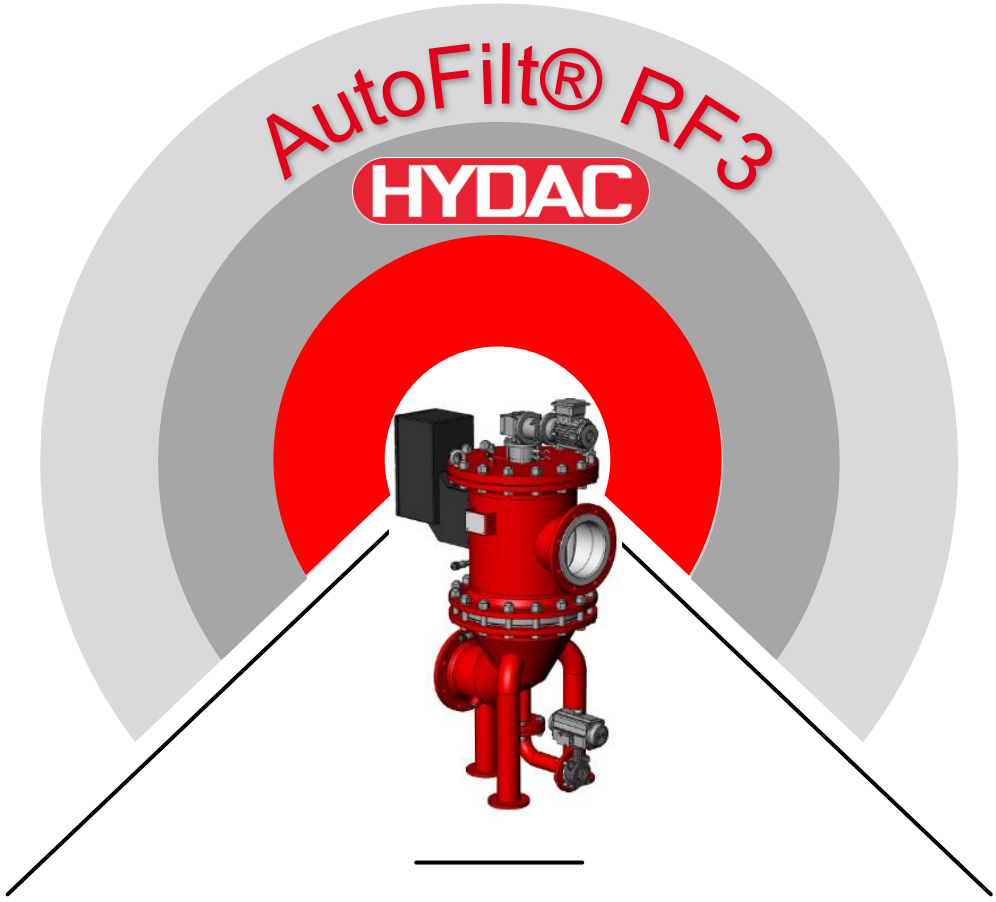
https://doi.org/10.5281/zenodo.18311606

Erstellt von Karsten Bruche Stand: 10.11.2025

Entwicklung eines innovativen Hochtemperatur-Filtrations- und Rückspülwassermanagement-Systems (RWM) zur nachhaltigen Beherrschung von Geochemie-induziertem Scaling und Korrosion in Tiefengeothermie-Anlagen (bis 200°C)



Autoren: Karsten Bruche, HYDAC Process Technology GmbH

HYDAC Process Technology GmbH, Am Wrangelflöz 1, 66538 Neunkirchen
Tel.: +49 (0) 6897 – 509 – 1241, Fax: +49 (0) 6897 – 509 – 1278
Internet: www.hydac.com, E-Mail: prozess-technik@hydac.com

Inhalt

Entwicklung eines innovativen Hochtemperatur-Filtrations- und Rückspülwassermanagement-Systems (RWM) zur nachhaltigen Beherrschung von Geochemie-induziertem Scaling und Korrosion in Tiefengeothermie-Anlagen (bis 200°C) 1

