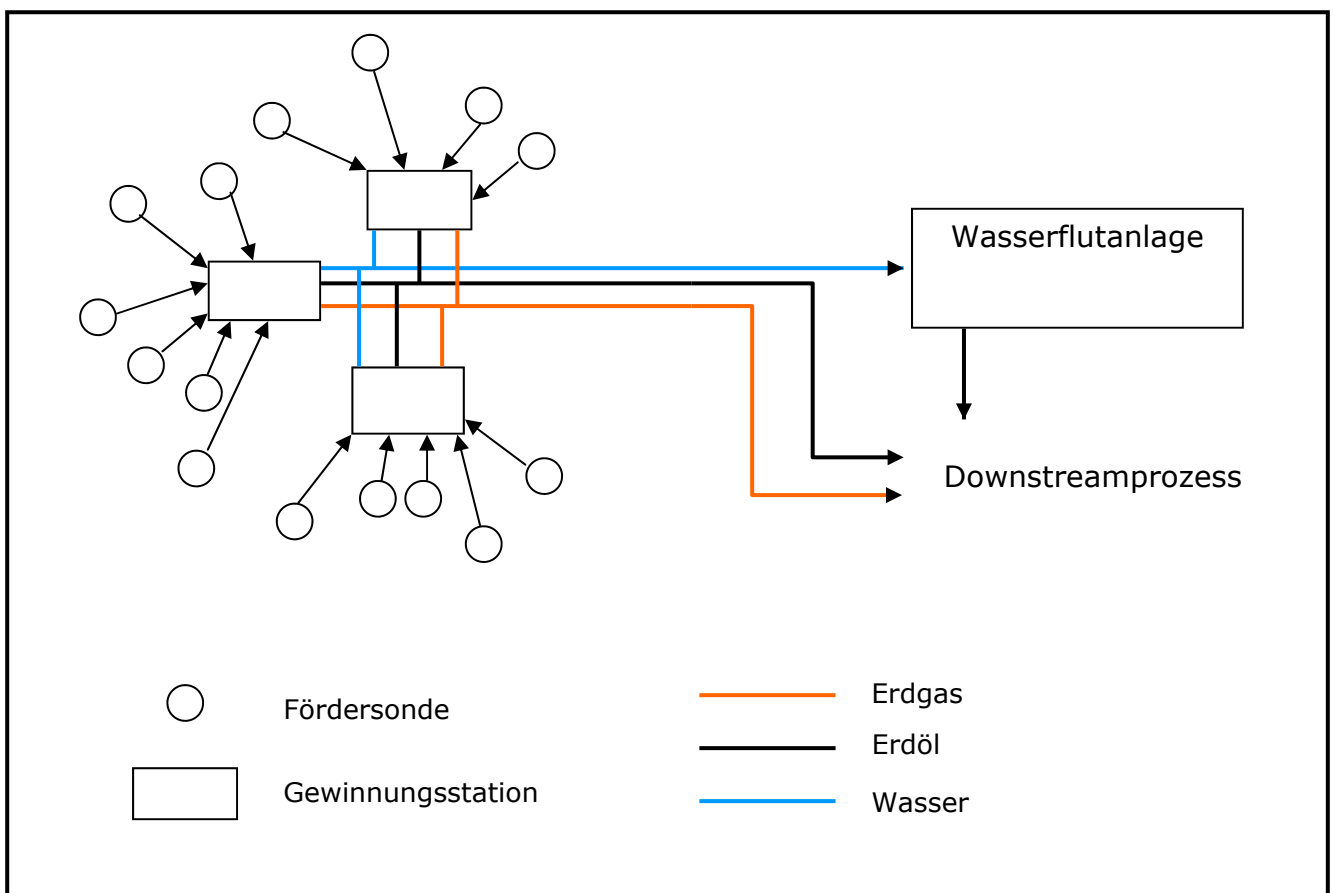


Abb. 1.6: Skizze des aktuellen Betriebs, von der Tiefpumpe bis zum Downstreamprozess

1.6. Wasser im Erdöl

Wasser ist in Erdöl- und -gaslagerstätten immer anwesend. Der Wasseranteil hängt von der Formation ab und steigt mit der Förderungszeit (siehe Abb. 1.7).

Früher wurden Formationen, die anfangs oder nach einer bestimmten Förderungszeit zu viel Wasser lieferten, einfach aufgegeben. Heutzutage müssen Erdölförderungsfirmen wie die OMV an dieser Fossilenergiequelle arbeiten, um dem hohen Erdölbedarf zu entsprechen.

Die Förderung dieser Formationen ist nur dann sinnvoll, wenn die Erdölverbraucher bereit sind, eine Preiserhöhung zu akzeptieren. Der aktuelle Preis erlaubt eine wirtschaftlich sinnvolle Erdölförderung, obwohl die durchschnittliche Menge an Wasser in gefördertem Öl etwa 93% beträgt.

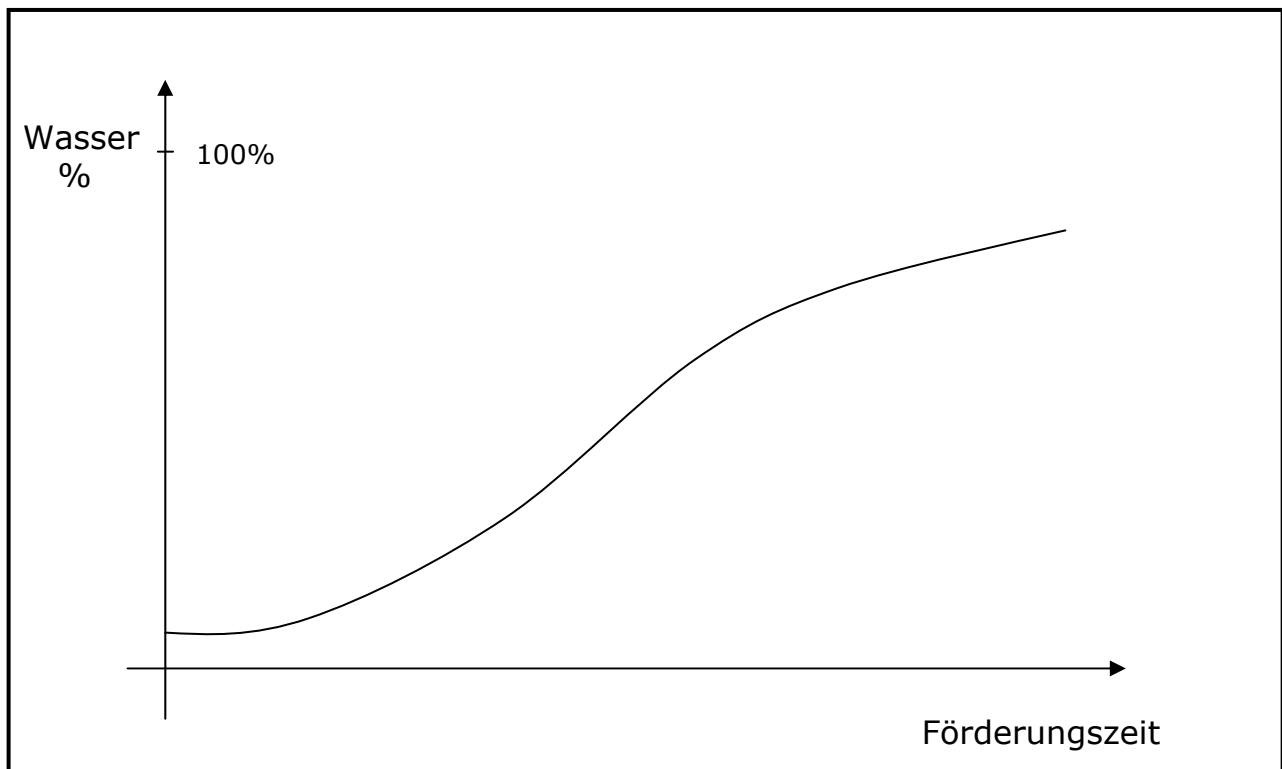


Abb. 1.7: Wassergehalt beim Fördern im Lauf der Zeit

Das Wasser im Prozess hat Verschiedenes zur Folge :

Zunächst wird die Entwicklung eines Verfahrens notwendig, welches ermöglicht, das Öl vom Wasser zu trennen. Zweitens ist die Ausbeute geringer, weswegen der Energieverbrauch zur Ölförderung steigt und drittens muss das Wasser gereinigt werden. Das Wasser ist mit Kohlenwasserstoff und Feststoffe belastet. Früher wurde das Wasser in Flüssen entsorgt. Heute ist dies nicht mehr erlaubt, d.h. es muss wie Abwasser aufbereitet werden. Diese Wasseraufbereitung, um das Wasser in Flüssen entsorgen zu

können, ist wirtschaftlich nicht sinnvoll. Es gab früher die Ansicht, dass das Wasser in den Formationen, an denen nicht mehr gefördert wurde, entsorgt werden könne. Da das Wasser keinen Kontakt mit der Umwelt hat, ist es nicht notwendig das Wasser so gut zu reinigen. Weil die Formationen aus porösen Medien bestehen, sind sie sehr feststoff- und öltropfenempfindlich. Wasser mit einem zu hohen Gehalt an diesen Bestandteilen (Feststoffe und/oder Öl) verstopft die Poren und erhöht dadurch den injektionsdruck. Daraus ergibt sich eine Erhöhung der Betriebskosten.

Es gibt ein Optimum (siehe Abb. 1.8), das den günstigsten Bedingungen entspricht. Dieses Optimum berücksichtigt die Investitionskosten und die Betriebskosten. Eine perfekte Wasseraufbereitung verursacht einen kleinen Injektionsdruck (Betriebskosten), erhöht aber die Investitionskosten. Auf der anderen Seite gibt es die Möglichkeit einer Injektion, ohne das Wasser aufzubereiten. Daraus ergibt sich ein hoher Injektionsdruck, der sich in den Betriebskosten niederschlägt.

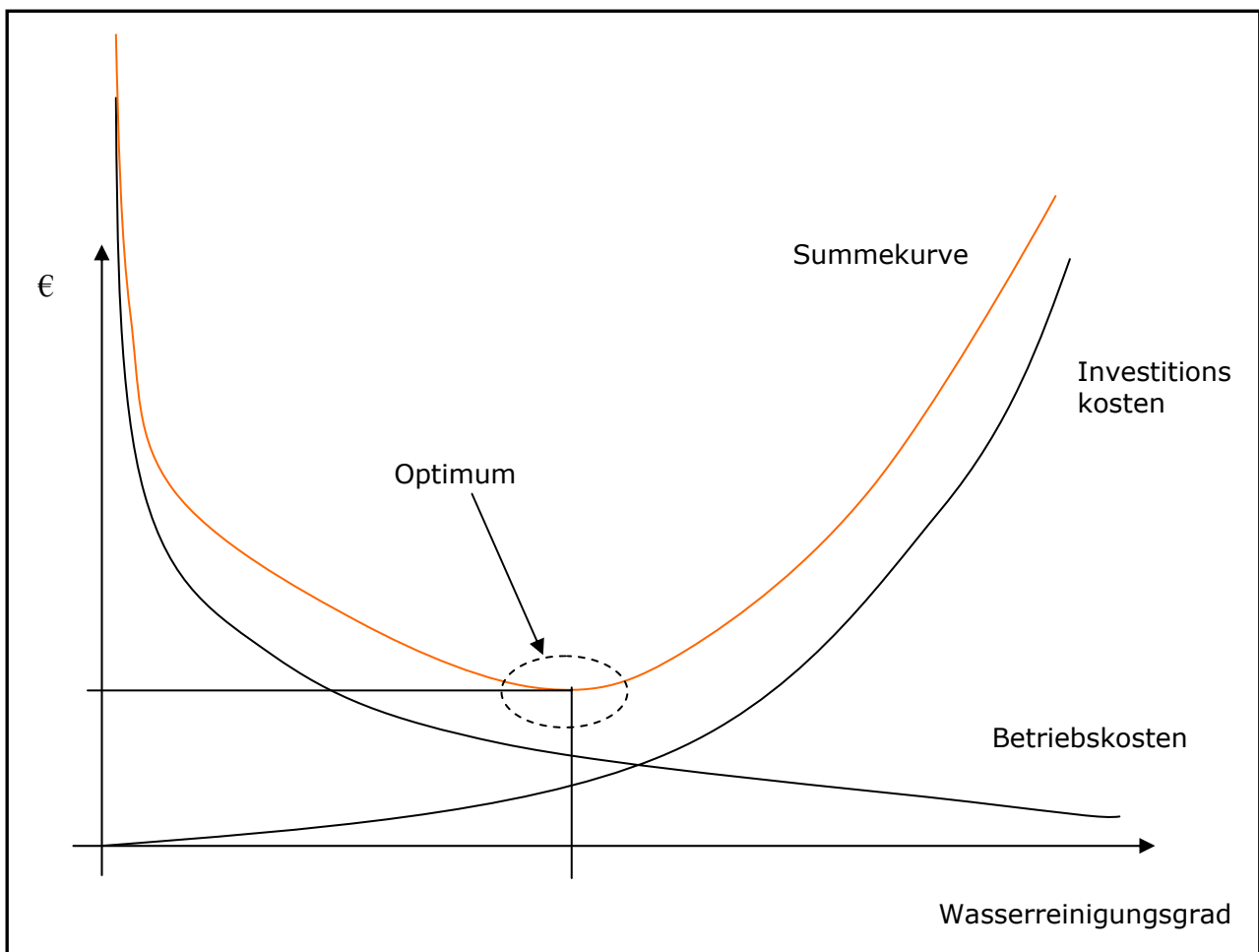


Abb. 1.8: Optimum des Wasserreinigungsgrades

Statt das Wasser in die Formationen, die nicht mehr gefördert werden, einzupressen, kann man es in produzierende Formationen injizieren, um die Ausbeute zu erhöhen. Dies ist die so genannte sekundäre Förderung. Die OMV bereitet ihr produziertes Wasser auf und verfügt über insgesamt 68 Injektionssonden, die der Druck in der Formation konstant halten.

1.7. „Matzen neu“ und „Wasserflutanlage neu“ Projekte

In der Zukunft werden alle Gewinnungsstationen durch eine einzige Station ersetzt (siehe Abb. 1.9). Das Projekt wird „Matzen neu“ genannt.

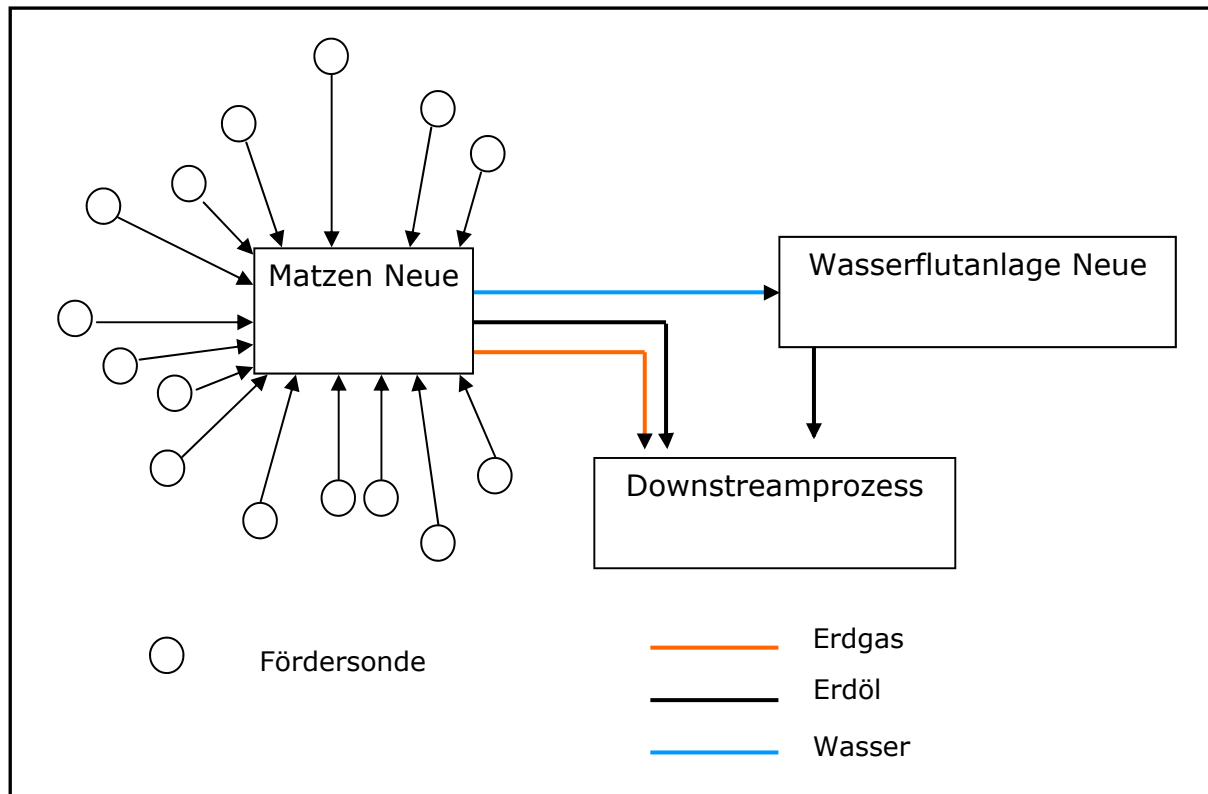


Abb. 1.9: Skizze der zukünftigen Anlagen

Das „Matzen Neu“ Projekt hat zum Ziel, die Betriebskosten zu verringern.

Das Projekt „Wasserflutanlage Neu“ ist eine Erneuerung der Wasserflutanlage. Die heutige Anlage wurde 1960 in Betrieb genommen. Im Lauf der Jahre wurde diese Anlage bis zu ihrem derzeitigen Zustand entwickelt. Heutzutage wird das Wasser in einem fünfstufigen Prozess aufbereitet.

1. Sedimentation
2. Entspannungsflotation
3. Belebungsverfahren
4. Sedimentation
5. Sandfilter

Danach wird das Wasser in die Injektionssonden geleitet.

Die derzeit in Verwendung befindliche Anlage soll bald ersetzt werden, da sie schon sehr alt ist. Alle Stufen der Wasseraufbereitung werden in offenen Becken erledigt. Die OMV will auch durch eine neue anaerobe Wasseraufbereitung Emissionen reduzieren und somit

einen weiteren Beitrag zum Umweltschutz leisten. Außerdem vermeidet ein anaerober Prozess Eisenhydroxydausfällungen und die bakteriologische Aktivität. Sind diese zwei Phänomene ausgeschaltet, sollte die Reinigung des Wassers einfacher sein. Das Feststoffproblem ist direkt an der Feststoffquelle neutralisiert. Die anaerobe Wasseraufbereitung an sich ist aber ein ganz neues Thema im Erdölbereich.

2. Problemstellung

Diese Diplomarbeit wurde erstellt im Rahmen des Projektes „Wasserflut neu“ der OMV. Das Ziel dieses Projektes ist der Ersatz der derzeitigen Wasserflutanlage, bei der das Wasser aus der Erdölförderung für die sekundäre Förderung aufbereitet wird, durch eine neue Wasserflutanlage. Die OMV will die Wasseraufbereitung, die heute im offenen Becken stattfindet, durch ein anaerobes Verfahren ersetzen. Das Projekt läuft seit 2006 und soll 2008 zum Abschluss gebracht werden. Diplomanden der TU nehmen an diesem Projekt teil. Die erste projektbezogene Diplomarbeit, verfasst von Christoph Janka, befasste sich mit der Literaturrecherche zum Thema. Nach Vorliegen der Ergebnisse dieser Literaturrecherche wurden geeignete Verfahren ausgewählt.

Diese Diplomarbeit markiert das Stadium zwischen der Literaturrecherche- und der Pilottestphase. Die anaerobe Flutwasseraufbereitung ist ein relatives neues Thema im Erdölbereich. Verschiedene für die Flutwasseraufbereitung bestimmte Verfahren wurden bei spezialisierten Firmen entwickelt. Diese Verfahren unterscheiden sich von den traditionellen Verfahren (Kläranlage), weil das Wasser in der Weise aufbereitet werden soll, dass es problemlos in den Boden wieder injiziert werden kann. Meine erste Aufgabe war es eine Zusammenfassung und Gegenüberstellung dieser ausgewählten Verfahren von verschiedenen Firmen zu erstellen

Die zweite Aufgabe dieser Diplomarbeit ist die Konzeption einer Wassertestanlage. Darunter versteht man eine Anlage, die die Injizierbarkeit des Wassers für die sekundäre Förderung bewerten lässt. Diese Anlage soll erstens die zukünftigen Leitungen simulieren, die das Wasser von der Wasserflutanlage zu den Injektionssonden leitet (Verweilzeit). Die Injizierbarkeitsbewertung erfolgt durch die Anwendung eines Kerns (sand core), der eine bestimmte Porosität und Durchlässigkeit hat. Das aufbereitete Wasser wird durch den Kern gefördert. Im Laufe der Zeit werden die Verschmutzungsrückstände (Öl und Feststoffe) den Förderdruck erhöhen. Dieser Druckanstieg stellt die Injizierbarkeit des Wassers vor.

Feststoffe und Öl liefern nicht denselben Beitrag zum Druckanstieg. Um den Effekt der Fremdstoffe (Öl oder Feststoffe) zu bewerten, muss man einen von diesen aus den Kern entfernen. Das einfachste ist das Öl durch die Anwendung eines Lösungsmittels zu entfernen. Ein Teil dieser Diplomarbeit beschreibt den Versuch den Kern durch Spülung wieder ölfrei zu bringen. Wenn es möglich wäre, wird man während der Pilottestphase die Möglichkeit haben, die Wirkungen von Öl und/oder Feststoffen auf den Kern zu untersuchen.

Die Effizienz jedes Verfahrens hängt von den Öltropfengrößen ab. Da die OMV kein Messapparat für die Tropfengrößenverteilung besitzt, soll versucht werden, die Anwendung eine fraktionierten Analysenseparation auf Basis des Stoke'schen Gesetzes zu untersuchen.

3. Ausgewählte Verfahren für die Pilottests

Literaturreferenz [04] – [10]

Die Flutwasseraufbereitung (siehe Abb. 3.1) erfolgt im Allgemeinen durch ein dreistufiges Verfahren.

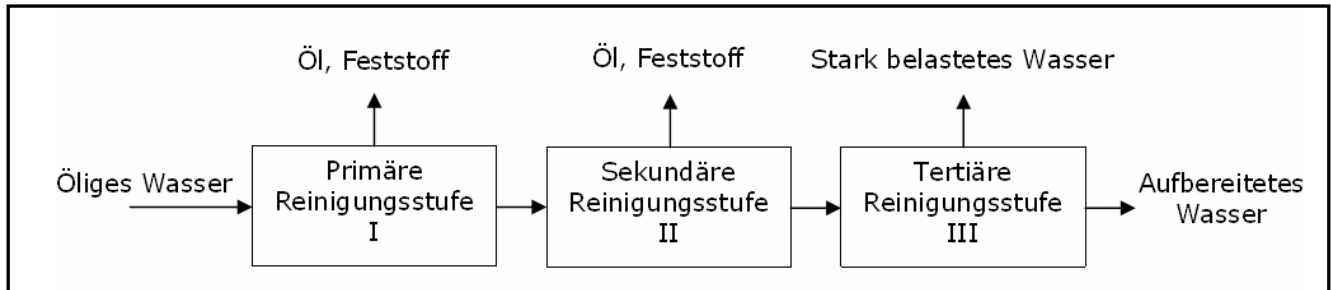


Abb. 3.1: Flutwasseraufbereitung

Die beiden ersten Stufen stützen sich im Allgemeinen auf das Stokes'sche Gesetz:

$$v_s = \frac{d^2 g \Delta \rho}{18 \mu} \quad (3.1)$$

v_s	Absetzgeschwindigkeit eines Teilchens (Öl oder Feststoff) [m/s]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
$\Delta \rho$	Dichteunterschied zwischen Teilchen und Wasser [kg/m ³]
μ	Viskosität des Mediums [Pa·s = kg/ms]
d	Durchmesser eines Teilchens (Öl bzw. Feststoff) [m]

Es gibt drei Möglichkeiten, die Geschwindigkeit eines Teilchens zu vergrößern.

1. Vergrößerung des Durchmessers (Coalescer)
2. Vergrößerung des Dichteunterschieds (Flotation)
3. Ersetzung des Erdbeschleunigungsfaktors durch Zentrifugalbeschleunigung (Zentrifugal-Apparaturen)

Die letzte Stufe ist meist ein Filtrations-, Adsorptions- oder Absorptionsvorgang.

Dieses Kapitel beschreibt die ausgewählten Verfahren, die im Pilotmaßstab getestet werden sollen. Die Verfahren sollen mehrere Bedingungen erfüllen, wie zum Beispiel die Möglichkeit des Betriebs ohne Kontakt mit Sauerstoff und mit minimalen Betriebskosten (wenig Wartung, keine Verbrauchsmaterialien), eine hohe Zuverlässigkeit und natürlich eine gute Trennleistung. Nach einer Literaturrecherche, die von Christoph Janka durchgeführt wurde, wurden die im Folgenden beschriebenen Verfahren ausgewählt.

Das erste Verfahren ist eine zentrifugale Flüssigkeit/Flüssigkeit Trennapparatur, die Hydrozyklon genannt wird. Danach wird eine Zentrifugalfotation Trennapparatur beschrieben. Der Voraxial Separator ist auch wie ein Hydrozyklon eine zentrifugale Trennapparatur. Eine Coalescer wird auch im Pilotmaßstab getestet. Das letzte Verfahren ist eine Filtrationsapparatur, die mit Nusschalenpackung befüllt ist.

Alle Informationen, die in diesem Kapitel angegeben sind, stammen aus der fachrelevanten Literatur, Gesprächen mit Mitarbeiter verschiedener Firmen, im Internet erhältlichen Produktinformation und Broschüren. Es ist klar, dass die Entscheidung für eine Pilotanlage nicht nur auf Basis dieser Information getroffen werden kann. Die OMV und die Anlagelieferanten bevorzugen Tests im Pilotmaßstab.

3.1. Liquid/Liquid-Hydrozyklon

Literaturreferenz [11] [13]

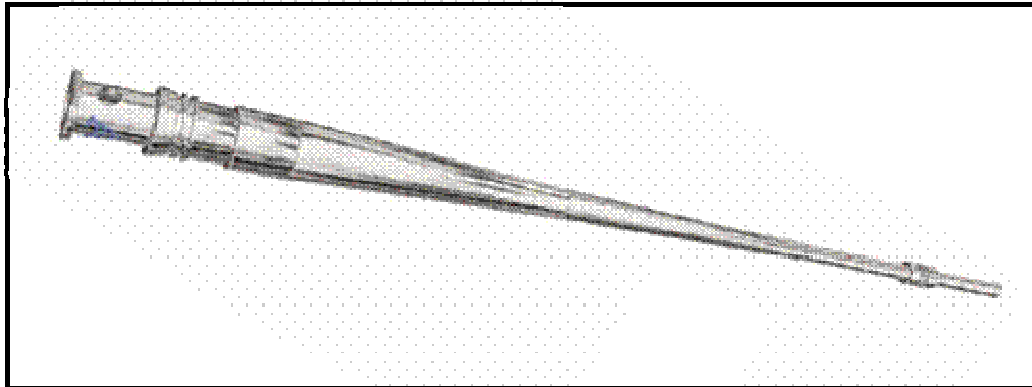


Abb. 3.2: Liquid/Liquid-Hydrozyklon

Da er sehr kompakt ist und die Trennung von Öl und Wasser gut erledigt, wird der Hydrozyklon (siehe Abb. 3.2) in der Ölindustrie oft verwendet. Er wird meistens nach einem Absetztank eingesetzt (Sekundäraufbereitung).

3.1.1. Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip des Hydrozyklons ist die Auftrennung von Medien unterschiedlicher Dichte im Zentrifugalfeld. Diese wird durch das tangentielle Einbringen der Flüssigkeit erreicht. Dabei werden ca. 4000 G erzeugt, wodurch sich das Öl viel schneller vom Wasser abtrennt als im Erdschwerfeld, das in einem Absetztank zur Trennung verwendet wird.

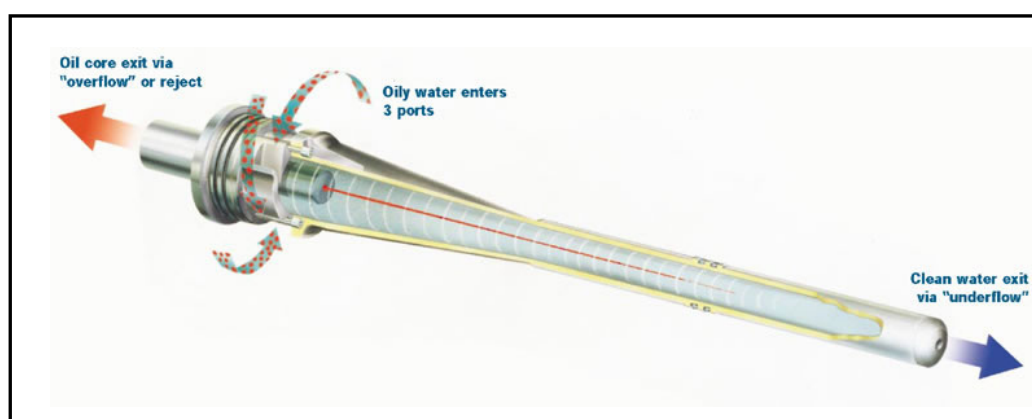


Abb. 3.3: Öl- und Wasserstrecke im Hydrozyklon

Öltropfen ab einer Größe von 10 μm können mit Hydrozyklonen vom Wasser effektiv abgetrennt werden. Das leichtere Medium (Öl) sammelt sich im Zentrum des Zyklons und verlässt durch das Tauchrohr den Hydrozyklon als Overflow (siehe Abb. 3.3). Der Rest

verlässt den Hydrozyklon als Underflow. Die „Energieversorgung“ erfolgt über den Druck, mit dem die Flüssigkeit in den Hydrozyklon eingebracht wird. Die Energie, die die Trennarbeit benötigt, entstammt dem Druckverlust, welcher der Druckdifferenz zwischen Einlauf und Auslauf entspricht.

3.1.2. Leistung

Ein Hydrozyklon kann die Öltropfen größer als 10 µm abtrennen. Mehrere Hydrozyklone werden parallel in einem Kessel eingesetzt, um große Flussraten zu schaffen. Die größte Vorrichtung, die mehr als 370 einzelne Hydrozyklone enthält (siehe Abb. 3.4), kann pro Stunde bis zu 1000 m³ Wasser in einem 2,2 m lang Tank mit 1,2 m Durchmesser aufbereiten.

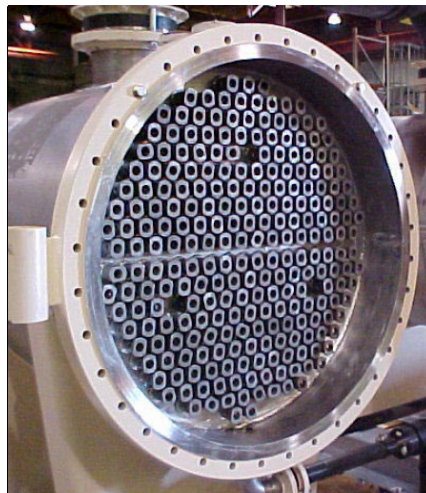


Abb. 3.4: Hydrozykloneneinrichtung in einem Kessel

Der leistungsmäßig optimale Druckverlust beträgt 3 bar. Das entspricht den Betriebskosten.

