

Das C-N-P - Verfahren zur biologischen Optimierung von Kläranlagen

1 *Veranlassung und Zielsetzung*

1.1 *Ökonomie oder Ökologie ?*

In der öffentlichen Diskussion wird das Thema „Umweltschutz“ in den letzten Jahren zunehmend kontrovers diskutiert:

Während einerseits nachhaltige Maßnahmen zur Erhaltung der Umweltqualität und zum Schutz des globalen Klimas gefordert werden (z.B. Kyoto- und folgende Protokolle), wird andererseits geltend gemacht, dass in wirtschaftlich schwierigen Zeiten ökonomische Aspekte Vorrang haben müssten. Umweltschutz droht damit zum Luxusgut zu werden, auf das man „später“ zurückkommt, „wenn man es sich leisten kann“.

Konkret heißt dies, dass das Umweltargument bei der Entscheidungsfindung in den maßgeblichen Gremien allenfalls eine nachgeordnete Rolle spielt, es sei denn, es seien bestimmte Gesetze einzuhalten (z.B. Emissionsgrenzwerte). Dies ist aus der Sicht der Kommunen und Verbände auch verständlich, da diese sich durch erhöhten Kostendruck und Ausfällen auf der Einnahmeseite immer stärker mit der Notwendigkeit konfrontiert sehen, Kosten einzusparen oder zu vermeiden.

Aus der Erkenntnis heraus, dass ökologisch vorteilhafte Maßnahmen sich nur dann in nennenswertem Umfang durchsetzen werden, wenn sie mit ökonomischen Vorteilen gepaart sind, wurde das innovative C-N-P - Verfahren entwickelt.

Für den Bereich der Abwasserreinigung sind anzustrebende **Vorteile für den Umweltschutz** im Wesentlichen:

- Verbesserung der Reinigungsleistung
- Erhöhung der Prozessstabilität und damit weniger Störfälle, die die ordnungsgemäße Funktion der Anlage beeinträchtigen
- Verminderung der CO₂-Emission durch verminderten Energieverbrauch, ggf. Erhöhung der Eigenerzeugung aus Klärgas
- Verminderung der zu entsorgenden Reststoffe (Klärschlamm)

Alle diese Punkte sind ebenfalls **ökonomisch** relevant durch:

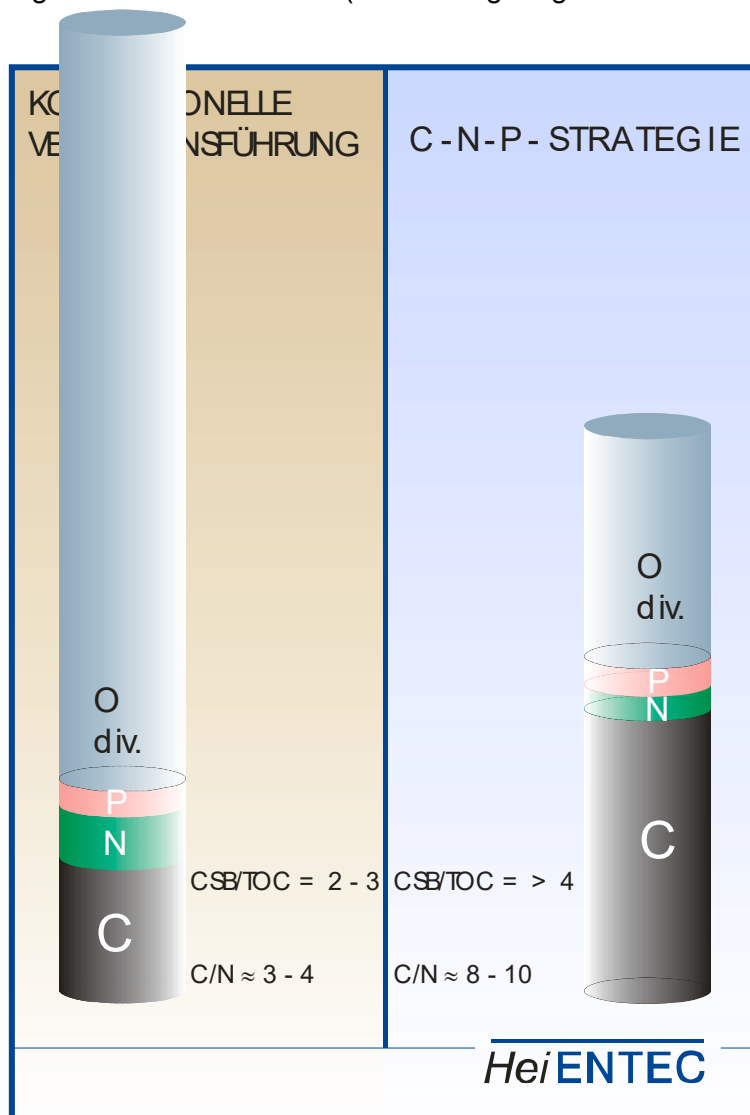
- Verbesserung der Reinigungsleistung = weniger Abwasserabgabe,
- Erhöhung der Prozessstabilität = Vermeidung von Strafzahlungen bei Grenzwertüberschreitungen sowie Verminderung der Kosten für Störungsbeseitigung
- Verminderung der Kosten für Energieverbrauch
- Verminderung der Kosten für Reststoffentsorgung