Autoren: Karsten Bruche, HYDAC Process Technology GmbH 1

1. Einleitung und Kontext der geothermischen Tiefennutzung 3

1.1 Motivation und die Rolle der Geothermie im Kontext der Sektor Kopplung 3

1.2 Die hydrogeochemische Herausforderung: Salinität, Temperatur und Toxizität 3

1.3 Das Ziel: Entwicklung eines hochtemperaturbeständigen und wirtschaftlichen Aufbereitungssystems 4

2. Hydrogeochemische und werkstoffliche Herausforderungen (NDB und ORG) 5

2.1 Charakterisierung der Zielmedien: Vertiefte Analyse der Wassertypen 5

2.2 Detaillierte Analyse der Scaling-Mechanismen: Nukleation und Keimbildung 6

2.3 Korrosionsrisiken und Materialwahl 7

3. Das Hochtemperatur-Filtrationskonzept der HYDAC Process Technology GmbH: Dreistufige Systematik 1

3.1 Stufe 1: AutoFilt® ATF Hybridfilter (Zentrifugalabscheidung) 1

3.2 Stufe 2: Kontinuierliche Prozessfiltration (AutoFilt® RF3) 2

3.3 Stufe 3: Injektionsschutz (PRFS-FB-520-D-SO) 2

4. Werkstofftechnische Umsetzung und Korrosionsschutz durch Hochleistungsbeschichtungen 3

4.1 Thermalwasser-Beschichtungen 3

4.2 Polysiloxan-Hybridbeschichtungen: Chemischer Aufbau und thermische Überlegenheit 3

5. Steuerung und Optimierung durch Rückspülwassermanagement (RWM) 4

5.1 Das RWM-Konzept: Geschlossener Kreislauf, Energieeffizienz und Regulierung 4

5.2 Hydrodynamische Steuerung der Rückspülung (RSP) 6

5.3 Detaillierte Analyse der SPS-Steuerlogik (Siemens S7/Profinet) 6

5.4 Integration der Wärme- und Masserückgewinnung 7

6. Validierung und Wirtschaftlicher Nutzen 7

6.1 Fallstudie: Referenz-Geothermieanlage in Norddeutschland 7

6.2 Nachweis der Systemstabilität und Standzeitverlängerung 7

6.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (OPEX-Reduktion) durch RWM 8

7. Zusammenfassung und Ausblick 9

8. Quellenverzeichnis 10

1. Einleitung und Kontext der geothermischen Tiefennutzung

1.1 Motivation und die Rolle der Geothermie im Kontext der Sektor Kopplung

Die Nutzung der Tiefengeothermie stellt eine tragende Säule für die angestrebte Wärmewende und die Dekarbonisierung urbaner Wärmeversorgungsnetze dar. Im Gegensatz zu anderen volatilen Quellen erneuerbarer Energien bietet die Geothermie eine grundlastfähige und lokal verfügbare Wärmeversorgung, welche die Netzstabilität unterstützt. Der effiziente und nachhaltige Betrieb geothermischer Anlagen wird jedoch maßgeblich durch die Aggressivität des Fördermediums – der basinalen Tiefenwässer – beeinflusst.

Die vorliegende Entwicklung zielt darauf ab, ein **hochtemperaturbeständiges Filtersystem (Design Temperatur bis 200°C)** bereitzustellen, das die Langlebigkeit und Wirtschaftlichkeit geothermischer Anlagen signifikant erhöht. Das Filtersystem konzentriert sich auf die technologische Beherrschung von Scaling (Ablagerungen) und Korrosion, die primären Risiken, welche die Betriebssicherheit gefährden. Diese Design-Temperatur ermöglicht die Anwendung des Systems nicht nur in moderaten Projekten (z.B. einer Referenzanlage mit 48 bis 50°C Betriebstemperatur), sondern auch in zukünftigen, hoch-enthalpischen Anwendungen, beispielsweise im Oberrheingraben.

1.2 Die hydrogeochemische Herausforderung: Salinität, Temperatur und Toxizität

Die tiefenhydrothermalen Wässer im Norddeutschen Becken (NDB) und im Oberrheingraben (ORG) sind über geologische Zeiträume in mesozoischen und paläozoischen Aquiferen zirkuliert. Sie zeichnen sich durch eine extreme Mineralisation aus, wobei die Gesamtmenge gelöster Stoffe (TDS) oft deutlich über 10 g/l liegt. [2, 2]

NDB und ORG – Geothermische Schlüsselregionen:

- NDB steht für das Norddeutsche Becken, eine Region mit bedeutendem hydrothermalem Potenzial in Deutschland, gekennzeichnet durch mesozoische und paläozoische Aquifere in Tiefen von 2.000 bis 6.000 m und Temperaturen von 55 bis 200°C.

- ORG steht für den Oberrheingraben, eine tektonische Grabenstruktur mit aktiven Störungszonen und häufig hydrothermalen Wässern, die tiefere, paläozoische Schichten erschließen und oft hohe Gehalte an Kohlendioxid aufweisen.