Der Energieverbrauch kann abgeschätzt werden wie folgt:

$$E = H \cdot Q \cdot g \cdot \rho = P \cdot Q \quad (3.2)$$

E = Energieverbrauch [Watt]

g = Erdbeschleunigung [m/s²]

ρ = Dichte des Mediums [kg/m³]

P = Druckdifferenz [Pa]

Q = Flussrate [m³/s]

Der Energiebedarf einer Anlage, die 1000 m³ Wasser pro Stunde aufbereiten muss, beträgt 83,3 kWh.

3.1.3. Pilotanlage

Die Pilotanlage wird von der Firma Kerbs angeboten. Sie besteht aus einem Hydrozyklon, der mit einer Membranpumpe auf einem Handkarren steht (siehe Abb. 3.5). Diese Pilotanlage kann zwischen 2 und 5 m³ Wasser pro Stunde aufbereiten.

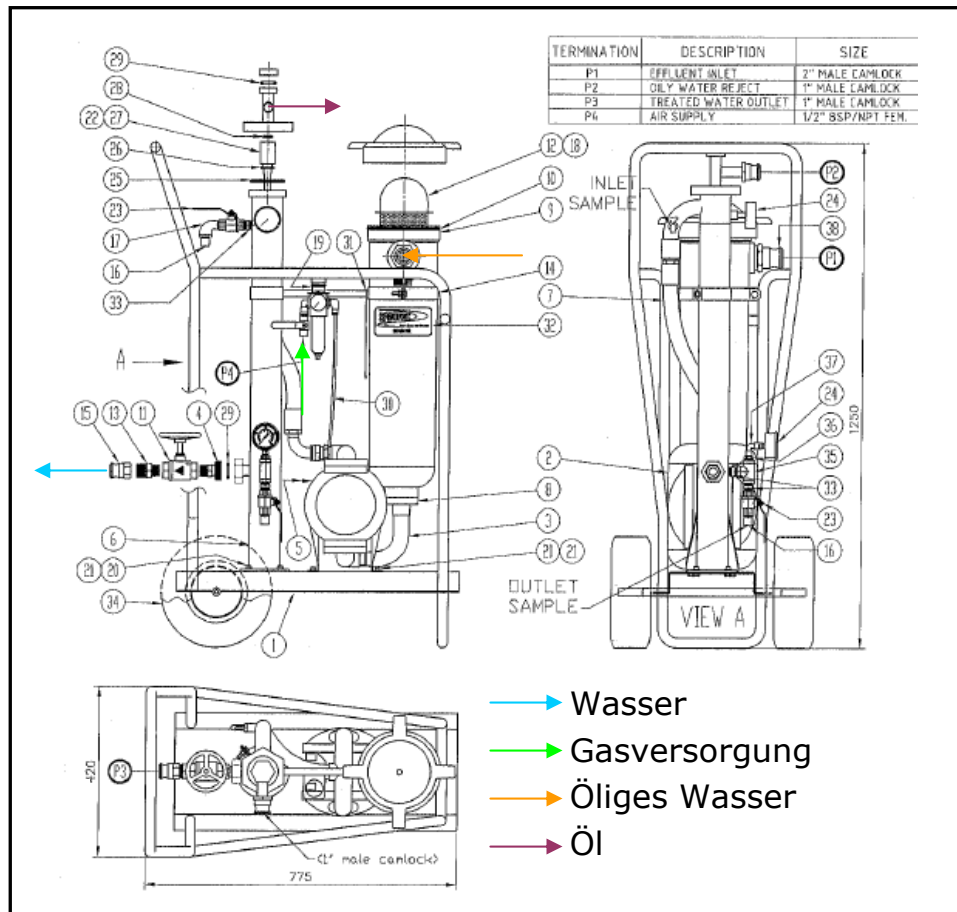


Abb. 3.5: Hydrozyklon-Pilotanlage (Litraturreferenz [12])

Die Pumpe braucht Druckluftversorgung mit einem Druck von 4,5 bar.

3.1.4. Vor- und Nachteile des Hydrozyklons

Vorteile

- keine bewegten Teile im Apparat → zuverlässig
- theoretisch keinerlei Wartungsbedarf
- kompakte Bauweise
- Den Betriebskosten entspricht nur der Druckverlust.
- keine äußere Energieversorgung notwendig
- vielfach erprobt und eingesetzt – on- und offshore
- funktioniert ohne Kontakt mit Sauerstoff

Nachteile

- Die OMV hat keine Erfahrung mit dieser Technologie.
- Die Feststoffe bleiben in der Wasserphase.

3.2. Zentrifugalflotation

Literaturreferenz [14]

Die Abtrennung von Öl aus Wasser stützt sich auf den Dichteunterschied. Eine Möglichkeit, die Öldichte zu verringern, ist die Flotation. Kleine Gasblasen können den gewünschten Effekt erzielen. In eine Flotationanlage haften kleine Gasblasen an den Öltropfen und schleppen die Tropfen zu der Oberfläche der Flüssigkeit im Behälter. Durch die geringere Gesamtdichte (von Öl und Gas) trennt sich das Öl schneller vom Wasser. Die Zentrifugalflotation baut auf zwei Parameter des Stokes'schen Gesetzes auf: erstens den Dichteunterschied und zweitens die Zentrifugalbeschleunigung statt der Erdbeschleunigung.

Die Mischung aus Wasser und Öl wird mit Gas gemischt und tangential in einem senkrechten Behälter eingefüllt. Eine Drehbewegung mit einer Zentrifugalbeschleunigung von etwa 90 m/s^2 entsteht im Kessel. Dadurch ergibt sich eine Verweilzeit von etwa 100 Sekunden. Die Öltropfen, die keine Gasblase getroffen haben, strömen durch den Dichteunterschied und die Zentrifugalbeschleunigung auch in Richtung des Behälterinneren, aber langsamer. Dort werden sie mit anderen Tropfen koagulieren oder agglomerieren. Da der Durchmesser der Tropfen so größer wird, schwimmt das Öl schneller nach oben.

Aufbereitetes Wasser wird unten abgeleitet. Eine zentrifugale Flotation kann mit einer Serienschaltung von zwei Einheiten die Ölkonzentration unter 10 ppm absenken. Diese Technologie ist eine Alternative zum Hydrozyklon.

Das Verfahren gibt es in verschiedenen Varianten, je nach Hersteller. EPCON wurde ausgewählt, da es am schnellsten eine Pilotanlage liefern kann.

3.2.1. CFU

Die Zentrifugalflotationstechnologie, die EPCON anbietet, heißt CFU (Compact Flotation Unit). Eine Mischung aus öligem Wasser und Gas wird tangential in den Kessel eingeströmt (siehe Abb. 3.6). Das Gas haftet an den Öltropfen und vereinfacht die Trennung.

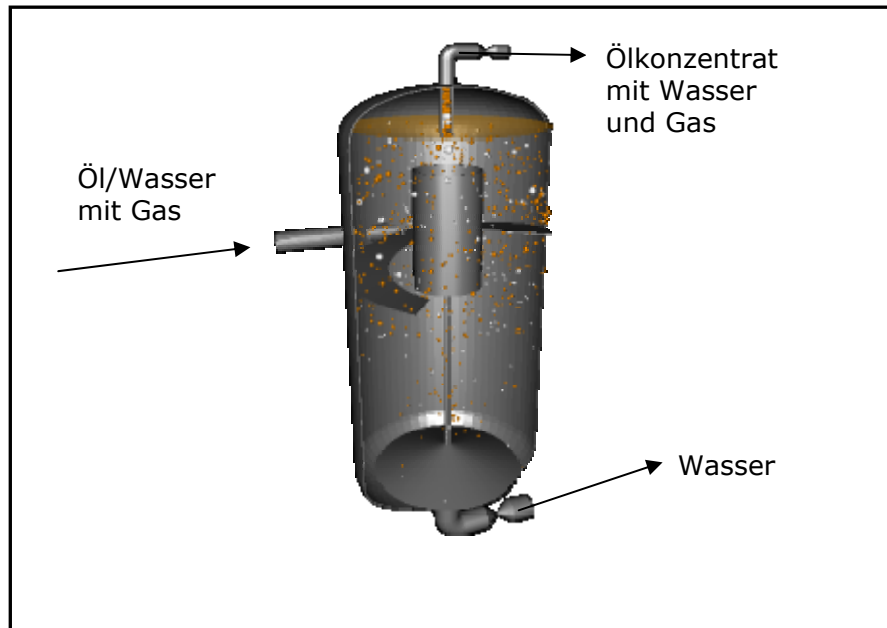


Abb. 3.6: CFU

Der optimale Druckverlust beträgt nur 0,5 bar. Das ist nur ein Sechstel des beim Hydrozyklon-Verfahrens auftretenden Druckverlusts. Das Öl wird direkt an der Oberfläche abgeleitet. Das Ölkonzentrat entspricht 1,5% des Eingangstroms und enthält 90% Wasser. Eine Gasrückgabe kann den Wassergehalt am Ölausgang um 10% (meist zwischen 5 und 10%) sinken lassen. Eine Anlage, die 540 m³ pro Stunde schafft, hat eine Fläche von 12 m². Das ist eine relativ kompakte Größe. EPCON empfiehlt die Schaltung von zwei CFUs in Serie (siehe Abb. 3.7), damit eine Ölkonzentration von 10 ppm erreicht werden kann.

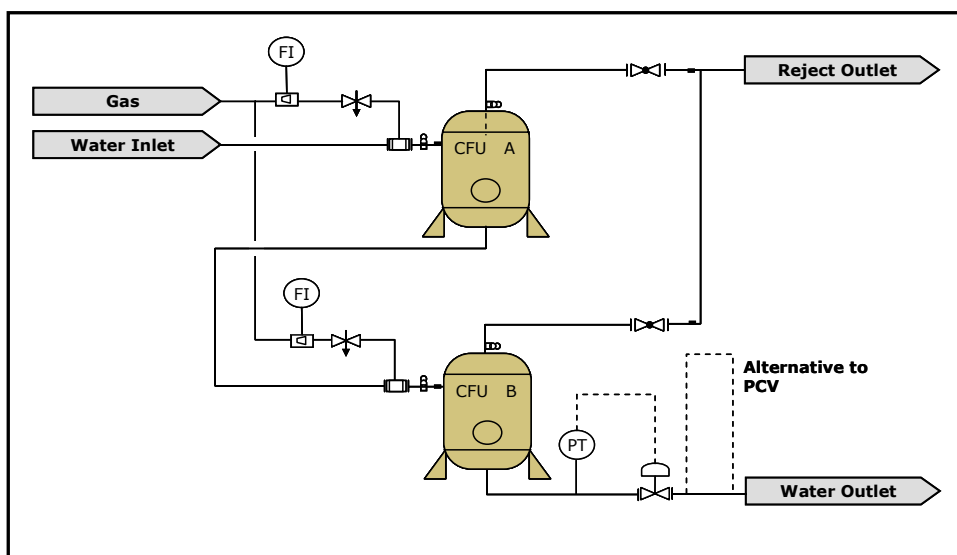


Abb. 3.7: Fließbild von zwei parallel geschalteten CFUs

3.2.2. Vergleich der Zentrifugalfotation mit anderen Technologien

Vergleich mit Hydrozyklon

Tabelle 3.1 zeigt, dass mit der gleichen Flussrate der Raumbedarf kleiner und die Leistung der Zentrifugalfotation besser ist. Der Inletdruck ist kleiner und, wie schon erwähnt, ist der Druckabfall mit einem CFU kleiner, sogar, wenn zwei CFUs nacheinander geschaltet werden. Andere Parameter, wie Ölkonzentration, Flussrate, Feststoffe und Gasgehalt haben kaum Einflüsse auf den Betrieb des CFU, auf den eines Hydrozyklon dagegen schon. Die Investitionskosten für ein CFU (CAPEX) und –seine Betriebskosten (OPEX) sind niedriger.

Parameters	Hydrocyclone and degasser	1 stage CFU	2 stage CFU
Footprint (m ²)	30	6	12
Wet weight (metric tons)	45	8	16
Capacity (bpd)/(m ³ /h)	81 000/540	81 000/540	81 000/540
Performance (mg OiW/l)	<40	<30 (20)*	<10
Minimum inlet pressure (barg)	5	0.7	1.5
Performance on high pressure	Good	No negative effect, but only tested for ≤30bars	
Sensitivity to upstream			
- oil slugging	High	Less sensitive	Low
- flow rate variation	High	Low	Low
- solids	High	Low	Low
- gas	Sensitive (<5%)	Not sensitive	Not sensitive
- movement (FPSO)	Low	Low	Low
CAPEX	“High”**	Low	Medium
OPEX	Low	Very low	Very low

* Brage ** For existing installations when limited in space and weight

Tab. 3.1: Vergleich mit Hydrozyklon

Vergleich mit MPPE-Verfahren

Das CFU-Verfahren hat ein besseres Verhältnis von Flussrate und Platzbedarf als der MPPE-Prozess (siehe Abb. 3.8), bei dem die MPPE-Wasseraufbereitung empfindlicher auf Betriebsparameter reagiert (siehe Tab. 3.2). Beim MPPE Prozess (Macro Porous Polymer Extraction) wird kohlenwasserstoffkontaminiertes Wasser durch eine mit MPPE Partikeln gepackte Kolonne geleitet. Die kugelförmigen Partikel enthalten eine Extraktionsflüssigkeit, die im Inneren der Poren auf dem Polymer immobilisiert ist. Diese extrahiert die Kohlenwasserstoffe aus der Flüssigkeit. Nach ca. einer Stunde Betrieb werden die Polymerpartikel mit Dampf regeneriert. Um eine kontinuierliche Wasseraufbereitung zu erlauben, sind zwei Kolonnen parallel geschaltet. Das schlägt sich in hohen Investitions- und Betriebskosten nieder.

Parameters	1 stage CFU	MPPE
Footprint (m ²)	6	42
Height (m)	3.3	10
Capacity (bpd/m ³ /h)	81 000/540	45 300/300*
Sensitivity to upstream:		
-Oil slugging	Less sensitive	Sensitive
-Solids	Low	Sensitive
-Gas	Not sensitive	n.a.
-Flow variation	Low	Sensitive
% OiW removal	90	50-99
Operational reliability (performance)	High	Low unless upstream process control particles and dispersed oil
CAPEX	Very low	High
OPEX	Very Low	Medium

Tab. 3.2: Vergleich mit MPPE

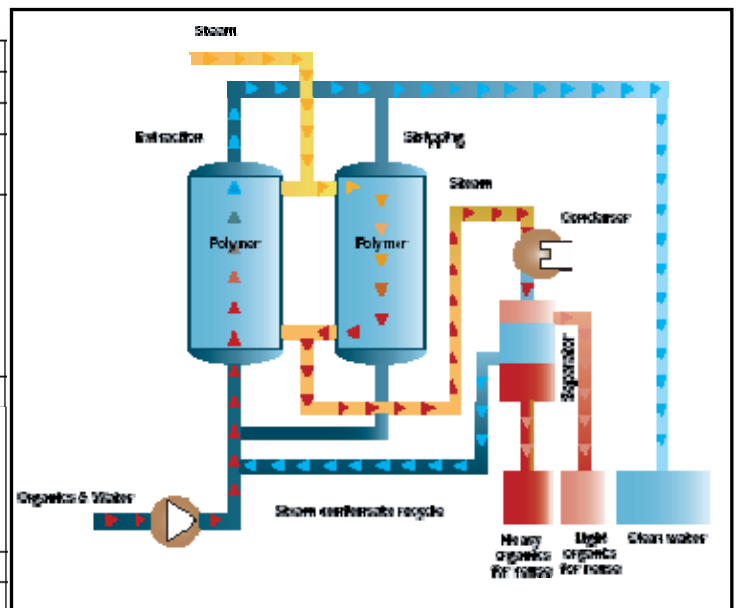


Abb. 3.8: MPPE-Prozess

Vergleich mit Zentrifuge

Die Zentrifuge (siehe Abb. 3.9) ist eine recht teure Apparatur. Das Preis-Leistungs-Verhältnis ist schlecht im Vergleich mit dem des CFUs (siehe Tab. 3.3). Dazu haben Zentrifugen noch andere Nachteile: Es gibt bewegende Teile, die Stromversorgt werden müssen.

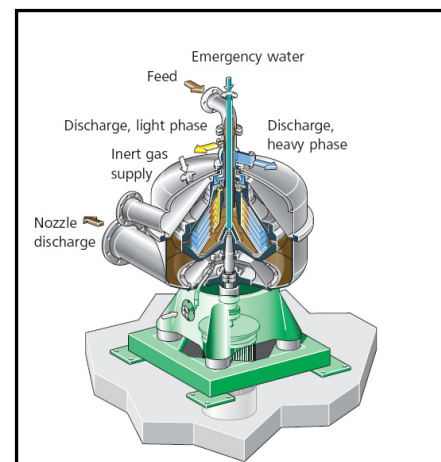


Abb. 3.9: Zentrifuge

Parameters	Centrifuges	1 stage CFU	2 stage CFU
Performance (mg OiW/l)	40-160*	<100*	<10**
Sensitivity to upstream			
- oil slugging	Sensitive	Less sensitive	Low
- flow variation	Sensitive	Low	Low
- solids	Sensitive	Low	Low
CAPEX	High	Low	Medium
OPEX	High	Very low	Very Low

*Data from Troll C ** Experiences from Troll C, incoming conc. ~1000 mg/l

Tab. 3.3: Vergleich mit Zentrifuge

3.2.3. Pilotanlage

EPCONs Pilotanlage (siehe Abb. 3.10 und 3.11) kann gemietet werden, da sie schneller als die CETCOs Pilotanlage geliefert werden kann. Sie besteht aus zwei nacheinander geschalteten CFUs, die eine Flussrate von etwa 5 m³/h schaffen können.



Abb. 3.10 : CFU-Pilotanlage

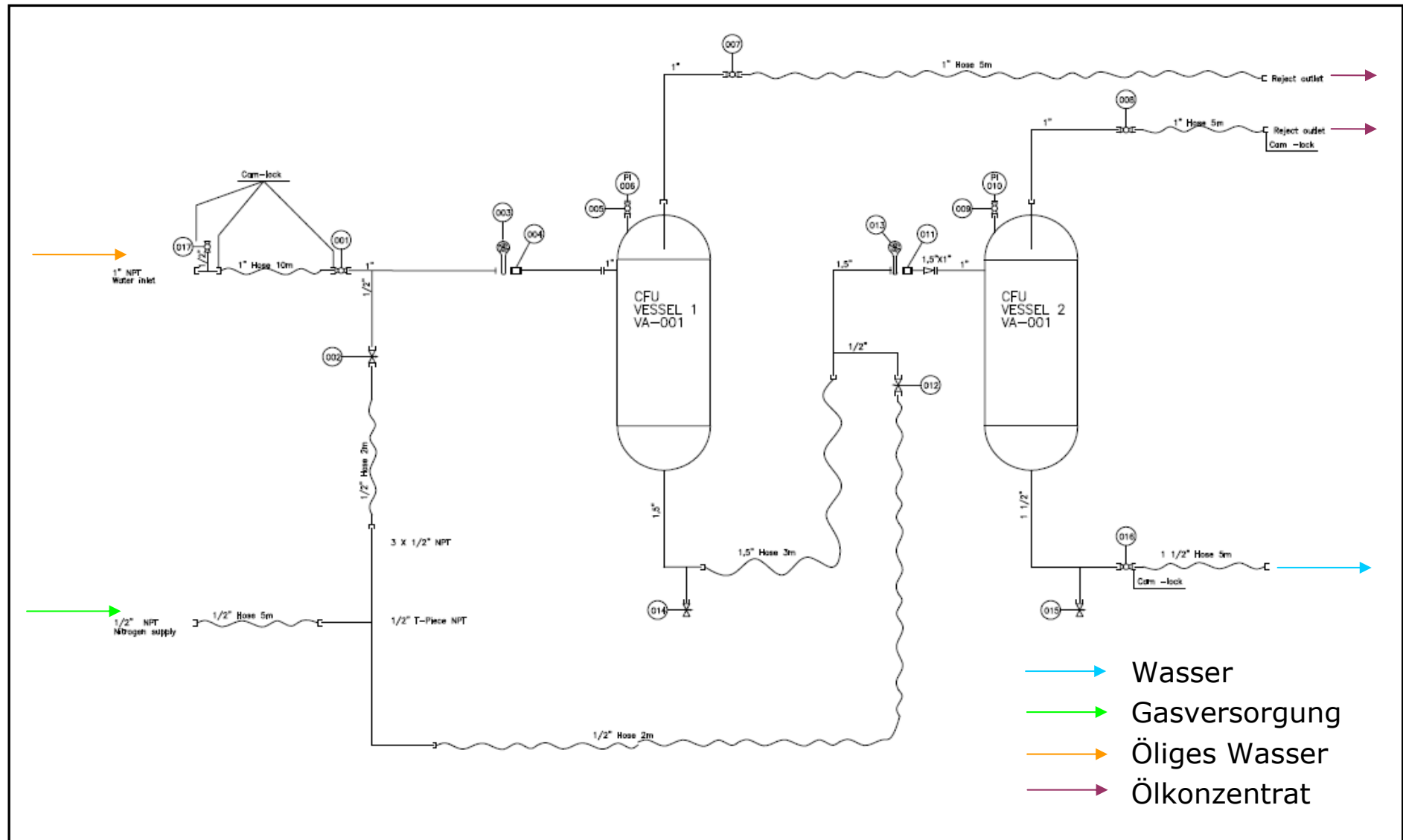


Abb. 3.11: Fließbild der Pilotanlage von EPCON

3.2.4. Vor- und Nachteile der Zentrifugalflotation

Vorteile

- kompakt
- funktioniert ohne Kontakt mit Sauerstoff
- geringe Verweilzeit
- geringe Investitions- und Betriebskosten
- braucht keine Betreuung während des Betriebs
- Den Betriebskosten entsprechen der Druckverlust und der Gasverbrauch.
- keine beweglichen Teile
- theoretische keine Wartung notwendig
- keine Energieversorgung von außen notwendig
- kontinuierlich hohe Leistung unter schwankenden Bedingungen.

Nachteile

- Die OMV hat keine Erfahrung mit dieser Technologie.
- Die Technologie ist relativ neu (Ersteinsatz 1999).

3.3. Coalescer

Literaturreferenz [15]

3.3.1. Funktionsprinzip

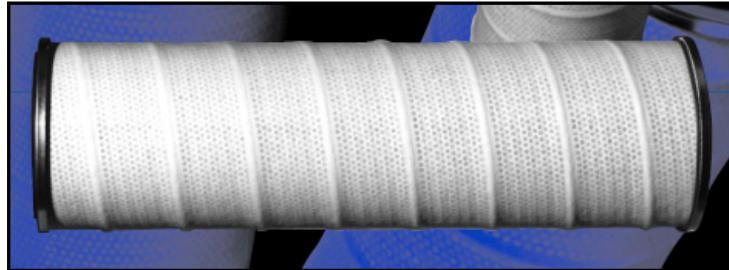


Abb. 3.11: Coalescerkerze

Coalescer-Apparaturen haben zum Ziel, die Durchmesser der Öltropfen zu vergrößern, damit sie schneller nach oben schwimmen. Ein Öltropfen wird auf eine Faser des Coalescers adsorbiert (siehe Abb. 3.11). Aufgrund der Strömung wandert dies entlang der Faser. Der Tropfen trifft an der Vernetzung der Faser auf einen anderen Tropfen. Dort findet die Koaleszenz statt. Jetzt ist das Tropfenvolumen-Kontaktfläche und Faser-Verhältnis nicht mehr günstig, um zu gewährleisten, dass der Tropfen an der Faser bleibt. Das vorbeiströmende Medium schleppt den Tropfen mit (siehe Abb. 3.12).

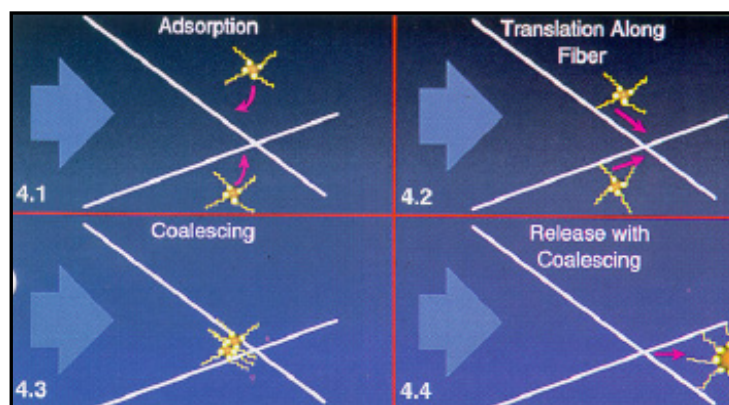


Abb. 3.12: Funktionsprinzip eines Coalescers

In einer Coalescerkerze sind mehrere Koaleszenzmedien mit unterschiedlichen Porendurchmessern eingebaut, damit die Tropfen einen ausreichenden Durchmesser für eine schnelle Abtrennung erreichen können. Der Wirkungsgrad eines Coalescers hängt von den Eigenschaften der durchströmenden Flüssigkeiten ab. Die Dichte, die Viskosität und die Grenzflächenspannung sind entscheidende Parameter. Dieses Verfahren wird hauptsächlich als zweite Stufe des Wasseraufbereitungsprozesses eingesetzt, anstatt eines Hydrozyklons.

3.3.2. PhaseSep

Das System, das Pall anbietet (siehe Abb. 3.13), besteht aus einem Vorfilter und einem waagrecht liegenden Kessel, der mehrere parallel geschaltete Coalescereinheiten enthält, die aus einem oleophilischen-hydrophobischen Medium bestehen. Der Vorfilter (3 μ m-Filter) vermeidet die Verstopfung des Coalscermediums. Feststoffe können Emulsionen auch stabilisieren, deswegen sollten sie entnommen werden. Beim Filtrationsvorgang entsteht schon ein Koaleszenzeffekt.

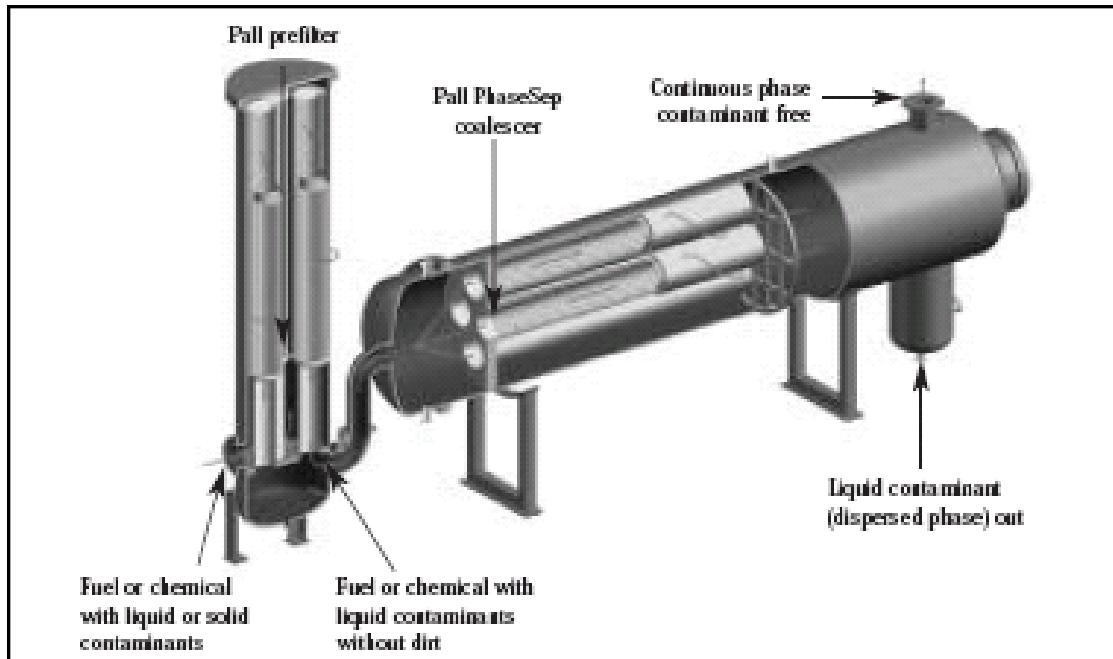


Abb. 3.13: Vorfilter und Coalescer

Der Ölgehalt kann um bis zu 15 ppm sinken. Der Coalescer kann Flüssigkeiten, die eine Grenzflächenspannung bis zu 0,5 mN/m haben, trennen (normale Coalescer funktionieren bis zu 20 mN/m).

Die horizontale Lage des Kessels vereinfacht die Trennung der zwei Flüssigkeiten. Die Öl-Wasser-Mischung fließt durch die Coalescerkerzen von innen nach außen. Wenn das Wasser durch die Coalescerkerzen fließt, koaleszieren die Tropfen der verteilten Phase (Öl). Die Tropfen werden größer und lassen sich im zweiten Teil des Kessels einfach trennen. Die Länge des zweiten Teils ist nach der Dichte, der Viskosität und der Grenzflächenspannung der Flüssigkeiten ausgelegt.

Der Druckverlust beträgt 3 bar im Vorfilter und 0,138 bis 1 bar im Coalescer.

3.3.3. Pilotanlage

Da die Firma Pall eine preislich günstige Pilotanlage anbot, wurde sie ausgewählt. Pall liefert eine Coalescereinheit und einen Plan des Kessels (siehe Abb. 3.14). Der Kessel

wird in einer OMV-Werkstatt gebaut. Der Vorfilter wird gleichzeitig bei einer von Pall empfohlenen Firma gekauft. Der Druckabfall wird an N7 und N8 (Abb. 3.14) gemessen. Wenn der Druckverlust zu hoch ist, muss man die Coalescerkerzen wechseln.

Der Kessel ist ein 3m langes Rohr mit einem Durchmesser von 20 cm. Er hat eine Winkel von 3° gegen die Horizontale.