Wie man sieht, ist die Schnittmenge zwischen den beiden Themenkreisen sehr groß, so dass sich eine realistische Chance bietet, mit Hilfe intelligenter Technologie ökologische und ökonomische Aspekte miteinander zu verbinden.

1.2 **Zielsetzung**

Das C-N-P - Verfahren wurde entwickelt, um mit Hilfe biologischer Optimierung von Belebungsanlagen Vorteile bei Reinigungsleistung, Prozessstabilität und Anlagenkapazität zu erzielen, gleichzeitig aber auch den Energieverbrauch und die anfallenden Reststoffe zu vermindern. Anders als viele gebräuchliche Ansätze zielt das C-N-P - Verfahren nicht auf eine anlagen- oder regelungstechnische Verbesserung, da dies als eher peripher betrachtet wird (z.B. bessere Ausnutzung des eingetragenen Sauerstoffs oder effizienterer Energieeinsatz). Vielmehr setzt das C-N-P - Verfahren direkt bei den die Abwasserreinigung bestimmenden Mikroorganismen an. Durch Optimierung derer Lebensbedingungen und Regelung ihrer Atmungsaktivität wird einerseits eine höhere und stabilere Reinigungsleistung erzielt, andererseits werden die Mikroorganismen aber auch in die Lage versetzt, die Reinigungsleistung mit insgesamt niedrigerem Sauerstoffverbrauch zu erzielen.

Dies führt insbesondere dazu, dass Stickstoffverbindungen nicht mehr ausschließlich mit der konventionellen Nitrifikation / Denitrifikation eliminiert werden. Vielmehr wird der Stickstoff ohne Umweg über die Nitrat-erzeugung zum großen Teil direkt als molekularer Stickstoff ausgetragen. Dies führt zu geringerem Sauerstoffbedarf (und damit geringerem Stromverbrauch), stabilerer Reinigungsleistung und geringerem Stickstoffeintrag in den Schlamm und damit geringerer Rückbelastung.



Die damit mögliche geringere Belüftung hat weiterhin eine bessere Phosphoreliminierung zur Folge, da in der Biomasse gebundener Phosphor nicht mehr durch Autolyse freigesetzt und dann gefällt werden muss. Unterstützt wird die verbesserte Phosphoreliminierung durch das verbesserte Absetzverhalten des Schlammes, wodurch der Flockenabtrieb unterbunden wird, der zur Erhöhung des P_{ges} -Ablaufwertes durch partikulären Phosphor führen würde.

Der niedrigere Sauerstoffeintrag führt nicht nur zu geringerem Stromverbrauch (die Gebläse sind für ca. 50 - 60 % des Stromverbrauchs der Anlage verantwortlich), sondern auch zu geringerem Sauerstoffeintrag in den Belebtschlamm. Dies führt zu einem geringeren Überschussschlammanfall. Die Veränderung der Zusammensetzung und Masse des Überschussschlammes ist schematisch in nebenstehender Abbildung dargestellt (bezogen auf die Trockensubstanz)