Charakteristisch für diese Wässer sind hohe Konzentrationen von Chlorid-Ionen (Cl-), die Lochfraßkorrosion begünstigen, sowie skalierungsbildenden Anionen wie Sulfat (SO4(2-)), die zur Ausfällung von schwerlöslichem Bariumsulfat (BaSO4) führen. Hinzu kommen gelöste Gase wie Kohlendioxid (CO2) und Schwefelwasserstoff (H2S), die die Korrosionsrate weiter beschleunigen und das Medium toxisch machen. Der Betriebsdruck der Anlage in der Referenzstudie beträgt 24 bar, bei einem Designdruck von 26 bar. Die Kombination dieser physikalischen und chemischen Parameter erfordert eine maßgeschneiderte Anlagentechnik.

1.3 Das Ziel: Entwicklung eines hochtemperaturbeständigen und wirtschaftlichen Aufbereitungssystems

Das innovative Filtersystem mit integriertem Rückspülwassermanagement (RWM) verfolgt einen Ansatz, der technologische Stabilität mit ökonomischer Effizienz vereint.

1. **Technologische Stabilität:** Der primäre Fokus liegt auf der Gewährleistung einer verlängerten Filterstandzeit und hohen Systemverfügbarkeit durch die proaktive Kontrolle des Scaling- und Korrosionsaufbaus.
2. **Kostenreduktion (OPEX):** Durch einen nahezu geschlossenen Wasserkreislauf können die Wartungskosten minimiert und die Entsorgungskosten für flüssigen Sondermüll drastisch gesenkt werden.
3. **Nachhaltigkeit und Regulatorik:** Das System ermöglicht eine gezielte Wärmerückgewinnung, indem die thermische Energie des Rückspülwassers im Prozess gehalten wird. Gleichzeitig wird die unkontrollierte Ableitung saliner oder potenziell radioaktiver Wässer in die konventionelle Entwässerung eliminiert, was ein häufiges regulatorisches Problem löst.

2. Hydrogeochemische und werkstoffliche Herausforderungen (NDB und ORG)

2.1 Charakterisierung der Zielmedien: Vertiefte Analyse der Wassertypen

Die spezifischen technischen Herausforderungen sind direkt auf die geologische Klassifizierung und chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer zurückzuführen.

Tabelle 1 fasst die kritischen Parameter der typischen basinalen Wässer zusammen, die in den Zielregionen NDB und ORG angetroffen werden:

Table 1: Chemische Charakterisierung und Risikoprofil von Tiefenwässern (NDB/ORG)

Wassertyp	**Vorkommen/Geologie**	**TDS (g/l) (Mineralisierung)**	**Sulfate (SO4(2-), mg/l) (Scaling-Potenzial)**	**pH-Wert (Korrosionspotenzial)**	**Kritische Gase**
Typ IIa (NDB/ORG)	Mesozoische Aquifere (Buntsandstein, Muschelkalk)	1.0 - 6.0	50 - 500	6.5 - 8.5	CO2, evtl. H2S
Typ IIb (NDB)	Tiefere Sedimente	2.0 - 7.0	200 - 1500	6.0 - 8.0	CO2, H2S
Typ III (NDB)	Erdöl-assoziiert (Oberjura, Rotliegend)	5.0 - 15.0	100 - 1000	5.5 - 7.5	H2S, CH4, CO2

Typ IV (ORG)	Aktive Störungszonen (Hydrothermal)	2.0 - 7.0	100 - 800	4.0 - 6.5	Hoher CO2
Typ IIc (ORG)	Komplexe tertiäre/quartäre Sedimente	2.0 - 8.0	200 - 1500	6.0 - 8.0	CO2, H2S

Die geochemische Belastung umfasst mehrere Risikoebenen. Die hohe Chlorid Konzentration, die oft über 10.000 mg/L liegen kann, ist ein Haupttreiber der Lochfraßkorrosion in Edelstählen. Die Sulfatkonzentrationen, die in den Typen IIb und IIc bis zu 1500 mg/L erreichen, sind kritisch für die Ausfällung des schwerlöslichen Bariumsulfats (BaSO4), dessen Entfernung mechanisch oder chemisch hochgradig aufwendig ist. [2, 2]

Zusätzlich bergen diese Wässer das Risiko der Radioaktivität. Durch den langen Kontakt mit den mineralischen Quellen im Gestein können Radionuklide wie Radium, Uran und Thorium in Lösung gehen. Diese Elemente stellen nicht nur ein Gesundheitsrisiko dar, sondern können auch technische Probleme verursachen, da sie sich in Ablagerungen anreichern.