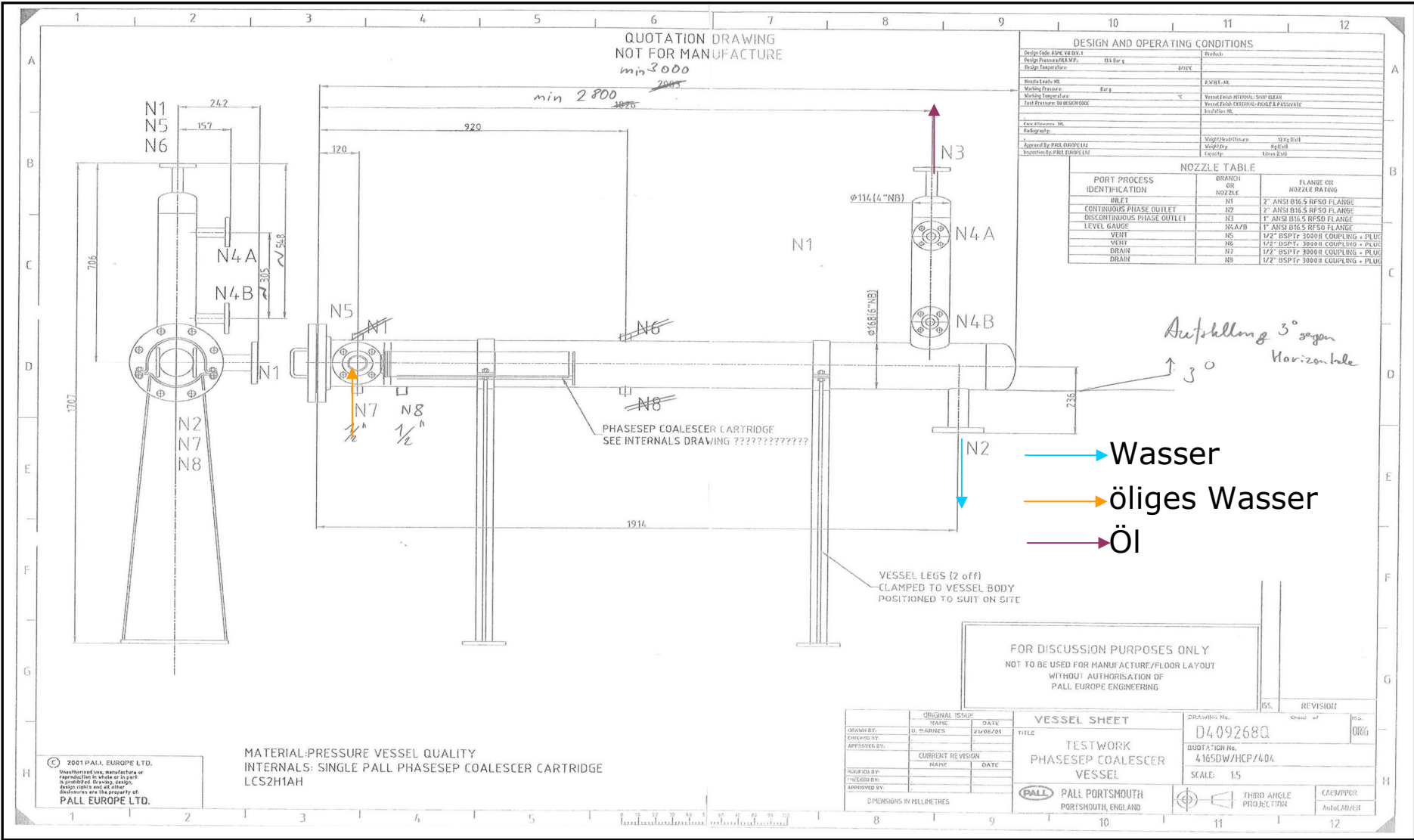


Abb. 3.14: Plan für die Herstellung eines Kessels für die Pilotanlage

3.3.4. Vor- und Nachteile des Coalescers

Vorteile

- geringer Druckverlust
- keine beweglichen Teile
- keine Energieversorgung von außen notwendig
- preisgünstige Pilotanlage
- funktioniert ohne Kontakt mit Sauerstoff

Nachteile

- Die Coalscereinheiten sind nicht regenerierbar.
- Ein nicht regenerierbar Vorfilter wird benötigt.
- Die zwei ersten Punkte schlagen sich in hohen Betriebskosten nieder.
- Die Apparatur reagiert empfindlich auf Chemikalien, die die Fasern sättigen können.

3.4. Voraxial Separator

Literaturreferenz [16]



Abb. 3.15: Voraxial Separator

Der Voraxial Separator (siehe Abb. 3.15) wirkt durch zentrifugale Kraft. Die Flüssigkeit wird mit Hilfe eines Laufrads, das eine Drehbewegung an die Flüssigkeit überträgt, in einen horizontalen Zylinder geleitet. Das Laufrad verursacht wenig Scherkräfte, damit keine Emulsion entsteht.

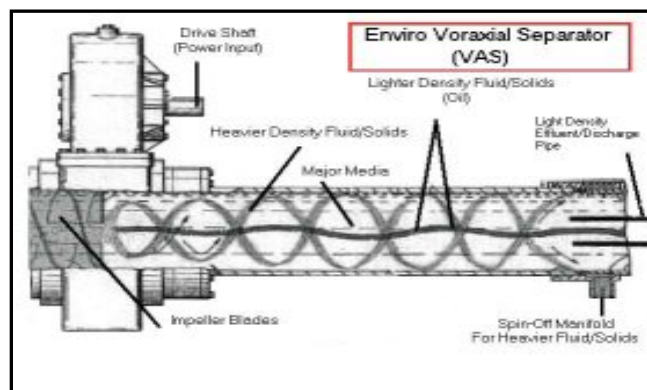


Abb. 3.16: Funktionsprinzip des Voraxial Separator

Die radiale Beschleunigung kann bis zu 1000 G betragen. Entsteht entlang des Zylinders ein Wirbel, sammeln sich die Öltropfen im Zentrum des Zylinders. Die Ölströmung wird am Ende der Apparatur abgeleitet. Durch die zentrifugale Beschleunigung werden die Feststoffe und das Wasser (schwerer als Öl) sich am Rand des Zylinders sammeln. (siehe Abb. 3.16 und 3.17). Der Voraxial Separator trennt Öl vom Wasser und der Feststoffe ab.

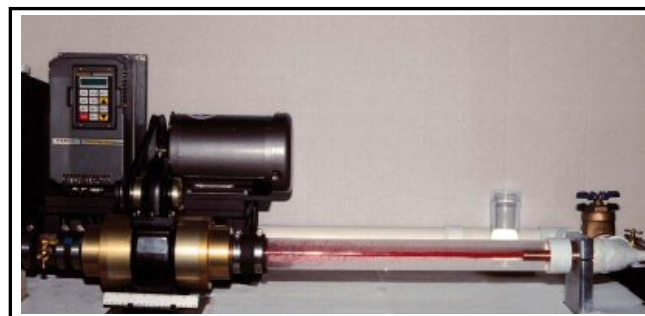


Abb. 3.17: Das Öl sammelt sich im Zentrum des Voraxial Separator

3.4.1. Leistung

Die Literatur, die zur Verfügung stand, enthält nur Leistungswerte, die mit aufbereitetem Öl gemessen wurden. Die Effizienz bei einer Flussrate von 7 m³/h mit 323 ppm Getriebeöl (Dichte 0,85 g/cm³) am Eingang beträgt 99,2%, d.h. 3,5 ppm am Ausgang. Die Ölströmung entspricht 5% des Inletflusses und enthält 2% Öl (ca. 20 000 ppm).

EVTN, das Unternehmen, das diese Technologie entwickelt hat, schlägt eine integrierte Gesamtanlage vor (siehe Abb. 3.18), die aus einem Coalescer, einem Voraxial Separator, einem Filter und einer Adsorptionskolonne besteht. Im Coalescer vergrößern sich die Tropfen, um eine optimale Leistung des Voraxial Separator zu erlauben. Der Filter schützt die Adsorptionskolonne von Feststoffen. Nach dieser Behandlung soll das Wasser einen Kohlenwasserstoffgehalt von unter 10 ppm haben.

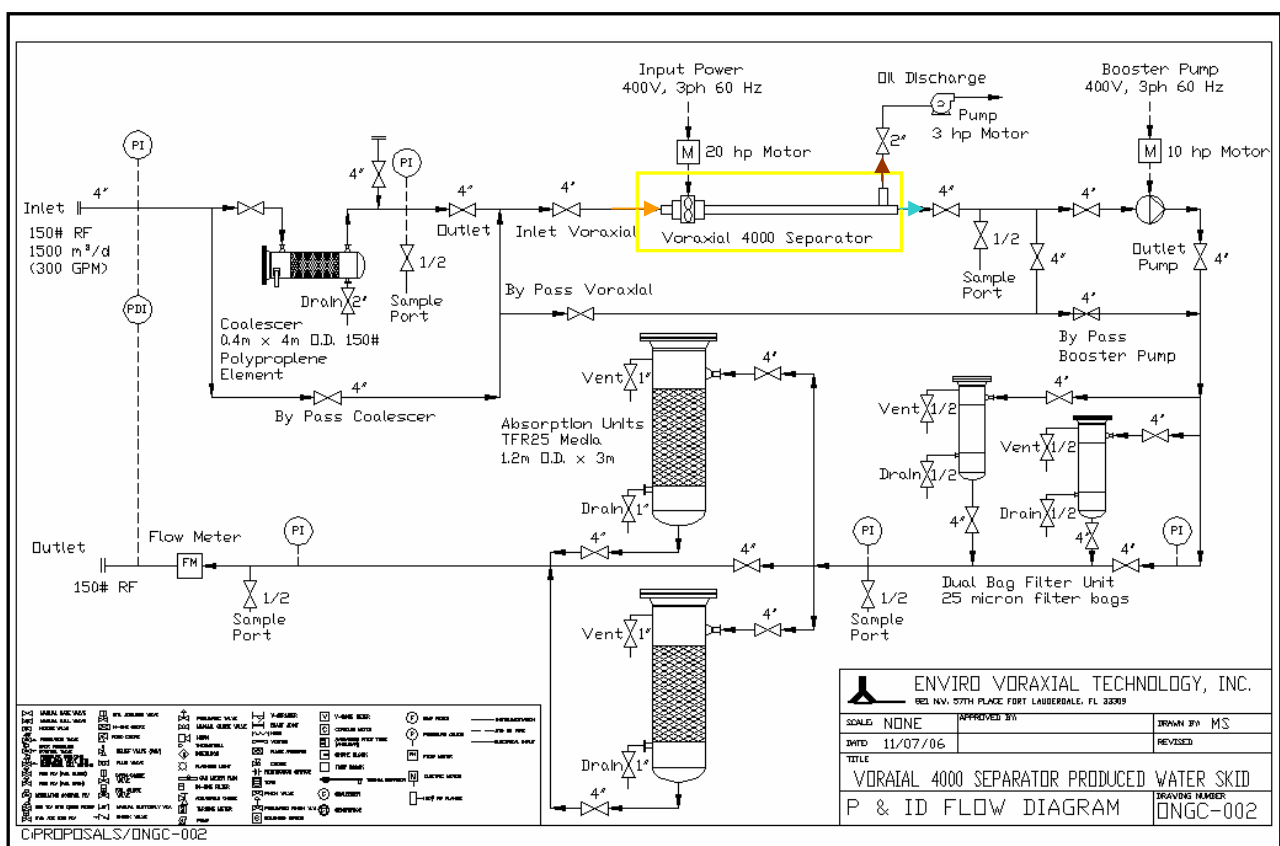


Abb. 3.18: Fließbild eines Prozesses, in den der Voraxial Separator integriert ist

3.4.2. Vergleich des Voraxial Separator mit Hydrozyklonen

	Voraxial	Hydrocyclones
Footprint/size	small	moderate
Utilities	electric motor for impeller	works off pressure drop
Sensitivities	low shear impeller does not re-emulsify oil droplets sensitive to emulsion and oil droplet not pumping the fluid so energy requirements are low	requires large pressure drop sensitive to emulsion and oil droplet internal cone wear can be high
Pressure drop	Very little	Very high to create necessary G's

Tab. 3.4: Vergleich mit Hydrozyklonen

Der wichtigste Vorteil des Voraxial Separator im Vergleich mit dem Hydrozyklon (siehe Tab. 3.4) ist der kleinere Druckverlust. Der Voraxial Separator braucht aber eine Energieversorgung für das Laufrad, das den Eingangsfluss beschleunigt.

3.4.3. Pilotanlage

Die Pilotanlage der Firma EVTN (siehe Abb. 3.19) besteht aus einem Coalescer, einem Voraxial Separator und einem Filter. Der Coalescer muss regelmäßig von Feststoffen gereinigt und das Filtermedium gewechselt werden.

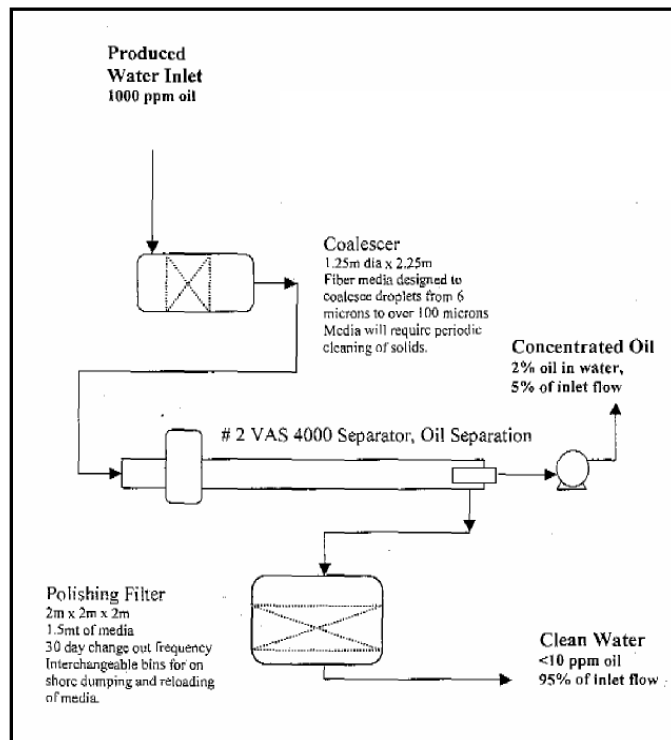


Abb. 3.19: Fließbild der angebotenen Pilotanlage

3.4.4. Vor- und Nachteile des Voraxial Separators

Vorteile

- mehrstufige Pilotanlage
- preisgünstig
- funktioniert ohne Kontakt mit Sauerstoff

Nachteile

- externe Energieversorgung für das Laufrad
- beweglicher Teil
- großer Ölstrom mit hohem Gehalt an Wasser
- In der gesamten Anlage muss der Coalescer von Feststoffen gereinigt werden; Filter- und Adsorptionsmedien müssen ausgetauscht werden. Dies führt zu hohen Betriebskosten.

3.5. Nussschalenfilter

Literaturreferenz [17]

Ein Nussschalenfilterbett besteht aus einem Granulat aus Walnussschalen (siehe Abb. 3.20 und 3.21). Das Medium ist effektiv gegen Feststoffe, ungelöste Kohlenwasserstoffe und Metallhydroxyde. Es hat eine geringe Anfälligkeit auf Fouling.



Abb. 3.20: Nussschalenfilterbehälter



Abb. 3.21: Nussschalengranulat

Der Kontakt des Mediums mit Öl mindert seine Eigenschaften nicht, weswegen es leicht rückspülbar ist und 5% der Packung jedes Jahr gewechselt werden sollten.

3.5.1. Funktionsprinzip

Die zur Bezeichnung der Ventile verwendeten Buchstaben verweisen auf Abb. 3.27.

Filtration (siehe Abb. 3.22): Die Ventile A, E und F sind geöffnet. Das Wasser fließt durch A in den Kessel. Das Medium wird von oben nach unten geflutet. Das filtrierte Wasser fließt durch E hinaus. Das F-Ventil verhindert die Sammlung von Gas oder Öl im Kessel. Der Filtrationsvorgang endet entweder nach 24 Stunden, wenn der Druckverlust auf 0,9 bar steigt oder manuell.

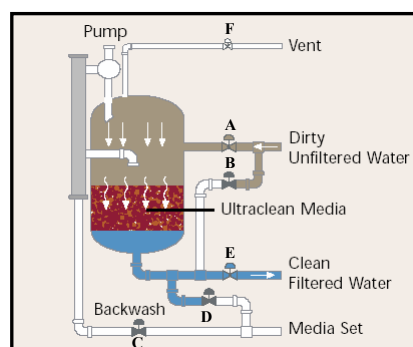


Abb. 3.22: Filtrationsvorgang

Die Rückspülung ist ein vierstufiger Vorgang.

1. A, F und E werden zugemacht und B geöffnet. Mit Hilfe der Flüssigkeit im Kessel und der Pumpe wird das Medium aufgewirbelt. Es entsteht im Kessel eine homogene Mischung aus Wasser, Medium, Öl, und Feststoffen. Das verschmutzte Medium und Wasser werden umgepumpt. Durch die Scherkraft wird das Medium von Öl und Feststoffen befreit. Das Aufwirbeln dauert nur ein paar Sekunden. (siehe Abb. 3.23). Das Ventil B ist geöffnet um das Aufwirbeln zu vereinfachen. Während dieser Phase fließt nichts durch die Anlage.

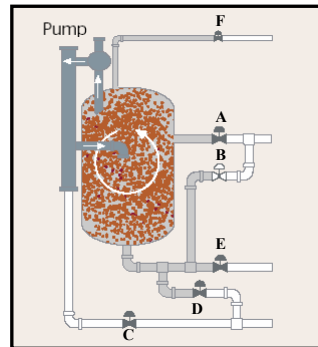


Abb. 3.23: Das Aufwirbeln des Mediums

2. Wenn das Bett aufgewirbelt wird, wird C geöffnet. Jetzt wird der Behälter von unten nach oben durchgeflossen. Das verschmutzte Wasser wird durch das C-Ventil abgeleitet. Das entnommene Wasser wird durch Eingangswasser ersetzt. Das Medium fährt wieder im Kessel. Diese Stufe dauert ca. zehn Minuten. (siehe Abb. 3.24)

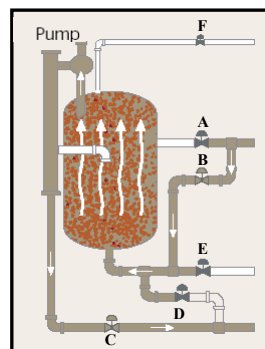


Abb. 3.24: Rückspülung

3. C und B werden zugemacht, die wird Pumpe ausgeschaltet, damit das Medium absetzt wird. A wird wieder geöffnet. (siehe Abb. 3.25)

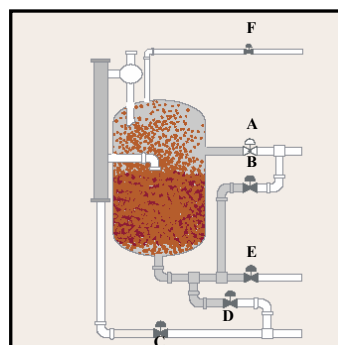


Abb. 3.25: Absetzung des Mediums

3. Ausgewählten Verfahren für die Pilottests

4. Zum Schluss werden die Leitungen gereinigt. Ventil D erlaubt die Entnahme von verschmutztem Wasser, das sich am Boden des Kessels ansammelt. Die Stufe erledigt auch eine Fertigstellung des Mediums, damit die Filtration effektiver wird. (siehe Abb. 3.26)

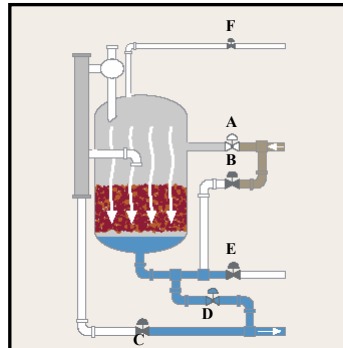


Abb. 3.26: Bettbefestigung und Leitungsspülung

Nach diesen vier Stufen beginnt wieder der Filtrationsvorgang. Insgesamt dauert die Rückspülung ca. zehn Minuten.

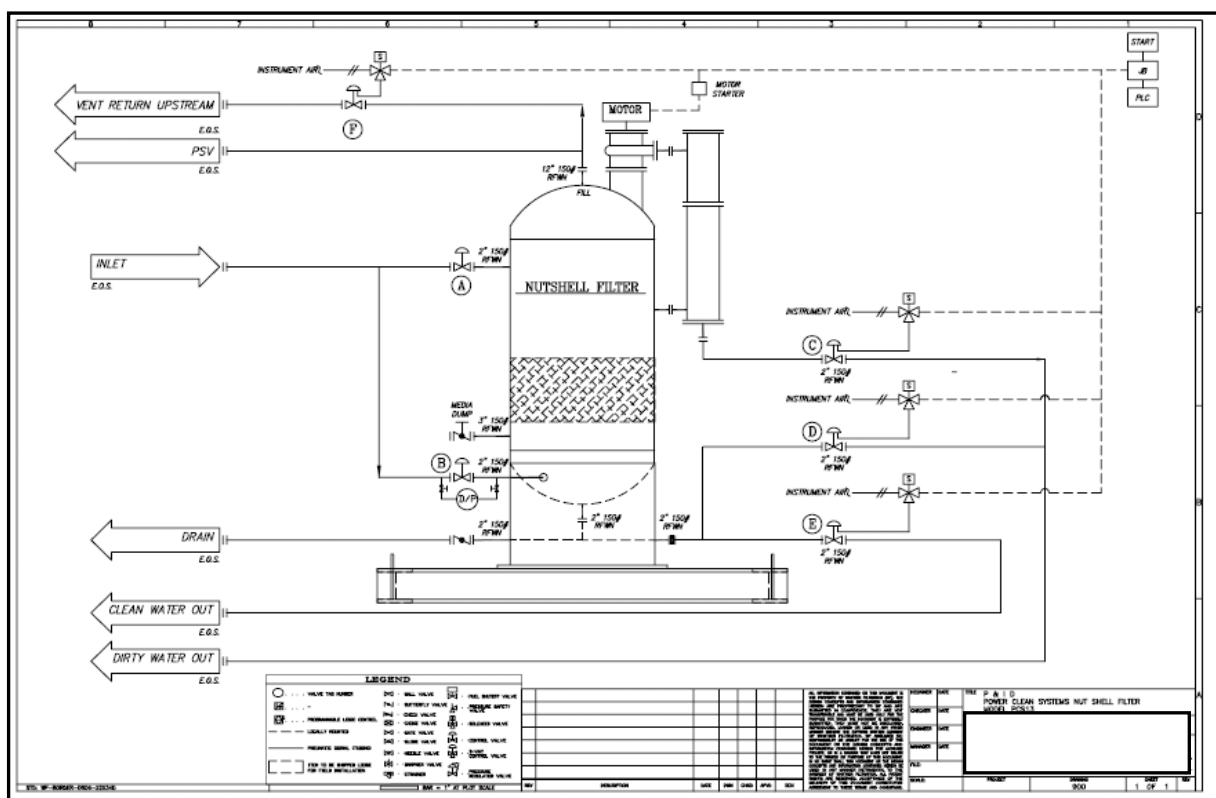


Abb. 3.27: Fließbild der Pilotanlage

3.5.2. Leistung

Die Flussrate pro Flächeneinheit beträgt 31,5 m³/m²h. Durch die Anwendung eines Walnussschalenfilters mit einer Betthöhe von 1,5 m kann man den Gehalt an Feststoffen und freien Kohlewasserstoffen um bis zu 2 mg/l senken. Der Walnussschalenfilter braucht keinen Chemikalienzusatz, um diese Reinigungswerte zu erreichen.

3.5.3. Pilotanlage

Krebs, die Firma, die die Hydrozyklone angeboten hat, hat auch eine Nussschalenfilterpilotanlage angeboten (siehe Abb. 27). Sie wird allen anderen Pilotanlagen als tertiäre Reinigungsstufe nachgeschaltet.

3.5.4. Vorteile

Vorteile

- kann die Öl- und Feststoffkonzentration um bis zu 2 ppm senken
- geringe Betriebskosten im Vergleich mit anderen Filtertechnologien
- erprobte Technologie
- wirkt auf Feststoffe und freies Öl
- braucht keinen Chemikalienzusatz
- funktioniert ohne Kontakt mit Sauerstoff

3.6. Zusammenfassung

Es wurden auch andere Firmen als die bisher genannten kontaktiert.

GE (General Electrics) ist ausgeschieden, da es ein Membranverfahren angeboten hat, das luftregenerierbar ist. Das widersprach unserer ersten Bedingung, also Betrieb ohne Kontakt mit Sauerstoff.

Veolia Water hat sofort eine große Gesamtanlage angeboten und keine Pilotanlage zur Verfügung gestellt.

Hydrozyklone, Nussschalenfilter und Coalescer wurden auch von USFilter angeboten. Die Pilottests wären hier aber deutlich teurer gewesen als ähnlichen Pilotanlagen.

Die Firma Graef, die einen Nussschalenfilter angeboten hätte, konnte keine Pilotanlage zur Verfügung stellen.

Die Firma Cetco hat eine Technologie ähnlich dem CFU von EPCON angeboten, aber zur Zeit gibt es keine verfügbare Pilotanlage.

Tab. 5 auf der nächsten Seite fasst die Technologien, die getestet werden, zusammen.

3. Ausgewählten Verfahren für die Pilottests

	Hydrozyklon	Coalescer	Voraxial Separator	CFU	Nussschalenfilter
Prinzip	Zentrifugalbeschleunigung	Koaleszenz	Zentrifugalbeschleunigung	Zentrifugal flotation	rückspülbarer Filter
Reinigungsebene	II	II	II	II	III
funktioniert ohne Sauerstoffkontakt	✓	✓	✓	✓	✓
keine beweglichen Teile	✓	✓	✗	✓	✓
Empfindlichkeit	Öl	Öl	Öl + Feststoffe	Öl + Feststoffe	Öl + Feststoffe
kein verbrauchbares Medium	✓	✗	✓	✗	✗
Druckverlust	3 bar	max. 1 bar	n/a	0,5 bar	max. 1 bar
KW-Konzentration am Ausgang	10 ppm	15 ppm	3,5 ppm (mit aufbereitetem Öl)	10 ppm (5 ppm)	2 ppm
Pilotanlagen-Verfügbarkeit	✓	✓	✓	✓	✓
OPEX	-	+/-	+/-	-	-
CAPEX	-	+/-	-	+	+
Firmen Referenz in der Flutwasseraufbereitung	✓	✓	✓	✓	✓

Tab. 5: Zusammenfassender Vergleich der ausgewählten Verfahren

4. Wassertestanlage

Die Eigenschaften des mit den zukünftigen Pilotanlagen aufbereiteten Wassers werden analysiert. Im Labor werden die Filtrierbarkeit, der Kohlenwasserstoff-, der Feststoff-, der Eisen- und der Sauerstoffgehalt bestimmt. Diese Analysen können aber nicht den Folgen in den Injektionszonen (Druckanstieg durch die Gesteinporenverstopfung) vorbeugen, wenn das aufbereitete Wasser in die Formationen injiziert wird.

Um die Injizierbarkeit des Wassers simulieren zu können, wurde eine Anlage entwickelt. Nach der Wasseraufbereitung in der zukünftigen Flutwasseranlage wird das Wasser zur Injektionssonde geleitet. Dort wird es in die Formation injiziert. Die Wassertestanlage soll diesen Bedingungen entsprechen. Sie wird im Testcontainer der Pilotanlage nachgeschaltet.

4.1. Leitungssimulation

Um die Injizierbarkeit eines aufbereiteten Wasser zu testen, müssen alle Bedingungen, die es in der Zukunft gibt, simuliert werden. Daher müssen die Leitungen zwischen Wasserflutanlage und Injektionssonden simuliert werden. Durch die lange Verweilzeit des Wassers (9,5 h) kann die biologische Aktivität eine Verschmutzung des Wassers verursachen. Diese Verschmutzungen können unerwünschte Phänomene in den Injektionssonden zur Folge haben. Die Simulation einer Verweilzeit erfolgt durch Anwendung eines Rohrs, das nach der gewünschten Verweilzeit ein bestimmtes Volumen hat und mit einem bestimmten Flussrate durchgeflossen wird. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Überlegung (Dimensionierung) des Rohrs und mit dem Nachprüfen, ob das überlegte Rohr der gewünschten Verweilzeit entspricht.

4.1.1. Theoretische Grundlagen

Literaturreferenz [18][19]

Hydrodynamische Verweilzeit

Die hydrodynamische Verweilzeit τ_h ist nur abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und dem Reaktionsvolumen V , d.h. sie ist unabhängig von der Strömungsart im Reaktor.

$$\tau_h = \frac{V}{Q} \quad (4.1)$$

τ_h = hydrodynamische Verweilzeit [h]

V = Volumen des Reaktors [m³]

Q = Volumenstrom [m³/h]

Das ideale Strömungsrohr

Unter einem Strömungsrohr versteht man ein kontinuierlich betriebenes zylindrisches Rohr, dessen Rohrlänge L im Verhältnis zum Durchmesser groß ist. Der Plug Flow Tubular Reactor (PFTR) zeichnet sich durch ein pfropfenartiges Strömungsprofil aus. In axialer Richtung tritt keine Vermischung auf, wohingegen in radialer Richtung keine Konzentrations- und Temperaturgradienten vorhanden sind, d.h. eine totale Durchmischung herrscht. Das ideale Strömungsrohr stellt in Bezug auf seinen Durchmischungszustand einen Grenzfall dar. Im idealen Strömungsrohr ist die Konzentration in der Strömungsrichtung vom Ort abhängig.

$$\begin{aligned} C &= f(x) \\ C(y)_x &= \text{Konst.} \end{aligned} \quad (4.2) \quad (4.3)$$

Beim PFTR gibt es keine axiale Vermischung. Hieraus folgt, dass alle in den Reaktor eintretenden Teilchen die gleiche Geschwindigkeit u haben. Aus diesem Grund, und unter Vernachlässigung des Diffusionsphänomens, werden die Eingangssignale in ihrer Form nicht verändert. Es erfolgt lediglich eine zeitliche Verzögerung um die hydrodynamische Verweilzeit τ_h . Beim PFTR ist die mittlere Verweilzeit gleich der hydrodynamischen Verweilzeit.

$$\tau = \tau_h \quad (4.4)$$

Verweilzeitbestimmung

Zur Untersuchung des Verweilzeitverhaltens eines kontinuierlich betriebenen Durchflussrohrs verwendet man ein einfaches Verfahren. Gibt man zu einem bestimmten Zeitpunkt $t = 0$ eine bestimmte Menge von Molekülen in den zu untersuchenden Reaktor (Markierungssubstanz, Tracer), so kann man am Reaktorausgang die Konzentration dieser Substanz in Abhängigkeit von der Zeit messen. Wird eine bestimmte Menge von Tracersubstanz gleichzeitig dem Reaktor am Eingang zugeführt, so spricht man von einer Stoßmarkierung (siehe Abb. 4.1).

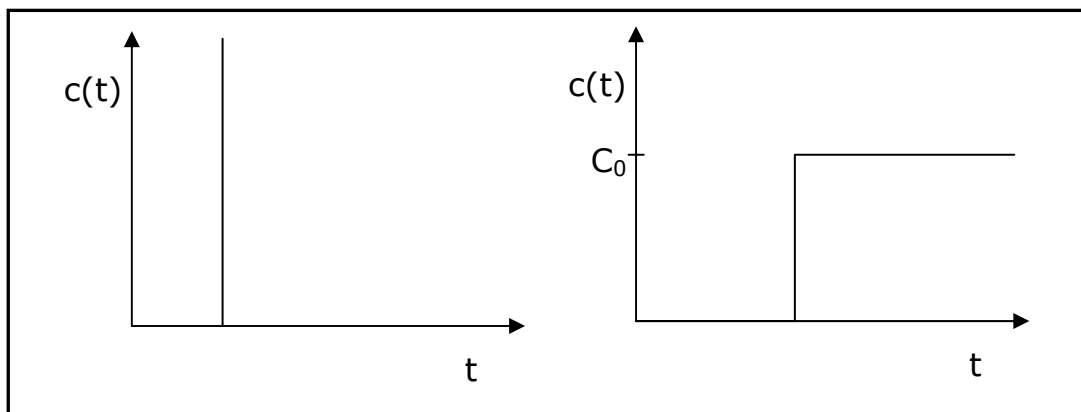


Abb. 4.1: Stoß- und Sprungmarkierung

Dosiert man ab einem bestimmten Zeitpunkt $t = 0$ eine Markierungssubstanz einer bestimmten Konzentration dem Zulaufstrom konstant dazu, so spricht man von der so genannten Sprungfunktion (siehe Abb. 4.1).

Definition der Verweilzeitverteilungsfunktion

Die relative Häufigkeit aller Moleküle der Markierungssubstanz mit gleicher effektiver Verweilzeit, dargestellt als Funktion der Zeit, nennt man Verweilzeitverteilung (Verweilzeitspektrum, $E(t)$). Diese Kurve gibt für einen beliebigen Zeitpunkt t an, welcher Bruchteil der eingebrachten Moleküle den Reaktionsraum (Bilanzraum) innerhalb der Zeit von t bis $t + dt$ verlässt, also eine Verweilzeit von zwischen t und $t + dt$ hat.

