

Einführung in die Versagensmechanismen von Sandfiltern

Introduction to failure mechanisms of sand screens

Kurzfassung

Sandfilter sind in vielen Öl-, Gas- und Geothermiebohrungen wichtige Komplettierungselemente. Ihr Zweck ist es, mobilisierte Formationspartikel zurückzuhalten und das Bohrloch mechanisch abzustützen. Der Ausfall eines Sandfilters kann schwerwiegende Folgen für die weitere Produktivität der Bohrung haben. Daher ist es wichtig, die Versagensmechanismen von Sandfiltern zu verstehen, um die Ursachen zu ermitteln.

Eine ausführliche Literaturrecherche, Laboruntersuchungen und praktische Erfahrungen wurden in einem neuartigen Schema zusammengefasst und die Versagensmechanismen werden definiert. Danach kann jedes Versagen eines Sandfilters auf einen von vier Mechanismen zurückgeführt werden, die ihre Wurzeln in der Konstruktions-, Herstellungs- oder Qualifizierungsphase, beim Transport, der Installation, dem Betrieb oder einem Workover haben können.

Ein Sandfilter hat versagt, wenn er nicht mehr in der Lage ist, die mobilisierten Formationspartikel zu kontrollieren, oder wenn er die Produktivität des Bohrlochs in unannehmbar hohem Maße beeinflusst. Die vier Versagensmechanismen sind Verstopfung, Erosion, Korrosion und mechanische Deformation. Die Mechanismen können und werden sich gegenseitig beeinflussen. Es werden Beispiele für das Zusammenspiel der Mechanismen diskutiert.

Abstract

Sand screens are important completion elements in many oil, gas and geothermal wells. Their purpose is to retain mobilized formation particles and mechanically support the wellbore. A failure of a sand screen can have severe consequences on the further productivity. It is therefore important to understand the failure mechanisms of sand screens to identify root causes.

An in depth literature review, laboratory investigations and practical experience have been summarized in a novel one of a kind schematic. The states of failure are defined. From there, any sand screen failure can be traced back to one of four mechanisms that can have its roots in the design, manufacturing or qualification phase, in shipping, installation, operation or workover.

A sand screen has failed if it is no longer able to control the mobilized formation particles or causes an unacceptably high influence on the productivity of the well. The four failure mechanisms are plugging, erosion, corrosion and mechanical deformation. The mechanisms can and will influence each other. Examples for the interaction of the mechanisms are discussed.

The proposed mechanisms can be applied to any sand control screen and are not limited to the use in wells. Instead, they universally fit many other applications from process engineering as well. This article provides an overview of the failure of sand screens and a novel visualization of the interaction of the failure mechanisms. The contained information is targeting anyone who is new to sand produc-

EEK Aus der Redaktion From the editorial office

Leserbriefe Letters to the editor

Diskutieren Sie mit und schreiben Sie uns Ihre Meinung per Mail an:

leserbriefe@eid.de

Discuss with us and write us your opinion by mail to:

leserbriefe@eid.de

(Foto: stock.adobe.com)



Die vorgestellten Mechanismen können auf jede Art von Sandfilter angewendet werden und sind nicht auf den Einsatz in Bohrlöchern beschränkt. Stattdessen passen sie universell auch für viele andere Anwendungen aus der Verfahrenstechnik. Dieser Artikel bietet einen Überblick über das Versagen von Sandfiltern und eine neuartige Visualisierung des Zusammenspiels der Versagensmechanismen. Die darin enthaltenen Informationen richten sich an alle, die sich zum ersten Mal mit der Sandproduktion und den Herausforderungen der Sandkontrolle beschäftigen. Das Wissen über die vorgeschlagenen Mechanismen kann als Ausgangspunkt für die Auslegung einer erfolgreichen Sandkontrolle sowie für die Optimierung bestehender Sandkontrollkonzepte dienen.

Einführung

Die Sandproduktion ist in vielen Bohrlöchern ein großes Problem. Um sie zu verhindern, wurde eine Vielzahl von Methoden entwickelt, wie z. B. die plastische Verfestigung, die Reduzierung der Fördermenge und das Sandmanagement. Die Menge der Veröffentlichungen zu diesen Themen kann überwältigend sein. Die Online-Bibliothek OnePetro, die von der Society of Petroleum Engineers betrieben wird, listet derzeit mehr als 7.500 Veröffentlichungen zu den Suchbegriffen „sand production“, mehr als 6.500 zum Begriff „sand control“ und mehr als 2.000 zum Begriff „sand screens“. Etwa 10 % dieser Veröffentlichungen sind von Fachleuten begutachtet. Die Liste der einführenden Literatur ist dagegen viel kürzer. Bücher über Sandkontrolle werden etwa alle zehn Jahre veröffentlicht [1–3] begleitet von Buchkapiteln, die ab und zu erscheinen [4, 5].

Der Inhalt dieses Artikels liegt irgendwo zwischen den allgemeinen Buchveröffentlichungen und spezialisierten Praxisanwendungen und detaillierten Laboruntersuchungen. Er behandelt eine sehr ausgewählte Gruppe von Komplettierungsbauteilen: Sandfilter. Die folgenden Seiten geben einen Überblick über das Versagen von Sandfiltern über den gesamten Lebenszyklus von der Konstruktion bis zum Ausbau und darüber, welche Faktoren ihre Funktionsfähigkeit beeinflussen können. Der Zweck dieser Übersicht ist es, Studenten, Berufseinsteigern und Ingenieuren, die neu auf dem Gebiet der Sandkontrolle sind, eine Einführung in dieses Thema zu geben und als Ausgangspunkt für die Lösung späterer, spezieller Probleme zu dienen.

Die Installation von Sandfiltern ist eine der bewährtesten Optionen zur Sandkontrolle. Sie werden in der Regel vor der produktiven Zone platziert, entweder allein (als sogenannte Standalone Screens) oder als Teil eines Gravel Packs. Ein Filter kann als versagt betrachtet werden, wenn er nicht in der Lage ist, die mobilisierten Feststoffe der Formation zu kontrollieren, oder wenn er die Produktivität des Bohrlochs in unannehmbare Weise beeinflusst.

Das Versagen eines Sandfilters kann schwerwiegende Folgen haben, z. B. Produktionsausfälle aufgrund von Partikelansammlungen, hohe Skin-Faktoren, die Erosion von Sicherheitsbauteilen, Schäden an Rohrleitungen und Oberflächeneinrichtungen sowie die Notwendigkeit, ein Bohrloch aufgrund eines Formationskollapses aufzugeben. Das Versagen von Sandfiltern kann seinen Ursprung jederzeit während der Konstruktion, der Herstellung, der Qualifizierung, des Transports, der Installation, des Betriebs und der Aufwältigung auftreten. Dieser Artikel definiert die Versagenszustände von Sandfiltern, listet alle Versagensmechanismen auf und gibt Beispiele für das Zusammenspiel der Mechanismen.

tion and sand control challenges. The knowledge about the proposed mechanisms can act as a starting point for the design of a successful screen as well as for the optimization of existing screen concepts.

Introduction

Sand production is a major problem in many wells. A wide variety of methods, such as plastic consolidation, rate reduction and sand management, have been developed to prevent it. The number of publications on this topic can be overwhelming. The online library OnePetro, operated by the Society of Petroleum Engineers, currently lists more than 7,500 papers for the search terms “sand production”, more than 6,500 for the term “sand control” and more than 2,000 for “sand screens”. About 10% of these publications are peer reviewed. The list of introductory literature on the other hand is much shorter. Books on sand control are published approximately once every decade [1–3] accompanied by book chapters every now and then [4, 5].

The content of this article is positioned somewhere between the general book publications and specialized field cases and detailed laboratory investigations. It covers a very select group of completion elements, namely sand screens. The following pages will give an overview over failure of sand screens over the complete lifecycle from design to retrieval and what factors can influence their functionality. The purpose of this review is to give an introduction to this topic for students, young professionals and engineers, who are new to sand control, and act as a starting point for the solution of subsequent, specialized problems.

The installation of sand screens is one of the most popular sand control options. They are usually placed in front of the productive zone, either alone or as part of a gravel pack. A screen may be considered failed when it is unable to control the mobilized formation solids or causes an unacceptable influence on the productivity of the well.

The failure of a sand screen can have severe consequences such as lost production due to accumulation of particles, high skin-factors, the erosion of safety elements, damage to pipelines and surface facilities, and the necessity to abandon a well because of a formation collapse. Failures of sand screens can originate anytime during design, manufacturing, qualification, shipping, installation, operation and workover. This article defines the states of failure of a sand screen, lists all failure mechanisms and gives examples for the interactions of the mechanisms. It was written to give an introduction to the design and development of sand screens. Due to the many influential factors on the sand control process and the different installation procedures, it is impossible to summarize the decisions that have to be made to choose and design a sand control method in a simplified manner. Despite all past efforts it has not yet been possible to define a precise cut of values for the applicability of certain screen types or opening sizes. The reason for that can be found in the interaction between geology and engineering. Sand screens are placed right at the border between the known system of a well and the formation that holds the desired fluids, where many properties can only be defined with a certain probability.

Sand production

The term sand production summarizes the mobilization, transport and deposition of natural formation solids in a reservoir, wellbore and surface facilities. Sand production can be distinguished by these three processes as well as the by the type of particles involved. Mobilization is the onset of all sand production problems. Particles are mobilized either in the near wellbore area within the formation or at the face of the wellbore itself. The mo-

Er wurde geschrieben, um eine Einführung in die Auslegung und Entwicklung von Sandfiltern zu geben. Aufgrund der vielen Einflussfaktoren auf den Sandkontrollprozess und der unterschiedlichen Installationsverfahren ist es unmöglich, die Entscheidungen, die bei der Auswahl und Auslegung eines Sandkontrollverfahrens getroffen werden müssen, in vereinfachter Form zusammenzufassen. Trotz aller bisherigen Bemühungen ist es bisher nicht gelungen, genaue Grenzwerte für die Anwendbarkeit bestimmter Filtertypen oder Öffnungsgrößen zu definieren. Der Grund dafür liegt in der Wechselwirkung zwischen Geologie und Technik. Sandfilter befinden sich genau an der Grenze zwischen dem bekannten System einer Bohrung und der Formation, in der sich die gewünschten Fluide befinden und viele Eigenschaften nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit definiert werden können.