2.2 Detaillierte Analyse der Scaling-Mechanismen: Nukleation und Keimbildung

Scaling ist der Prozess der Ablagerung schwerlöslicher Salze und beginnt mit der Nukleation (Keimbildung) in der übersättigten Lösung. Druck- und Temperaturabfälle entlang der Förderstrecke sind die primären Auslöser.

Die **homogene Nukleation** ist die spontane Bildung von Kristallkeimen im Fluid. Sie wird oft durch Druckentlastung und die damit verbundene Ausgasung von CO2 induziert, was zu einem Anstieg des pH-Wertes und der anschließenden Ausfällung von Kalziumkarbonat (CaCO3) führt. Die resultierenden Partikel sind nanoskopisch klein.

Die technisch bedeutendste Form ist jedoch die **inhomogene Nukleation**, bei der die Keimbildung an vorhandenen Grenzflächen stattfindet (z.B. Rohrwände, Korrosionsprodukte oder mitgeführte Partikel). Diese Grenzflächen senken die energetische Barriere für die Keimbildung erheblich, wodurch Scaling bereits bei geringeren Übersättigungen einsetzt.

Mitgeführte Sandpartikel oder Eisenoxide wirken als bevorzugte Keime für die Bildung von $BaSO_4$ oder $CaCO_3$.

Das entwickelte mehrstufige Filtrationskonzept fungiert als **Kinetic Scaling Management System (K-SMS)**. Das zugrundeliegende Prinzip ist, die kritischen Oberflächen und Keime, welche die Kinetik der inhomogenen Nukleation bestimmen, kontinuierlich zu entfernen. Durch die Eliminierung der Keimbildungsstellen durch die Vorfiltration (Stufe 1) und die kontinuierliche Unterbrechung der Kristallisation auf den Filterelementen (Stufe 2) wird das Scaling-Risiko an den kritischsten Anlagenteilen minimiert. Dies reduziert nicht nur den Wartungsaufwand, sondern verringert auch die Abhängigkeit von teuren chemischen Inhibitoren.

2.3 Korrosionsrisiken und Materialwahl

Die gleichzeitige Präsenz von hoher Salinität, hohem Druck, erhöhter Temperatur und korrosiven Gasen wie H_2S und CO_2 stellt extreme Anforderungen an die Anlagenmaterialien. Säurekorrosion (H_2CO_3), Lochfraßkorrosion durch Chloride und H_2S-induzierte Korrosion verkürzen die Lebensdauer herkömmlicher Stähle dramatisch. [2, 2]

Für Komponenten im direkten Medium kontakt, insbesondere die Innenteile und Filterelemente des AutoFilt® RF3, werden hochlegierte Werkstoffe wie **Super-Duplex-Stähle** (z.B. 1.4501/1.4507 für Filterelemente) eingesetzt. [2, 2] Diese bieten eine hohe Beständigkeit gegen Lochfraß und Spannungsrisskorrosion in Chlorid haltigen Umgebungen.

Da die Verwendung von Nickelbasislegierungen oder hochlegierten Edelstählen für großvolumige Komponenten (Behälter) unwirtschaftlich wäre, stellen hochwertige **Hochleistungsbeschichtungen** eine effektive und kosteneffiziente Lösung dar.

3. Das Hochtemperatur-Filtrationskonzept der HYDAC Process Technology GmbH: Dreistufige Systematik

Das Filtersystem ist als robustes Hybrid-Konzept konzipiert, das mechanische Separation, Prozessfiltration und Absolut Filtration kombiniert.

Table 2: Übersicht über das dreistufige Filtrationskonzept (IFC)

Stufe	Komponente (Typ)	Funktion	Trenngrenze Feinheit	Materialspezifika	Strategisches Ziel
1 (Grob)	ATF Hybridfilter (3.5)	Zentrifugalabscheidung (Desanding)	Scharfe Trenngrenze (>100 µm Sand)	Behälter C-Stahl, **Thermalwasser-Beschichtung**	Abrasionsschutz und Vor-Kollektor für RWM
2 (Fein-Rückspülbar)	AutoFilt® RF3-1	Prozessfiltration, Scaling-Kontrolle	25 µm (SuperMesh 1.4435)	Innenteile Super-Duplex, Gehäuse C-Stahl, Beschichtung [2]	Kontinuierliche Entfernung inhomogener Nukleationskeime
3 (Schutz)	PRFS-FB-520-D-SO	Absolutfiltration, Injektionsschutz	5 µm (Beutelfilter, Polyester)	Behälter C-Stahl, **Thermalwasser-Beschichtung**	Schutz vor homogener Nukleation vor Reinjektion

3.1 Stufe 1: AutoFilt® ATF Hybridfilter (Zentrifugalabscheidung)

Der von HYDAC ATF Hybridfilter dient als erste Stufe zur Abtrennung von groben, abrasiven Partikeln (Sand, Grobsediment). Er arbeitet nach dem Prinzip der Zentrifugalabscheidung, wodurch Partikel >100 µm effizient in einen darunterliegenden, druckbehafteten C-Stahl-Behälter geleitet werden. Die Vermeidung von abrasivem Verschleiß in den nachgeschalteten Feinfiltern ist hierbei von höchster Priorität.