Berechnung der Verweilzeitverteilungsfunktion

Die Werte der Verweilzeitverteilungsfunktion zu einem beliebigen Zeitpunkt t erhält man, indem man die Konzentration der Markierungssubstanz zu diesem Zeitpunkt dividiert durch die Fläche unter der Konzentration-Zeit-Kurve.

$$E(t) = \frac{c(t)}{\int c(t)dt} \quad (4.5)$$

Das Verweilzeitspektrum erhält man als Ergebnis einer Stoßmarkierung.

Definition der Verweilzeitsummenfunktion

Durch Integration der Verweilzeitverteilungsfunktion erhält man die Verweilzeitsummenfunktion (Übergangsfunktion).

$$F(t) = \int_0^t E(t)dt \quad (4.6)$$

Die Verweilzeitsummenkurve erhält man als normiertes Ergebnis einer Sprungmarkierung, indem man die Konzentration der Markierungssubstanz zum Zeitpunkt t dividiert durch c_0 , also die Konzentration, die sich bei $t = \infty$ einstellt.

$$F(t) = \frac{c(t)}{c(t = \infty)} \quad (4.7)$$

Die Übergangsfunktion gibt an, welcher Bruchteil der zur Zeit $t = 0$ eingebrachten Markierungssubstanz den Reaktor zu einer beliebigen Zeit t wieder verlassen hat.

Bestimmung der Verweilzeit und der Varianz

Die mittlere Verweilzeit der Teilchen im Bilanzraum erhält man grundsätzlich, indem man die effektive Verweilzeit der Teilchen, gewichtet mit ihrer relativen Häufigkeit, über die Zeit integriert.

$$\tau = \int_0^{\infty} t \cdot E(t) dt \quad (4.8)$$

Bei dieser statistischen Mittelwertbildung (arithmetisches Mittel) wird also berücksichtigt, dass zu verschiedenen Zeitpunkten unterschiedlich viele Moleküle der Markierungssubstanz den Reaktor verlassen.

Die mittlere quadratische Abweichung σ^2 von t zeigt an, wie stark das reale Strömungsrohr, dessen mittlere Verweilzeit mit Hilfe einer Gleichung bestimmt wurde, vom idealen PFTR abweicht.

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - \tau)^2 \cdot E(t) dt \quad (4.9)$$

Aus der Verweilzeitsummenkurve F kann man auch die Verweilzeit bestimmen.

$$E(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (4.10)$$

$$\tau = \int_0^{\infty} t \cdot E(t) dt = \int_0^1 t \cdot dF(t) = - \int_0^1 t d(1 - F(t)) = \int_0^{\infty} (1 - F(t)) dt \quad (4.11)$$

4.1.2. Dimensionierung des Verweilzeitrohrs

Im Moment und in der Zukunft nach seiner Aufbereitung in der Wasserflutanlage wird das Wasser nach der Injektionssonden geleitet. Es gibt 68 von denen, die im Feld verteilt sind. Nach internen Daten der OMV verweilt das Wasser durchschnittlich in dieser Leitungen 9,5 Stunden. Das Rohr muss diese Verweilzeit erledigen.

Für die Länge des Leitungssimulationsrohrs wird aus praktischen Gründen 1,2 Meter gewählt. Die Flussrate des Wassers durch dieses Rohr ist dieselbe wie in der Formationssimulation, d.h. ein Liter pro Stunde ($Q=1$ l/h). Um die Plug-flow-Bedingungen zu nähern, muss der Ein- und Ablaufdurchmesser dem Rohrdurchmesser so nah wie möglich kommen. Es gibt einen Kompromiss zwischen Platzbedarf und Plug-flow-Strömung. Die benötigte Rohrabmessungen können bestimmt werden wie folgt:

$$\tau_h = 9,5h = \frac{V}{Q} \Rightarrow V = Q \cdot \tau_h \quad (4.12)$$

$$V = 0,0095m^3$$

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot L \Rightarrow r = \sqrt{\frac{V}{L \cdot \pi}} \quad (4.13)$$

$$r = 0,0502m$$

$$d = 0,10m$$

Das nun benötigte Material muss durchsichtig sein, um die biologische Aktivität zu beobachten. Es wurde Acrylglas ausgewählt. Dieses besteht aus Polymethylmethacrylat (PMMA), das ein thermoplastischer Kunststoff ist; es ist vor allem als Plexiglas bekannt. Die Durchsichtigkeit ist wichtig. Außerdem hat Acrylglas den Vorteil einer geringeren Dichte und einer gewissen Ölbeständigkeit. Die Deckel wurden auf POM-Kunststoff in der Werkstatt aufbereitet. POM ist Polyoxymethylen, ein thermoplastischer Kunststoff. Er ist einfach zu bearbeiten und besonders geeignet für Präzisionsteile. Die zwei Deckel werden mit metallischen Stangen befestigt. Die Dichtheit des Rohrs wird durch die Verwendung von Gummi-O-Ringen sichergestellt. (siehe Abb. 4.2)

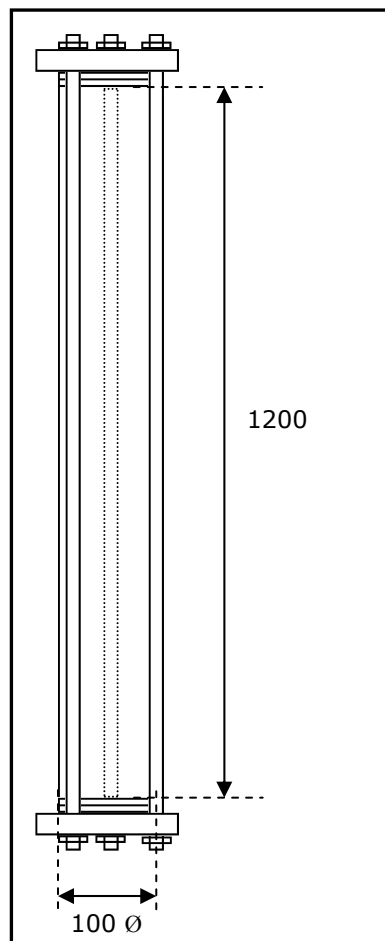


Abb. 4.2: Technische Zeichnung des Verweilzeitrohrs

4.1.3. Bestimmung der praktischen Verweilzeit

Versuch 1

Das Rohr steht senkrecht und das Wasser wird von unten mit einer Kolbenpumpe gesaugt. Das Wasser fließt von oben nach unten. Die Betriebstemperatur bei der Gewinnungsstation, bei der die Pilottests stattfinden werden, liegt zwischen 26°C und 40°C. Ein Temperaturgradient zwischen dem Wasser im Rohr und dem Wasser aus der Pilotanlage kann einen Konvektionseffekt verursachen. Dieser Konvektionseffekt kann die Verweilzeit verfälschen. Um es zu vermeiden, soll immer das heißere Wasser über das kältere Wasser gefördert werden. Deswegen ist das Rohr stehend und von oben nach unten durchflossen.

Versuchsanlage

Die praktische Verweilzeit, die das Rohr erlaubt, wurde im Labor untersucht. Die Anlage besteht aus dem Acrylrohr, das einer Verweilzeit entspricht, einer Kolbenpumpe und einer Messzelle, in der die Photometermesssonde taucht. Das Signal des Photometers wird dann aufgenommen. Das Rohr wird durch das Ventil 1 mit Leitungswasser aus einem Kanister versorgt. Die Stoßmarkierung erfolgt durch das Einpumpen einer Uraninlösung durch das Ventil 2, wenn das Ventil 1 zugemacht ist. (siehe Abb. 2.3)

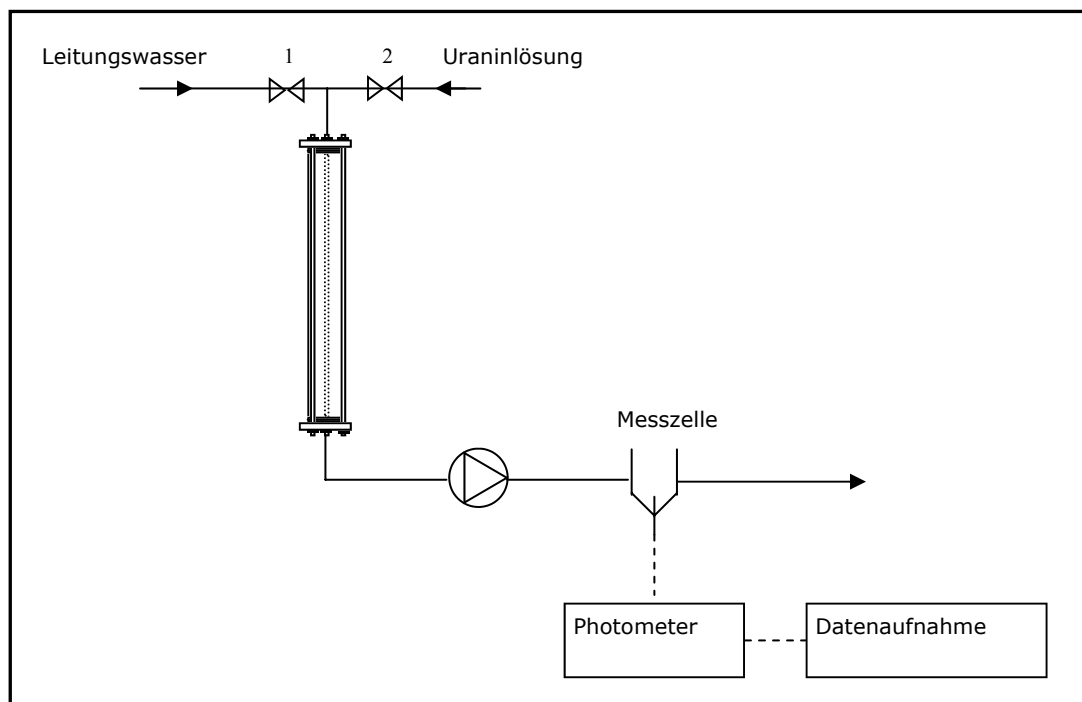


Abb. 2.3: Fließbild der Versuchsanlage für den Versuch 1

Als Markierungssubstanz wurde eine Uraninlösung mit einer Konzentration von 8.30 g/l aufbereitet. Diese Lösung wurde 20 Sekunden lang mit einer Flussrate von 1 l/h eingepumpt. Das entspricht einer Uranin-Menge von 0,0461 g. Wenn die zugegebene Uraninmenge sich in die 9,5 l verteilt, ergibt sich eine Konzentration von 0,004853 g/l.

Diese Konzentration ist noch deutlich sichtbar. Um den Durchbruch zu detektieren, wurde ein Photometer in einer gebastelten Zelle angewendet. Das Photometer misst die Absorbance (Extinktion). Aus ihm kommt ein Stromsignal, das im Datenlogger aufgenommen wird. Je höher die Uraninkonzentration ist, desto höher ist die Absorbance-Rate und desto kleiner ist das Stromsignal.

Ergebnisse

Ein Teil des Uranins ist sofort am Boden des Rohrs abgesunken wegen des Unterschieds zwischen der Uraninlösung und dem Leitungswasser. Nur ein Teil des Uranins ist direkt auf den Boden des Rohrs gesunken. Obwohl ein Teil des Uranins gesunken ist, bleibt eine deutlich sichtbare Uraninschicht richtig auf der Eingangsquerschnittsfläche des Rohrs verteilt. Im Laufe der Zeit hat diese Schicht verformt und eine bevorzugte Strömung wie in Abbildung 4.4 ausgebildet.

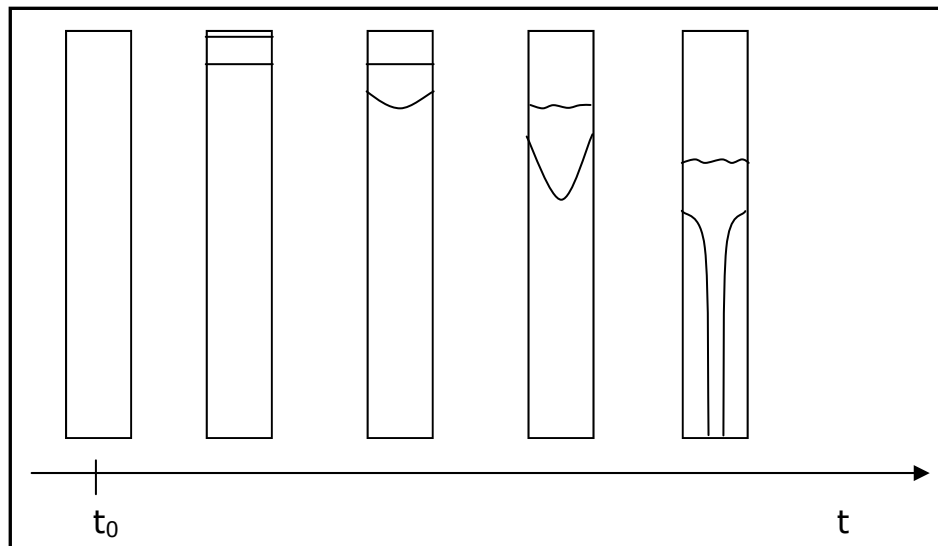


Abb. 4.4 : Uraninschicht im Lauf der Zeit

Diese bevorzugte Strömung, die beobachtet wurde, tritt wegen des Durchmesserunterschieds zwischen In-, Ablauf- und Rohrdurchmesser auf. Ein anderer Grund für dieses Phänomen ist die Art der verwendeten Pumpe: Kolbenpumpen fördern nicht eine konstante Rate, sondern eine Impulsrate.

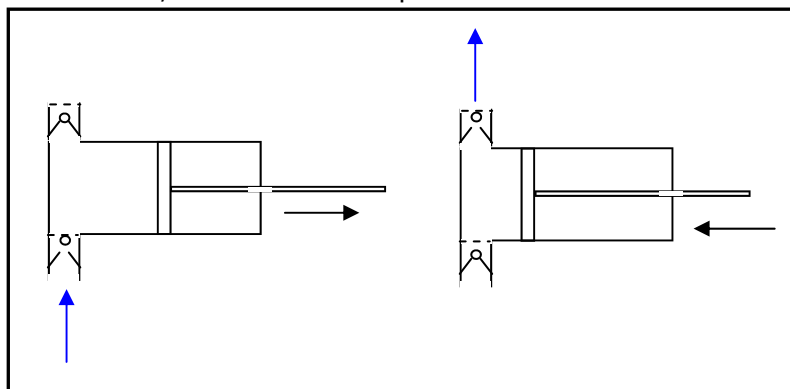


Abb. 4.5 : Funktionsprinzip einer Kolbenpumpe: Saugphase (l.) und Ablassphase (r.)

In der Saugphase saugt die Pumpe eine bestimmte Menge an Wasser aus dem Acrylrohr. In der zweiten Phase schließt sich wegen des Drucks das Eingangsventil und der Kolben lässt das Wasser durch das Ausgangsventil ab (siehe Abb. 4.5).

Gegen diese bevorzugte Strömung wurde am Eingang und Ausgang ein Vortex Breaker eingesetzt.

Das aus dem Photometer aufgenommene Signal (siehe Abb. 4.6) ist aber nicht interpretierbar. Normalerweise soll nicht die Durchbruchskurve sprunghaft sein, sondern kontinuierlich.

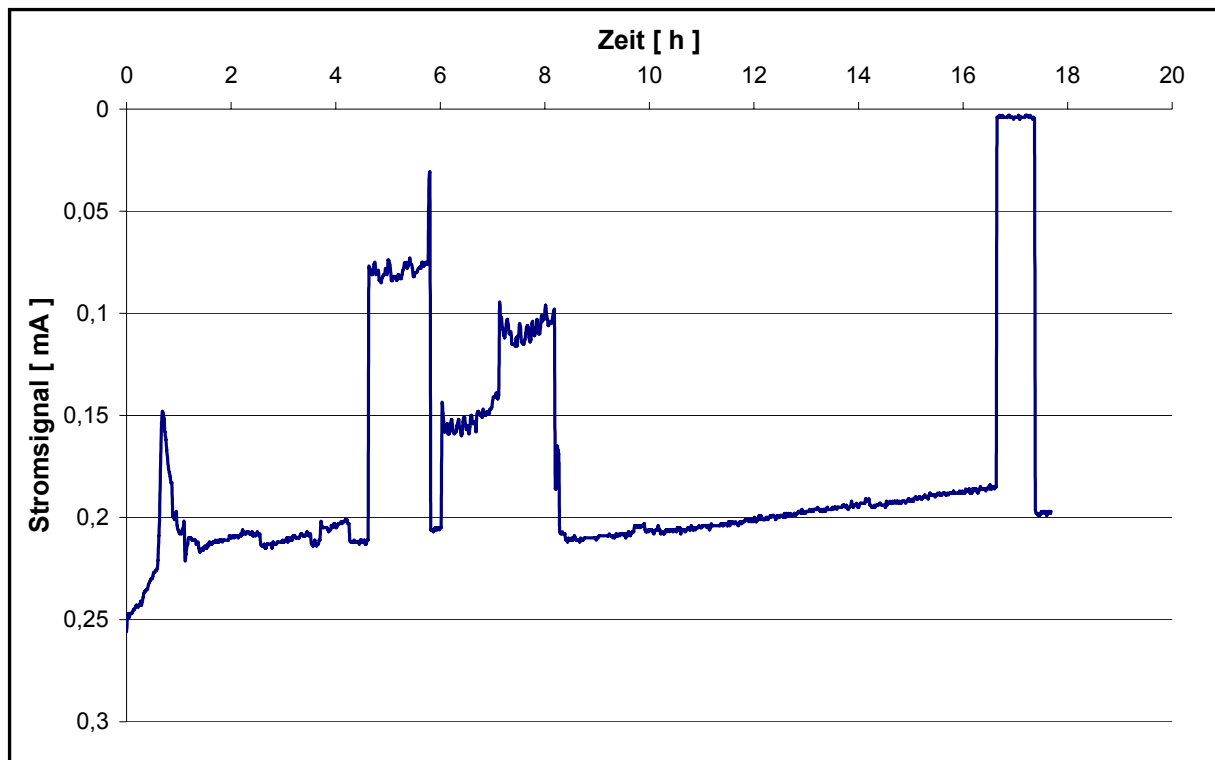


Abb. 4.6: Aufnahme des Stromsignals aus dem Photometer (Versuch 1)

Aus dieser Kurve kann folglich nichts Relevantes abgelesen werden. Nach diesem Versuch stellt sich die Frage, ob Uranin als Markierungsstoff, die mit einem Photometer detektiert wird, geeignet ist. Für den nächsten Versuch wurde doch das Uranin als Markierungsstoff verwendet. Auch wenn keine Verweilzeit bestimmbar mit Uranin ist, wird der Farbstoff zeigen, ob es eine bevorzugte Strömung gibt. Es wurde auch versucht, der Verweilzeit durch Temperaturmessung zu bestimmen.

Versuch 2

Am Eingang soll der Vortex Breaker die Strömung auf den ganzen Querschnitt regelmäßig verteilen und am Ausgang den Effekt der Saugphase vermeiden. Er besteht aus POM-Kunststoff und ist ein Konus mit einem Grundflächendurchmesser von 50 mm und einer Höhe von 15 mm. Jede Vortex Breaker wurde mit drei Stangen mit einem Gewinde auf jeden Deckel montiert, damit die Abstände zu Ein- und Ablauf verstellbar

sind. Sie wurden um 30 mm verstellt. Beide Konusspitzen sind nach oben gerichtet, um eine optimale Plug-flow-Strömung zu erreichen (siehe Abb. 4.7).

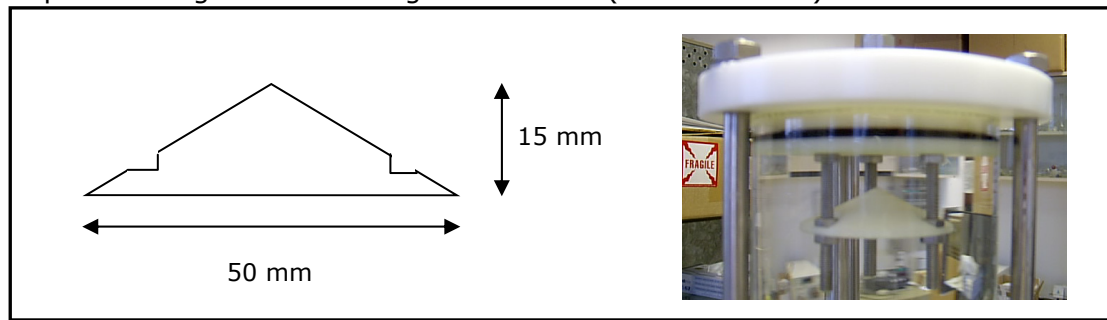


Abb. 4.7: Vortex Breaker

Versuchsanlage

Bei diesem Versuch wurde gleichzeitig die Verweilzeit mit der Uraninlösung (Stoßmarkierung) und mit einer Temperaturmessung untersucht (Sprungmarkierung). Die Temperaturmessung erfolgt durch die Anwendung von Thermofühlern des Typs K. Dieser besteht aus Ni und Ni-Cr. Die Temperatur beeinflusst die Spannung zwischen diesen zwei Metallen. Sie ergibt sich aus einer polynomischen Funktion der Spannung. Ein Wärmeaustauscher wurde eingesetzt, um eine konstante Eingangstemperatur zu halten. Die Eingangs- und Ausgangswassertemperaturen wurden gemessen und aufgenommen.

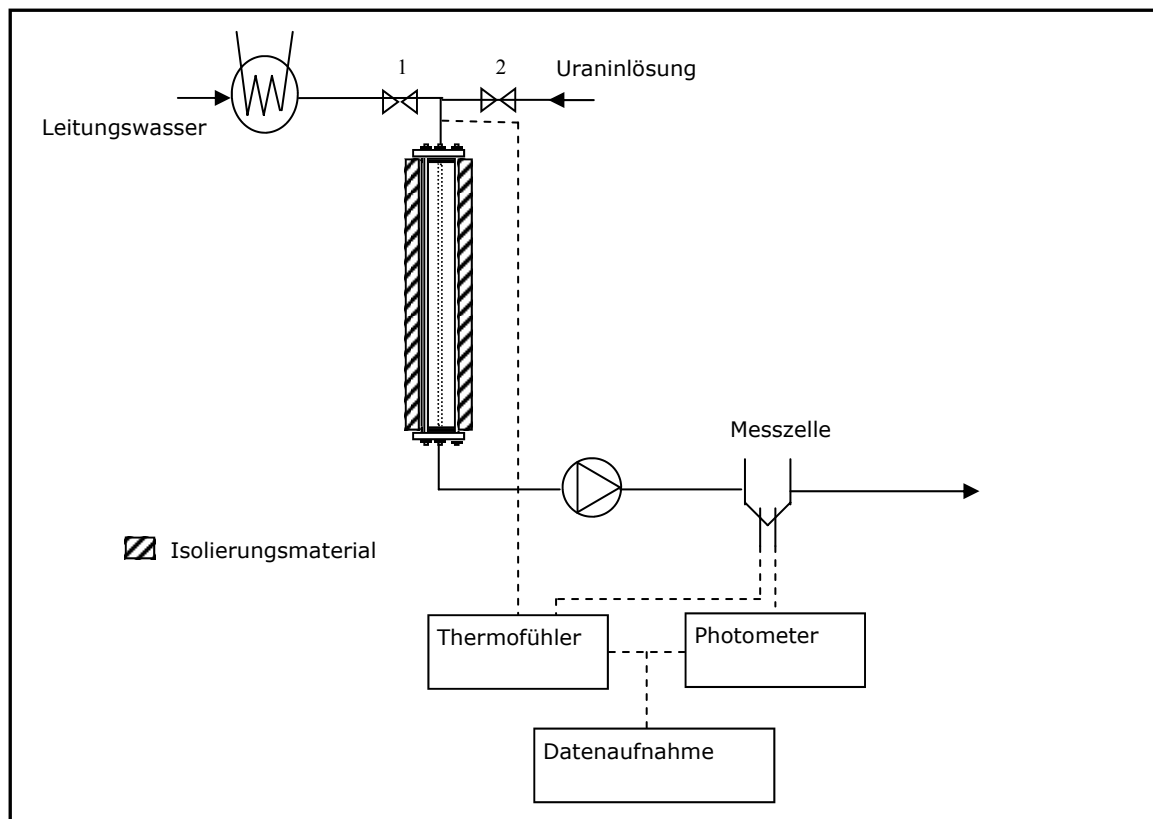


Abb. 4.8 : Fließbild der Versuchsanlage für den Versuch 2

Das Rohr wurde mit luftbefülltem Packungsmaterial gedämmt. Die Messung der Verweilzeit stützte sich somit auf den Temperaturdurchbruch. Das Rohr wurde mit

raumtemperiertem Wasser befüllt und der Thermostat auf 50°C eingestellt. Die Uraninzubage erfolgt durch Einpumpen der Lösung wie im Versuch 1. (siehe Abb. 4.8)

Eine genaue Verweilzeit würde gemessen werden, wenn die erste Front an heißem Wasser am Ausgang detektiert würde. Diese Front hat aber entlang des Rohrs ihre Wärme verloren, um die Isolierung zur Gleichgewichttemperatur zu bringen. Das Wasser, das danach geflossen ist sollte diese Temperatur halten. Das erste Phänomen (Isolierung zur Gleichgewichttemperatur zu bringen) resultiert in eine Verschiebung der Verweilzeit nach höherer Zeit (Die Kurve ist nach rechts verschoben). Das zweite Phänomen hat keinen Einfluss auf die resultierende Verweilzeit, sondern nur auf den Temperaturunterschied zwischen Eingang und Ausgang, wenn $t = \infty$. Mit idealer Isolierung sollen diese zwei Temperaturen gleich sein.

Ergebnisse

Auf der Abbildung 4.9 kann man bemerken, dass das Stromsignal höher wird (Umgekehrt Skala), wenn es normalerweise kleiner werden muss. Daher wurde es beschlossen, dass der Photometer nicht zuverlässig ist, um eine Verweilzeit zu bestimmen. Die Untersuchung der Verweilzeit durch der Anwendung Uranin aufgegeben. Obwohl es keine Information über die Verweilzeit gab, wurde keine bevorzugte Strömung beobachtet.

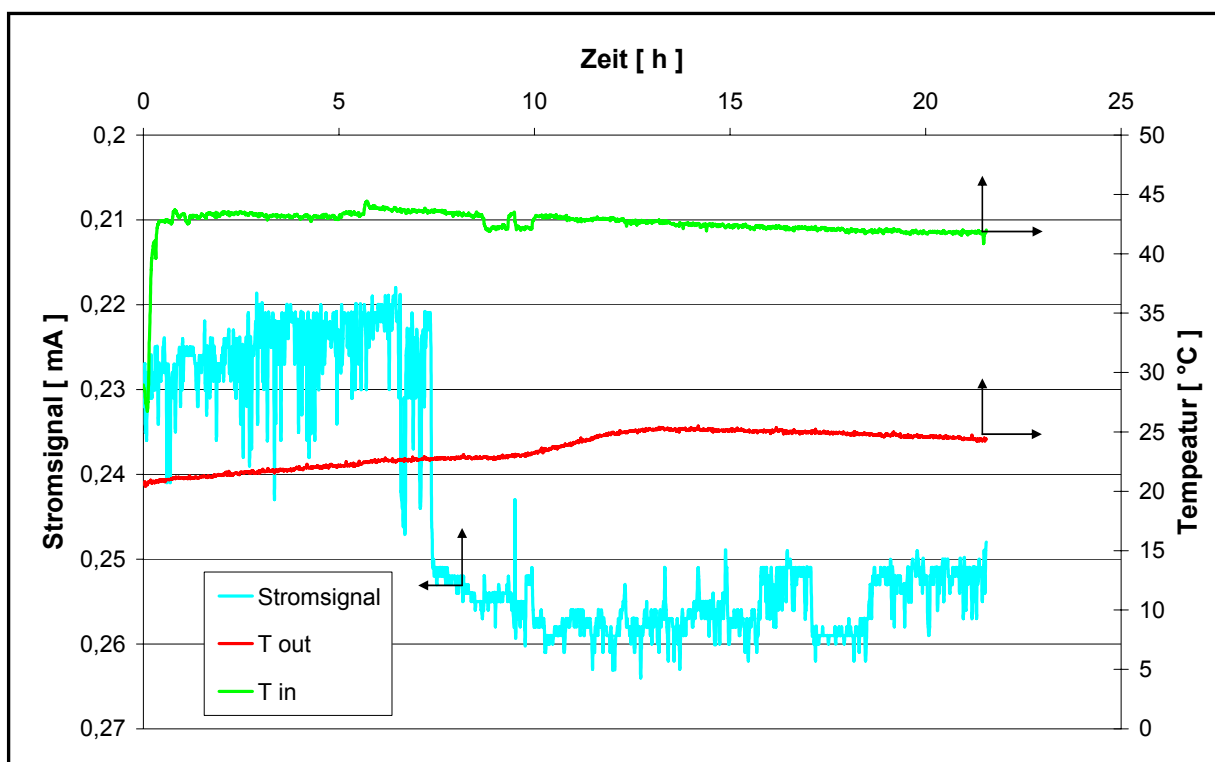


Abb. 4.9: Temperaturverlauf am Ein- und Ausgang

Die Temperaturverläufe am Ein- und Ausgang sind auch in Abb. 16 dargestellt. Die Ausgangstemperaturkurve ist S-förmig wegen des Diffusionseffekts. Die Diffusion wirkt wie folgt: Im Lauf der Zeit wird die Grenzfläche zwischen warmem und kaltem Wasser weniger sprunghaft. Durch die Diffusion erwärmt das heiße Wasser das kalte Wasser, und das kalte Wasser kühlt das heiße Wasser ab. Dieses Phänomen ist symmetrisch. Der

Wendepunkt (Punkt, an dem die Konkavität der Kurve sich ändert) bleibt an der ursprünglichen Grenzfläche (siehe Abb. 4.10).

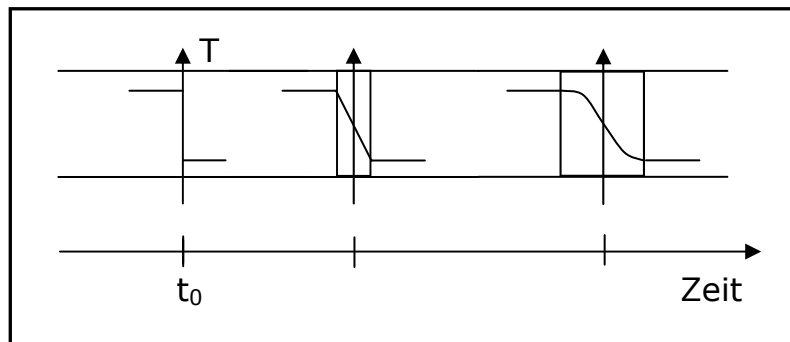


Abb. 4.10: Ausbreitung des Temperaturprofils wegen Wärmediffusion

Aus dieser Kurve und mit Hilfe der Formel (4.11):

$$\tau = \int_0^{\infty} t \cdot E(t) dt = \int_0^1 t \cdot dF(t) = - \int_0^1 t d(1 - F(t)) = \int_0^{\infty} (1 - F(t)) dt$$

wurde eine Verweilzeit von 11,8 Stunden berechnet. Dieser Wert ist deutlich höher als die hydrodynamische Verweilzeit (9,5 h) (Formel 4.1):

$$\tau_h = \frac{V}{Q}$$

Das Volumen ist 9,5 Liter und die Flussrate soll 1 Liter pro Stunde betragen. Das bedeutet: Die Flussrate ist nicht konstant geblieben und/oder die Wärmedämmung war nicht ausreichend, daher wurde die Kurve nach rechts verschoben. Für die nächsten Versuche wurde die Flussrate gemessen und das Rohr mit einer besseren Isolierung ausgerüstet.