Sandproduktion

Unter dem Begriff Sandproduktion werden alle Mobilisierungs-, Transport- und Ablagerungsvorgänge von natürlichen Formationsfeststoffen in Lagerstätte Bohrloch und Obertageanlagen zusammengefasst. Sandproduktion kann durch diese drei Prozesse oder die Art der beteiligten Partikel unterschieden werden. Die Mobilisierung steht am Anfang eines jeden Sandproduktionsproblems. Die Partikel werden entweder im bohrlochnahen Bereich innerhalb der Formation oder an der Bohrlochwand selbst mobilisiert. Die Mobilisierung innerhalb der Formation wird durch den Fluidfluss verursacht und betrifft kleine Partikel, die nicht mit anderen verbunden sind und sich frei durch den Porenraum bewegen können. Sie werden gewöhnlich als Feinanteile bezeichnet und manchmal fälschlicherweise nach ihrer Partikelgröße klassifiziert [6] und nicht nach ihrer Fähigkeit, sich zu bewegen, z. B. in bimodalen Partikelgrößenverteilungen [7]. An der Bohrlochwand erfolgt die Mobilisierung infolge von Ausbrüchen. In diesem Fall ist die Menge der mobilisierten Feststoffe deutlich größer.

Der Transport kann durch zwei Extreme charakterisiert werden. Kleine Mengen werden als Suspension transportiert, ohne dass eine Interaktion zwischen den einzelnen Partikeln stattfindet. Dies ist der Fall bei der Förderung von Feinanteilen, in konsolidierten Formationen [8] oder in den meisten verrohrten Bohrungen. Mit zunehmender Feststoffkonzentration in der Suspension nimmt die Wechselwirkung zwischen den Partikeln zu, bis es bei Bohrlochwandausbrüchen zu einer Bewegung von flüssigkeitsgesättigten, großen Partikelagglomeraten oder verfestigtem Gestein kommt [9].

Mobilisierte Partikel können in der Formation oder im Bohrloch abgelagert werden. Von dort können sie an die Oberfläche gelangen, wenn die Fließgeschwindigkeit der geförderten Fluide hoch genug ist, um die Feststoffe zu transportieren.

Ursachen von Sandproduktion

Ausgehend von den zuvor beschriebenen Arten der Sandproduktion können zwei ursächliche Mechanismen genannt werden: ein niedriger Druck im Bohrloch und der Fluidfluss durch die Poren selbst. Wenn der Fluidfluss hoch genug ist, kann er lose Partikel mobilisieren und transportieren. Wie bereits erwähnt, ist dies jedoch nur bei kleinen Partikeln möglich.

In verfestigten Formationen kommt es zum Ausbruch oder Einsturz des Bohrlochs, wenn der Flüssigkeitsdruck im Bohrloch zu einer erheblichen Veränderung der Gesteinsspan-

bilization within the formation is caused by the fluid flow and affects small particles that are not connected to other solids and can freely move through the pores. They are usually referred to as fines and sometimes falsely classified according to their particle size [6] instead of their ability to move e.g. in bimodal particle size distributions [7]. At the face of the wellbore, the mobilization occurs as a result of borehole breakouts. In this case, the amount of mobilized solids is much greater.

The transport can be characterized by two extremes. Small amounts are transported as a slurry, without interaction between the individual particles. This is the case for fines production, in consolidated formations [8] or in most cased holes. With an increasing solids concentration in the slurry, the interaction between the particles increases until borehole breakouts cause the movement of agglomerates that are saturated with fluids or solidified rock [9].

Mobilized particles can be deposited within the formation or in the borehole. From there they can reach the surface if the flow velocity of the produced fluids is high enough to carry the solids.

Causes of sand production.

Based on the previously described types of sand production, two root causes can be identified: low flowing bottom hole pressure and the fluid flow through the pores itself. If the fluid flow is high enough, it can mobilize and transport loose particles. However, as mentioned above, this is only possible for small particles.

In consolidated formations, the breakout or collapse of the borehole will occur if the fluid pressure inside the well results in a significant change of the rock stress in the near wellbore area. During bean up and operation of the well, the pressure is reduced to produce fluids, which will further increase the stress. Towards the end of the lifetime of a reservoir, the effective stress is again increased due to the depletion of the pore pressure.

An enormous number of factors can influence these two root causes. Some of them are shown in Figure 1. The undisturbed in situ-stress depends on the depth and the characteristics of the overlying formations as well as pore pressure and Poisson's ratio. Simplified solutions of the stress field around the wellbore can be derived from the Kirsch-Equations [10]. The resulting secondary stresses are influenced by the wellbore pressure, which is influenced by the fluid density and dynamic factors such as flow rate and friction, and the geometry of the well (diameter, inclination, etc.). The rock strength depends on the friction between the particles and the existence of cementation (e.g. by calcite). Wettability properties of the particles combined with the chemical composition of the produced fluids have the greatest influence on the mobilization of individual particles. Especially clay particles are said to be heavily mobilized after a water breakthrough [11]. Models to calculate wellbore stability and predict sand production can be found in Petroleum Rock Mechanics: Drilling Operations and Well Design by Aadnøy and Looyeh [12].

Consequences of sand production

The production of sand usually leads to problems. One exception from this rule is a possible increase of the near wellbore porosity and permeability, which can be used during sand management operations. Negative consequences include lowered production rates due to accumulation of particles. In the wellbore they can lower the productive area of the well or decrease the permeability. At the surface, sand can form beds of sediment in flow lines or block separators. This leads to increased pressure drops and processing costs [13]. The mobilized sand can cause erosive wear in all completion elements it is transported through. This can ne-

nung im bohrlochnahen Bereich führt. Während der Inproduktionssetzung und des Betriebs des Bohrlochs wird der Druck verringert, um Flüssigkeiten zu fördern, was die Spannung weiter erhöht. Gegen Ende der Lebensdauer einer Lagerstätte erhöht sich die effektive Spannung erneut, da der Porendruck abnimmt.

Es gibt eine enorme Anzahl von Faktoren, die diese beiden Grundursachen beeinflussen (Abb. 1). Die ungestörte Insitu-Spannung hängt von der Tiefe und den Eigenschaften der überlagernden Formationen sowie vom Porendruck und der Poissonzahl ab. Vereinfachte Lösungen des Spannungsfeldes um das Bohrloch können aus den Kirsch-Gleichungen abgeleitet werden [10]. Die resultierenden sekundären Spannungen werden durch den Bohrlochdruck beeinflusst, der von der Flüssigkeitsdichte und dynamischen Faktoren wie Fließgeschwindigkeit und Reibung sowie von der Geometrie des Bohrlochs (Durchmesser, Neigung usw.) abhängt. Die Festigkeit des Gesteins hängt von der Reibung zwischen den Partikeln und dem Vorhandensein einer Zementierung (z. B. durch Kalzit) ab. Die Benetzungseigenschaften der Partikel in

cessitate an investment in sand tolerant pumps [14] and erosion surveillance such as sand detectors [15] and erosion probes.

Sand control methods and sand screens

A number of procedures and completion elements have been developed to counteract sand production. These methods are summarized under the term 'sand control'. Sand control comprises all procedures that are applied to stop the mobilization, transport or deposition of formation solids. Based on Figure 1, the methods of sand control can be distinguished into the elimination of root causes (such as lowering the flow rate), manipulation of the influential factors (plastic consolidation) and the toleration of different types of sand production in terms of particle size or place of deposition (i.e. allowing the movement of solids up to a certain point). A combination of the methods can be referred to as sand management.

The most widely used method is probably mechanical sand control. This means the installation of downhole filters (i.e. sand screens) that retain mobilized particles at different places of the

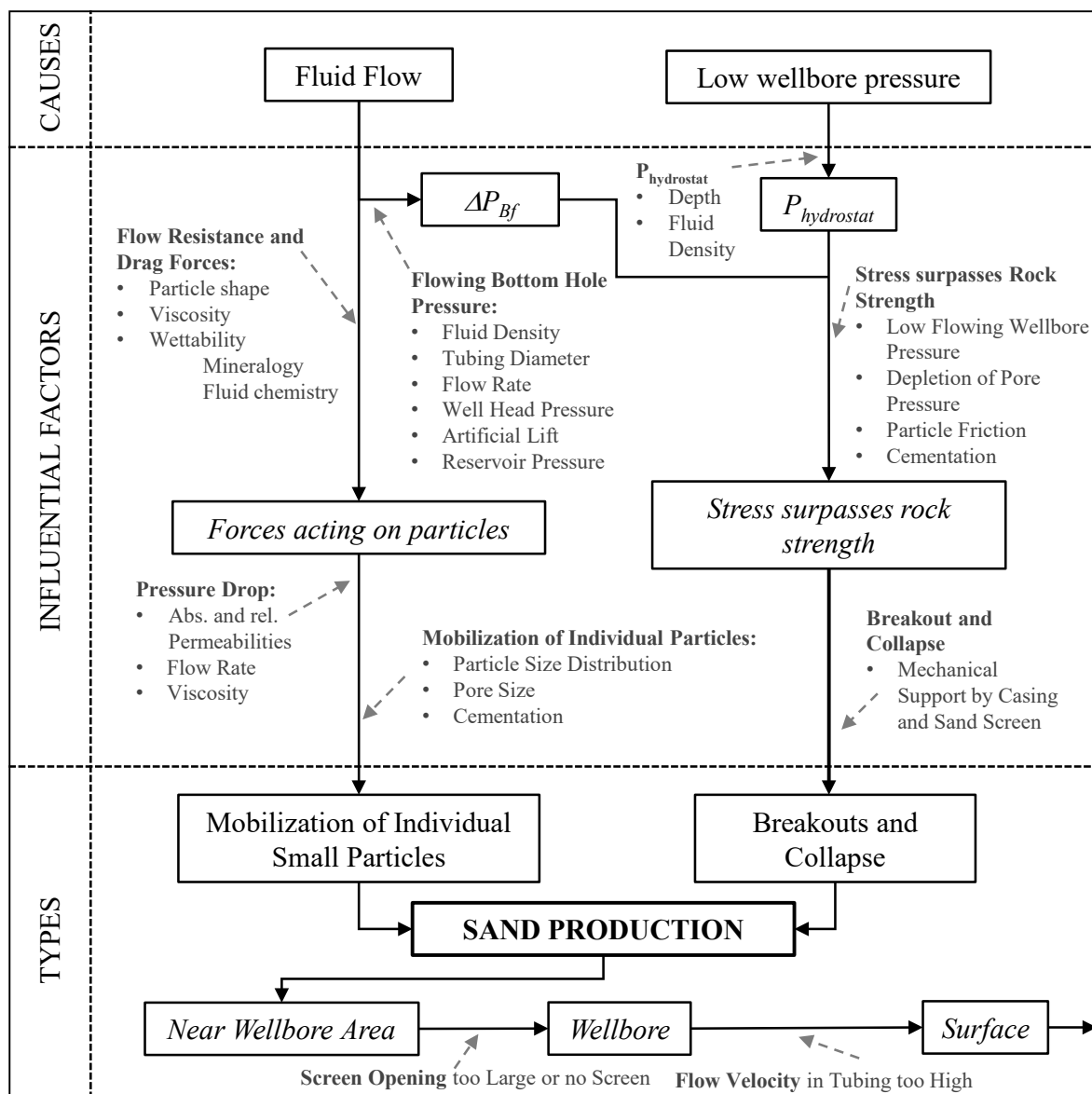


Abb. 1 Sandproduktion - Ursachen, Arten und ausgewählte Einflussfaktoren
 Fig. 1 Sand production – Causes, types and selected influential factors

Verbindung mit der chemischen Zusammensetzung der geförderten Fluide haben den größten Einfluss auf die Mobilisierung einzelner Partikel. Insbesondere Tonpartikel können nach einem Wasserdurchbruch verstärkt mobilisiert werden [11]. Modelle zur Berechnung der Bohrlochstabilität und zur Vorhersage der Sandproduktion sind in Petroleum Rock Mechanics: Drilling Operations and Well Design von Aadnøy und Looyeh [12] zu finden.