Der C-Stahl-Behälter ist mit einer speziellen **Thermalwasserbeschichtung** ausgestattet, um ihn gegen das korrosive Medium zu schützen.

3.1.1 Detaillierter Entleerungsvorgang des Desander-Behälters

Der Entleerungsvorgang des Desanderbehälters, der die abgetrennten Feststoffe und Schlämme sammelt, wird manuell durch das Betriebspersonal ausgelöst, nachdem die sensorische Füllstandsüberwachung das Erreichen des maximalen Füllniveaus gemeldet hat.

Der Prozess ist darauf ausgelegt, eine kontrollierte und vollständige Entsorgung des hochkonzentrierten Feststoffschlamms zu gewährleisten und die Partikelverfestigung zu verhindern:

1. Systemisolierung und Druckentlastung: Zunächst wird der Desanderbehälter vom Prozesskreislauf isoliert und anschließend durch eine Entlüftungsleitung druckentlastet, um die Sicherheit während der Handhabung zu gewährleisten.

2. Aktivierung des Sandbettmanagements: Sobald der Druck abgebaut ist, beginnt die eigentliche Entleerung in den angeschlossenen BigBag. Um sicherzustellen, dass das abgesetzte Material – insbesondere der verfestigte Sand und Skalierungsschlamm – vollständig und kontrolliert entleert wird, wird das Sandbett aktiv durch mechanische Anregung (Vibrationsmotor) und intermittierende Drucklufteinleitung aufgelockert. Diese Kombination ist entscheidend, da die hohe Mineralisierung des Thermalwassers zur Zementierung der Partikel neigt, was eine passive Entleerung erschweren würde.

3. Wiederherstellung des Betriebs: Nach der erfolgreichen Entleerung und dem Schließen der Entsorgungsarmatur wird der Behälter wieder kontrolliert mit Medium

vorgefüllt. Dabei wird überschüssige Luft durch die Entlüftung abgelassen, bis der Vordruck des Anlagensystems wieder erreicht ist. Erst dann wird der Desander wieder vollständig in den Filtrationskreislauf integriert. Während des Entleerungsvorgangs bleibt der AutoFilt® ATF im Filtrationsbetrieb.

3.2 Stufe 2: Kontinuierliche Prozessfiltration (AutoFilt® RF3)

Der AutoFilt® RF3-1 dient als Herzstück der Filtration und Scaling-Kontrolle. Dieser rückspülbare Filter, ausgelegt für den Nennvolumenstrom verwendet sechs SuperMesh-Filterelemente mit einer Feinheit von 25 µm.

Die **sequenzielle Einzelkerzen-Rückspülung** ist die wichtigste verfahrenstechnische Maßnahme zur Bekämpfung des Scaling. Im Gegensatz zur gleichzeitigen Reinigung aller Elemente wird jede Filterkerze nacheinander gereinigt. Dies hat den Vorteil, dass der Systemdruck und der Filtratstrom stabil bleiben und der Scaling-Aufbau durch die kontinuierliche Entfernung der gebildeten Keime unterbrochen wird. Dies verhindert die Verfestigung und Zementierung des Filterkuchens, was eine signifikante Verlängerung der Filterstandzeiten zur Folge hat.

3.3 Stufe 3: Injektionsschutz (PRFS-FB-520-D-SO)

Die letzte Stufe besteht aus einem Beutelfilter (PRFS-FB-520-D-SO), der unmittelbar vor der Reinjektionsbohrung positioniert ist. Dieser Filter nutzt Beutelfilterelemente aus Polyester zur **Absolut Filtration** mit einer Feinheit von 5 µm.

Der Zweck dieser Stufe ist der Schutz der Injektionsbohrung vor feinsten Partikeln. Obwohl die Stufe 2 die inhomogene Nukleation kontrolliert, können bei Druck- und Temperaturänderungen im Prozess noch immer nanoskopische Keime durch **homogene Nukleation** entstehen. Diese müssen vor der Reinjektion zuverlässig entfernt werden, um die Permeabilität des Reservoirs langfristig zu sichern. Der Behälter der dritten Stufe ist ebenfalls aus C-Stahl gefertigt und mit einer Thermalwasser-Beschichtung versehen.