2. Durchführung eines Betriebsversuchs

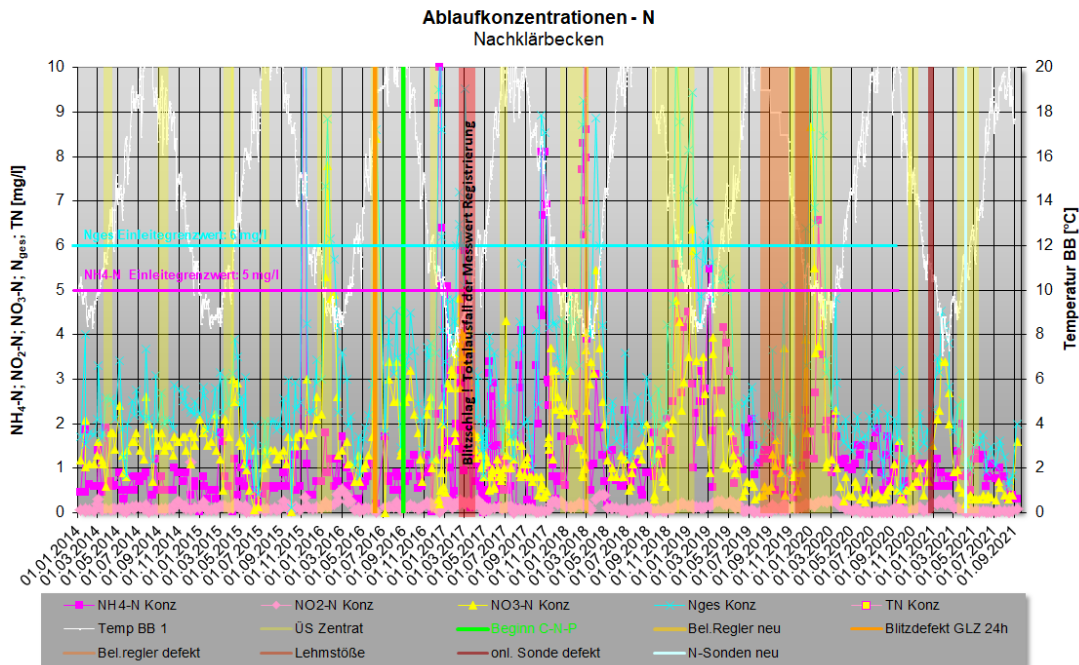
Das C-N-P - Verfahren war an dieser Stelle bereits 2016 vorgestellt worden, einschließlich Beispielen von anderen Kläranlagen und einer Kostenprognose. Es wurde daraufhin die Durchführung eines Betriebsversuchs beschlossen, über den hier berichtet werden soll.

Der Betriebsversuch basiert auf der Optimierung der Lebensbedingungen der Mikroorganismen wobei die Regelung deren Atmungsaktivität die Zugabe eines speziell entwickelten Hilfsmittels erfordert. Dessen Zugabe erfolgt kontinuierlich und in Abhängigkeit von der Anlagenbelastung. Der hier beschriebene Betriebsversuch wurde im September 2016 begonnen, und wird seitdem fortgeführt.

Die Umstellung auf die patentierte C-N-P Verfahrensführung erfolgt dabei über einen längeren Zeitraum, da biologische Systeme nur langsam reagieren und folglich nur in kleinen Schritten durchgeführt werden kann, um die Einhaltung der jeweiligen Grenzwerte nicht zu gefährden. Der Übergang auf die neue Verfahrensführung muss deshalb mit Augenmaß vorgenommen werden, was aber wiederum Risiken minimiert, da jederzeit die Möglichkeit zum Eingreifen und Ausgleichen unerwünschter Effekte besteht. Ein längerer Zeitraum wird ebenfalls benötigt, um eine fundierte statistische Bewertung vornehmen zu können – besonders dann wenn starke Schwankungen der Zulauffracht auftreten. Problematisch sind hierbei vor allem Stickstoff- und Phosphor- Frachtstöße, die in Strullendorf höchstwahrscheinlich auf Einleitungen aus dem Industriegebiet (*vermutlich aus Reinigungsaktionen der einzelnen Betriebe*) zurückzuführen sind. Um diese Störeffekt möglichst gering zu halten, und gleichwohl den Fortgang der Optimierungen gewährleisten, wurden in Zusammenarbeit mit dem Betriebspersonal Einstellvarianten erarbeitet, die einen jetzt stabilen Betrieb ermöglichen.