Versuch 3

Um einen deutlicheren Durchbruch beobachten zu können, wurde das Rohr mit einer stärkeren Isolierung ausgestattet. Mit dieser Ausstattung soll der Wärmeverlust nach außen vermieden und eine glattere Durchbruchkurve, die auf der Zeitachse nicht zu sehr verschoben ist, erzeugt werden.

Versuchsanlage

Die Flussrate wurde ebenfalls genau gemessen. Um die Flussrate zu messen, legt man den Versorgungskanister auf eine Waage. Das Gewicht auf der Waage wird jede Minute neu aufgenommen (siehe Abb. 4.11). Die Flussrate ist der Winkel der Geraden, die das Gewicht im Laufe der Zeit darstellt.

Mit Hilfe die folgende Umrechnung kann man die Wassermenge in Liter berechnen:

$$Wassermenge[l] = \frac{Wassermenge[kg]}{\rho_{Wasser}[kg/m^3]} \times 1000 \quad (4.14)$$

Die Flussrate ist der Winkel der Geraden, die das Gewicht im Laufe der Zeit darstellt.

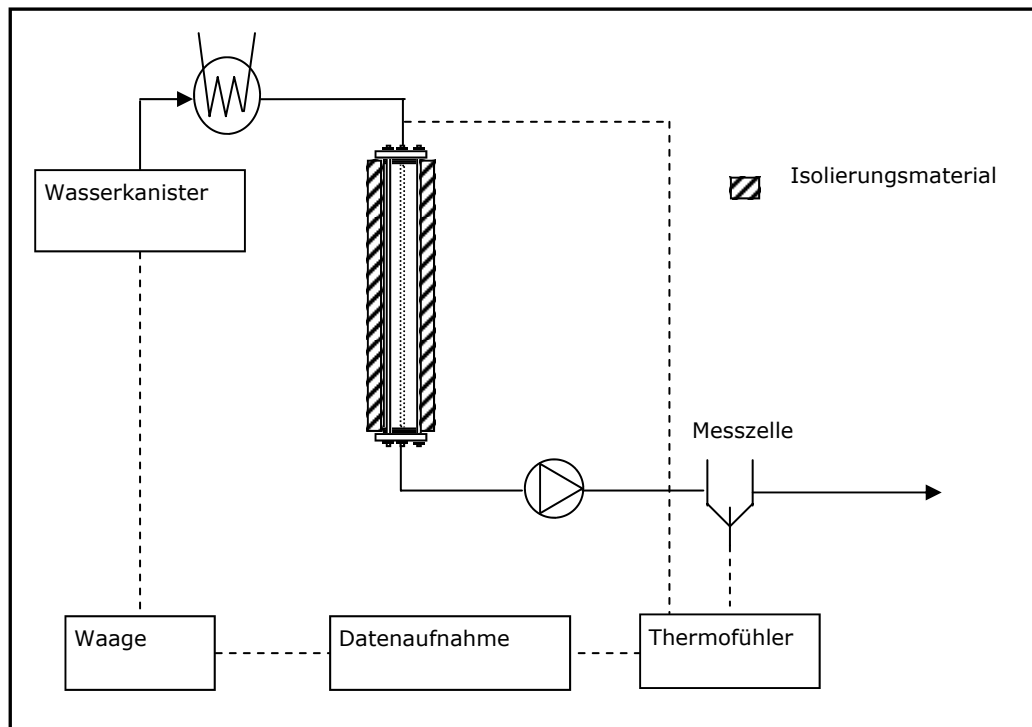


Abb. 4.11 : Fliessbild der Versuchsanlage für den Versuch 3

Ergebnisse

Die Flussrate war 0,9404 l/h (siehe Abb. 4.12). Das entspricht einer hydrodynamischen Verweilzeit (τ_h) von 10,51 Stunden.

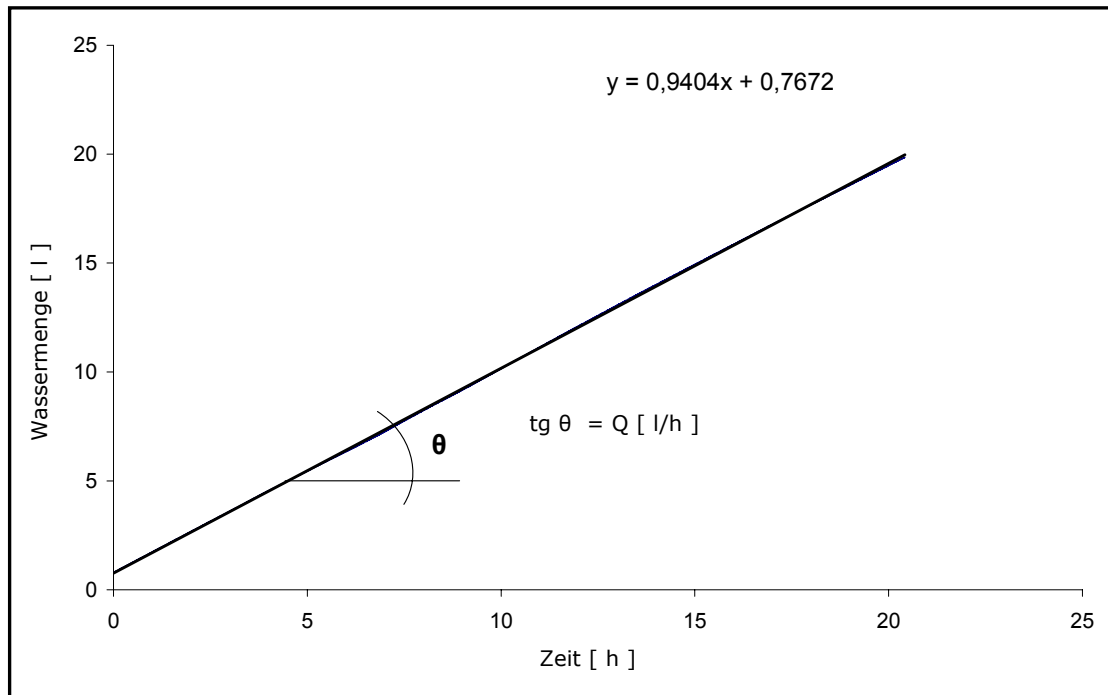


Abb. 4.12: Flussratemessung (Versuch 6)

Der Temperaturverlauf (siehe Abb. 4.13) ist schärfer und erlaubt eine einfachere Ablesung der Verweilzeit.

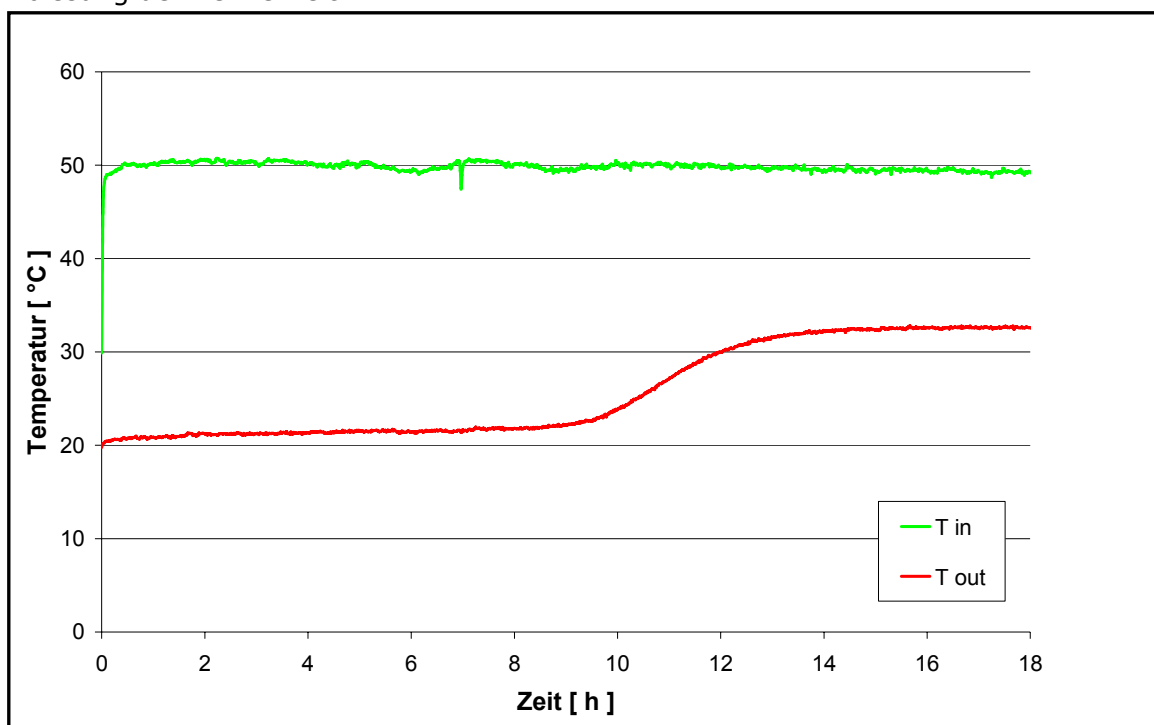


Abb. 4.13: Temperaturverlauf am Ein- und Ausgang mit starker Isolierung

Aus diesem Temperaturverlauf kann eine Verweilzeit von 10,98 Stunden berechnet werden. Obwohl das Rohr isoliert war, hat die Wärmekonvektion nach außen eine Rolle gespielt, wenn auch eine kleinere als in den anderen Versuchen. Die resultierende Verweilzeit wurde überschätzt. Mit einer Flussrate von 0,9404 l/h liegt die genaue

Verweilzeit zwischen der hydrodynamischen und dieser resultierenden Verweilzeit, d.h. zwischen 10,51 und 10,98 Stunden. Der mittlere Wert beträgt 10,76 Stunden. Dieser Wert wurde als Verweilzeit angenommen. Der Unterschied zwischen diesem Wert und der hydrodynamischen Verweilzeit ist 2,4 %.

Versuch 4

Versuchsanlage

In diesem Versuch wurde das Rohr mit 3%NaCl-Wasser befüllt, und danach wurde Leitungswasser hindurchgefahren. Der Durchbruch wurde mit einer Leitfähigkeitsmessungsapparatur gemessen. Je höher ist die Leitfähigkeit, desto größer wird das Stromsignal (siehe Abb. 4.14). Ziel dieses Versuchs war, das Konvektionsphänomen abzuschalten. Nur ein Diffusionsphänomen sollte die Kurve ausbreiten.

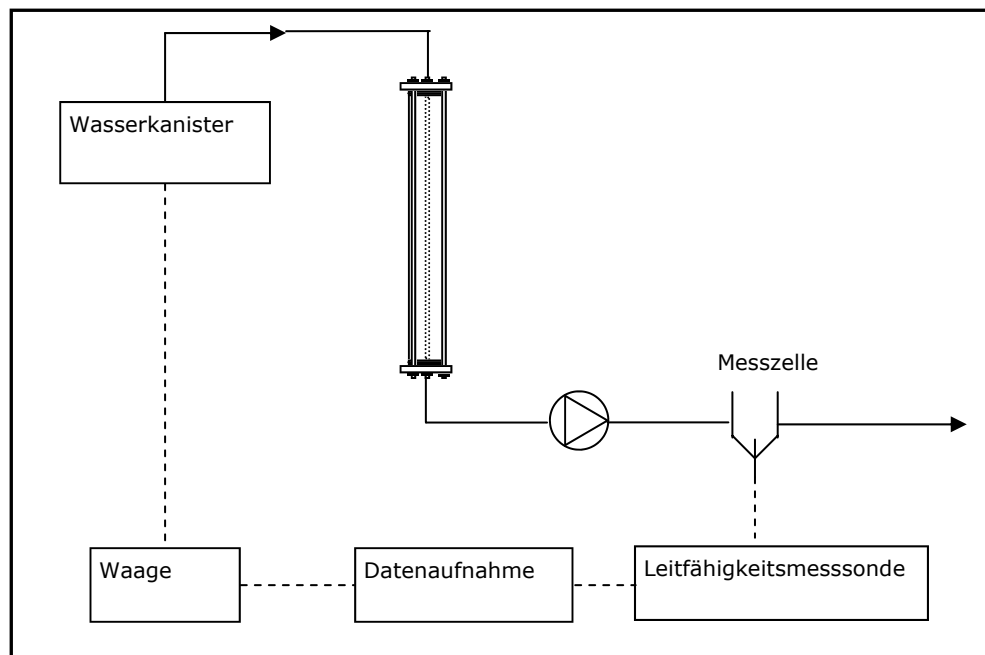


Abb. 4.14 : Fließbild der Versuchsanlage für den Versuch 4

Ergebnisse

Die hydrodynamische Verweilzeit für die Flussrate (1,0951 l/h) beträgt 8,68 Stunden (siehe Abb. 4.15).

Die Kurve ist deutlich und einfach zu interpretieren (siehe Abb. 4.16). Aus der Kurve kann man eine Verweilzeit von 8,71 Stunden berechnen. Die zwei Werte sind sehr nahe beieinander, was bedeutet, dass die Strömung kolbenähnlich war. Im Laufe der Beobachtung wurde festgestellt, dass eine Grenzfläche zwischen den beiden Wässern entstand. Die Energie dieser Grenzfläche hat die Durchmischung verhindert. Daraus lässt

sich schließen, dass die axiale Durchmischung sehr gering ist. Der Unterschied zwischen den zwei Verweilzeiten beträgt 1,8 Minuten, d.h. 0,35 % der hydrodynamischen Verweilzeit. Dieser Unterschied ist unbedeutend.

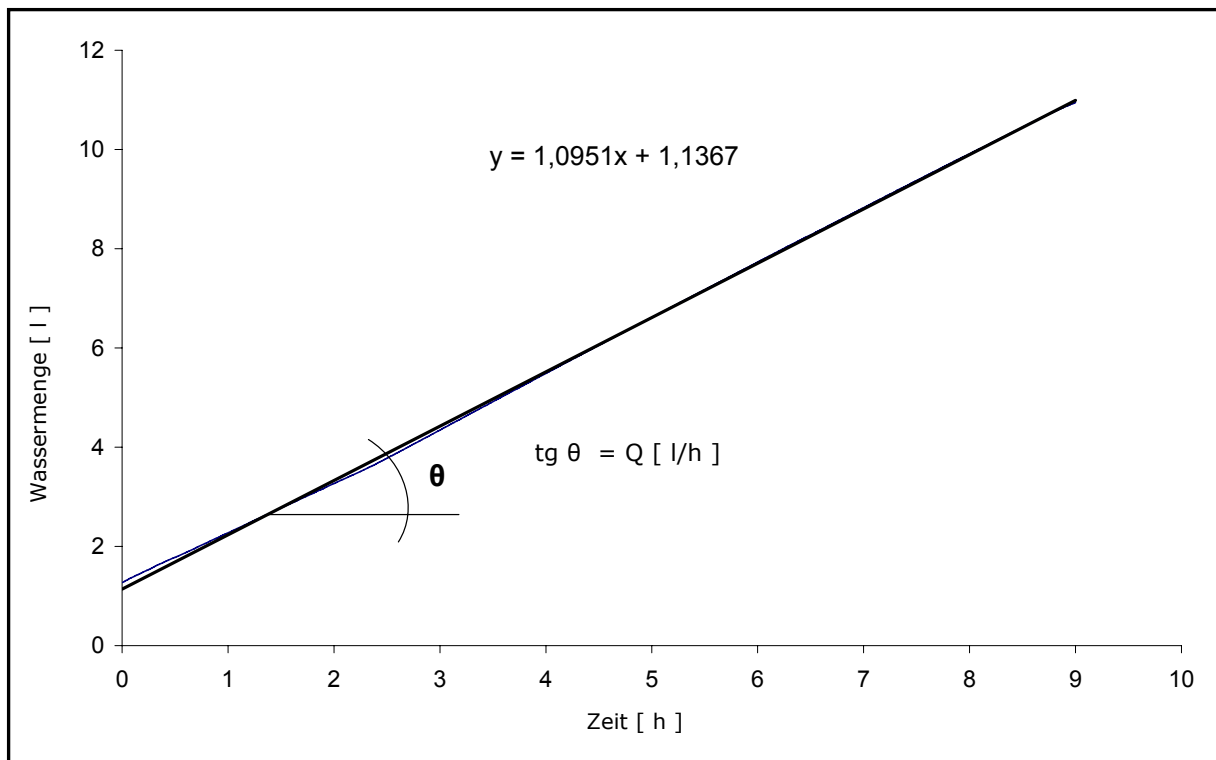


Abb. 4.15: Aufgenommene Gewichtsabnahme

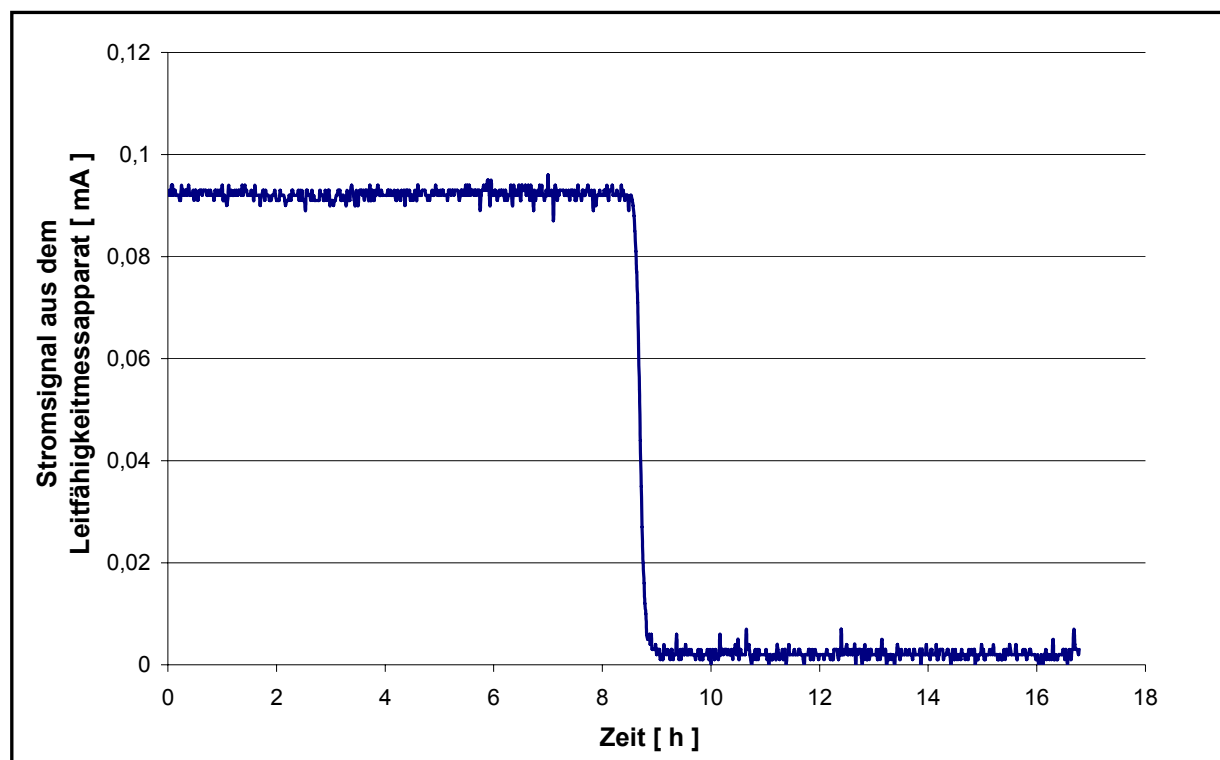


Abb. 4.16: Leitfähigkeitsmessung am Ausgang des Rohrs

4.1.4. Ergebnisse und Interpretation

Der Versuch 1 hat durch die Anwendung von Uranin eine bevorzugte Strömung angezeigt. Dieses Problem wurde mit zwei Vortex Breakers gelöst.

Der Farbstoff (Uranin) war ein guter Markierungsstoff, um die bevorzugte Strömung zu beobachten. Die drei letzten Versuche haben eine Schätzung der Verweilzeit ermöglicht. In diesen drei Versuchen hat sich gezeigt, dass das Wasser mit wenig axialer Durchmischung in das Rohr fließt. Versuch 3 lieferte das beste Ergebnis. Man muss berücksichtigen, dass die Kurve nach rechts verschoben ist. Deswegen wurde ein mittlerer Wert der hydrodynamischen Verweilzeit und der gemessenen Verweilzeit berechnet. Dieser Wert beträgt 10,76 Stunden mit einer Flussrate von 0,9404 l/h. Der Unterschied zwischen diesem Wert und der berechneten hydrodynamischen Verweilzeit ($\tau_h = 10,51$ mit $Q = 0,9404 \text{ l / h}$) entspricht 2,4 % der hydrodynamischen Verweilzeit. Wenn wir diese Abweichung auf die hydrodynamische Verweilzeit, die mit 1 l/h berechnet wurde, anwenden, ergibt sich eine mittlere Verweilzeit von 9,73 Stunden.

Dieser Wert gilt als endgültige Verweilzeit, die das Rohr erledigt, wenn es mit einer Flussrate von 1 l/h durchgeflossen wird.

4.2. Formationssimulation - Kernversuch

Die derzeitige Wasserflutanlage liefert sehr gute Ergebnisse. Sowohl die Öl- als auch die Feststoffkonzentration liegen bei ca. 1 ppm. Diese Konzentration hat seit fünf Jahren keinen Druckanstieg in den Injektionssonden verursacht. Der themenbezogenen Literatur und Fachleuten zufolge sind diese Werte ohne kostenintensive Membranverfahren nur sehr schwierig zu erreichen. Die Frage ist folgende: Würde ein höherer Gehalt an Feststoffen und Öl schlimme Folgen in der Injektionssonde verursachen? Da die Formationsschädigungen nicht reversibel sind und die Antwortzeit (Druckanstieg) sehr lang (von einem Monat bis hin zu mehreren Jahren) ist, wurde kein Versuch direkt in der Injektionssonde durchgeführt. Stattdessen wurde die Formation mit einem Kern simuliert.

Die Simulation einer Lagerstätte erfolgt durch einen Kernversuch. Obwohl dieser Versuch nicht normalisiert ist, wird er sehr oft für Flutwasseraufbereitung im Erdölbereich verwendet.

Die Ergebnisse eines Kernversuchs sind wertvoll, wenn sie miteinander verglichen werden. Bei der OMV wurde ein solcher das letzte Mal vor acht Jahren durchgeführt, als den biologische Reinigungsstufe in der Wasserflutanlage untersucht wurde.

Versuchsprinzip:

Aufbereitetes Wasser wird durch einen zylindrischen Kern gefahren. Der Kern besteht aus Berea-Sand und hat eine bestimmte Porosität bzw. eine bestimmte Durchlässigkeit (Darcy). Durch Wasserverschmutzungen steigt langsam der Förderdruck. Der Feststoff verursacht eine Verstopfung der Poren bzw. eine Kuchenbildung auf der Eingangsoberfläche. Das Öl wirkt somit nur auf die Permeabilität. Diese drei Phänomene treten auch in der Injektionszone auf.

4.2.1. Theoretische Grundlagen

Literaturreferenz [20][21]

Formationen bestehen aus porösen Medien, die als verknüpfte Kapillaren betrachtet werden können. Wenn Flüssigkeiten durch solche Medien fließen, können zwei verschiedene Strömungsarten auftreten:

Einphasenströmung

Linear Steady-State Flow

Unter Linear Steady-State Flow versteht man eine Einphasenströmung unter konstantem Druckgradienten, die durch das poröse Medium fließt. Diese ist eine stationäre Strömung, d.h.

$$\frac{\delta p}{\delta t} = 0 \quad (4.15)$$

p = Druck [Pa]

t = Zeit [s]

Absolute Durchlässigkeit

Durchlässigkeit ist die Fähigkeit eines porösen Mediums, von einer Flüssigkeit oder einem Gas durchflossen zu werden. Sie ist eine Eigenschaft des Mediums und ist daher unabhängig der Flüssigkeit.

Darcy'sches Gesetz:

$$\frac{Q}{A} = v = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (4.16)$$

Q = Flussrate [cm³/s]

A = Querschnittsfläche [cm²]

v = scheinbare Geschwindigkeit [cm/s]

k = absolute Durchlässigkeit, Darcy [D]

μ = dynamische Viskosität der Flüssigkeit [cP, Centipoise]

p = Druck [atm]

x = Dicke der Schicht, die durchgeströmt wird [cm]

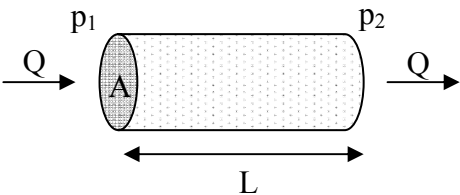
Diese Gesetz wurde in 1856 festgestellt, daher werden alten Einheiten (wie atm) verwendet.

Ein Darcy (1 D) ist eine sehr große Einheit. Es entspricht der Permeabilität eines ein Zentimeter langen Mediums, wenn eine Flüssigkeit mit eine Viskosität von 1 cP, mit einer Flussrate von 1 cm³/s·m² und mit einem Druckverlust von 1 atm unter viskoser Strömung durch ein Medium hindurchfließt, das zu 100% mit dieser Flüssigkeit gesättigt ist.

Um diese Gleichung zu verwenden, muss man sie mit Grenzbedingungen integrieren.

Für eine lineare Strömung einer inkompressiblen Flüssigkeit muss man verschiedene Annahmen machen:

- Steady-State-Bedingungen sind erfüllt.
- Poröses Medium ist zu 100% mit der Flüssigkeit gesättigt.
- Viskosität bleibt konstant.
- Temperatur bleibt konstant.
- Vorhandensein eines isotropischen Kerns.
- Der Kern hat eine konstante Porosität und eine konstante Durchlässigkeit.
- laminare Strömung
- Schwerkraft ist vernachlässigbar.

$$Q = \frac{kA(p_1 - p_2)}{\mu L} \quad (4.17)$$


Q = Flussrate [cm³/s]

A = Querschnittsfläche [cm²]

k = absolute Durchlässigkeit, Darcy [D]

μ = dynamische Viskosität der Flüssigkeit [cP, Centipoise]

p = Druck [atm] (1 - Eingang, 2 - Ausgang)

L = Länge des Mediums [cm]

Mehrphasenströmung

Unsteady-State Flow

Ein wichtiges Konzept in der Zweiphasenflüssigkeitstheorie ist die Sättigung. Wenn man mit zwei Phasen ein poröses Medium durchströmt, stellt die Sättigung das Verhältnis zwischen dem Porenvolumen, das mit einer Phase gefüllt ist, und dem gesamte Porenvolumen dar. Die Sättigung steht zwischen 0 und 1. Die Summe der Sättigung aller Komponenten ist gleich 1.

$$S_i\% = \frac{V_i}{V_{pore}} \quad (4.18)$$

Bei Zweiphasenströmungen kann man von Steady-State Flow sprechen, wenn die Flüssigkeitssättigungen konstant bleiben, bei konstantem Druckgradient. Wenn die Sättigung sich im Lauf der Zeit ändert, spricht man von Unsteady-State Flow. Dieser ist eine nichtstationäre Strömung.

$$\frac{\delta p}{\delta t} \neq 0 \quad (4.19)$$

Effektive und relative Durchlässigkeit

Wenn zwei nicht miteinander mischbare Flüssigkeiten durch einen Kern gefahren werden, kann das Darcy'sches Gesetz für jede Flüssigkeit verwendet werden.

$$v_{öl} = \frac{k_{öl}(p_1 - p_2)}{\mu_{öl}L}$$

$$v_w = \frac{k_w(p_1 - p_2)}{\mu_w L} \quad (4.20) \quad (4.21)$$

$v_{...}$ = scheinbare Geschwindigkeit [m/s]

$k_{...}$ = effektive Durchlässigkeit [D]

p = Druck [atm] (1 - Eingang, 2 – Ausgang)

μ = dynamische Viskosität der Flüssigkeit [cP, Centipoise]

L = Länge des Mediums [cm]

Die effektive Permeabilität ist ein relatives Maß der Durchströmung eines porösen Mediums, das mit mehreren nicht mischbaren Flüssigkeiten gesättigt ist. Diese effektive Permeabilität ist unterschiedlich für jede Phase und ist abhängig von der Sättigung, der Gesteinbenetzbarkeit und der Porengeometrie. Deswegen muss man die Sättigung mit jedem Permeabilitätsversuch angeben. So entspricht z.B. $k_{w(30)}$ einer effektiven Permeabilität des Wassers mit einer Ölsättigung von 30%. Die Wassersättigung ist gleich 100%, von denen wiederum 30% abgezogen werden.

Um die Kernparameter (Porengeometrie, Benetzbarkeit) zu berücksichtigen, wird die effektive Permeabilität durch die Permeabilität einer beliebigen Flüssigkeit bei 100% Sättigung in diesem Kern dividiert. Normalweise sollte die Permeabilität für jede Flüssigkeit bei 100% Sättigung gleich sein. Der resultierende Wert ist dimensionslos und ist daher relative Durchlässigkeit genannt (k_r)

$$k_{röl(30)} = \frac{k_{öl(30)}}{k}$$

$$k_{rw(30)} = \frac{k_{w(30)}}{k} \quad (4.22)(4.23)$$

$k_{röl(30)}$ = relative Öldurchlässigkeit, wenn das Medium 30%-Öl gesättigt ist [-]

$k_{rw(30)}$ = relative Wasserdurchlässigkeit, wenn das Medium 30%-Öl gesättigt ist [-]

$k_{öl(30)}$ = effektive Öldurchlässigkeit [D]

$k_{w(30)}$ = effektive Wasserdurchlässigkeit [D]

k = Absolute Durchlässigkeit [D]

4.2.2. Auftretende Phänomene

Die Abhängigkeit der relativen Durchlässigkeit von der Sättigung stellt die auftretenden Phänomene dar. Abb. 4.17 zeigt die relativen Durchlässigkeitskurven von Gas (CO_2) und Wasser in Abhängigkeit von der Wassersättigung.

Wenn der Kern zu 100% mit einer Flüssigkeit gesättigt ist, ist die relative Durchlässigkeit gleich 1. Wenn eine zweite Flüssigkeit gefahren wird, nehmen die Sättigung und die relative Durchlässigkeit ab.

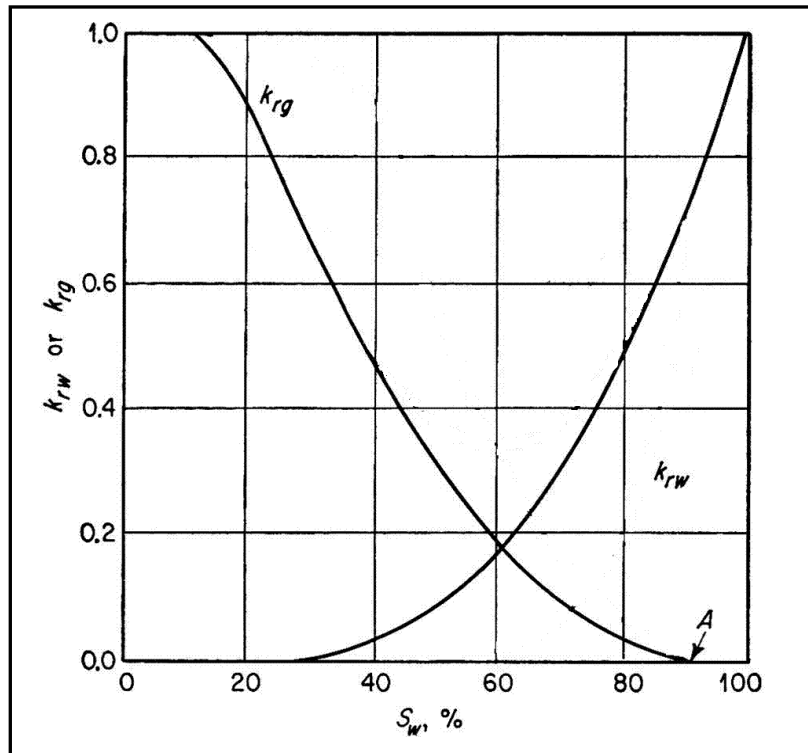


Abb. 4.17: Relative Durchlässigkeit in Abhängigkeit von der Sättigung

Ein wichtiger Punkt auf dieser Abbildung ist der Punkt A. Er wird Durchbruchpunkt genannt. Bei diesem Punkt wird die nicht sättigende Phase am Ausgang des Kerns auftreten. Der Literatur nach tritt dieser Punkt zwischen 0 und 30% Sättigung in der zweiten Phase auf. Man kann auch bemerken, dass, wie vorher gesagt, die Summe der relativen Durchlässigkeiten kleiner als 1 ist.