4. Werkstofftechnische Umsetzung und Korrosionsschutz durch Hochleistungsbeschichtungen

Angesichts der chemischen Aggressivität und der Design-Temperatur bis 200°C sind die verwendeten Werkstoffe und Beschichtungen entscheidend für die Systemstabilität. Für die Innenteile des RF3 werden hochlegierte Stähle verwendet, während für die großvolumigen C-Stahl-Behälter spezielle Beschichtungen zum Einsatz kommen, um eine kosteneffiziente Lösung zu bieten. [2, 2]

4.1 Thermalwasser-Beschichtungen

Die Thermalwasser-Beschichtung ist ein hochvernetztes Epoxid- oder Phenol-Modifikationssystem, das ursprünglich für die anspruchsvollen Bedingungen der Öl- und Gasindustrie entwickelt wurde. In der **Referenzanlage zur tiefen Geothermie** wurden die Behälter der Stufe 1 und 3 mit dieser Beschichtung ausgestattet.

Beschichtungs-Systeme bieten hervorragenden Schutz gegen Korrosion und chemische Angriffe. Die Dünnfilmbeschichtungen können Temperaturbeständigkeiten von bis zu **204°C** erreichen und sind resistent gegen aggressive Gase wie CO2 und H2S. Die Oberfläche der Beschichtung ist zudem auf eine minimale Rauheit optimiert, wodurch die Adhäsion von Scaling-Keimen reduziert wird. Dies erschwert die kritische inhomogene Nukleation an der Behälterwand und unterstützt die Gesamtstrategie der Scaling-Kontrolle.

4.2 Polysiloxan-Hybridbeschichtungen: Chemischer Aufbau und thermische Überlegenheit

Polysiloxanbeschichtungen sind anorganisch-organische Hybridsysteme, die durch ihre stabile, wiederkehrende Silizium-Sauerstoff (Si-O-Si) - Kettenstruktur gekennzeichnet sind.

Diese chemische Struktur verleiht den Polysiloxan-Systemen eine überragende thermische Stabilität. Sie können Betriebstemperaturen von bis zu **250°C** standhalten. Ihre Stabilität macht sie ideal für den Einsatz in hochkorrosiven und Salinen Thermalwässern, da die Si-O-Bindung inert gegenüber hydrolysierenden Angriffen ist. Sie werden als Zweikomponentensysteme auf vorbereiteten Stahloberflächen appliziert und härten bei Raumtemperatur oder beschleunigt bei erhöhter Temperatur aus.

Die Betrachtung dieser beiden Beschichtungssysteme zeigt eine strategische Ausrichtung. Während Thermalwasser-Beschichtungen die spezifischen Korrosionsrisiken (insbesondere H2S/CO2 Beständigkeit) der NDB-Wässer bei Temperaturen bis 204°C adressiert, ermöglicht die höhere Temperaturgrenze der Polysiloxan-Systeme (bis 250°C) die Anwendung des Filtersystems in der gesamten Bandbreite der Geothermie, einschließlich der kritischen Hochtemperatur-Szenarien, die durch die Designgrenze von 200°C des Filtersystems festgelegt sind. Dies unterstreicht die Flexibilität und Zukunftssicherheit der Anlagentechnik.

5. Steuerung und Optimierung durch Rückspülwassermanagement (RWM)

5.1 Das RWM-Konzept: Geschlossener Kreislauf, Energieeffizienz und Regulierung

Das integrierte Rückspülwassermanagement (RWM) ist integraler Bestandteil der Anlagenwirtschaftlichkeit. Das RWM vermeidet die Abführung des warmen, Salinen Konzentrats in die Umgebung und führt es stattdessen in einem nahezu geschlossenen Kreislauf zurück. [2, 2]

Durch diese geschlossene Kreislaufführung werden zwei wesentliche Vorteile realisiert: Erstens wird die im Rückspülwasser enthaltene thermische Energie (bei 48-50°C in der Pilotanlage, oder bis zu 200°C im Designfall) nicht verschwendet, sondern bleibt dem thermodynamischen Kreislauf erhalten, was die Energiebilanz der Anlage verbessert. Zweitens minimiert der Prozess die Entsorgungskosten erheblich, da das Flüssigvolumen, das als Sondermüll behandelt werden müsste, drastisch reduziert und die Schadstoffe im Desander (Stufe 1) für eine einfache Entsorgung in Big-Packs konzentriert werden.