Bei Versuchsbeginn wurde zunächst die ehemalige Ferrifloc Dosierung durch eine frachtproportionale Dosierung des Hilfsmittels ENTEC 118/A ersetzt. Die Dosierung des ENTEC Hilfsmittels wurde, unter Verwendung eines ebenfalls von HeiENTE C zur Verfügung gestellten Steuermoduls, an die annähernd frachtproportionale Gebläseleistung gekoppelt. Durch Begutachtung der Belüftungskurven zeigte sich jedoch bald, dass die Konfiguration des bis dahin verwendeten AQUALOGIC Belüftungsreglers fast jeden Optimierungsansatz ausschloss. Die Hauptursache lag in der unterschiedlichen und ungünstigen Wahl der Eingangsparameter. Für Belebungsbecken (BB) 1 wurden die Parameter $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{PO}_4\text{-P}$ verwandt, während BB 2 nach den Parametern O_2 und Zeit geregelt wurde. Erschwerend kam hinzu, dass die Nitratmessung in BB1 mit einem photometrischen Analysator erfolgte, der wiederum bedingt durch die erforderliche Probenansaugung, eine etwa. 30-minütige Messverzögerung zur Folge hatte. Deshalb wurde übereingekommen, zwei $\text{NH}_4\text{-N/NO}_3\text{-N}$ Kombisonden anzuschaffen, damit in beiden Belebungsbecken gleiche Verhältnisse gewährleistet sind, der Primärparameter $\text{NH}_4\text{-N}$ mitgemessen wird, und die Totzeit der photometrischen Nitratmessung umgangen ist. Diese (*zunächst Teil-*) Umstellung erfolgte im März 2018, weil die Signaleinbindung der Sonde von BB 2 zunächst nicht möglich war, und erst im März 2019 realisiert werden konnte. In der Folge verlängerte sich die Umstellungsphase, und die Anpassung der Biozönose vollzog sich langsamer als ursprünglich vorgesehen. Gleichwohl sank der Sauerstoffbedarf, sodass der Eintrag trotzdem kontinuierlich vermindert werden konnte. Dieser Effekt verringert seitdem den Schlammbildungsgradienten, weshalb fortlaufend weniger Überschussschlamm abgezogen werden muss.

Diese „Teilumstellung“ führte vorübergehend zu etwas erhöhten $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufwerten (*überwiegend in den Wintermonaten, in denen die Grenzwerte ausgesetzt sind*). Inzwischen liegen aber alle Stickstoffwerte unter dem Ausgangsniveau.