Folgen von Sandproduktion

Die Förderung von Sand führt meist zu Problemen. Eine Ausnahme von dieser Regel ist eine mögliche Erhöhung der Porosität und Durchlässigkeit in der Nähe des Bohrlochs, die bei Sandmanagementmaßnahmen genutzt werden kann. Zu den negativen Folgen gehören verringerte Förderraten aufgrund der Ansammlung von Partikeln. Im Bohrloch können sie den produktiven Bereich der Bohrung verringern oder die Durchlässigkeit reduzieren. An der Oberfläche kann der Sand in Fließleitungen aussedimentieren oder Abscheider blockieren. Dies führt zu erhöhten Druckverlusten und Aufbereitungskosten [13]. Der mobilisierte Sand kann in allen Komplettierungselementen, durch die er transportiert wird, erosiven Verschleiß verursachen. Dies kann eine Investition in sandtolerante Pumpen [14] und Erosionsüberwachung wie Sanddetektoren [15] und Erosionssonden erforderlich machen.

Methoden der Sandkontrolle und Sandfilter

Um der Sandproduktion entgegenzuwirken, wurde eine Reihe von Verfahren und Komplettierungselementen entwickelt. Diese Methoden werden unter dem Begriff „Sandkontrolle“ zusammengefasst. Die Sandkontrolle umfasst alle Verfahren, die angewandt werden, um die Mobilisierung, den Transport oder die Ablagerung von Formationsfeststoffen zu unterbinden (Abb. 1). Die Methoden der Sandkontrolle können unterschieden werden in die Beseitigung der Ursachen (z. B. Verringerung der Fließgeschwindigkeit), die Beeinflussung der Einflussfaktoren (plastische Verfestigung) und die Tolerierung verschiedener Arten der Sandproduktion in Bezug auf die Partikelgröße oder den Ablagerungsort (d. h. Zulassung der Bewegung von Feststoffen bis zu einem bestimmten Punkt). Eine Kombination der Methoden kann als Sandmanagement bezeichnet werden.

Die wohl am weitesten verbreitete Methode ist die mechanische Sandkontrolle. Darunter versteht man die Installation von Bohrlochfiltern (d. h. Sandfiltern), die mobilisierte Partikel an verschiedenen Stellen des Bohrlochs zurückhalten. Sandfilter sind im Wesentlichen Rohre mit definierten Öffnungen und werden in der Regel direkt vor der produktiven Gesteinsformation installiert. Sie können mit einem Kiesfilter im Ringraum kombiniert werden (Gravel Pack). Ohne Kies werden sie als Standalone Screens (SAS) bezeichnet. Sie können auch in einem Landenippel installiert werden, um Partikel zurückzuhalten [16] oder von Bohrochsausrüstungen wie z. B. Pumpen zu schützen (Abb. 2).

Sandfilter

Nach ISO 17824 ist ein Sandfilter definiert als eine „mechanische Filtriervorrichtung, die verwendet wird, um Formations-sand oder die Ringraum-Kiespackung zurückzuhalten, während sie den Durchtritt von Fluiden in das Förderrohr zulässt“. [17] Es wurden verschiedene Arten von Sandfiltern entwickelt, wie z. B. Slotted Liner, Wickeldrahtfilter (WWS), Gewe-

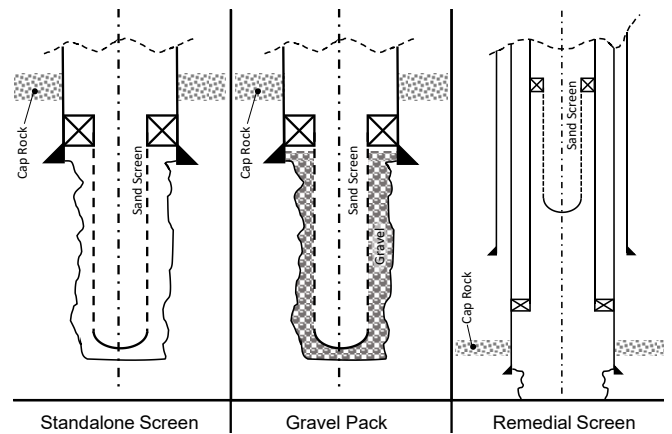


Abb. 2 Mögliche Einbaupositionen für Sandfilter
Fig. 2 Possible installation positions for sand screens

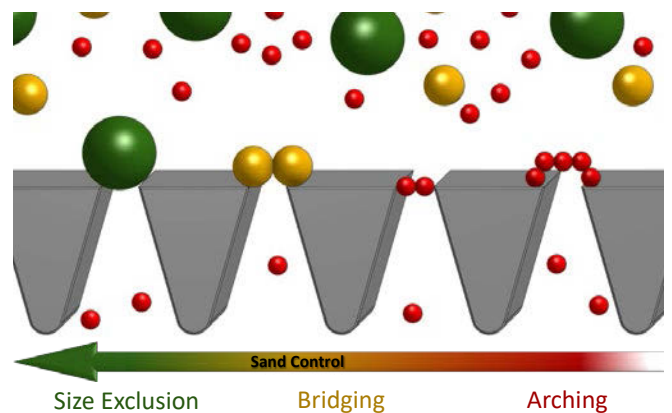


Abb. 3 Partikelrückhaltemechanismen auf der Oberfläche von Wickeldrahtfiltern
Fig. 3 Particle retention mechanisms on the surface of wire wrapped screens

wellbore. Sand screens are essentially pipes with defined openings and are usually placed directly in front of the productive rock formation. They can be combined with a gravel filter in the annulus (Gravel Pack). Without gravel they are referred to as standalone screens (SAS). They can also be installed in a landing nipple as remedial sand control [16] or to protect downhole equipment such as pumps (Fig. 2).

Sand Screens

According to ISO 17824, a sand screen is defined as a “mechanical filtration device used to retain the formation sand or annular gravel pack while allowing the passage of fluids into the production tubing”[17]. Various screen types have been developed such as slotted liners, wire wrapped screens (WWS), metal mesh screens, prepacked screens and filters using stainless steel wool. A small amount of market share is taken up by ceramic screens[16, 18, 19].

Most screens function by retaining the particles on the outside due to bridging or size exclusion[20] (Fig. 3). Prepacked and steel wool screens can also retain particles within their filtration media (depth filtration). When used as standalone screens, the ultimate goal is to create a permeable layer of retained particles that fills up the whole annulus. This is achieved by first producing some of the smaller particles until large particles block the open-

befilter, vorgepackte Filter und Filter mit Edelstahlwolle. Ein kleiner Marktanteil entfällt auf keramische Filter [16, 18, 19]. Die meisten Filter funktionieren, indem sie die Partikel aufgrund von Brückenbildung oder Größenausschluss an der Außenseite zurückhalten [20] (Abb. 3). Vorgepackte Filter und Stahlwollefilter können Partikel auch innerhalb ihres Filtrationsmediums zurückhalten (Tiefenfiltration). Bei der Verwendung als SAS besteht das Ziel darin, eine durchlässige Schicht aus zurückgehaltenen Partikeln zu schaffen, die den gesamten Ringraum ausfüllt. Dies wird erreicht, indem zuerst ein Teil der kleineren Partikel produziert wird, bis große Partikel die Öffnungen des Filters blockieren. Die sich ergebenden Porenöffnungen zwischen den großen Partikeln sind kleiner als die ursprüngliche Öffnungsweite, so dass nach einigen zurückgehaltenen Partikelschichten keine Partikel mehr durch den Filter transportiert werden.

Lebenszyklus von Sandfiltern

Wie jedes andere Komplettierungselement müssen auch Sandfilter auf der Grundlage der zu erwartenden Bohrlochbedingungen und Betriebsverfahren ausgelegt werden. Dies ist in der Regel eine gemeinsame Aufgabe von Betreiber und Hersteller, die eine präzise und umfassende Kommunikation erfordert. Je nach den Vorgaben des Betreibers muss der Filter dann durch verschiedene Tests an Mustern und Prototypen qualifiziert werden. Danach wird der Filter hergestellt und

ings of the screen. The resulting pore throats between the large particles are smaller than the initial screen opening and so after some retained particle layers, no particles will be transported through the screen.

Life cycle of sand screens

Just like any other completion element, sand screens have to be designed based on the expected wellbore conditions and operational procedures. This is usually a joint effort involving the operator and the screen manufacturer, which necessitates precise and comprehensive communication. Depending on the operator's guidelines, the screen might then have to be qualified by conducting various tests on screen samples and prototypes. After that the screen is manufactured and shipped. It is not uncommon that screens are stored for extended periods of time before their installation. After the screen is installed, the well is beamed up and brought to production. The operational phase can include a number of production-stops and restarts. Workovers and stimulations can put additional strain on the screens. The life cycle of sand screens either ends with their retrieval or they are left in the ground when the well is abandoned.