Ein entscheidender Aspekt ist die Compliance: Da Basinale Wässer potenziell Radionuklide (Radium, Thorium) enthalten, die sich im Scaling anreichern, dient der geschlossene Kreislauf als wichtige umweltrechtliche Sicherheitsbarriere gegen die Freisetzung kritischer Schadstoffe in die konventionelle Entwässerung. [2, 2]

5.2 Hydrodynamische Steuerung der Rückspülung (RSP)

Die effektive Ablösung des Filterkuchens und des beginnenden Scaling erfordert einen schnellen, hohen Druckimpuls. Dieser Impuls wird nicht durch eine externe Pumpe, sondern durch eine hydraulische Lösung erzeugt.

Ein dem RF3 nachgeschalteter Zwischenbehälter enthält ein **Expansionsgefäß (Blasenspeicher)**, das mit einem Vordruck versehen ist, der über dem Bubble-Point (ca. 12 bis 14 bar) liegt. Dieser Blasenspeicher liefert den notwendigen, schnellen Druckabfall, der einen Differenzdruck von mindestens 1,5 bar für die Rückspülung gewährleistet. [2, 2] Dies ist besonders wichtig, da der Blasenspeicher im Gegensatz zum Pumpen eine Impulskraft bereitstellt, die auch bei der hohen Viskosität des heißen Wassers und bei verfestigtem Scaling den Filterkuchen zuverlässig abscheren kann. Die Pumpe dient ausschließlich der anschließenden, kontrollierten Überführung des gesammelten Konzentrats und nicht der Erzeugung des Reinigungsimpulses.

5.3 Detaillierte Analyse der SPS-Steuerlogik (Siemens S7/Profinet)

Die Steuerung des rückspülbaren Filters (AutoFilt® RF3) erfolgt über eine programmierbare Logik (SPS-Steuerung), die eine präzise, sequenzielle Reinigung der Filterelemente ermöglicht. Diese sequenzielle Schaltung, bei der jede Filterkerze einzeln und nacheinander gespült wird, ist entscheidend für die Systemstabilität und die Effektivität des **Kinetik Scaling Managements (K-SMS).**

Der Reinigungsprozess wird automatisch ausgelöst, sobald die Differenzdrucksensoren am Filter einen vorab eingestellten Schwellenwert überschreiten, was auf eine beginnende Verschmutzung hindeutet. Die Steuerung initiiert daraufhin einen geschlossenen Reinigungszyklus für jede einzelne Kerze, um den Filtratstrom und den Anlagendruck während des Betriebs stabil zu halten.

Dieser Zyklus umfasst im Wesentlichen: die kurzzeitige Isolierung der zu reinigende Kerze, die Erzeugung des hydrodynamischen Druckimpulses durch den Blasenspeicher zur sofortigen Ablösung des Scaling-Filterkuchens und die anschließende Sammlung des Konzentrats im Zwischenbehälter zur kontrollierten Weiterverarbeitung. [2, 2] Nach Abschluss der Reinigung aller Kerzen kehrt das System in den Überwachungsmodus zurück. Die Logik gewährleistet somit die unterbrechungsfreie Entfernung von Nukleationskeimen und sichert die langfristige Verfügbarkeit der Anlage.

5.4 Integration der Wärme- und Masserückgewinnung

Nachdem der Blasenspeicher den kritischen Reinigungsimpuls geliefert hat und der Schmutz abgelöst wurde, wird das Konzentrat im Zwischenbehälter gesammelt. Anschließend wird die Pumpe aktiviert, um das Konzentrat kontrolliert in den Desander der Stufe 1 zurückzuführen.

Diese Rückführung erfolgt über einen speziellen Zirkulationskreis, der während des Pumpvorgangs eine turbulente Strömung gewährleistet, um eine vorzeitige Partikelabsetzung in den Leitungen zu verhindern. Im Desander erfolgt die Sedimentation der schweren Sand- und Scaling-Partikel. Das überstehende, geklärte und temperierte Wasser wird dem Prozesskreislauf wieder zugeführt. Damit ist die passive Wärmerückgewinnung abgeschlossen, was die gesamte Systemeffizienz steigert. [2, 2]

6. Validierung und Wirtschaftlicher Nutzen

6.1 Fallstudie: Referenz-Geothermieanlage in Norddeutschland

Die **Referenzanlage**, die Thermalwasser mit einer Temperatur von 48°C aus über 1.300m Tiefe fördert, dient als wichtige Validierungsplattform. Die Anlage nutzt Wärmepumpen, um das gewonnene Thermalwasser auf das Fernwärmeniveau zu bringen, und soll rechnerisch über 6.000 Haushalte versorgen.