4.2.3. Versuch

Ein Kernversuch wird in der Zukunft für die Bewertung der Pilotanlagen mit dem aufbereiteten Wasser durchgeführt. Ein solcher Versuch erlaubt eine Bewertung der Injizierbarkeit des Wassers. Durch einen Versuch im Labor wird praktischerweise das Verhalten eines Kerns, der mit zwei Flüssigkeiten geflutet ist, untersucht. Es wurde auch probiert den Kern, der nur mit zwei Flüssigkeiten geflutet wurde, durch Spülen zu

regenerieren. Wenn der Versuch beweist, dass es möglich ist, könnte man den Einfluss der Feststoffe auf die Injizierbarkeit des Wassers bewerten. Dieser Versuch wird ohne Feststoff geführt und ist deswegen ein blinder Versuch.

Der Laborversuch wird wie folgend ablaufen.

1. Den Kern mit einer 3%NaClWasserlösung 100% sättigen
2. Durchlässigkeit mit einer 3%NaClWasserlösung messen
3. Den Kern mit einer Öl/Wassermischung fluten
4. Den Kern spülen
5. Die Durchlässigkeit mit einer 3%NaClWasserlösung messen

Wenn die in Punkt 2. und Punkt 5. gemessene Durchlässigkeiten gleich sind, müsste der Kern voll regenerierbar (entölbar) sein.

Installationen

Da es nicht möglich war, mit der Pumpe direkt Öl zu fahren, wurden zwei verstellbare Dosierpumpen (Kolbenpumpen) angewendet statt nur eine, die die Mischung fördert. Die erste fördert Wasser und die zweite Öl.

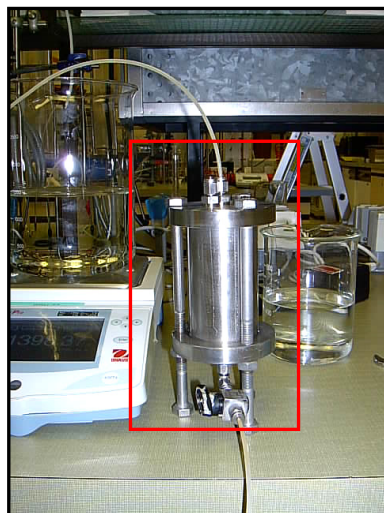


Abb. 4.18: Ölbehälter (Roter Rahmen). Das Wasser kommt unten rein und verdrängt das Öl nach oben (zum Kern)

Das Öl liegt in einem nach der Pumpe geschalteten Behälter (siehe Abb. 4.18). Wasser wird gepumpt und unten den Ölbehälter gefördert. Da Öl nicht mit Wasser mischbar und leichter als Wasser ist, wird nur Öl nach oben verdrängt. Die Wasserströmung und die Ölströmung werden vor dem Kern durch eine Keramikfritte gut gemischt (siehe Abb. 4.19).



Abb. 4.19: von unten nach oben gefluteter Kern

Der Druck vor dem Kern, die Gesamtmenge an hindurchgeführter Flüssigkeit und die Wassermenge, die Öl verdrängt hat, werden alle zehn Sekunden aufgenommen. Die geförderte Menge wird mit Hilfe von Laborwaagen gemessen (siehe Abb. 4.20 u. 4.21).

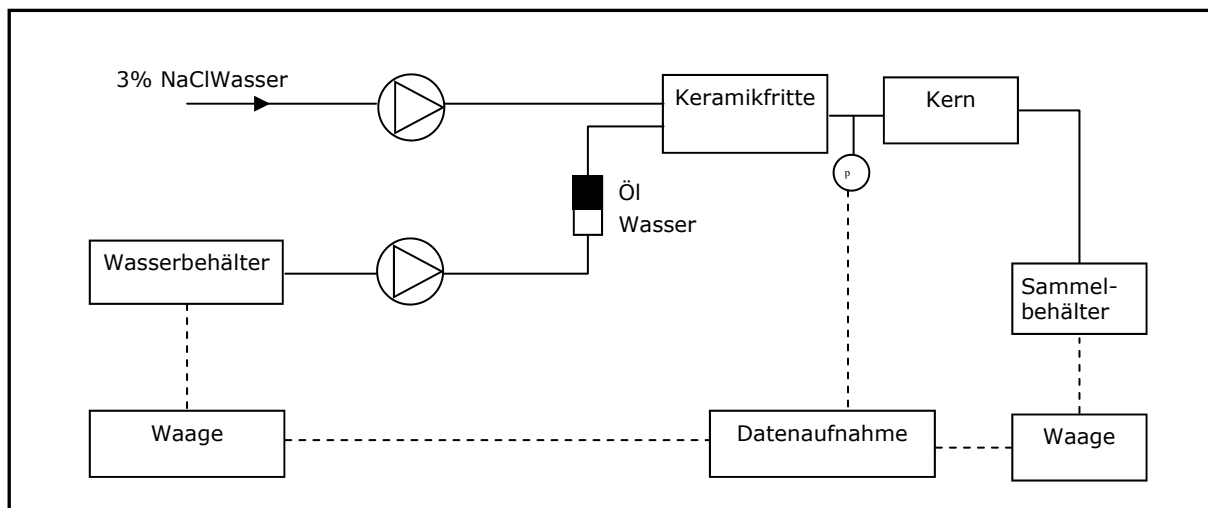


Abb. 4.20: Skizze der Versuchsanlage

Der angewendete Kern ist ein Berea-Kern. Berea ist ein Sand, der einfach verfügbar ist. Es werden keine Kerne aus der Formation des Wiener Beckens verwendet, weil das von dort stammende Material zu schwierig zu vergleichen wäre. Die OMV hat den Berea-Kern als Referenztestkern ausgewählt.

Destilliertes Wasser mit 3% NaCl wird als Sättigungsphase angewendet. Es wird Salzwasser benötigt, um die Kernschädigung zu vermeiden. Mit süßem Wasser reagiert der Ton und es ist kein Steady-Flow erreichbar ($\delta p / \delta t = 0$). Außerdem enthält die Formation Salzwasser. Das Wasser wird mit einem $0,45\mu\text{m}$ -Filter filtriert, um alle Feststoffe, die schädlich für die Pumpe und den Versuch sind, abzufiltrieren.

Als Öl wird Gasöl, ein leichtes Öl mit geringer Viskosität, verwendet.

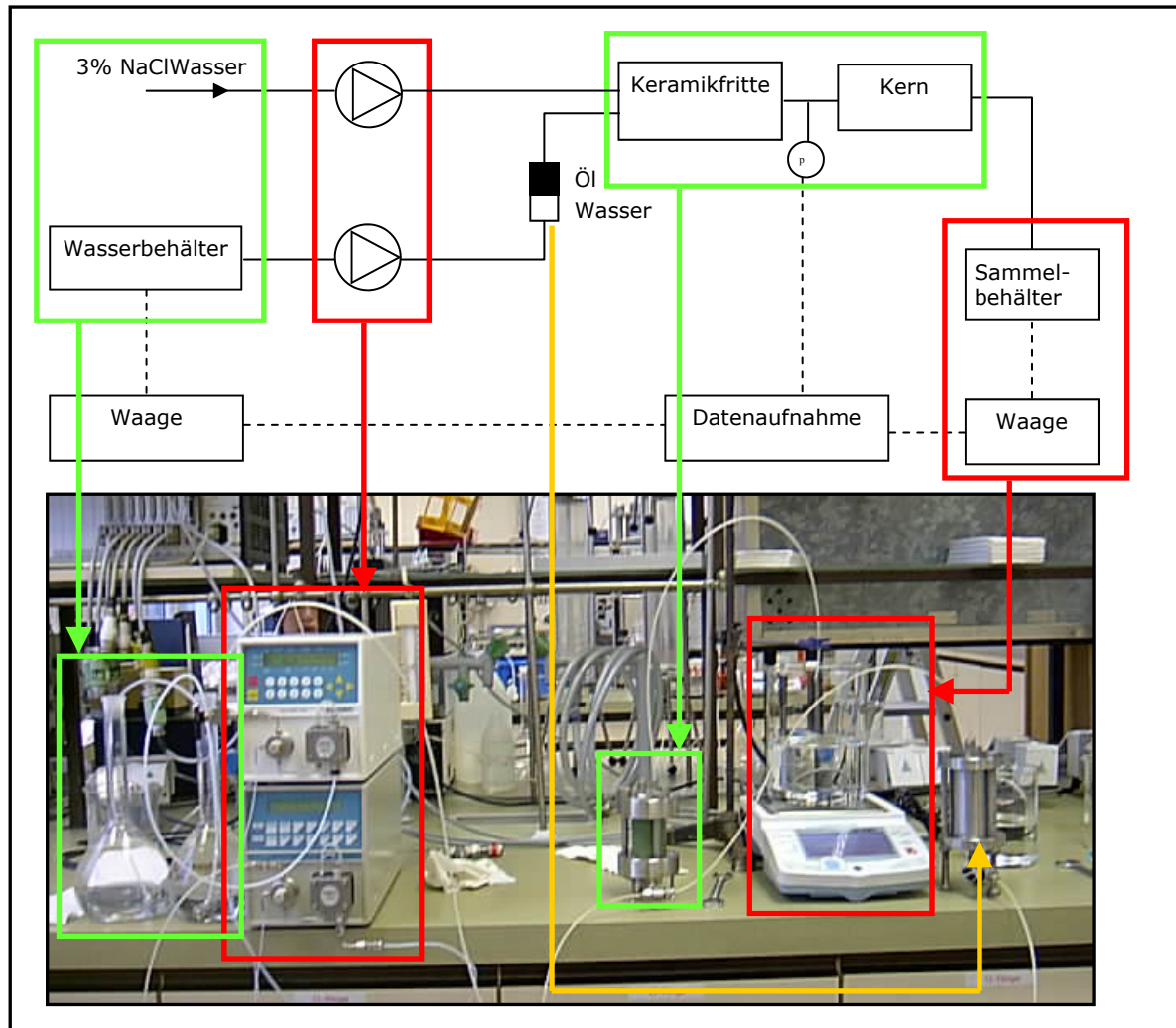


Abb. 4.21: Versuchsanlage

Kernvorbereitung und Vorberechnungen

Vor Versuchsbeginn sollte der Kern mit 3% NaCl-Wasser gesättigt werden. Dieser Vorgang wird unter Vakuumbedingungen erledigt und dauert eine Nacht lang.

Das Porenvolumen wurde auf Basis des Gewichtsunterschieds vor und nach der Sättigung berechnet. Das Porenvolumen ist das Volumen, das das Wasser einnimmt. Es wird so berechnet:

$$V_{\text{Pore}} = \frac{\text{Gewicht}_{\text{Gesättigt}} - \text{Gewicht}_{\text{Trocken}}}{\text{Dichte}_{3\% \text{ NaClWasser}}} \quad (4.24)$$

Die Dichte des Wassers wurde mit einem Handdichtemessgerät gemessen und liegt bei $1,019 \text{ g/cm}^3$. Die Porosität ist das Verhältnis der Porenvolumina und der Gesamtvolumina.

$$Porosität\% = \frac{V_{pore}}{\pi * \frac{d^2}{4} l} * 100 \quad (4.25)$$

d = Durchmesser des Kerns [m]

l = Länge des Kerns [m]

Für unseren Kern wurde 11,1 cm³ Porenvolumen berechnet. Das bedeutet eine Porosität von 24,04%. Die Öldurchbruchzeit kann abgeschätzt werden. Der Theorie nach tritt der Öldurchbruch spätestens dann auf, wenn eine Menge Öl von etwa 30% des Porenvolumen (V_{pore}) gefahren wurde. In unserem Fall entspricht das 3,3 cm³.

Die Öldichte beträgt 0,807 g/cm³.

Versuchsbedingungen

Wasserflussrate Q_{Wasser} : 0,017 ml/min (≈ 1 l/h)

Ölflussrate Q_{Öl} : 0,03 ml/min = 24 mg/min

Der Wasserflussrate ist aufgrund des Drucks begrenzt. Wenn eine zu hohe Wasserflussrate eingestellt wird und das Wasser Verschmutzungen enthält, kann der Druck über 100 bar liegen. Eine Flussrate von 1l/h sollte normalerweise den Druck unterhalb von 100 bar halten, auch wenn das Wasser verschmutzt sein könnte (wie es nach der Pilotanlage zu erwarten). Die Ölflussrate sollte sich der Ölkonzentration eines aufbereiteten Wassers so weit wie möglich nähern; sie ist aber durch die Pumpeneigenschaften (Pumprate) begrenzt.

Die Ölkonzentration wird berechnet wie folgt:

$$ppm_{\text{Öl}} = \frac{mg_{\text{Öl}}}{l_{\text{Wasser}}} = \frac{Q_{\text{öl}}}{Q_{\text{wasser}}} = \frac{24}{0,017} \quad (4.26)$$

$$ppm_{\text{Öl}} = 1411 ppm$$

Auf Grundlage dieser Daten kann man die Öldurchbruchzeit (t_{Durchbruch}) annäherungsweise berechnen:

$$t_{\text{Durchbruch}} = \frac{30\% V_{\text{Pore}}}{Q_{\text{Öl}}} \quad (4.27)$$

$$t_{\text{Durchbruch}} = \frac{3,3 ml}{0,03 \frac{ml}{min}} = 110 min$$

Zunächst wird nur 3%NaCl-Wasser gefahren. Wenn ein Steady-Flow erreicht wird ($p = \text{konst.}$), wird eine Öl-Wasser-Mischung gefahren. Dann wird der Kern mit 3%NaCl-Wasser gespült, und schließlich wird er rückgespült. Das Ziel dieses Versuches ist, zu überprüfen, ob es möglich ist, den Anfangsdruck nur mittels Spülung und Rückspülung wieder zu erreichen.

4.2.4. Bewertungsvorgang

Um die Ergebnisse zu bewerten, werden die Daten in einer Grafik dargestellt. Zwei Parameter sind wichtig: einerseits der Druck und andererseits die Ölflussrate in Abhängigkeit von der gesamten durchgefahrenen Menge an Flüssigkeit, auf das Porenvolumen V_{pore} bezogen. Diese dimensionslose Größe stellt theoretische dar, wie viele mal wurde das Porenvolumen durchgeflutet wird.

In diesem Fall ist 1 PV gleich $11,1 \text{ cm}^3$ oder $0,61 \text{ min}$. Das gesamte gefahrene PV wird mit Hilfe der Flussrate, der Porosität und der Wasserdichte berechnet.

$$PV = \frac{\frac{\text{Wassermenge}[g]}{\text{Wasserdichte}[g/cm^3]}}{V_{\text{pore}}[cm^3]} \quad (4.28)$$

Abbildung 4.22 zeigt den Druckverlauf des Kernversuches.

Es zeigt sich, dass das gefahrene Ölvolumen nicht linear ist (rote Kurve). Hierfür gibt es zwei mögliche Gründe: Die Flussrate war zu gering für die Pumpe, und/oder die Waage konnte aufgrund der geringen Flussrate die Gewichtabnahme nicht kontinuierlich detektieren.

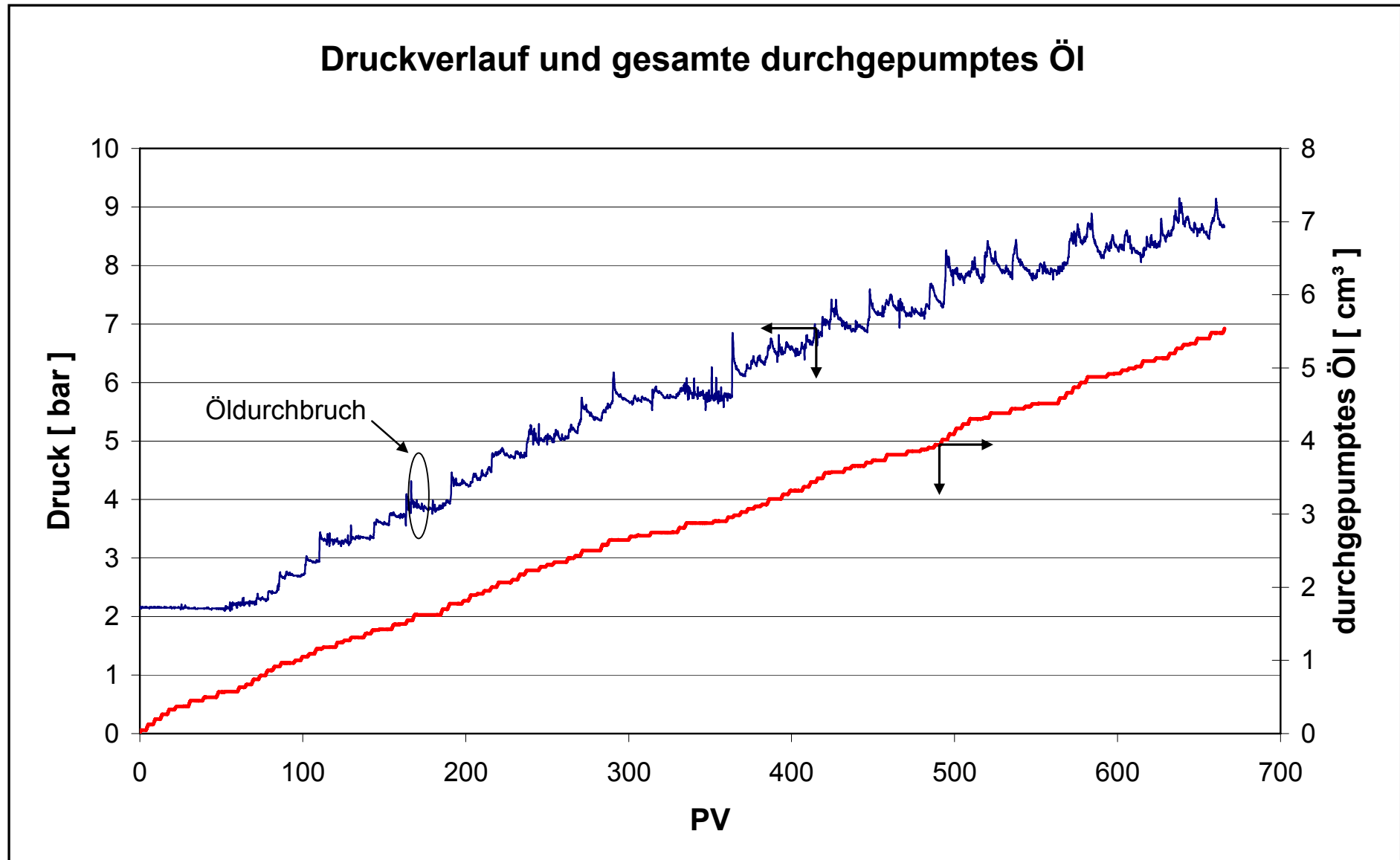


Abb. 4.22: Druckverlauf des Kernversuchs und geförderttes Öl

Wasserdurchlässigkeit

Der Kern ist mit 3% NaCl-Wasser 100% gesättigt. Jetzt wird das Sättigungsmedium (3% NaCl-Wasser) durchgepumpt. Die Durchlässigkeit, die sich während dieses Versuchs messen lässt, ist die Durchlässigkeit des Kerns, wenn er sauber ist, d.h. kein Öl oder Feststoffe wurden durchgepumpt. Dieser Wert ist der Referenzwert des Versuchs, der nach der Spülung wieder erreichbar sein sollte.

3%NaCl-Wasser wurde durchgepumpt, bis ein konstanter Druck erreicht wurde (siehe Abb. 4.23).

Die Wasserflussrate wurde nachgeprüft und beträgt 16,9 ml/min.

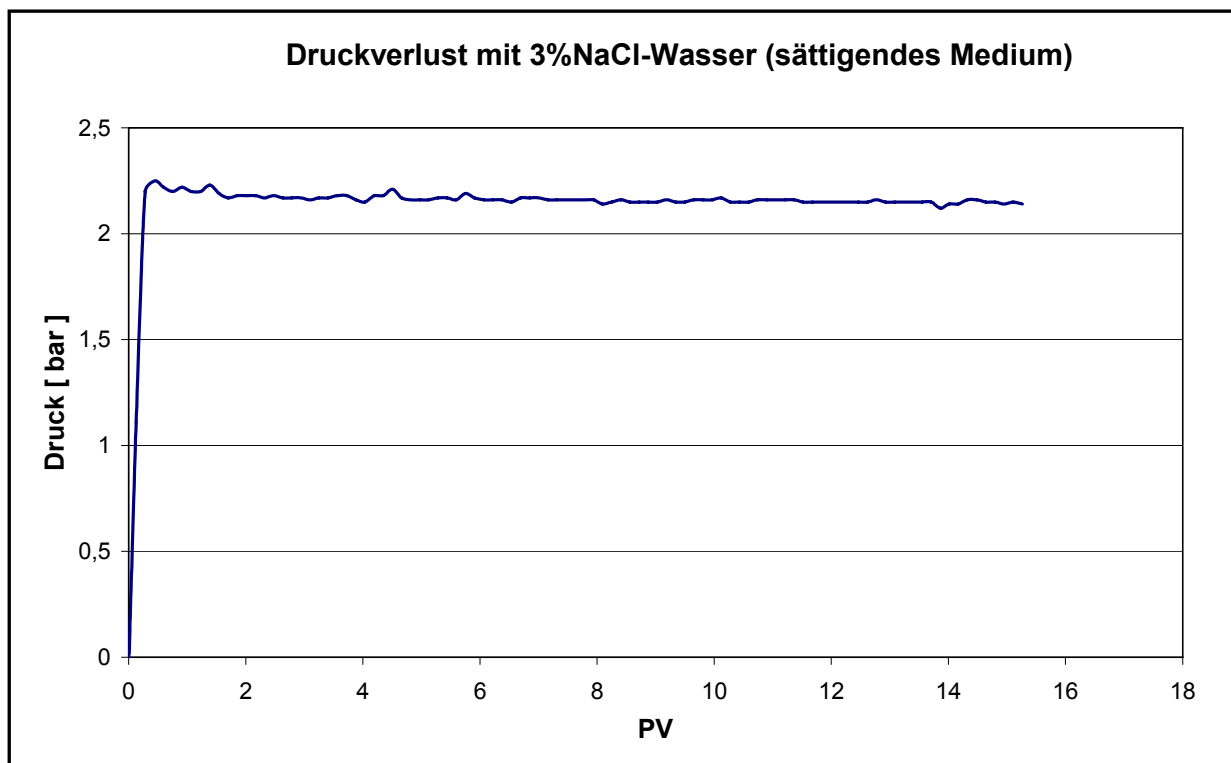


Abb. 4.23: Druckverlauf der ersten Sättigung

Mit diesem Druck (2,15 bar) und dieser Flussrate kann man die Durchlässigkeit berechnen. Sie beträgt 137,57 mD. Dieser Wert wurde die folgende Gleichung berechnet:

$$k = \frac{Q * \mu * l * 1000 * 1,01325}{\frac{d^2 * \pi}{4} * 60 * \Delta p} \quad (4.29)$$

k = Durchlässigkeit [mD]

Q = Durchflussrate [ml/min]

μ = dynamische Viskosität des Durchflussmediums [mPa·s]

l = Kernlänge [cm]

d = Kerndurchmesser [cm]

Δp = Differenzdruck vor-nach dem Kern [bar]

1000 = Umrechnungsfaktor Darcy auf Millidarcy [-]

1,01325 = Umrechnungsfaktor bar auf Atmosphäre [-]

Druckanstieg

Das Öl wird langsam das Porenvolumen einnehmen. Die Viskosität des Öls verursacht einen größeren Druckverlust. Die Durchlässigkeit nimmt ab. Das Öl wurde erst nach 171 PV bzw. 1,6 cm³ Öl am Ausgang beobachtet. Dies ist der Durchbruchpunkt. Der Kern ist zu 15% ölgesättigt. Dieser Wert stimmt mit den Annahmen der Theorie überein (Punkt A zwischen 0 und 30%). Nach diesem Öldurchbruch steigt der Druck noch weiter, weil die Gleichgewichtsättigung noch nicht erreicht ist (siehe Abb. 4.24).

Wenn der Kern nur mit einer Mischung aus Öl und Wasser durchgeflutet wird, soll der Druckverlauf auf einen konstanten Wert hinaufkommen. Langsam entsteht in den Kernporen eine Ölgleichgewichtsättigung. Der Versuch wurde jedoch vor Erreichen dieses Maximums abgebrochen, damit eine sofortige Spülung am selbem Tag gemacht werden konnte.

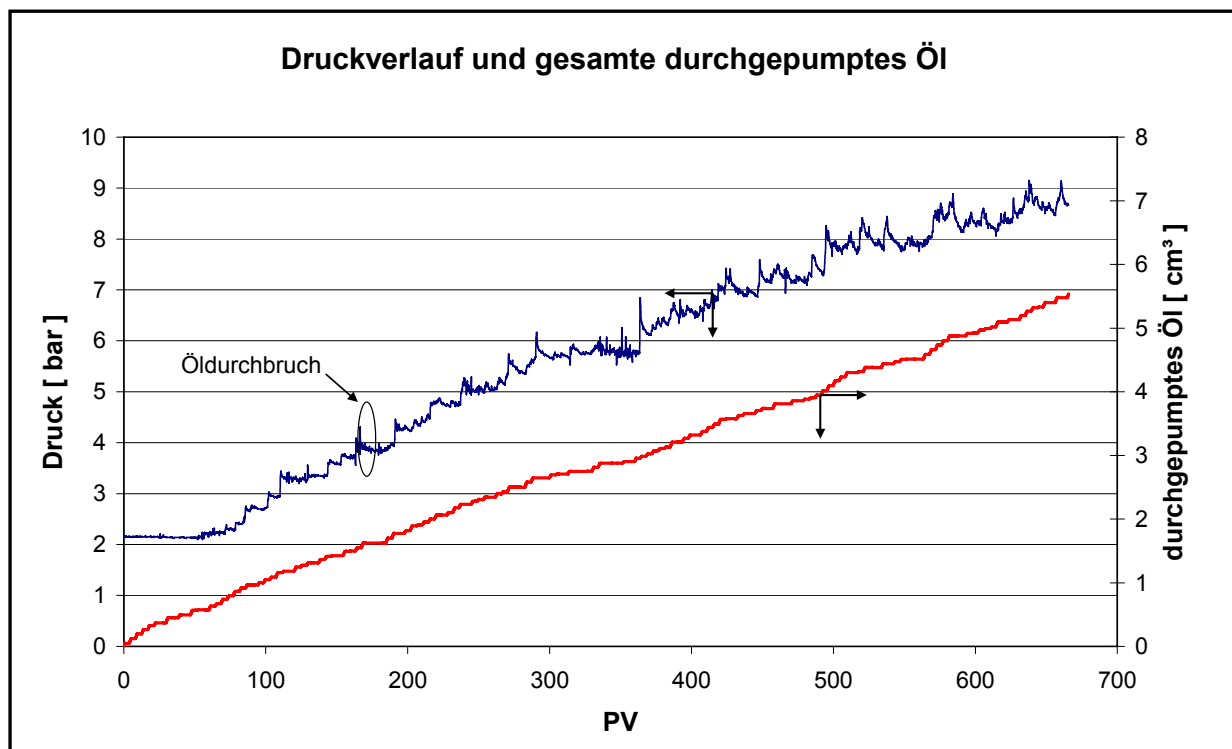


Abb. 4.24: Druckverlauf, wenn der Kern mit Öl und Wasser geflutet wird

Am Ende des Versuchs (400 min) beträgt der Druck 8,8 bar. Man kann mit derselben Gleichung (4.29) die Durchlässigkeit berechnen:

$$k = \frac{Q * \mu * l * 1000 * 1,01325}{\frac{d^2 * \pi}{4} * 60 * \Delta p}$$

Die Durchlässigkeit beträgt jetzt nur 35,19 mD, d.h. eine Viertel der 3%NaClwasserdurchlässigkeit.

Spülung

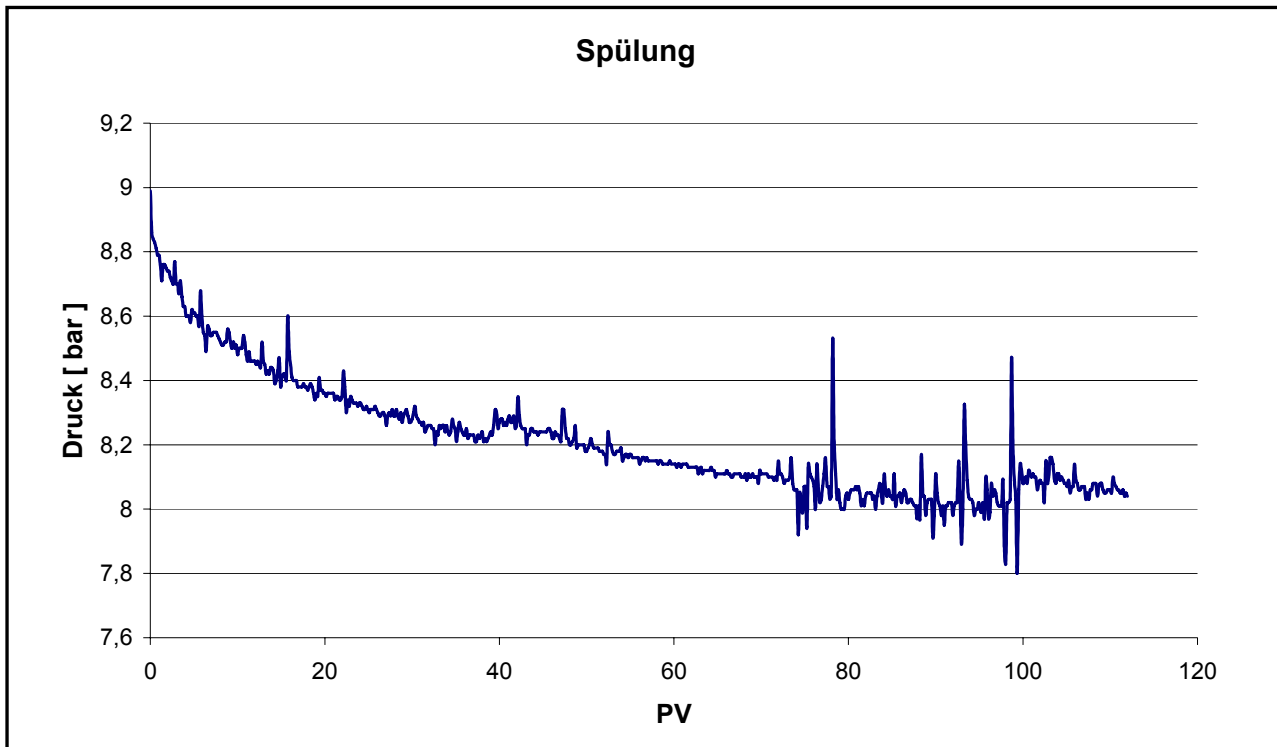


Abb. 4.25: Druckverlauf beim Wasserspülen

Die Spülung (siehe Abb. 4.25) wird mit 3%NaCl-Wasser in die Fließrichtung durchgeführt, während die Ölpumpe abgeschaltet wird. Nach 80 PV bewegt sich der Druck im Bereich 8,05 bar. Die jetzt erreichte Durchlässigkeit beträgt 37,60 mD. Sie ist größer als die Durchlässigkeit mit Öl und Wasser Mischung (35,19 mD). Sie ist aber deutlich kleiner als die berechnete Durchlässigkeit, als der saubere Kern nur mit 3%NaCl-Wasser geflutet wurde (137,5 mD). Dieser Unterschied beweist, dass es eine Restölsättigung gibt.