Failure mechanisms of sand screens

Sand screens are used to retain mobilized solids and mechanically stabilize the wellbore to prevent a collapse. At the same time they are supposed to have a minimal influence on the productivi-

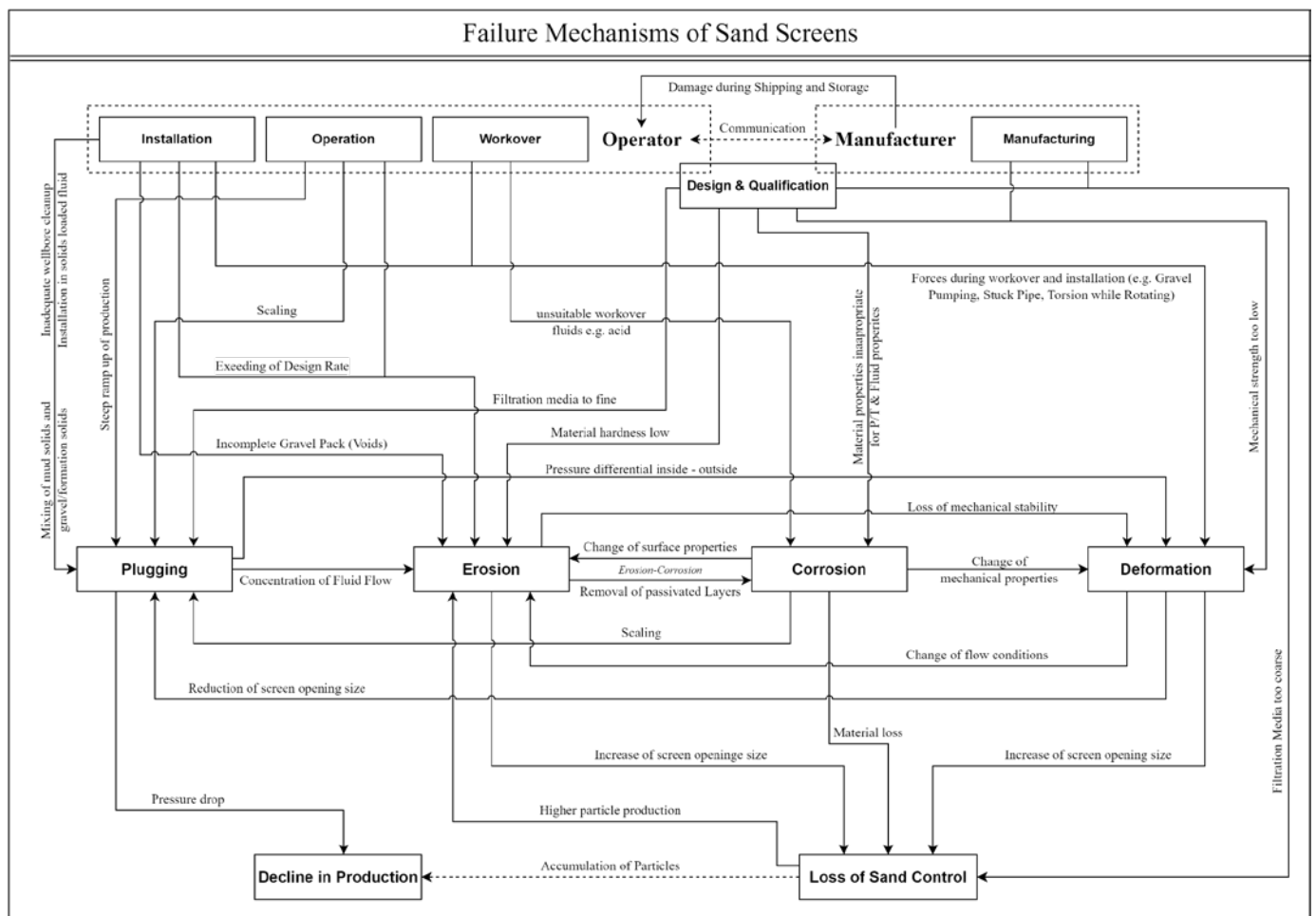


Abb. 4 Versagensmechanismen von Sandfiltern und Beispiele für ihr Zusammenwirken und ihre Ursachen
 Fig. 4 Failure mechanisms of sand screens and examples of their interaction and root causes

versandt. Es ist nicht ungewöhnlich, dass sie vor ihrem Einbau über längere Zeit gelagert werden. Nach dem Einbau des Filters wird die Bohrung in Betrieb genommen. Die Betriebsphase kann eine Reihe von Produktionsstopps und Wiederinbetriebnahme umfassen. Aufwältigungen und Stimulationen können die Filter zusätzlich beanspruchen. Der Lebenszyklus von Sandfiltern endet entweder mit ihrem Ausbau oder sie werden in der Bohrung gelassen, wenn das Bohrloch aufgegeben wird.

Versagensmechanismen von Sandfiltern

Sandfilter werden eingesetzt, um mobilisierte Feststoffe zurückzuhalten und das Bohrloch mechanisch zu stabilisieren, um einen Kollaps zu verhindern. Gleichzeitig sollen sie einen minimalen Einfluss auf die Produktivität des Bohrlochs haben. Ausgehend von diesen beiden Aufgaben sind zwei Versagenszustände zu definieren: Ein Sandfilter hat versagt, wenn er nicht in der Lage ist, die mobilisierten Partikel zurückzuhalten, oder wenn die Produktivität des Bohrlochs aufgrund seiner Installation signifikant verringert wird.

Das Oxford English Dictionary definiert das Verb „versagen“ als „1 erfolglos sein, um ein Ziel zu erreichen [...]“ oder „3 aufhören, richtig zu funktionieren; zusammenbrechen“ [21]. Übertragen auf Sandfilter bedeutet diese doppelte Definition, dass zwischen einem anfänglichen Versagen und einem späteren Versagen während der Lebensdauer unterschieden werden muss. Ein anfänglicher Ausfall ist das Ergebnis einer falschen Auslegung (z. B. zu große Öffnungen, die zu einer übermäßigen Sandproduktion führen, falsches Installationsverfahren). Abgesehen von einer falschen Auslegung können vier verschiedene Mechanismen zu einem Versagen während der Installations-, Rückhol-, Workover- und Betriebsphase führen. Diese Mechanismen sind mechanische Deformation, Korrosion, Verstopfung und Erosion. Die Mechanismen können sich gegenseitig beeinflussen, was es schwierig macht, die Grundursache eines Ausfalls zu ermitteln. Abbildung 4 zeigt Beispiele für das Zusammenspiel aller Versagensmechanismen von Sandkontrollfiltern.

Verstopfen von Sandfiltern

Bei der Verstopfung von Sandfiltern muss zwischen verschiedenen Kategorien unterschieden werden. Erstens gibt es eine Verstopfung der Filteröffnungen selbst. Dies ist in der Regel nicht das Ergebnis des Sandkontrollverfahrens. Stattdessen können die Öffnungen durch organische [22] oder anorganische [23] (Silikate, Calcit) Ablagerungen sowie Tone und Korrosionsprodukte verstopfen [11, 23, 24]. Die zweite Form der Filterverstopfung, die eigentlich eher eine Folge der fehlenden Sandkontrolle ist, ist die Ansammlung von Material zwischen Filtermantel und Basisrohr [25]. Die wohl wichtigste Form der Filterverstopfung ist das Vorhandensein einer gering durchlässigen Zone im bohrlochnahen Bereich und im Ringraum. Diese Zone kann aus zurückgehaltenen Formationspartikeln oder aus einer Kiesschüttung bestehen, in die Feinanteile eingedrungen sind.

Eine Verstopfung führt zu einem Rückgang der Produktivität des Bohrlochs. Um die Entwicklung einer gering durchlässigen Zone außerhalb eines Standalone Screens zu verhindern, muss die Öffnungsgröße richtig ausgelegt werden. Zu kleine Öffnungen behindern die Produktion von Feinstoffen in der Anfangsphase und behindern die Entwicklung einer durchlässigen Schicht. Zu große Öffnungen sind nicht in der Lage, die mobilisierten Sandkörner zu kontrollieren.

ty of the well. Based on these two features, two states of failure have to be defined: A sand screen has failed, when it is unable to retain the mobilized particles or if the productivity of the well is significantly decreased due to its installation.

The Oxford English Dictionary defines the Verb “to fail” as “1 Be unsuccessful in achieving one’s goal [...]” or “3 Cease to work properly; break down”[21]. In the context of sand screens, this dual definition necessitates distinguishing between an initial failure and a failure later during its life span. An initial failure is the result of a false design (e.g. screen openings too large, resulting in excessive sand production, wrong installation procedure). Apart from a false design, four distinct mechanisms can lead to a failure during installation, retrieval, workover and operational phase. These mechanisms are mechanical deformation, corrosion, plugging and erosion. The mechanisms can influence each other, which makes it difficult to identify the root cause of a failure. Figure 4 shows examples of the interaction of all failure mechanisms of sand control screen.

Plugging

Plugging of sand screens has to be distinguished into different categories. First there is a plugging of the screen openings itself. This is usually not a result of the sand control process. Instead the openings can be plugged by organic [22] or inorganic [23] (silicates, calcite) scaling, as well as clays and corrosion products [11, 23, 24]. The second form of screen plugging that is in fact more a consequence of failed particle retention is the accumulation of material between filter shroud and base pipe [25]. Probably the most important type of screen plugging is the existence of a low permeable zone in the near wellbore area and annulus. The zone can be made up of retained formation particles or a gravel pack that has been invaded by fines.

Plugging leads to a decrease of the productivity of the well. To prevent the development of a low permeable zone outside a standalone screen, the opening size has to be designed properly. Too small openings interfere with the production of fines during the initial phase and hinder the development of a permeable layer. Too large openings are unable to control any of the mobilized sand grains.

The correct sizing of screen openings has been a topic for several decades. The first attempt was published by Coberly [20] who was immediately challenged by Wilson [26], who proposed the famous Gulf Coast Criterion (Opening Size equal to D10 of particle size distribution of the reservoir). We suggest sizing a screen based on field experience (either from wells in the same field or comparable formations) and sand retention tests [27] with the Gulf Coast Criterion being a good starting point. Ideally, the result of the tests is an opening size range [28]. More precisely discussed sizing criteria have been published en masse for different screens (dutch twilled waeve: D5[29], sintered mesh: D10[30], Mesh: 2.5•D50[31], Slot width < 2•D50[31]). There is already an excellent summary and selection methodology for sand screens written by Chanpura et al. [7].

There is no universal definition for when the area outside the screen has to be defined as plugged. The installation of a screen will inevitably lead to a decrease of the wellbore radius and therefore to a pressure drop [28]. This can be seen by simply applying Darcy’s Law [32] in a radial form:

$$\Delta P_{e \rightarrow w} = \frac{Q \cdot \eta}{2\pi \cdot k \cdot h} \cdot \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) \tag{1}$$

A good definition can be found by applying the skin-concept de-

Die richtige Öffnungsweite ist schon seit mehreren Jahrzehnten ein Thema. Der erste Versuch wurde von Coberly veröffentlicht [20] dem jedoch direkt von Wilson [26] direkt widersprochen wurde, der das berühmte Golfküstenkriterium vorschlug (Öffnungsgröße gleich D10 der Partikelgrößenverteilung des Reservoirs). Wir schlagen vor, die Größe eines Filters auf der Grundlage von Erfahrungen vor Ort (entweder aus Bohrlöchern im selben Feld oder in vergleichbaren Formationen) und Sandretentionstests zu bestimmen [27] wobei das Golfküsten-Kriterium ein guter Ausgangspunkt ist. Idealerweise ist das Ergebnis der Tests ein Öffnungsweitenbereich [28]. Genauere Auslegungskriterien sind für verschiedene Filtermedien veröffentlicht worden (Dutch Twilled Wave: D5[29], Sintergewebe: D10[30], Maschenweite: 2,5-D50[31], Schlitzweite < 2-D50[31]). Es gibt bereits eine ausgezeichnete Zusammenfassung und Auswahlmethodik für Sandfilter, die von Chanpura et al. [7].