Die Erprobung in der **Pilotanlage** unter den spezifischen NDB-Bedingungen (potenziell Typ IIb/III, mit Sulfat- und H2S-Risiken) bestätigt die Praxistauglichkeit des sequenziellen RWM und die Wirksamkeit der gewählten Thermalwasser-Beschichtungssysteme.

6.2 Nachweis der Systemstabilität und Standzeitverlängerung

Das integrierte Design aus Kinetik Scaling Management System (K-SMS), Hochleistungswerkstoffen und dem RWM zielt darauf ab, die Hauptursachen für Anlagenausfälle – Scaling und Korrosion – zu neutralisieren. Die hydraulische Impulsgebung durch den Blasenspeicher ist entscheidend, da sie eine schnelle und vollständige Reinigung

der Filterelemente ermöglicht und so die Unterbrechung des Kristallwachstums gewährleistet. Dies führt zu einer nachweislichen Verlängerung der Filterstandzeit und minimiert das Risiko irreversibler Porenverstopfungen, welche die Verfügbarkeit des Gesamtsystems stark beeinträchtigen würden.

6.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (OPEX-Reduktion) durch RWM

Der ökonomische Mehrwert des Gesamtsystems wird maßgeblich durch das RWM beeinflusst:

1. **Reduzierte Wartungs- und Betriebskosten:** Durch die automatische, sequenzielle Reinigung und die verlängerten Wartungszyklen wird der Personal- und Materialeinsatz gesenkt.

2. **Minimierte Entsorgungskosten:** Der geschlossene Kreislauf und die Konzentrierung der Schadstoffe im Desander (zur Feststoffentsorgung) eliminieren die kostspielige Abführung großer Volumina an flüssigem, salinem Sondermüll, was eine drastische Senkung der Entsorgungskosten ermöglicht.

3. **Energieeffizienz:** Die passive Wärmerückgewinnung durch die Rückführung des warmen Rückspülwassers in den Prozess erhöht den Gesamtnutzungsgrad der geothermischen Anlage. Die eingesparte thermische Energie muss nicht durch andere, energieintensive Quellen kompensiert werden, was die Betriebskosten weiter senkt.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte, innovative Hochtemperatur-Filtersystem der **HYDAC Process Technology GmbH** adressiert die operativen Herausforderungen der tiefen Geothermie durch einen integrierten, wissenschaftlich fundierten Ansatz. Die Kombination aus dreistufiger mechanischer Trennung (K-SMS), die auf die Bekämpfung der kritischen inhomogenen Nukleation ausgerichtet ist, hochresistenten Werkstoffen (Super-Duplex) und thermisch stabilen Hochleistungsbeschichtungen gewährleistet maximale Materialbeständigkeit gegen Korrosion und Scaling.

Der entscheidende Wettbewerbsvorteil liegt im automatisierten, sequenziellen **Rückspülwassermanagement (RWM**). Durch die Kombination aus hochentwickelter Rückspülfiltertechnologie und Speichertechnik entsteht ein an die jeweiligen Prozessparameter anpassbares System, das eine effiziente impulsgesteuerte Reinigung im geschlossenen Hochtemperatur-Kreislauf ermöglicht. Dieses System nutzt die hydraulische Impulstechnik eines Blasenspeichers für eine zuverlässige Hochtemperatur-Rückspülung und gewährleistet durch den geschlossenen Kreislauf die Wärmerückgewinnung sowie die kontrollierte Konzentrierung von Schadstoffen. [2, 2]

Dieser integrierte, auf maximale Systemstabilität und Effizienz ausgerichtete Ansatz stellt einen signifikanten technologischen Fortschritt dar, der die Geothermie als zuverlässige, wirtschaftliche und nachhaltige Säule für die zukünftige Wärmeversorgung in Deutschland festigt. Die Validierung in **Referenzprojekten** wird die erwartete wirtschaftliche Optimierung und die langfristige Zuverlässigkeit in der Praxis bestätigen.

8. Quellenverzeichnis

Die in dieser Ausarbeitung verwendeten Informationen und Daten basieren auf folgenden Quellen:

HYDAC Process Technology GmbH. Abstract zur Geothermie-Anlage und Wärmeversorgung (Interne Projektdaten/Abstract V2).

HYDAC Process Technology GmbH. Funktionsbeschreibung / Lastenheft Filterkonzept und Basinale Wässer im Bereich mesozoischer und paläozoischer Aquifere (Interne Lastenheft- und Geochemie-Dokumente).

NOV. Tuboscope – Geothermal Solutions: Exceptional corrosion, abrasion and chemical resistance.

NOV. Tuboscope Coatings Spec Sheet: Corrosive gas resistant thin film coating (Liquid) (204°C).