Um der Einfluss der Feststoffe zu bewerten, soll die Spülung, die das Öl rauskriegt (das entölen), eines Kerns, der Feststoffe enthält, in die Fließrichtung erledigt werden, sonst werden die Feststoffe rausgespült. In diesem Fall wird die Spülung in die Gegenfließrichtung gemacht, weil die Antwortzeit des Kerns kurzer sein soll. Da der Kern keine Feststoffe enthält, kann man so arbeiten. Wenn der Kern so entölbar ist, heißt dass es möglich ist, dass er durch eine Spülung in Fließrichtung entölbar wäre aber wenn der Kern in der Gegenfließrichtung nicht regenerierbar ist, ist er sicher nicht entölbar in der Fließrichtung. In dem Fall der Kern in der Gegenfließrichtung regenerierbar ist, wird eine neue Versuch unternommen werden, um die Spülung in die Fließrichtung zu untersuchen.

Rückspülung (Spülung in die Gegenfließrichtung)

Die Regenerierbarkeit bei der Rückspülung ist eine erforderliche Bedingung der Regenerierbarkeit in der Fließrichtung. Bei der Rückspülung wollten wir wissen, ob der Anfangsdruckverlust (2,15 bar) wieder erreichbar ist oder nicht. Das Rückspülungsmedium war erst Wasser und danach Methanol, weil es nicht giftig für den Kern ist und das Öl löst. Die verschiedenen Phasen der Rückspülung sind in Abbildung 4.26 dargestellt.

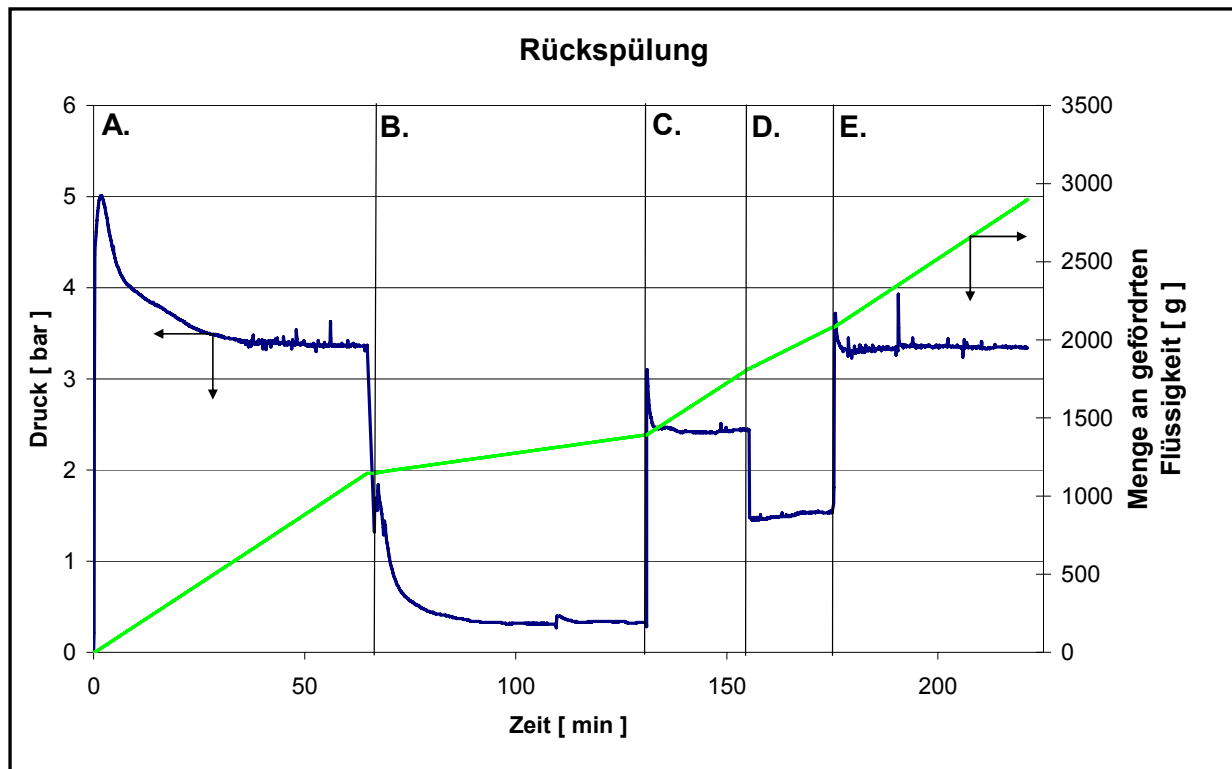


Abb. 4.26: Druck im Laufe der Rückspülung

A. Rückspülung (siehe Abb. 4.26) mit 3% **NaCl-Wasser** (17 ml/min) bis zu stabilem Druck

Der Druckverlust wurde auf bis zu 3,4 bar gesenkt. Die Wassermenge entspricht in etwa 100 PV.

B. **Methanol** 5 ml/min

Der Druckverlust ist geringer aufgrund des Viskositätsunterschieds und der geringeren Flussrate. Die gefahrene Menge stellt etwa 30 PV dar.

C. **Wasser** 17 ml/min

Nach dieser Methanolrückspülung wurde Wasser gefahren, um eine Wirkung des Methanols zu beobachten. Der Druckverlust war noch zu hoch. Eine zweite Methanolrückspülung mit einer höheren Flussrate wurde gemacht.

D. Methanol 17ml/min

Dieses Mal ist der Druckverlust im Vergleich mit der Wasserspülung geringer, nur wegen des Dichte- und Viskositätsunterschieds.

E. Wasser 17 ml/min

Ein geringerer Druckverlust wurde erwartet. Der Druckverlust ist ähnlich wie nach der Spülung mit 3%NaCl-Wasser und beträgt 3,4 bar. Diese Rückspülung hat nichts gebracht. Die Durchlässigkeit beträgt 89,01 mD.

4.2.5. Abschließender Kommentar

Nach diesem Versuch ist das deutlich, dass eine Spülung eines Kerns, der nur mit Wasser und Öl geflutet wurde, in die Gegenfliessrichtung mit Methanol ihn nicht regenerieren kann. Da der Kern in der Gegenfliessrichtung nicht regenerierbar (entölbar) ist, ist er auch sicher nicht durch eine Spülung in die Fliessrichtung regenerierbar. In der Zukunft (bei der Pilotanlagebewertung) können die Effekte von Feststoffe und Öl auf die Durchlässigkeit nicht getrennt untersucht werden.

Obwohl die Regenerierung nicht möglich ist, wird ein Kernversuch in der Wasserqualitätsanlage eingesetzt (siehe Kapitel 4.3.). Dadurch kann man die Injizierbarkeit eines Wassers bewerten und vergleichen.

4.3. Vorschlag für eine Wassertestanlage

Die Pilotanlagen werden in eine Gewinnungsstation getestet werden (siehe Anhang „MA XII“). Die Wassertestanlage wird nach jeder Pilotanlage nachgeschaltet. Die Wassertestanlage hat den Zweck die Bewertung den Pilotanlagen, die im Pilottestphase getestet werden (siehe Kapitel 3.), durchzuführen. Parallel zu den Laboranalysen, wird die Wassertestanlage qualitativ das Wasser testen.

Die Wassertestanlage besteht aus einer Leitungs- und eine Formationssimulation. Die Leitungssimulation wird durch das Leitungssimulationsrohr erledigt (siehe Kapitel 4.1.). Dieser Teil der Wassertestanlage soll die zukünftigen Leitungen, die das Wasser von der Wasserflutanlage, bei der das ganze Wasser aus der OMV-Ölförderung aufbereitet wird und bis zu Injektionssonden leitet, simulieren. In diesen Leitungen kann die bakteriologische Aktivität sich entwickeln und zu einer Verschmutzung des Wassers führen. Diese Simulation soll den kleinen Lebenswesen die Möglichkeit geben, sich wie in den zukünftigen Leitungen zu entwickeln. Eine Kolbenpumpe wird das Wasser durch die Leitungssimulation saugen und zu dem Kern (Formationssimulation) fördern. Die Pumpe ist nach der Leitungssimulation nachgeschaltet, weil das Rohr keinen Überdruck halten kann. Sie fördert 1 l/h.

Die Formationssimulation besteht aus einem Kern, der eine bestimmte Durchlässigkeit hat, damit wird die Injizierbarkeit des Wassers bewertet. Ein Kern ist empfindlicher als die echte Formation (kürzere Antwortzeit) und ist einfach zum Einsatz zu bringen. Der Druckverlauf, der mit Hilfe eines piezo-resistiven Drucksensors (0 - 100 bar) vor dem Kern aufgenommen wird, stellt die Injizierbarkeit dar. Dieser Druckverlauf ist aber abhängig von der Flussrate. Deswegen wird nach der Formationssimulation ein Sammelrohr nachgeschaltet, das die Flussrate kontinuierlich messen kann (siehe Abb. 4.27).

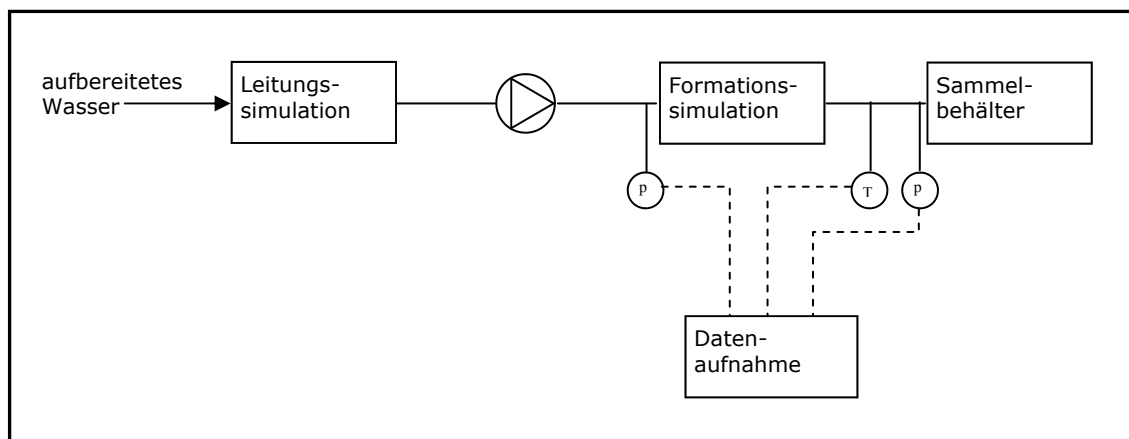


Abb. 4.27: Skizze der Wassertestanlage

Die Flussratemessung erfolgt durch die Messung des hydrostatischen Drucks. Die Druckmessung ist direkt proportional zu der Wasserspiegelhöhe bzw. der Wassermenge.

$$p = \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \cdot h$$

p = Druck am Boden des Sammelbehälter [Pa]

ρ_{Wasser} = Dichte des Wassers [kg/m³]

g = Erdbeschleunigung [m/s²]

h = Höhe des Wassers im Rohr [m]

Die Veränderung des Drucks im Laufe der Zeit ist direkt proportional zu der Veränderung der Wassermenge im Sammelrohr.

Um die Dichtemessung zu vermeiden, wird vor jedem Versuch eine direkte Beziehung zwischen Wassermenge (l) und dem gemessenen Druck (bar) hergestellt. Das Sammelrohr ist daher mit einem piezo-resistiven Drucksensor (0 - 0,6 bar) ausgestattet. Am Sammelrohrs wird ebenfalls die Temperatur gemessen (siehe Abbildung 4.28). Das Rohr wird mit einem Dreibein stabilisiert.

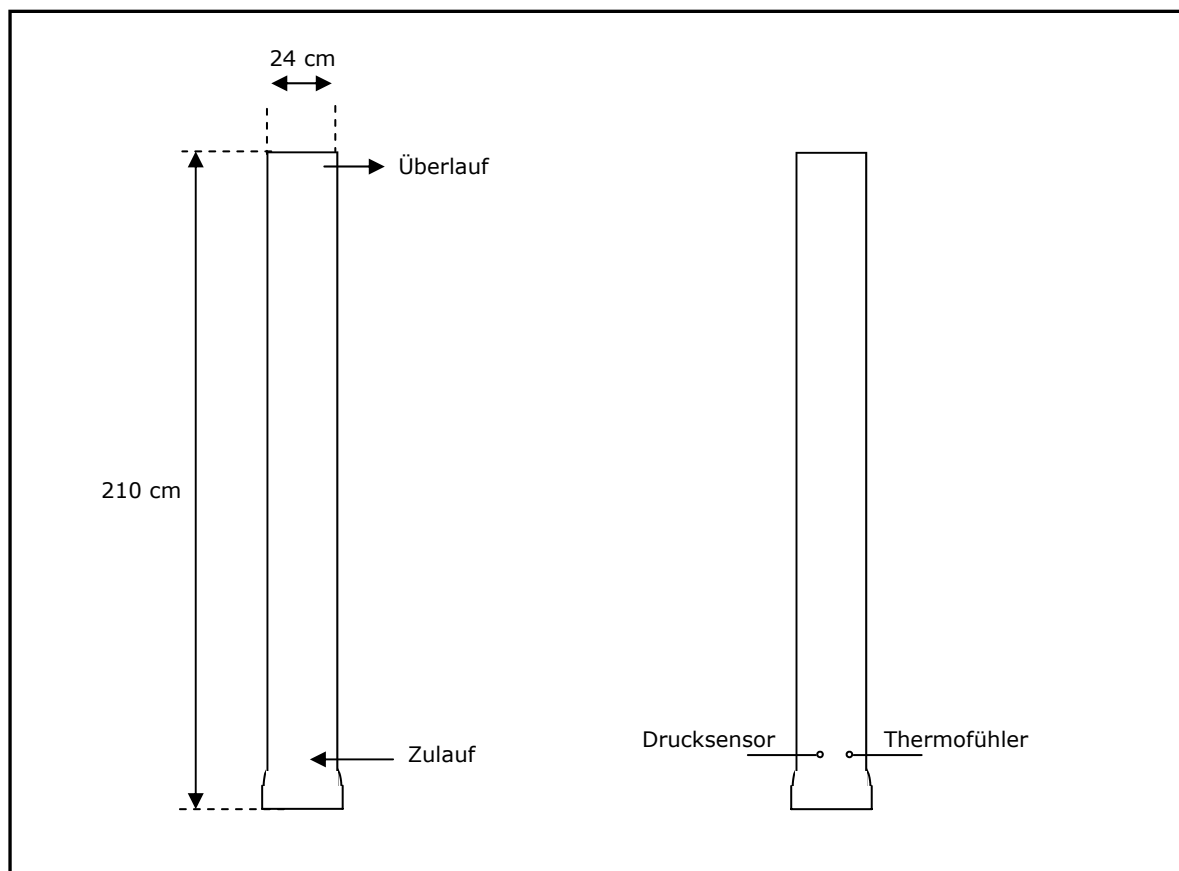


Abb. 4.28: technische Skizze des Sammelrohrs

Injizierbarkeitsbewertung

Bei der derzeitigen Wasserflutanlage, hat das aufbereitete Wasser eine sehr gute Injizierbarkeit. Der Injektionsdruck bei den Injektionssonden ist konstant seit mehreren Jahren geblieben. Das beweist eine sehr gute Qualität des Wassers für die Injektion. Die Wassertestanlage wird in der Wasserflutanlage eingesetzt, um einen Druckverlaufreferenz, ähnlich wie in der Abbildung 4.22, zu bekommen.

Während des Pilottests wird die Wassertestanlage nach der Pilotanlage nachgeschaltet. Ein Druckverlauf wird damit gewonnen. Es ist sicher, dass ein zum Referenzdruckverlauf

ähnlicher Druckverlauf eine sehr gut Injizierbarkeit des Wassers beweist. Wenn der Druck schneller (langsamer) steigt, beweist es eine schlechtere (bessere) Injizierbarkeit als die derzeitige Wasserinjizierbarkeit.

5. Anwendung der Stokes'schen Gesetz auf die Ergebnisse der Absetzversuche

Literaturreferenz [22] - [27]

In den Besprechungen mit Fachleuten aus verschiedenen Firmen hat sich herausgestellt, dass die Öltropfengrößenverteilung eine wesentliche Rolle für die Wirkung der Apparaturen spielen kann. Zu den öltropfenempfindlichen Apparaturen gehören Coalescer, Flotationseinheit, Filter und Hydrozyklon. Um repräsentativ zu sein, muss eine Öltropfengrößenbestimmung online sein, d.h. direkt in der Strömung. Im Gegensatz zu Feststoffen, tritt mit Öltropfen ein Koaleszenzeffekt auf. Im Lauf der Zeit wird ein Teil der kleinsten Tropfen zusammenwachsen, bis sie eine stabile Größe erreichen. Es gibt zwei Methoden, mit denen eine genaue Bestimmung erfolgen kann:

Die erste Kategorie sind Bilderanalysegeräte. Sie analysieren Bilder der Strömung, die mit Hilfe eines Mikroskopes aufgenommen wurden. Sie unterscheiden Öltropfen von Feststoffen in ihrer unterschiedlichen Form. Öltropfen sind kugelförmig, während Feststoffe einen diskreten Umfang haben (nichtkugelförmig).

Die Lasermethode stützt sich auf das Phänomen, dass die Teilchen eine Laserstrahlung streuen. Es gibt eine direkte Wechselbeziehung zwischen Streuungsverteilung und Teilchengrößenverteilung.

Da solche Geräte extrem teuer sind und da die Partikelgrößenmessung keine Routinemessung bei der OMV ist, steht keine dieser Apparaturen zur Verfügung.

Alles, was die OMV hat, was uns zu Tropfengrößenverteilungen bringen könnte, sind die Absetzdaten, die aus den Absetzversuchen stammen. Ein genauer Wert ist natürlich interessant, wird aber nicht unbedingt benötigt. Wir haben versucht, ein Verfahren für Feststoffgrößenverteilungsbestimmung an Öltropfen anzupassen. Wegen bestimmter Näherungen müssen die gelieferten Ergebnisse vorsichtig interpretiert werden. Diese Methode kann nur zu einer groben Abschätzung dienen.

5.1. Theoretische Grundlagen

Es gibt in der Literatur Beispiele für Teilchengrößenverteilungsbestimmung durch Absetzversuche. Das Prinzip ist das folgende:

Die Bestimmung von der Partikelgrößenverteilung basiert auf dem Stokes'schen Gesetz: Für die Fallgeschwindigkeit v_s eines Teilchens mit der Feststoffdichte ρ_s und dem Durchmesser d in einer Flüssigkeit mit der Dichte ρ_0 und der dynamischen Zähigkeit μ ergibt sich:

$$v_s = \frac{d^2 g \Delta \rho}{18 \mu} \quad (5.1)$$

v_s = Geschwindigkeit des Tropfens [m/s]

d = Durchmesser des Tropfens [m]

g = Erdbeschleunigung [m/s^2]

$\Delta\rho$ = Dichteunterschied zwischen Wasser und Öl [kg/m^3]

μ = Viskosität [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]

Die großen Teilchen sinken schneller ab als die kleinen.

Dieses Gesetz gilt unter verschiedenen Bedingungen:

1. Temperatur konstant
2. ρ konstant
3. Teilchen kugelförmig
4. Oberfläche glatt
5. Fallgeschwindigkeit konstant
6. Flüssigkeit in Ruhe, Teilchen bewegt sich
7. keine gegenseitige Störung der Teilchen
8. $0,1\ \mu\text{m} < d < 0,25\ \text{mm}$ – es sei denn, in diesem Bereich wirkt die Brown'sche Bewegung ($< 0,1\mu\text{m}$) oder es ist der laminare Zustand nicht mehr annehmbar.

5.2. Größenverteilungsbestimmung

Für Feststoffe ist das Prinzip das folgende: Die Flüssigkeit steht in einem Absetzzylinder. Nach dem Stokes-Gesetz sinken die Teilchen ab, wobei die größeren schneller sinken als die kleineren.

Eine Referenzhöhe H wird angenommen. Diese Höhe wird ab der Oberfläche gemessen (Siehe Abbildung 5.1).

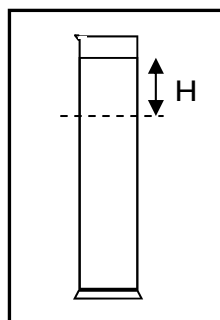


Abb. 5.1: Absetzzylinder mit der Referenzhöhe

Nach einer Zeit t_i haben alle Teilchen größer als d_i ($f = (H/t_i)$) das Volumen, das durch die Höhe begrenzt ist, verlassen. Die Feststoffkonzentration (g/l) oberhalb von H entspricht der Konzentration an Feststoffen kleiner als d_i .

Öltropfen sinken nicht ab, sondern schwimmen nach oben. Das Prinzip ist umgekehrt: Eine Referenzhöhe wird ab dem Behälterboden angenommen. Nach einer Zeit t_i sind alle Tropfen größer als d_i durch H geschwommen. Die Kohlenwasserstoffkonzentration unterhalb von H stellt die Tropfen kleiner als d_i dar (siehe Abb. 5.2).

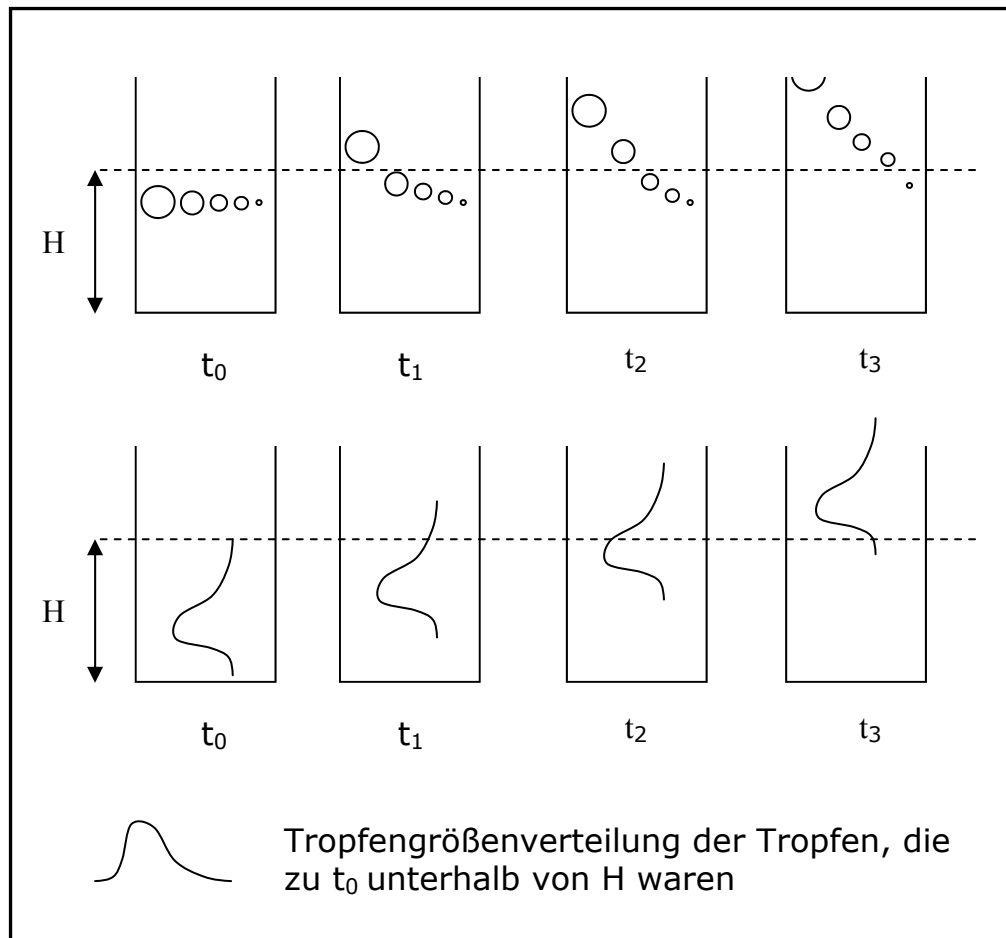


Abb. 5.2: Wanderung der Tropfengrößenverteilung durch H nach oben.

Bedingungsanalyse:

1. Temperatur konstant

Die Temperatur kann sich zwischen der ersten und der letzten Probe um ein paar Grade ändern (starker Einfluss auf Wasserviskosität).

2. ρ konstant

Die Dichten ändern sich mit der Temperatur.

3. Teilchen kugelförmig

Wie jede Flüssigkeit haben Öltropfen einen Hang zur kugelförmigen Verformung, um die Oberflächenenergie zu vermeiden.

4. Oberfläche glatt

Siehe Punkt 3. Die Feststoffe können sich an die Oberfläche anhängen. In diesem Fall werden sie auch gegen den Koaleszenzeffekt wirken.

5. Fallgeschwindigkeit konstant

nicht erfüllt, wenn die Tropfen koaleszieren

6. Flüssigkeit in Ruhe, Teilchen bewegt sich

7. keine gegenseitige Störung der Teilchen

Aufgrund des Koaleszenzeffektes ist diese Bedingung nicht erfüllt.

8. $0,1 \mu\text{m} < d < 0,25 \text{ mm}$ – es sei denn, auf diesen Bereich wirkt die Brown'sche Bewegung ($< 0,1 \mu\text{m}$) oder es ist der laminare Zustand nicht mehr annehmbar ($> 0,25 \text{ mm}$).

5.3. Anaerobe Absetzversuche

Zunächst wird der Behälter mit Stickstoff durchgespült, um sauerstofffrei arbeiten zu können. Der Behälter (siehe Abb. 5.3) ist bis 1,3 bar mit Stickstoff gefüllt.

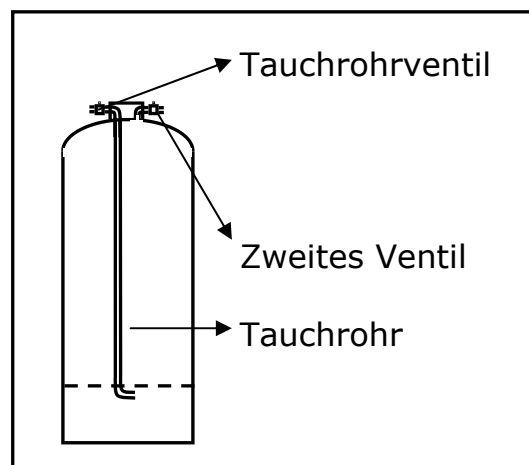


Abb. 5.3: Behälter für anaerobe Probenahme

In der Gewinnungsstation wird er mit Wasser aus dem Drei- oder Zwei-Phasen-Separator anaerob befüllt, d.h. das Tauchrohr wird an die Leitung angeschlossen. Anschließend wird das Tauchrohrventil gefolgt von dem zweiten Ventil geöffnet. Wenn man so arbeitet, hat das Wasser keinen Kontakt mit Sauerstoff.

Die Probenentnahme aus dem Behälter erfolgt folgendermaßen:

- Tauchrohrventil öffnen
- zweites Ventil öffnen

- Gas in das zweite Ventil einblasen
- am Tauchrohr Probe entnehmen
- Tauchrohrventil zumachen
- zweites Ventil zumachen

Um Punkte der Absetzkurve zu sammeln, nimmt man eine Probe direkt nach der Einfüllung und dann weitere Proben nach 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120 und 180 Minuten. Die KW-Konzentration wird im Labor bestimmt.

Die Kurven werden dann in Excel aufgezeichnet, wie in der Abbildung 5.4.

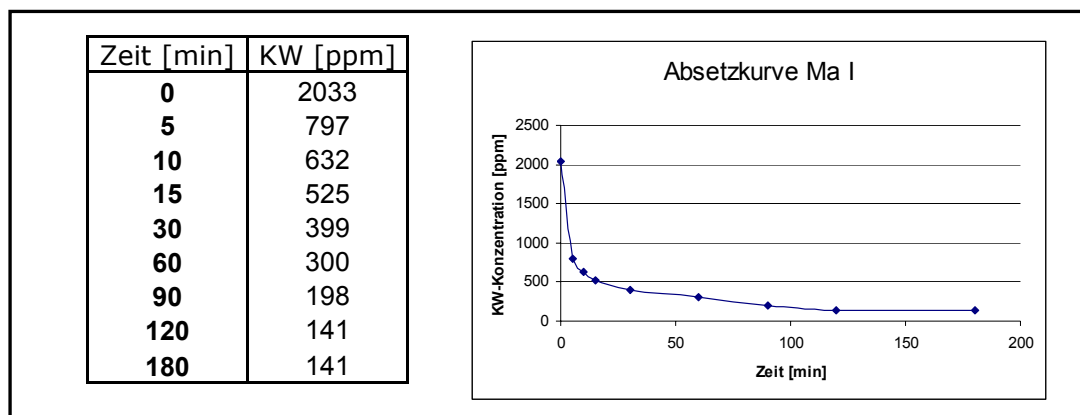


Abb. 5.4: Beispiel Absetzversuch Daten

Die Konzentration nimmt ab, weil die Öltropfen nach oben schwimmen. Die Referenzhöhe H ist am Tauchrohrende. Das Tauchrohr befindet sich 7,5 cm über dem Behälterboden. Für jeden Zeitpunkt der Absetzkurve kann man einen Durchmesser berechnen.

$$v_s = \frac{H}{t} \quad (5.2)$$

$$d_i = \sqrt{\frac{18\mu H}{t_i g \Delta \rho}} \quad (5.3)$$

H = Abstand zwischen Boden und Tauchrohr [m]

t = Zeit [s]

Alle Partikel mit einem gleichen oder größeren Durchmesser sind nicht mehr im Bereich des Tauchrohrs (siehe Abb. 5.5).