Es gibt keine allgemeingültige Definition dafür, wann der Bereich außerhalb des Filters als verstopft zu betrachten ist. Der Einbau eines Sandfilters führt unweigerlich zu einer Verringerung des Bohrradius und damit zu einem Druckabfall [28]. Dies lässt sich durch einfache Anwendung des Darcy'schen Gesetzes [32] in radialer Form nachvollziehen:

$$\Delta P_{e \rightarrow w} = \frac{Q \cdot \eta}{2\pi \cdot k \cdot h} \cdot \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) \quad (1)$$

Eine gute Definition kann durch Anwendung des von Antonius van Everdingen entwickelten Skin-Konzepts [33] unter Verwendung der Hawkins-Gleichung [34] für den Skin-Faktor gefunden werden:

$$\Delta P_{e \rightarrow w} = \frac{Q \cdot \eta}{2\pi \cdot k \cdot h} \cdot \left(\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) + S\right) \quad (2)$$

$$S = \left(\frac{k_e}{k_s} - 1\right) \cdot \ln\left(\frac{r_s}{r_w}\right) \quad (3)$$

Wenn der Innenradius des Sandfilters als Bohrradius r_w verwendet wird und der Radius der Skin-Zone r_s gleich dem unkomplettierten Bohrradius (d.h. dem Radius des Bohrmeißels) ist, hat der Sandfilter keinen unerwarteten Einfluss auf die Produktivität, wenn die Durchlässigkeit der Skin-Zone k_s mindestens gleich oder größer ist als die Durchlässigkeit der Lagerstätte k_e . Diese Definition wird auch von anderen Autoren verwendet [7]. Markestad et al. definieren einen Skin-Faktor von weniger als 0,5 als erfolgreich [28].

Betriebsbedingte Ursachen für Verstopfungen können die Installation der Filter in feststoffbeladener Bohrspülung sein, der durch unzureichende Bohrlöcherreinigung, Vermischung von Filterkuchen und Formationsfeststoffen und Vermischung von Partikeln aus verschiedenen Lagerstättenschichten verursacht wird. [7, 11]. Die Verstopfung muss nicht unbedingt gleichmäßig über die gesamte Länge des Filters erfolgen. Vielmehr ist es wahrscheinlicher, dass nur Teile des Zuflussbereichs oder der Perforationen von der geringen Durchlässigkeit betroffen sind. Unvollständige Kiespackungen (d.h. Hohlräume im Ringraum) können zu einem geringeren Durchflusswiderstand führen. Beide Faktoren führen zu einer Konzentration des Flüssigkeitsstroms auf kleinere Bereiche des Filters, was den Druckabfall und das Erosionsrisiko erhöht.

veloped by Antonius van Everdingen [33], using the Hawkins-Equation [34] for the Skin-Factor:

$$\Delta P_{e \rightarrow w} = \frac{Q \cdot \eta}{2\pi \cdot k \cdot h} \cdot \left(\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) + S\right) \quad (2)$$

$$S = \left(\frac{k_e}{k_s} - 1\right) \cdot \ln\left(\frac{r_s}{r_w}\right) \quad (3)$$

If the inner radius of the sand screen is used as the wellbore radius r_w and the radius of the skin-zone r_s is equal to the uncompleted wellbore radius (i.e. the radius of the drill bit), the sand screen has no unexpected influence on the productivity if the permeability of the skin zone k_s is at least equal to or larger than the permeability of the reservoir k_e . This definition is also used by other authors [7]. Markestad et al. define a skin factor of less than 0.5 as successful [28].

Operational causes for plugging can be the installation of the screens in solids-loaded mud caused by inadequate wellbore cleanup, mixing of filter cake and formation solids and mixing of particles from different reservoir layers [7, 11]. Plugging must not necessarily occur homogeneously along the whole length of the screen. Instead it is more likely that only parts of the inflow area or perforations are influenced by the low permeability. Incomplete Gravel Packs (i.e. voids in the annulus) can lead to lower flow resistance. Both factors lead to a concentration of the fluid flow to smaller areas of the screen, increasing pressure drop and the risk of erosion.

Corrosion

According to ISO 8044, corrosion is defined as a "physicochemical interaction between a metal and its environment that results in changes in the properties of the metal, and which may lead to significant impairment of the function of the metal, the environment, or the technical system, of which these form a part" [35]. Corrosion of sand screens can either lead to a loss of material and therefore a decrease of mechanical stability or an increase in opening size. The loss of mechanical stability is especially critical, when a screen has to be retrieved after years of operation, because it can fall apart due to its reduced tensile strength. Corrosion products can plug sand screens [23].

An in depth description and investigation on failure of different screen types due to corrosion was given by Mahmoudi et al. [36]. The corrosion system that sand screens are part of is characterized by the pressure and temperature conditions in the well, the fluids that flow through it, the flow parameters (e.g. velocity, rate, etc.) and the material of the screen. Sand screens for oil and gas wells are usually made out of stainless steel. Commonly used alloys include 1.4301, 1.4404 or 1.4571 but they can also be manufactured from duplex steels such as 1.4462. Sometimes the base pipe is made of carbon steel to save costs. The alloy is usually chosen according to the expected brine composition and the possible presence of gases such as hydrogen (H_2), hydrogen sulfide (H_2S) and carbon dioxide (CO_2). It does not make economic sense to choose the highest grade material for every application. Instead the alloy that will provide the desired properties and longevity under the well conditions for the lowest cost will be chosen. [37] There are a number of industry standards for the selection of alloy grades for general application (ISO 21457 [38]) and specific environments such as CO_2 (ISO 17348[39]) and H_2S (ISO 15156 Part 1 [40], 2 [41] and 3 [42]).

Korrosion

Nach ISO 8044 ist Korrosion definiert als eine „physikochemische Wechselwirkung zwischen einem Metall und seiner Umgebung, die zu einer Veränderung der Eigenschaften des Metalls führt und die zu erheblichen Beeinträchtigungen der Funktion des Metalles, der Umgebung oder des technischen Systems, von dem diese einen Teil bilden, führen kann.“ [35] Die Korrosion von Sandfiltern kann entweder zu einem Materialverlust und damit zu einer Abnahme der mechanischen Stabilität oder zu einer Vergrößerung der Öffnung führen. Der Verlust an mechanischer Stabilität ist besonders kritisch, wenn ein Filter nach mehrjährigem Betrieb ausgebaut werden muss, da er aufgrund einer verminderten Zugfestigkeit reißen kann. Korrosionsprodukte können darüberhinaus den Sandfilter verstopfen [23].

Eine eingehende Beschreibung und Untersuchung des Versagens verschiedener Filtertypen aufgrund von Korrosion wurde von Mahmoudi et al. erstellt [36]. Das Korrosionssystem, zu dem Sandfilter gehören, ist durch die Druck- und Temperaturbedingungen im Bohrloch, die durchfließenden Fluide, die Durchflussparameter (z. B. Geschwindigkeit, Volumenstrom usw.) und das Material des Filters gekennzeichnet. Sandfilter für Öl- und Gasbohrungen werden in der Regel aus rostfreiem Stahl hergestellt. Zu den häufig verwendeten Legierungen gehören 1.4301, 1.4404 oder 1.4571, sie können aber auch aus Duplexstählen wie 1.4462 hergestellt werden. Manchmal wird das Basisrohr aus Kostengründen aus Kohlenstoffstahl hergestellt. Die Wahl der Legierung richtet sich in der Regel nach der zu erwartenden Solezusammensetzung und dem möglichen Vorhandensein von Gasen wie Wasserstoff (H_2), Schwefelwasserstoff (H_2S) und Kohlenstoffdioxid (CO_2). Es ist wirtschaftlich nicht sinnvoll, für jede Anwendung das hochwertigste Material zu wählen. Stattdessen wird die Legierung gewählt, die die gewünschten Eigenschaften und die Langlebigkeit unter den Bohrungsbedingungen zu den niedrigsten Kosten bietet. [37] Es gibt eine Reihe von Industrienormen für die Auswahl von Legierungsarten für allgemeine Anwendungen (ISO 21457 [38]) und spezifische Umgebungen wie CO_2 (ISO 17348 [39]) und H_2S (ISO 15156 Teil 1 [40], 2 [41] und 3 [42]).

Deformation

Ein Sandfilter kann sich verformen, wenn die auf ihn wirkenden Kräfte die mechanische Festigkeit der Konstruktion übersteigen. Unter Deformation werden in diesem Artikel alle elastischen und plastischen Deformation sowie vollständige Abrisse verstanden. Ein Versagen aufgrund von Verformung kann während des Einbaus, des Ausbaus und der Betriebsphase auftreten. Die Zug- und Torsionsfestigkeit des Filters sind die wichtigsten Faktoren während des Einbaus und des Ausbaus. Kritische Zustände können beispielsweise bei der Installation von Sandfiltern in Bohrlöchern langen horizontalen Abschnitten auftreten [43] wenn sie rotiert oder zurückgezogen werden müssen, und in Bohrlöchern mit hohen Aufbautraten, in denen die Filter gebogen werden [44]. Ein wichtiger Einflussfaktor ist die Reibung zwischen Filter und Bohrloch. Das Gleiche gilt auch für den Ausbau von Sandfiltern, wenn aufgrund der erhöhten Reibung durch zurückgehaltene Partikel im Ringraum die maximale Zugfestigkeit erforderlich ist. In der Regel können nach längerer Betriebszeit nur kurze Abschnitte von wenigen Rohren zuverlässig ausgebaut werden.

Mechanische Deformation während des Betriebs führen zu

Deformation

A sand screen can deform if the forces that act on it exceed the mechanical strength of the construction. In this paper deformation is defined as any elastic and plastic deformation as well as entire tear-offs. A failure due to deformation can happen during installation, retrieval and the operational phase. The tensile and torsional strength of the screen are the most important factors during installation and retrieval. For example, critical states can occur during the installation of sand screens in extended reach wells with long horizontal sections[43] if they need to be rotated or pulled back and in wells with high dog legs where the screens are bending[44]. An important influential factor is the friction between screen and wellbore. The same also applies for the retrieval of screens, when the maximum tensile strength is needed due to increased friction from retained particles in the annulus. In general, only short sections of a few joints can reliably be retrieved after longer operational periods.

Mechanical deformation during operation leads to a loss of sand control. It is possible that only the screen shroud is damaged, while the base pipe stays intact [45]. The plugging of screens during the operational phase can result in a pressure differential between formation and the inside of the base pipe [46]. Combined with the load of the formation this can lead to collapse on exceeding the compressive strength of the construction. Under normal conditions (i.e. not plugged) the pressure differential is negligible [44]. A collapse of a screen joint due to the force from reservoir rocks is very rare [6]. Mechanical damage can also be the result of point loads [47] e.g. from bore hole breakouts [48]. Sand screens are often assembled from two parts: base pipe and filter shroud. Both parts can fail individually and can significantly differ in their mechanical strengths[49]. The validation of the mechanical strength of sand screens is standardized by ISO 17824[17]. A validation can be necessary because of the complex geometry of sand screens that cannot directly be translated into verified existing models e.g. of thin walled pipes etc. This also applies to any changes of a design (“scale-up”) that could necessitate additional full scale tests [49].

Erosion

The erosion of sand screens comprises all processes where material is removed due to fluid flow (single- or multi-phase with solids). The loss of material can be caused by impact from solid particles on the screen or when particles roll and slide over its surface. Erosion due to droplets in gas wells is also possible. Cavitation is usually not a concern in wells due to the increased pressure. Erosion is closely linked to corrosion and both mechanisms will influence each other (erosion-corrosion).

Sand control is always linked to an interaction of particles with the surface of a sand screen. Solids are transported to and through the screen by the fluid flow (individual particles) or gravity (breakouts and collapse). The occurrence of material loss depends on a number of factors. It is obvious that the faster the particles move and the larger they are, the more erosion they can cause [46]. This is due to an increase in kinetic energy [50]. The faster the fluid flows, the higher the particle velocity. However, particle and flow velocity are not necessarily equal at all times. Different velocities have to be used to characterize the system, depending on the exact mechanism. For a direct impact, the velocity in the annulus or the perforations is important. In the case of solids-loaded fluid flow through a gravel pack screen, the velocity inside the screen openings is relevant.

Another influential factor is the viscosity of the fluid because it

einem Verlust der Sandkontrolle. Es ist möglich, dass nur die Filtermanschette beschädigt wird, während das Basisrohr unversehrt bleibt [45]. Die Verstopfung von Sandfiltern während der Betriebsphase kann zu einem Druckunterschied zwischen der Formation und dem Inneren des Basisrohrs führen [46]. Zusammen mit der Belastung der Formation kann dies zu einem Kollaps aufgrund einer Überschreitung der Druckfestigkeit der Konstruktion führen. Unter normalen Bedingungen (d. h. ohne Verstopfung) ist der Druckunterschied vernachlässigbar [44]. Der Kollaps eines Filterrohres durch die Kraft des Lagerstättengesteins ist sehr selten [6]. Mechanische Schäden können auch durch Punktbelastungen verursacht werden [47] z. B. durch Bohrlochwandausbrüche [48].

Sandfilter werden häufig aus zwei Teilen zusammengesetzt: dem Basisrohr und der Filtermanschette. Beide Teile können einzeln versagen und sich in ihrer mechanischen Festigkeit erheblich unterscheiden [49]. Die Validierung der mechanischen Festigkeit von Sandfiltern ist in der ISO-Norm 17824 [17] beschrieben. Eine Validierung kann aufgrund der komplexen Geometrie von Sandfiltern erforderlich sein, die nicht direkt in verifizierte bestehende Modellen, z. B. von dünnwandigen Rohren, übertragen werden kann. Dies gilt auch für Änderungen einer Konstruktion („Scale-up“), die zusätzliche Versuche im Originalmaßstab erforderlich machen könnten [49].

Erosion

Die Erosion von Sandfiltern umfasst alle Vorgänge, bei denen Material aufgrund von Fluidströmungen (ein- oder mehrphasig mit Feststoffen) abgetragen wird. Der Materialverlust kann durch den Aufprall von Feststoffpartikeln auf den Filter oder durch das Rollen und Gleiten von Partikeln über die Oberfläche verursacht werden. Auch Erosion durch Tröpfchenschlag in Gasbohrungen ist möglich. Kavitation ist in Bohrlöchern aufgrund des erhöhten Drucks normalerweise kein Problem. Erosion ist eng mit Korrosion verbunden, und beide Mechanismen beeinflussen sich gegenseitig (Erosion-Korrosion).

Mechanische Sandkontrolle ist immer mit einer Interaktion von Partikeln mit der Oberfläche eines Sandfilters verbunden. Die Feststoffe werden durch den Fluidstrom (einzelne Partikel) oder die Schwerkraft (Ausbrüche und Kollaps) zum und durch den Filter transportiert. Das Auftreten von Materialverlusten hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Es liegt auf der Hand, dass je schneller sich die Partikel bewegen und je größer sie sind, desto mehr Erosion können sie verursachen [46].

determines how well the solids will follow the direction of the fluid flow. Particles in a liquid with higher viscosity cause less specific mass loss than particles in a lower viscosity liquid [51].

Based on the hardness of the transported solids and its ratio to the hardness of the screen material, the risk of an erosional failure can be estimated. The formation solids are usually harder than the commonly used alloys and therefore cause increased wear [52]. If materials are used, that are harder than the formation solids, the wear can be significantly decreased. This can be achieved by the use of ceramics or hard metals [19, 53]. The concentration of particles has less of an influence on the likelihood of erosion, than it has on how long a completion element can withstand the conditions.

High rate gas wells, especially cased holes and fractured reservoirs, are very prone to erosion. Partial plugging of the annulus can further concentrate the fluid flow [46]. These areas are susceptible to erosion due to high flow velocities [51]. Cameron and Jones [54] describe an erosional failure in cased holes as follows: “[...] a particle has to be moved and accelerated from the formation, through the tunnel to impact the screen. The particle then either passes through the screen [...], moves away from the screen into the annulus, recirculates or bridges in the screen itself. If the tunnel fills with formation sand and a sand layer builds on the screen surface, further erosion is thought to be greatly reduced.”

If the screens are heavily eroded during this initial phase, sand control has failed due to ongoing particle transport through enlarged screen openings. This further increases erosion and dramatically reduces the lifetime of the screen. It is therefore essential to keep the initially specified screen opening constant for as long as possible.

Apart from direct particle impacts, erosion can be caused by continuous fines production [46] also through gravel packs [6]. Some authors primarily consider this process as responsible for erosion [55]. A similar mechanism can erode screens already during their installation by the solids loaded drill in fluids [49, 56]. As previously described, a screen can be plugged by mud-solids. If the circulation continues, the resulting high flow rates can erode the remaining free part of the screen [44].

Another mechanism for the emergence of a flow concentration is the existence of annular flow, e.g. in horizontal wells. An open annulus will not lead to a uniform inflow through the entire screen surface. Instead the flow concentrates at the heel of the well. The reason for that is a pressure equilibrium between annulus and inside the screen that prevents radial flow. Only at the end of the well, the fluid is forced through the screen and results in increased flow velocities. Sudden changes in flow velocities

Tab. 1 Fließgeschwindigkeitsgrenzen für Sandfilter.

Tab. 1 Flow velocity limits for sand screens

Flow velocity		Comment	Source
ft/s	m/s		
12,66	3,86	Flow inside Base Pipe	Mahmoudi et al (2018)[36]
0,27	0,08	Perforation Velocity (empty Annulus)	Cameron & Jones (2018)[54]
0,5	0,15		Gillespie & Jones (2009)[51]
20	6,10	Fluid: Gas	Tiffin et al (2003)[50]
10	3,05	Fluid: Oil	
1	0,30	Generally proposed velocity limit	Procyk et al (2015)[55]
0,13	0,04		
0,33	0,1	Gravel Pack without voids, some flow concentration	Cased Hole, Perforation Velocity, Mesh Screens
0,65	0,20	Gravel Pack, no voids, no hot spots	

Dies ist auf eine Zunahme der kinetischen Energie zurückzuführen [50]. Je schneller das Fluid fließt, desto höher ist die Geschwindigkeit der Partikel. Allerdings sind Partikel- und Strömungsgeschwindigkeit nicht unbedingt immer gleich. Je nach dem genauen Mechanismus müssen unterschiedliche Geschwindigkeiten zur Charakterisierung des Systems verwendet werden. Bei einem direkten Aufprall ist die Geschwindigkeit im Ringraum oder in den Perforationen wichtig. Im Falle einer mit Feststoffen beladenen Flüssigkeitsströmung durch einen Gravel-Pack-Filter ist die Geschwindigkeit innerhalb der Filteröffnungen relevant.

Ein weiterer Einflussfaktor ist die Viskosität der Flüssigkeit, da sie bestimmt, wie gut die Feststoffe der Strömungsrichtung der Flüssigkeit folgen. Partikel in einer Flüssigkeit mit höherer Viskosität verursachen weniger spezifischen Materialverlust als Partikel in einer Flüssigkeit mit niedrigerer Viskosität [51].

Anhand der Härte der transportierten Feststoffe und ihres Verhältnisses zur Härte des Filtermaterials lässt sich das Risiko eines erosiven Versagens abschätzen. Die Feststoffe der Formation sind in der Regel härter als die üblicherweise verwendeten Legierungen und verursachen daher einen erhöhten Verschleiß [52]. Werden Materialien verwendet, die härter sind als die Formationsfeststoffe, kann der Verschleiß deutlich verringert werden. Dies kann durch den Einsatz von Keramiken oder Hartmetallen erreicht werden [19, 53]. Die Konzentration der Partikel hat weniger Einfluss darauf, ob Erosion auftritt, als darauf, wie lange ein Bauteil den Bedingungen standhalten kann.

Gasbohrungen mit hoher Förderrate, insbesondere verrohrte Bohrungen und geklüftete Lagerstätten, sind sehr erosionsanfällig. Eine teilweise Verstopfung des Ringraums kann den Flüssigkeitsstrom weiter konzentrieren [46]. Diese Bereiche sind aufgrund der hohen Fließgeschwindigkeiten anfällig für Erosion [51]. Cameron und Jones [54] beschreiben ein erosives Versagen in verrohrten Bohrungen wie folgt: „[...] ein Partikel muss von der Formation durch den Porenraum bewegt und beschleunigt werden, um auf den Filter zu treffen. Der Partikel geht dann entweder durch den Filter [...], bewegt sich vom Filter weg in den Ringraum, rezirkuliert oder bildet eine Brücke im Filter selbst. Wenn sich der Porenraum mit Formationspartikeln füllt und sich eine Sandschicht auf der Oberfläche des Filters gebildet hat, wird die weitere Erosion vermutlich stark reduziert.“

Wenn die Filter in dieser Anfangsphase stark erodiert werden, ist die Sandkontrolle aufgrund des anhaltenden Partikeltransports durch die vergrößerten Filteröffnungen gescheitert. Dadurch wird die Erosion weiter verstärkt und die Lebensdauer des Filters drastisch verkürzt. Es ist daher wichtig, die ursprünglich festgelegte Öffnungsweite so lange wie möglich konstant zu halten.