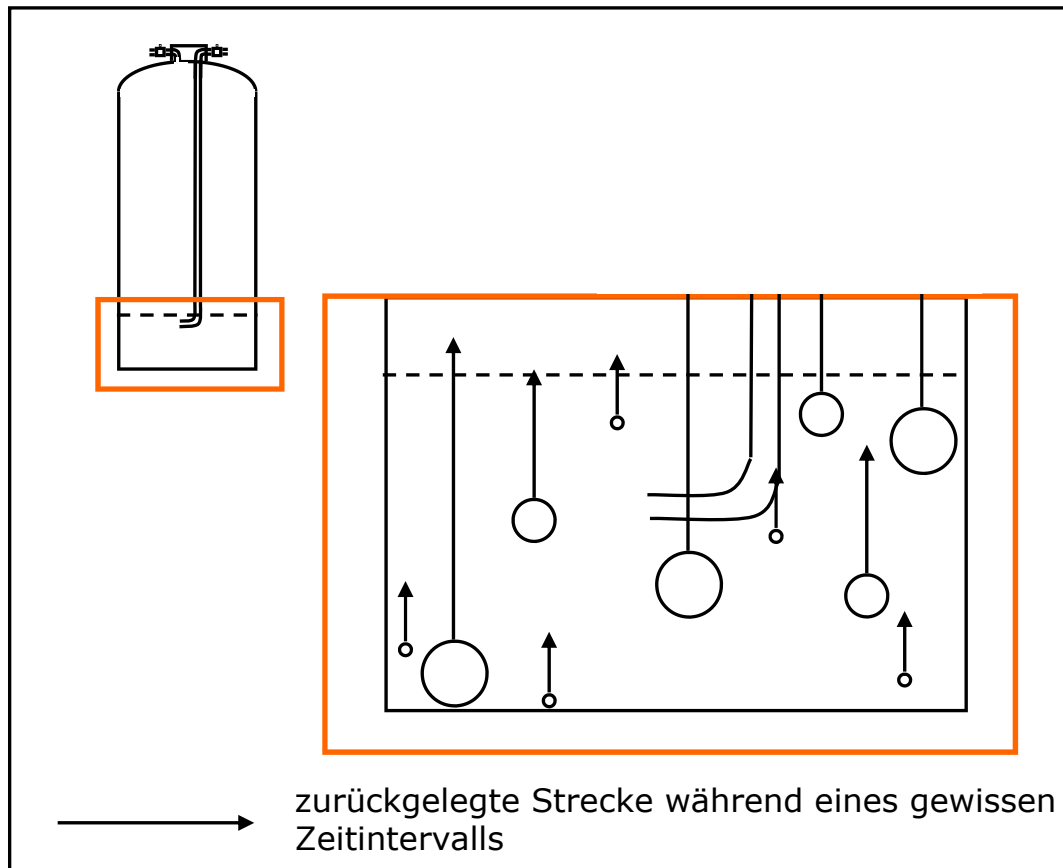


Abb. 5.5: Tropfenwanderung im Behälter

5.4. Berechnungsvorgang

Die Tabelle 5.1 enthält die berechneten Durchmesser nach Stokes' Gesetz für jeden Zeitpunkt.

Zeit [min]	d [μm]
5	56,20
15	32,45
30	22,94
60	16,22
120	11,47
180	9,37

Tab. 5.1: nach Stokes' Gesetz berechnete Tropfendurchmesser.

Die Tabelle 5.2 stellt die Berechnungen vor, die aus dem vorgestellten Prinzip stammen. Die gemessene Konzentration zu dem Zeitpunkt t_i entspricht der gesamten Konzentration, von der die Konzentration an Tropfen größer als d_i subtrahiert wurden.

T	d_t	$[KW]_t =$	$[d_i < d < d_{i-1}] =$
5	d_5	$[Gesamte] - [d > d_5]$	$[Gesamte] - [KW]_5$
15	d_{15}	$[Gesamte] - [d > d_5] - [d_{15} < d < d_5]$ $= [KW]_5 - [d_{15} < d < d_5]$	$[KW]_5 - [KW]_{15}$
30	d_{30}	$[KW]_{15} - [d_{30} < d < d_{15}]$	$[KW]_{15} - [KW]_{30}$
...	...	...	...

Tab. 5.2: Berechnungsvorgang, um die Konzentration für jede Tropfengrößenklasse zu bestimmen.

$[KW]_t =$ gemessene KW-Konzentration nach t [ppm]

$[Gesamte] =$ gesamte KW-Konzentration ($t = 0$) [ppm]

$[d_i < d < d_{i-1}] =$ Konzentration an Tropfen größer als d_i und kleiner als d_{i-1} [ppm]

5.5. Ergebnisse

Dieser Berechnungsvorgang wurde auf die bilanzierte Absetzkurve (siehe Abb. 5.6), die aus den Absetzversuchen stammt, angewendet. Diese Absetzkurve wurde auf der Basis jeder Absetzkurve aus jeder Gewinnungsstation mit entsprechendem Durchfluss berechnet.

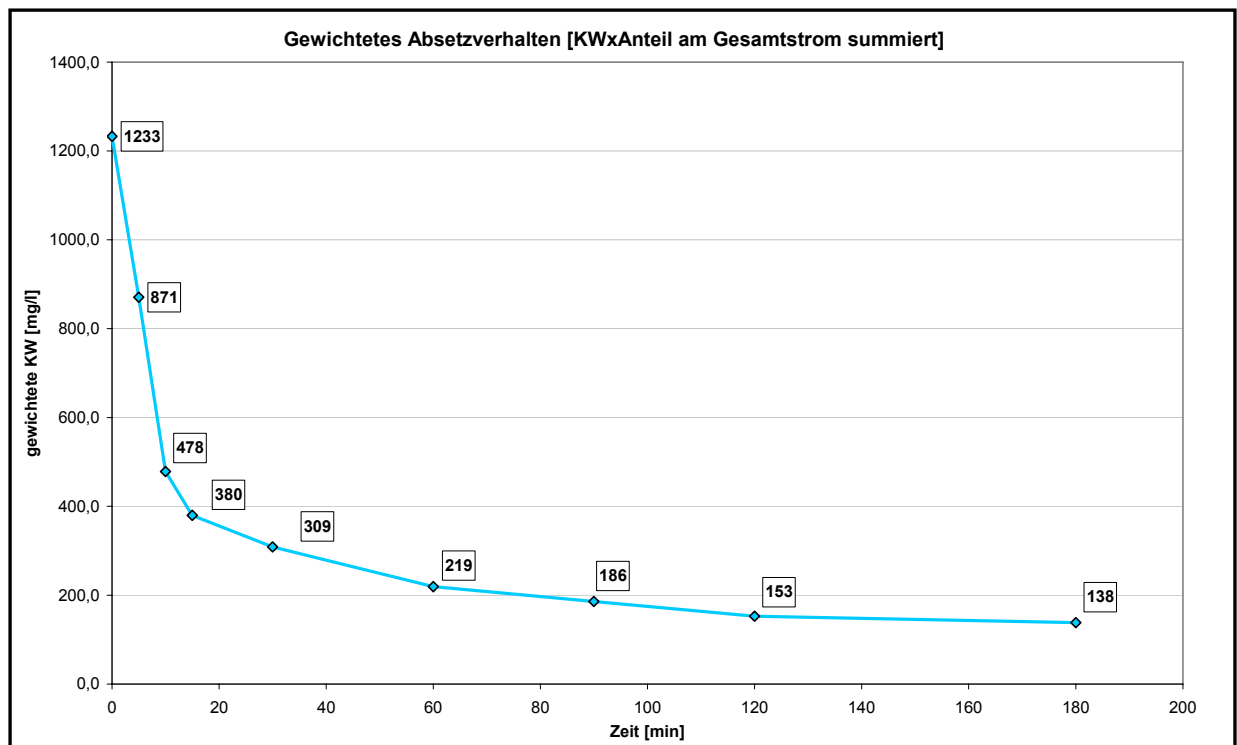


Abb. 5.6: Bilanzierte Absetzkurve

Wenn man den vorgestellten Berechnungsvorgang auf diese Werte anwendet, bekommt man die Ergebnisse, die in der Tabelle 5.3 aufgezeigt sind.

t [min]	[KW] _t [ppm]	d _t [μm]	[d _i <d<d _{i-1}] [ppm]
0	1233,1		
5	870,6	56,19	362,5
10	478,5	39,73	392,2
15	380,0	32,44	98,5
30	308,5	22,94	71,5
60	219,0	16,22	89,5
90	185,9	13,24	33,0
120	152,6	11,47	33,4
180	138,1	9,37	14,5
∞	0,0	0,00	138,1

Tab. 5.3: Anwendung des Berechnungsvorganges zur bilanzierten Kurve

Um den Beitrag jeder Klasse richtig zu bewerten, muss man die Verteilungsdichte berechnen, d.h. die Klassenbreite berücksichtigen. Dies erfolgt durch die Anwendung der folgenden Gleichung:

$$q_i = \frac{[d_i < d < d_{i-1}]_i}{(d_{i-1} - d_i)} \quad (5.4)$$

Diese Werte werden in einer Histogramm-Graphik (siehe Abbildung 5.7) aufgetragen, jedem Wert entspricht die mittlere Konzentration an Tropfen für jede Durchmesser (μm) zwischen d_i und d_{i-1} .

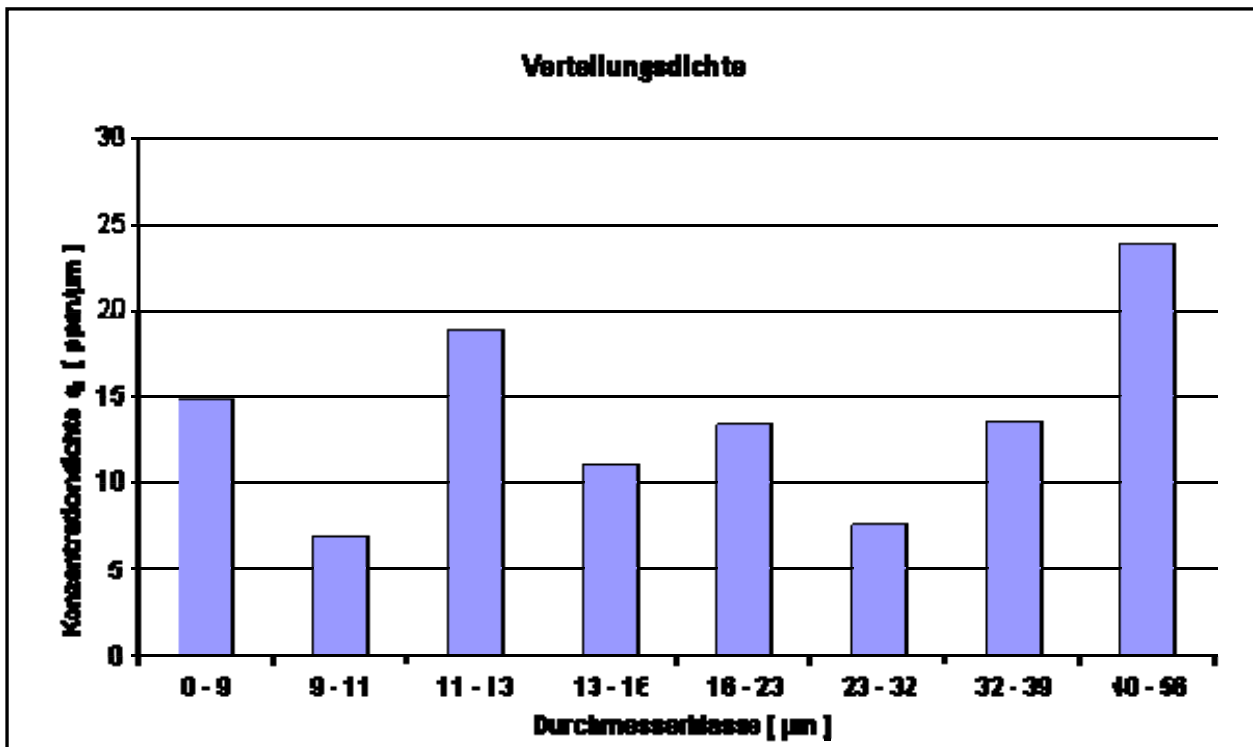


Abb. 5.7: Berechnete Tropfengrößenverteilungsdichte

Die Abbildung 5.7 zeigt zwei Trends. Die zwei wichtigsten Klassen sind oberhalb 40 μm und zwischen 11 und 13 μm .

Unter der Annahme, dass die Absetzzeit bei der Station Matzen Neu eine Stunde beträgt, sollten nur die Öltropfen kleiner als 16 μm ($t > 60 \text{ min}$) berücksichtigt werden. Die Abbildung 5.9 zeigt die Tropfengrößenverteilungsdichte im Bereich $d < d_{60}$.

In diesem Fall kommt der Hauptbeitrag von den Tropfen mit einem Durchmesser zwischen 11 und 13 μm . Die zweite größte Klasse ist die unterhalb 9 μm Klasse.

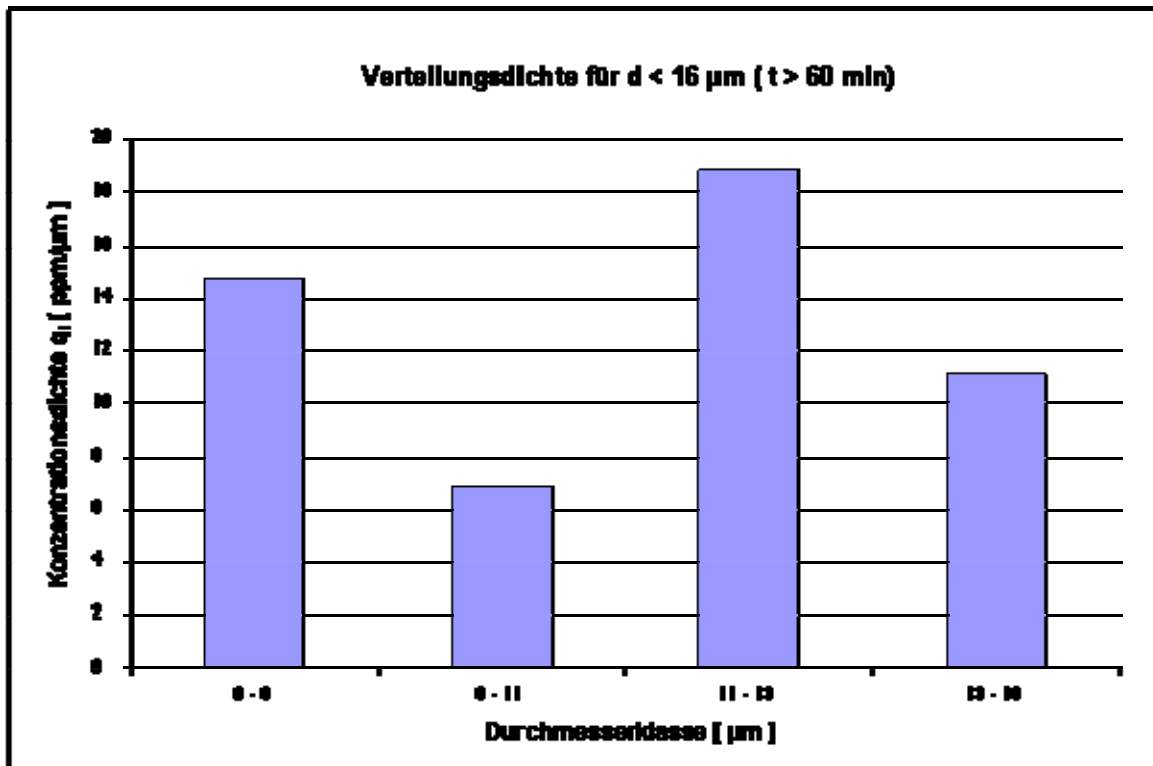


Abb. 5.9: Berechnete Tropfengrößenverteilung für d kleiner als d_{60} .

Obwohl viele Voraussetzungen nicht erfüllt wurden, sollen die Ergebnisse der Berechnung trotzdem die Realität darstellen. Der Koaleszenzeffekt wird auch während der ersten Reinigungsstufe (Matzen Neu) auftreten. Diese Tropfengrößenverteilung soll nicht repräsentativ für die Tropfengrößenverteilung am Eingang von Matzen Neu sein, sondern am Ausgang, d.h. am Eingang der neuen Wasserflutanlage. Wenn die Absetzzeit in Matzen Neu eine Stunde beträgt, sollte der praktische Wert für d_{60} am Ausgang dem berechneten theoretischen entsprechen.

Aber für die kleineren Durchmesser werden die Werte verfälscht. Die Koaleszenz wird noch im Laufe der Zeit auftreten und die Tropfen vergrößern. Je kleiner der d_i ist, desto mehr unterschätzt man die Konzentration (Der praktische Wert liegt höher als der berechnete).

Diese Ergebnisse können nicht als genaue Tropfengrößenverteilung gelten. Diese Berechnungen haben indirekt zu einer Tropfengrößenverteilung geführt. Diese Methode hat aber nicht den Koaleszenzeffekt berücksichtigt. Die resultierenden Werte sollen jetzt mit einer online Messung verglichen werden, um die Methode weiter zu entwickeln.

6. Zusammenfassung

Diese Diplomarbeit wurde bei der OMV im Rahmen des Projekts „Matzen neu“ erstellt. Dieses Projekt hat den Zweck die derzeitige Wasserflutanlage, die das Wasser für die sekundäre Ölförderung aufbereitet, durch eine neue Anlage zu ersetzen. Die OMV will hierfür ein neues anaerobes Verfahren einsetzen. Von einer früheren Arbeit wurden fünf Technologien ausgewählt. In dieser Arbeit wurden nach einer Produktinformationsanalyse Vor- und Nachteile dieser Technologie aufgelistet und einer Bewertung unterzogen. Jedes Verfahren erfüllt die OMV- Anforderungen und kann die erwünschte Qualität liefern.

Die zweite Aufgabe dieser Arbeit war der Entwurf und der Aufbau einer Wasserqualitätstestanlage, um die Injizierbarkeit des aufbereiteten Wassers zu testen. Diese Testanlage sollte erstens die zukünftigen Leitungen simulieren (vorgegebene Verweilzeit von 9,5 Stunden) und zweitens die Injizierbarkeit bewerten können. Diese Anlage besteht aus einem Sandkern durch den das Wasser durchgedrückt wird und einer Messung des zeitlichen Druckanstieges (wegen der Verschmutzungsrückstände). Diese Zunahme stellt die Injizierbarkeit des Wassers vor. Ein Versuch mit einer Wasser und Öl (Gasöl) Mischung wurde geführt. Im Laufe der Zeit (400 min) ist der Förderdruck von 2,15 bar bis zu 8,8 bar gestiegen, d.h. die Durchlässigkeit des Kerns ist von 135,7 mD bis zu 35,19 mD gesunken.

Vor diesem Kern ist ein Verweilzeitrohr geschaltet, welches so dimensioniert wurde, dass die in der Realität vorhandene Leitungsverweilzeit und die damit verbundenen Veränderungen der Wasserqualität simuliert werden können. Dieses Rohr ist ein kontinuierliches durchflossenes stehendes Rohr. Die Verweilzeit beträgt 9,7 Stunden.

Der Einfluss von Feststoff- und Ölrückstände auf die Injizierbarkeit des Wassers ist unterschiedlich. Um den Einfluss der Feststoffe allein bewerten zu können, wird versucht, nach einem Wassertestversuch der mit Feststoff- und Öl belastet Kern von Öl auszuwaschen und danach der Druckverlust des mit Feststoff beladenen Kerns bei Wasserdurchfluss zu messen.

Im Labor wurde einen Versuch geführt, bei dem der Kern keine Feststoffe enthält, d.h. der Kern sollte nach der Spülung seine Anfangseigenschaften (Durchlässigkeit = 137,5 mD) wieder aufzeigen. Dieser Waschvorgang wurde mit Wasser allein in Fließrichtung und mit Methanol in Rückspülrichtung durchgeführt.

Der verschmutzte Kern hat eine Durchlässigkeit von 35,19 mD. Er wurde erst in die Fließrichtung mit Wasser gespült. Nach dieser Spülung war die Durchlässigkeit immer zu klein (37,60 mD). Es wurde dann versucht, mit Methanol in die Gegenfließrichtung zu spülen. Die Rückspülung hat doch eine Verbesserung der Durchlässigkeit gebracht. Eine Durchlässigkeit von 89,01 mD wurde am Ende der Methanolspülung gemessen, d.h. 64,7% der Anfangsdurchlässigkeit.

Es zeigt sich aber, dass kein zufriedenstellender Wascheffekt erzielt werden konnte. Es wird vorgeschlagen weitere Lösungsmittel auszutesten.

Die Öltropfengrößenverteilung ist ein entscheidender Parameter für die Effizienz jedes Verfahrens. Diese Diplomarbeit enthält den Entwurf einer Methode, um die Tropfengrößenverteilung indirekt zu bestimmen. Das Stokes'sche Gesetz wurde auf die fraktionierten Analysenseparationsdaten angewendet. Davon wurde ein Ergebnis, das die

Tropfengrößenverteilung darstellen soll, berechnet. Da mehrere Voraussetzungen des Stockes'schen Gesetzes noch nicht erfüllt sind, muss diese Methode noch weiter entwickelt werden.

7. Literatur

- [01] Brix F. & Schultz O., 1993, **Erdöl und Erdgas in Österreich** (S. 11-35 u. 472)
- [02] Hofbauer H., 2006, **Brennstoff- und Energietechnologie**. Vorlesungskript (S. 41-82)
- [03] OMV internen Daten
- [04] **Veolia Water** (2006). Hydrocarbon Processing Industry
Online im Internet: WWW: www.veoliawater.com (10-2006)
- [05] Applied and Environmental Microbiology, Apr. 2002, p 1516-1523, Activity and Diversity of Sulfate-Reducing Bacteria in a Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Aquifer. Juniel K.A., NATCO Group (2003). **Practical Application of Produced Water Treating Technology for Land-Based Injection Operations**. Houston, TX.
- [06] Ciarapica F.E., Giacchetta G.. **The Treatment of „Produced Water“ in Offshore Rig: Comparaison Between Traditional Installations and Innovative Systems**. Ancona:
Departement of Energy, Faculty of Engineering.
- [07] Saad M., Plebon M.J., Fraser S.. **Fundamental Approach to Produced Water treatment: Validation of an Innovative Technology**. Produced Water Society – 16th Annual Conference.
- [08] Hayes T., Arthur D. (2004). **Overview of Emerging Produced Water Treatment Technologies**. The 11th Annual International Environmental Conference. Albuquerque, NM.
- [09] Arthur D., Langhus B.G., Patel C. (2005). **Technical Summary of Oil & Gas Produced Water Treatment Technologies**. All Consulting.
- [10] Janka C., **Diplomarbeit**, TU Wien (2007)
- [11] **Krebs Engineers** (2006). Products
Online im Internet: WWW: www.krebs.com (10-2006)
- [12] **Krebs Engineers**. Product information
- [13] **Siemens** (2006). Products & Services Finder
Online im Internet: WWW: www.usfilter.com (09-2006)
- [14] **M-I Epcon AS** (2006). Products and Services
Online im Internet: www.epconoffshore.com (10-2006)
- [15] **Pall Corporation** (2006). Products, Oil/Water separation
Online im Internet: WWW: www.pall.com (10-2006)

- [16] **Enviro Voraxial Technology, Inc.** (2006) Equipment
Online im Internet: WWW : www.evtm.com (9-2006)
- [17] **Natco Group** (2006).
Online im Internet: WWW: www.natcogroup.ch
- [18] **Wikipedia, the free encyclopedia.** Water injection
Residence Time Distribution
Online im Internet: WWW: en.wikipedia.org
- [19] **Gartz M.** (2001). Verweilzeit
Online im Internet: WWW: http://www.tu-berlin.de/~itc/lehre_tc/Praktikums-Skripte/Grundpraktikum/Verweilzeit.pdf
- [20] Tiab & Donaldson, 1996, **Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties** (S. 89-91 u. 319-379)
- [21] Amyx, Bass & Whiting, 1960, **Petroleum reservoir engineering, Physical Properties** (S. 174-180)
- [22] Sunil Kokal (2005). **SPE** 77497 Crude Oil Emulsion: a State-Of-The-Art Review.
- [23] Janssen P.H. und Harris C.K. (1998). **SPE** 49077 Emulsion characteristics of High Water-cut Oil Wells.
- [24] El-Hamouz A.M. (1996). **SPE** 36672 On-line Drop size Distribution Measurement of Oil-Water Dispersion Using a Par-Tec M300 laser Backscatter Instrument.
- [25] Hajskjold B., Morrow T.B., Celius H.K.B. und Johnson D. R. (1994). **SPE** 28536 Drop-Drop Coalescence in Oil/Water Separation.
- [26] Arnold K. E. und Koszela P.J. (1990). **SPE** 16640 Droplet-Settling vs. Retention-Time Theories for Sizing Oil/Water Separator.
- [27] **Del Villar R., 2006**, Procédés métallurgiques, Méthode expérimentale d'analyse granulométrique (**S.6 – 14**)

8. Anhang

8.1. Matzen XII

8.1. Ma XII

Die Station, bei der die Tests der Pilotanlagen stattfinden werden, soll Strömungsbeschaffenheit erfüllen und logistische Gelegenheit anbieten.

MatzenNeu soll alle gefördert Flüssigkeiten zusammensammeln danach eine Phasentrennung erledigen. Am Ausgang wird es eine Wasserströmung, eine Erdgasströmung und eine Erdölströmung geben. Jede wird in das entsprechen Downstreamprozess versorgt werden. Die Wasserströmung wird in der neuen Flutwasseranlage gefördert werden.

Da alle Wasser zusammengebracht werden, ergibt es sich eine Mischung aus Wasser mit P-Öl, A-Öl.

Die ideale Möglichkeit wäre, dass wir nach einem drei-Phaseseparator einen Absetztank einrichten, um die Kohlenwasserstoffe- und Feststoffkonzentration bis repräsentative Werte senken zu lassen. Der drei-Phaseseparator und der Absetztank würden Matzen neu simulieren. Wegen logistischen Fragen, wurde diese Möglichkeit nicht fortgesetzt. Die Überlegung und Vorbereitung solches Tanks kommen nicht im Zeitplan.

8.1.1 Benötigt Strömungseigenschaften

Das Wasser aus MatzenNeu wird A-Öl und P-Öl enthalten. Deswegen soll eine Gewinnungsstation, die die zwei Wasser mit genügend Flussrate hat, ausgewählt werden. Während der Wasserbehandlung in Matzen neu, wird eine Verweilzeit erfolgen, die die Feststoffkonzentration und die Kohlenwasserstoffe sanken lassen sollen. Die Konzentration an Feststoffe und an Kohlenwasserstoffe soll 300 ppm liegen. Diese Werte wurden mit Hilfe der Absetzversuche bestimmt. Die Station soll bis zu 6m³ pro Stunde Wasser zu der Pilotanlage fordern.

Ma XII wurde ausgewählt. In diese Station wird A-Öl und P-Öl aus Wasser parallele getrennt. Dann wird das Wasser nach Flutwasseranlage geleitet. Nach dem Gasseparatoren werden jede Wasser in einem Hochtank (T8 und T9) geleitet (Leitung 1), wo Öl aus Wasser sich trennt. Die Wasser/Öl-mischung wird durch ein Tauchrohr in den Tank gefordert. Öl trennt sich vom Wasser durch die Dichteunterschiede. Es entsteht sich eine Trennfläche. Wasser wird durch Leitung 2 und Öl durch Leitung 3 entnommen.

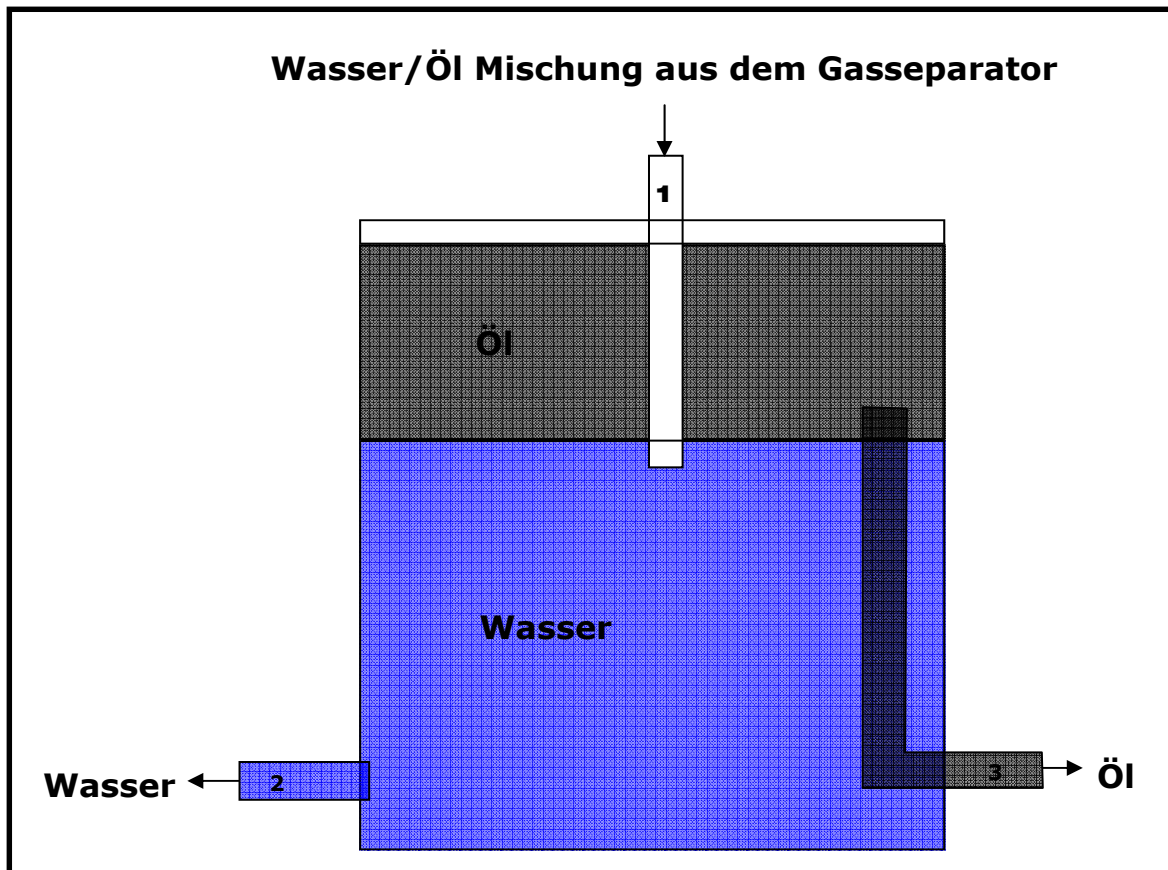


Abb. 1: Skizze der Hochtank

Im T8 trennt sich P-Öl vom Wasser und hat einen Wasserflussrate von 300 m³/tag in einem Volumen von ca. 98 m³. Die Konzentration an Kohlenwasserstoffe (P-Öl) liegt zwischen 40 ppm und 60 ppm.

T9 enthält dasselbe Volumen an Wasser, das eine Flussrate von 700m³ pro Tag hat. Die Konzentration an A-Öl liegt zwischen 550 ppm und 750 ppm.

Diese zwei Tanks liegen nebeneinander. Für unsere Tests werden wir beides Wasser zusammenmischen, um die Möglichkeit zu haben, mit verschiedenen Konzentrationen nach unsere Pilotanlage zu fördern. Die Wasserflussrate sind ausreichende für die Tests.

Außer den optimalen Strömungen, Ma XII hat andere wichtige Eigenschaften, die zur Entscheidung gekommen sind.

Ma XII ist einfach erreichbar für jede Pilotanlagekomponentenlieferung hat genügend Raum, um eine Container, in dem die Pilotanlagen einrichten werden, einzusetzen.

Druckluftmembranepumpen benötigen eine Druckluftversorgung. Das gibt es auch in MaXII zur Verfügung.

8.1.2 Zusätzlichen Informationen:

Betriebsbedingungen

A-Öl (T9)	P-Öl (T8)
Öl/Wasser = 7 % Trennschichthöhe im Tank = ca. 5m	Öl/Wasser = 4 % Trennschichthöhe im Tank = ca. 5 m

Analyseergebnisse

A – Öl (T9)	P – Öl (T8)
Öl = 550 – 750 mg/l Fe ges. = 1,83 mg/l Fe lsg. = 0,91 mg/l Temperatur = 26,5 °C Sauerstoffe = 0,2 - 0,3 ppm	Öl = 40 – 60 mg/l Fe ges. = 7,94 mg/l Fe lsg. = 6,84 mg/l Temperatur = 39,4 °C Sauerstoffe = 0,2 – 0,3 ppm