Abgesehen von den direkten Partikeleinwirkungen kann die Erosion auch durch die kontinuierliche Produktion von Feinanteilen verursacht werden [46] auch durch Kiesschüttungen [6]. Einige Autoren sehen vor allem diesen Prozess als verantwortlich für die Erosion an [55]. Ein ähnlicher Mechanismus kann Filter bereits während ihrer Installation durch die mit Feststoffen beladenen Bohrspülungen erodieren [49, 56]. Wie bereits beschrieben, kann ein Filter durch Spülungsfeststoffe verstopft werden. Wenn die Zirkulation fortgesetzt wird, können die daraus resultierenden hohen Durchflussraten den verbleibenden offenen Teil des Filters erodieren [44]. Ein weiterer Mechanismus für die Entstehung einer Strömung

can be caused by steam breakthrough [57]. It is difficult to define safe flow velocities that minimize the risk of erosion. This is due to the many influential factors and the lack of knowledge of the true flow condition in a well. Nevertheless, a number of authors have tried to find safe velocities for special cases. Some results are summarized in Table 1.

Conclusions

Sand screens represent an important element of many well completions. They are used to mechanically retain mobilized formation solids or gravel packs. The applied sand screens can fail in two distinct ways: either by losing the ability to retain particles or by causing an unacceptable influence on the productivity of the well. Four mechanisms can lead to failure: plugging, erosion, corrosion and deformation. The mechanisms are highly interconnected and can influence each other. They can originate at different steps during the lifetime of a screen from design, to retrieval. It is therefore important to understand which mechanisms are relevant at which stage (design, qualification, shipping, installation, operation, workover). The knowledge about the proposed mechanisms can act as a starting point for the design of a screen.

The literature is full of detailed examples for screen failures. Learning from past mistakes can be an important step in the design process. In addition to that, laboratory tests can be used to evaluate the suitability of the designed sand screen for the selected wellbore. It has to be kept in mind that lab tests are often just an approximation of the real world conditions and are therefore often not an aid to what will work but mostly to what will not work. Instead of aiming for a screen that overachieves in many areas it can be beneficial to identify the most critical failure mechanisms over its lifetime. Step-by-step the screen can then be optimized for a successful operation.

List of symbols

h	height/length of productive interval
k	permeability
k_e	unaltered reservoir permeability
k_s	permeability in skin-zone
Q	flow rate
r_e	drainage radius
r_w	wellbore radius
S	skin factor
$\Delta P_{e \rightarrow w}$	pressure differential between drainage radius and wellbore
μ	viscosity

Literature

- [1] W. L. Penberthy Jr and C. M. Shaughnessy, Sand Control. Society of Petroleum Engineers, 1992, ISBN: 978-1-55563-041-6.
- [2] W. K. Ott and J. D. Woods, Modern Sandface Completion Practices Handbook. Gulf Publishing Company, 2001.
- [3] D. Matanovic, M. Cikes, and B. Moslavac, Sand Control in Well Construction and Operation. Heidelberg: Springer, 2012, ISBN: 978-3-642-25613-4.
- [4] W. L. Penberthy Jr, "Sand Control," in Petroleum Engineering Handbook Volume IV Production Operations Engineering, J. D. Clegg, Ed. Society of Petroleum Engineers, 2007.
- [5] W. G. Graves, W. K. Ott, and J. D. Woods, "Sand Control Basics and Remedial Sand Control Practices," in Mature Oil and Gas Wells Downhole Remediation Handbook, Gulf Publishing Company, 2013, pp. 131–160.
- [6] D. Tiffin, G. King, R. Larese, and L. Britt, "New criteria for gravel and

mungskonzentration ist das Vorhandensein einer Ringraumströmung, z. B. in horizontalen Bohrlöchern. Ein offener Ringraum führt nicht zu einem gleichmäßigen Zufluss über die gesamte Filterfläche. Stattdessen konzentriert sich die Strömung am Fuß des Bohrlochs. Der Grund dafür ist ein Druckausgleich zwischen Ringraum und dem Inneren des Filters, der eine radiale Strömung verhindert. Erst am Ende des Bohrlochs wird die Flüssigkeit durch den Filter gezwungen, was zu erhöhten Fließgeschwindigkeiten führt. Plötzliche Änderungen der Fließgeschwindigkeiten können durch Dampfdurchbruch verursacht werden [57].

Es ist schwierig, sichere Fließgeschwindigkeiten zu definieren, die das Risiko von Erosion minimieren. Dies ist auf die vielen Einflussfaktoren und die mangelnde Kenntnis der tatsächlichen Fließbedingungen in einer Bohrung zurückzuführen. Dennoch haben eine Reihe von Autoren versucht, sichere Fließgeschwindigkeiten für spezielle Fälle zu finden. Einige Ergebnisse sind in Table 1 zusammengefasst.

Schlussfolgerungen

Sandfilter sind ein wichtiges Element vieler Bohrungskompletierungen. Sie werden eingesetzt, um mobilisierte Formationsfeststoffe oder Kiespakete mechanisch zurückzuhalten. Der Einsatz von Sandfiltern kann auf zwei verschiedene Arten versagen: entweder durch den Verlust der Fähigkeit, Partikel zurückzuhalten, oder durch eine inakzeptable Beeinflussung der Produktivität der Bohrung. Vier Mechanismen können zu einem Versagen führen: Verstopfung, Erosion, Korrosion und Deformation. Die Mechanismen sind eng miteinander verknüpft und können sich gegenseitig beeinflussen. Sie können in verschiedenen Phasen der Lebenszeit eines Filters auftreten, von der Auslegung bis zum Ausbau. Daher ist es wichtig zu verstehen, welche Mechanismen in welcher Phase (Auslegung, Qualifizierung, Transport, Installation, Betrieb, Workover) relevant sind. Das Wissen über die vorgeschlagenen Mechanismen kann als Ausgangspunkt für die Auslegung eines Sandfilters dienen.

Die Literatur ist voll von detaillierten Beispielen für Fehlfunktionen von Sandfiltern. Aus den Fehlern der Vergangenheit zu lernen, kann ein wichtiger Schritt im Designprozess sein. Darüber hinaus können Labortests verwendet werden, um die Eignung des geplanten Sandfilters für das ausgewählte Bohrloch zu bewerten. Dabei ist zu bedenken, dass Labortests oft nur eine Annäherung an die realen Bedingungen darstellen und daher oft nicht Aufschluss darüber geben, was funktionieren wird, sondern vor allem, was nicht funktionieren wird. Anstatt einen Sandfilter anzustreben, der in vielen Bereichen überdurchschnittliche Leistungen erbringt, kann es von Vorteil sein, die kritischsten Versagensmechanismen während seines Einsatzes zu ermitteln. Schritt für Schritt kann der Filter dann für einen erfolgreichen Betrieb optimiert werden.

- screen selection for sand control,” SPE International Symposium on Formation Damage Control, 1998, <https://doi.org/10.2118/39437-MS>.
- [7] R. A. Chanpura, R. M. Hodge, J. S. Andrews, E. P. Toffanin, T. Moen, and M. Parlar, “A review of screen selection for standalone applications and a new methodology,” SPE Drilling and Completion, vol. 26, no. 1, pp. 84–95, 2011, <https://doi.org/10.2118/127931-PA>.
- [8] B. Wu, S. K. Choi, R. Denke, T. Barton, C. Viswanathan, S. Lim, M. Zamberi, S. Shaffee, N. Fadhlani, Z. Johar, M. B. Jadid, and B. B. Madon, “A new and practical model for amount and rate of sand production estimation,” Offshore Technology Conference Asia 2016, OTCA 2016, pp. 2830–2847, 2016, <https://doi.org/10.4043/26508-ms>.
- [9] E. B. Rogers, “Sand control in oil and gas wells - 1,” Oil and Gas Journal, vol. 69, no. 44, pp. 54–60, 1971.
- [10] K. G. Kirsch, “Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre,” Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, no. 42, pp. 797–807, 1898.
- [11] T. Unneland and R. I. Waage, “Experience and Evaluation of Production Through High-Rate Gravel-Packed Oil Wells, Gullfaks Field, North Sea,” SPE Production & Facilities, vol. 8, no. 2, pp. 108–116, 1993, <https://doi.org/10.2118/22795-PA>.
- [12] B. S. Aadnoy and R. Looyeh, Petroleum Rock Mechanics: Drilling Operations and Well Design. Gulf Professional Publishing, 2010, ISBN: 978-0-12-385546-6.
- [13] S. K. Bukkaraju, N. F. Osorio, K. M. Annadorai, J. L. Garduno, and N. K. Golden, “Practical guidelines for the diagnosis and remediation of pipeline blockages,” Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, vol. 2, pp. 1486–1504, 2016, <https://doi.org/10.4043/27001-ms>.
- [14] J. Stachowiak, “New Sucker Rod Pump Technology with Integral Screen for Sandy Wells,” SPE Production and Operations Symposium, Oklahoma City, 2015, <https://doi.org/10.2118/173623-MS>.
- [15] A. Gupta, D. Kamat, N. Borhan, B. Madon, Z. Ahmad, A. Faruqi, and M. Zulkapli, “Getting the Best Out of Online Acoustic Sand Monitoring System: A Practical Method for Quantitative Interpretation,” International Petroleum Technology Conference, Bangkok, Thailand, 2016, <https://doi.org/10.2523/IPTC-18688-MS>.
- [16] S. Sidek, K. G. H. Lian, Y. B. Ching, K. Trjanganung, B. Madon, Z. Yusop, B. R. Gundemoni, R. Jackson, and P. Barth, “First successful application of ceramic sand screen in maturing oil field, offshore east Malaysia,” Society of Petroleum Engineers - SPE Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, 2017, <https://doi.org/10.2118/188537-ms>.
- [17] ISO 17824:2014, “Petroleum and natural gas industries - Downhole equipment - Sand screens (ISO 17824:2014).” 2014.
- [18] S. Wildhack, S. Müssig, F. Strahammer, and M. Leitner, “Sand control with ceramic screens in unconsolidated reservoirs demonstrated in the mature Gaiselberg oilfield,” Oil Gas European Magazine, vol. 38, no. 2, pp. 74–78, 2012.
- [19] L. Ochmann, M. Amro, B. Gronde, G. Fischer, S. Weber, and D. Martin, “Development of Plasma Sprayed Coatings to Improve the Erosion Resistance of Wire Wrapped Screens,” International Petroleum Technology Conference, Virtual, 2021, <https://doi.org/10.2523/iptc-21158-ms>.
- [20] C. J. Coberly, “Selection of Screen Openings for Unconsolidated Sands,” Drilling and Production Practice, pp. 189–201, 1937, API 37-189.
- [21] Oxford University Press, “Definition of ‘fail,’” 2020. [Online]. Available: <https://www.lexico.com/definition/fail>. [Accessed: 10-Feb-2021].
- [22] R. Rensvold, W. E. Robins, C. Knox, and F. Sharp, “Permeable sand screen,” Drilling and Production Practice, pp. 177–181, 1962, API-62-177.
- [23] A. Habibi, C. E. Fensky, M. Perri, M. Roostaei, M. Mahmoudi, V. Fattahpour, H. Zeng, and M. Sadrzadeh, “Unplugging standalone sand-control screens using high-power shock waves,” SPE Drilling and Completion, vol. 36, no. 2, pp. 398–412, 2021, 10646671, 10.2118/199294-PA.
- [24] A. Andiappan, H. Hofstätter, S. Müssig, and P. Barth, “Investigation of

*Dr.-Ing. Lukas Ochmann, Prof. Dr.-Ing. Mohammed Amro, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau
E-Mail: Lukas.Ochmann@tbt.tu-freiberg.de, 0179-3187/22/4
DOI 10.19225/220403 © 2022 DWV Media Group GmbH

- Plugging and Scaling Processes on Ceramic Sand Screens, the New Approach for Sustainable Oil and Gas Production,” OIL GAS European Magazine, no. 3, pp. 130–136, 2014.
- [25] M. Mahmoudi, M. Roostaei, V. Fattahpour, A. Uzcatequi, J. Cyre, C. Sutton, and B. Fermaniuk, “Standalone sand control failure: The role of wellbore and near wellbore hydro-thermo-chemical phenomenon on the plugging and the flow performance impairments of the standalone sand screen,” Society of Petroleum Engineers - SPE Thermal Well Integrity and Design Symposium, 2018, <https://doi.org/10.2118/193355-ms>.
- [26] H. D. Wilson, “Written Discussion in: Selction of Screen Openings for Unconsolidated Sands von C. J. Coberly,” Drilling and Production Practice - 1. Januar, p. 198, 1937, API-37-189.
- [27] L. Ochmann, R. Joseph, and M. Amro, “Development of a Sand Retention Test Set-Up Focussing on the Measurement of Produced Sand,” OIL GAS European Magazine, no. 2, pp. 25–32, 2021, <https://doi.org/10.19225/210609>.
- [28] P. Markestad, O. Christie, A. Espedal, and O. Rorvik, “Selection of Screen Slot Width to Prevent Plugging and Sand Production,” SPE Formation Damage Control Syposium, Lafayette, 1996, <https://doi.org/10.2118/31087-MS>.
- [29] T. Ballard and S. Beare, “Media Sizing for Premium Sand Screens: Dutch Twill Weaves,” Proceedings of SPE European Formation Damage Conference, 2003, <https://doi.org/10.2118/82244-MS>.
- [30] T. Ballard and S. Beare, “Sand Retention Testing: The More You Do, the Worse It Gets,” SPE International Symposium and Exhibiton on Formation Damage Control, Lafayette, 2006, <https://doi.org/10.2118/98308-MS>.
- [31] G. Gillespie, C. K. Deem, C. D. Consulting, C. Malbrel, and J. Screens, “Screen Selection for sand control based on laboratory tests,” SPE Asia Pacific Conference and Exhibition, Brisbane, 2000, <https://doi.org/10.2118/64398>.
- [32] H. Darcy, Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris: Dalmont, 1856.
- [33] A. F. Van Everdingen, “The Skin Effect and Its Influence on the Productive Capacity of a Well,” Journal of Petroleum Technology, vol. 5, no. 06, pp. 171–176, 1953, <https://doi.org/10.2118/203-g>.
- [34] M. F. Hawkins, “A Note on the Skin Effect,” Journal of Petroleum Technology, vol. 8, no. 12, pp. 65–66, 1956, <https://doi.org/10.2118/732-g>.
- [35] ISO 8044:2015, “Corrosion of metals and alloys - Basic terms and definitions (ISO 8044:2015); Trilingual version EN ISO 8044:2015,” 2015.
- [36] M. Mahmoudi, M. Roostaei, V. Fattahpour, C. Sutton, B. Fermaniuk, D. Zhu, H. Jung, J. Li, C. Sun, L. Gong, S. Shuang, X. Qiu, H. Zeng, and J. L. Luo, “Standalone sand control failure: Review of slotted liner, wire wrap screen, and premium mesh screen failure mechanism,” Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2018, <https://doi.org/10.2118/191553-MS>.
- [37] G. Chitwood and L. Skogsberg, “Cost-effective solutions for corrosion-resistant expandable screen base pipe in sour/brine service,” Journal of Canadian Petroleum Technology, vol. 45, no. 12, pp. 18–22, 2006, <https://doi.org/10.2118/06-12-TB2>.
- [38] DIN EN ISO 21457:2010, “Erdöl-, petrochemische und Erdgasindustrie – Werkstoffauswahl und Korrosionsschutzmaßnahmen für Öl- und Gasproduktionssysteme (ISO 21457:2010),” 2010.
- [39] DIN EN ISO 17348, “Erdöl- und Erdgasindustrie – Werkstoffauswahl für Futterrohre, Steigrohre und Bohrloch-Ausrüstungen in Umgebungen mit hohem CO-Gehalt (ISO 17348:2016),” 2016.
- [40] DIN EN ISO 15156-1, “Erdöl- und Erdgasindustrie – Werkstoffe für den Einsatz in H2S-haltiger Umgebung bei der Öl- und Gasgewinnung – Teil 1: Allgemeine Grundlagen für die Auswahl von gegen Rissbildung beständigen Werkstoffen (ISO 15156-1:2015),” 2015.
- [41] DIN EN ISO 15156-2, “Erdöl- und Erdgasindustrie – Werkstoffe für den Einsatz in H2S-haltiger Umgebung bei der Öl- und Gasgewinnung – Teil 2: Gegen Rissbildung beständige unlegierte und niedriglegierte Stähle und Gusseisen (ISO 15156-2:2015),” 2015.
- [42] DIN EN ISO 15156-3, “Erdöl- und Erdgasindustrie – Werkstoffe für den Einsatz in H2S-haltiger Umgebung bei der Öl- und Gasgewinnung – Teil 3: Hochlegierte Stähle (CRAs) und andere Legierungen (ISO 15156-3:2015),” 2015.
- [43] A. Valisevich, V. Zvyagin, K. Wilson, A. Bayanova, A. Shapovalov, M. Huseynov, T. Moen, P. Jaruga, S. Hansen, and P. Hanley, “Rotating sand screens to TD in Korchagina ERD wells,” Society of Petroleum Engineers - 30th Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, ADIPEC 2014: Challenges and Opportunities for the Next 30 Years, vol. 4, pp. 2975–2993, 2014, <https://doi.org/10.2118/171957-ms>.
- [44] S. Hamid and S. A. Ali, “Causes of sand control screen failures and their remedies,” SPE - European Formation Damage Control Conference, Proceedings, pp. 445–458, 1997, <https://doi.org/10.2118/38190-ms>.
- [45] G. Colwart, R. C. Burton, L. F. Eaton, R. M. Hodge, and K. Blake, “Lessons learned on sand-control failure and subsequent workover at Magnolia deepwater development,” SPE/IADC Drilling Conference, Proceedings, 2007, <https://doi.org/10.2118/105542-ms>.
- [46] A. G. Slayter, M. Byrne, C. A. McPhee, and P. McCurdy, “Sand management: What are we sure of?,” SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 2008, <https://doi.org/10.2118/114781-MS>.
- [47] M. Parlar, R. J. Tibbles, B. Gadiyar, and B. Stamm, “A new approach for selecting sand-control technique in horizontal openhole completions,” SPE Drilling and Completion, vol. 31, no. 1, pp. 4–15, 2016, <https://doi.org/10.2118/170691-PA>.
- [48] C. S. Wilson, “Selection and Use of Screened Pipe,” Transactions of the AIME, vol. 103, no. 01, pp. 116–135, 1932, <https://doi.org/10.2118/933116-G>.
- [49] P. R. Adams, E. R. Davis, R. M. Hodge, R. C. Burton, L. Ledlow, A. D. Procyk, and S. C. Crissman, “Current state of the premium screen industry: Buyer beware, methodical testing and qualification shows you don’t always get what you paid for,” SPE Drilling and Completion, vol. 24, no. 3, pp. 362–372, 2009, <https://doi.org/10.2118/110082-PA>.
- [50] D. Tiffin, M. H. Stein, and X. Wang, “Drawdown Guidelines for Sand Control Completions,” Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition, pp. 3901–3910, 2003, <https://doi.org/10.2118/84495-MS>.
- [51] G. Gillespie and C. Jones, “Sand Control Screen Erosion – When Are You at Risk?,” SPE European Formation Damage Conference, Scheveningen, 2009, <https://doi.org/10.2118/122269-MS>.
- [52] H. Wahl, “Verschleißprobleme im Braunkohlenbergbau,” Braunkohle, Wärme und Energie, vol. 3, no. 5/6, pp. 75–87, 1951.
- [53] N. Manning, P. Cadogan, P. Barth, B. Hoskin, T. Read, D. Manning, R. Jackson, and B. Gundemoni, “Performance of ceramic sand screen for high rate gas application - Gas sand screen erosion testing,” Society of Petroleum Engineers - SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 2018, <https://doi.org/10.2118/191942-ms>.
- [54] J. Cameron and C. Jones, “Development, Verification, and Application of a Screen Erosion Model,” SPE European Formation Damage Conference, Scheveningen, 2007, <https://doi.org/10.2118/107437-MS>.
- [55] A. Procyk, X. Gou, S. K. Marti, R. C. Burton, M. Knefel, D. Dreschers, A. Wiegmann, L. Cheng, and E. Glatt, “Sand Control Screen Erosion: Prediction and Avoidance,” SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, 2015, <https://doi.org/10.2118/174837-MS>.
- [56] R. Tibbles, K. Govinathan, I. Mickelburgh, S. Jain, and P. Wassouf, “Understanding sand control installation failures,” Offshore Technology Conference Asia 2020, OTCA 2020, pp. 19–21, 2020, <http://doi.org/10.4043/30441-ms>.
- [57] A. Dikshit, G. Woiceshyn, and L. Hagel, “A systematic approach to the design and development of a new ICD to minimize erosion and erosion-corrosion,” SPE Drilling and Completion, vol. 35, no. 3, pp. 414–427, 2020, <https://doi.org/10.2118/197601-PA>.