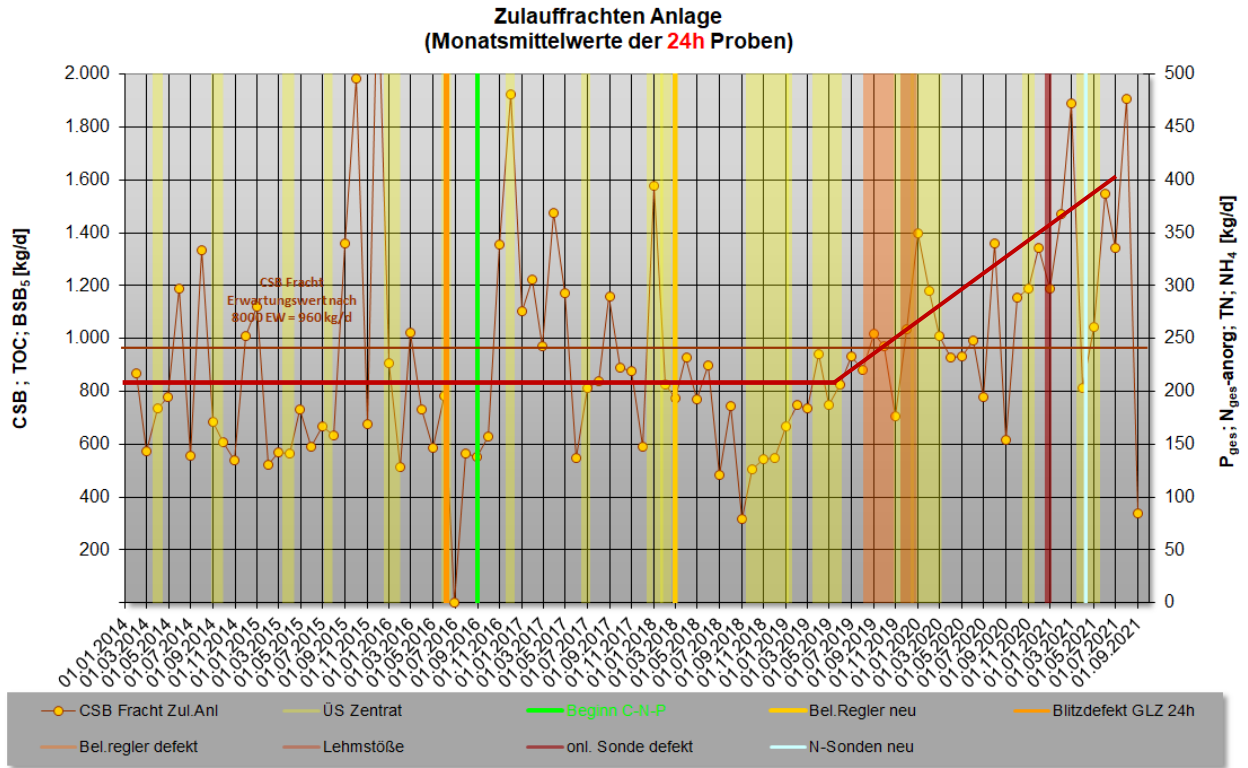


Wie bereits erwähnt, ist im Vorfeld eine, auf den damaligen Betriebsdaten basierende, Prognose für den C-N-P Betrieb erstellt worden. Dabei wurden Einsparungen von etwa 30 % beim Stromverbrauch der Belüftung als auch dem Schlammfall in Aussicht gestellt. Zudem wurde darauf hingewiesen dass die Kosten für das Eisenchlorid Sulfat Fällmittel verfahrensbedingt entfallen, bzw. durch Kosten für das ENTEC 118/A Produkt ersetzt werden. Insgesamt wurde eine Einsparung von etwa 47.000 €/a (netto) prognostiziert.

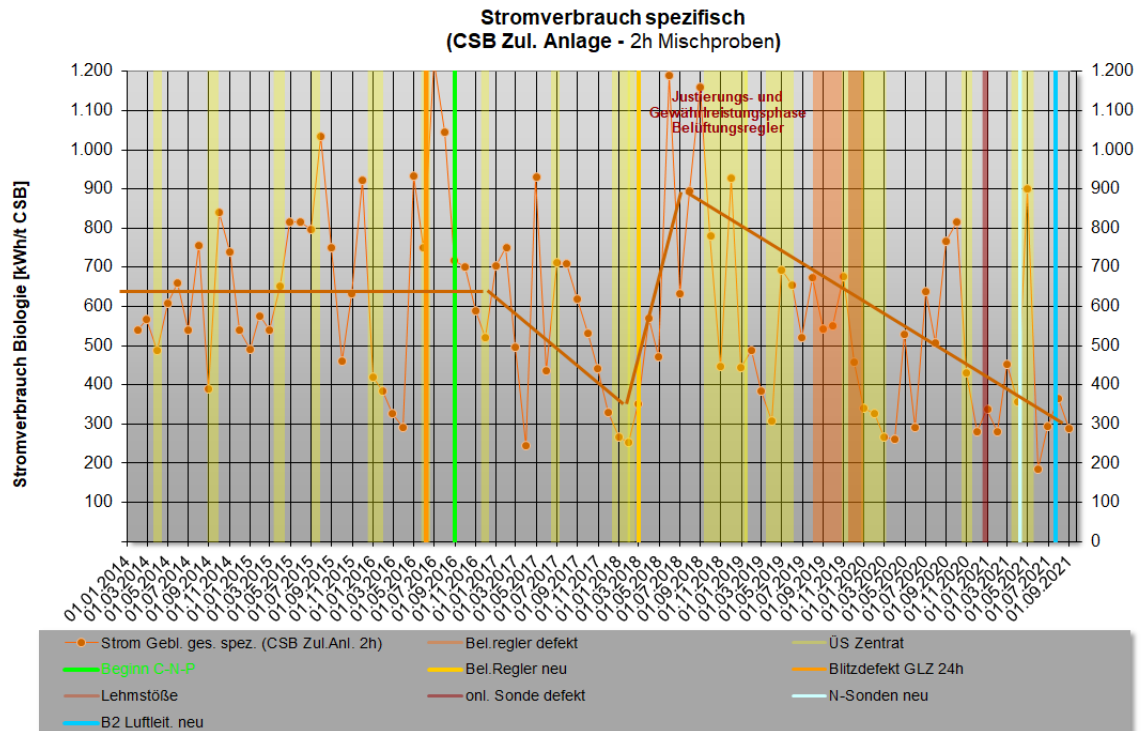
Im Rahmen dieser Zwischenauswertung sollen nun auf die aktuellen Verhältnisse eingegangen werden. Um hierbei die situationsbedingten Schwankungen ausgleichen und verlässliche Aussagen machen zu können, müssen (*wie bereits erwähnt*) längere Zeiträume miteinander verglichen werden. Hierzu würden sich eigentlich Jahresvergleiche anbieten. Da aber im Besonderen auf die neuesten Ergebnisse eingegangen werden soll, diese jedoch noch nicht als vollständiger Jahresdatensatz (Auswertestand August 2021) vorliegen, muss der zu betrachtende Zeitraum entsprechend zurückverlegt werden. Die Vergleichbarkeit erfordert dann aber die Wahl eines äquivalenten Zeitraums aus der Vorversuchsphase. Dies führte zur Wahl folgender Zeitspannen:

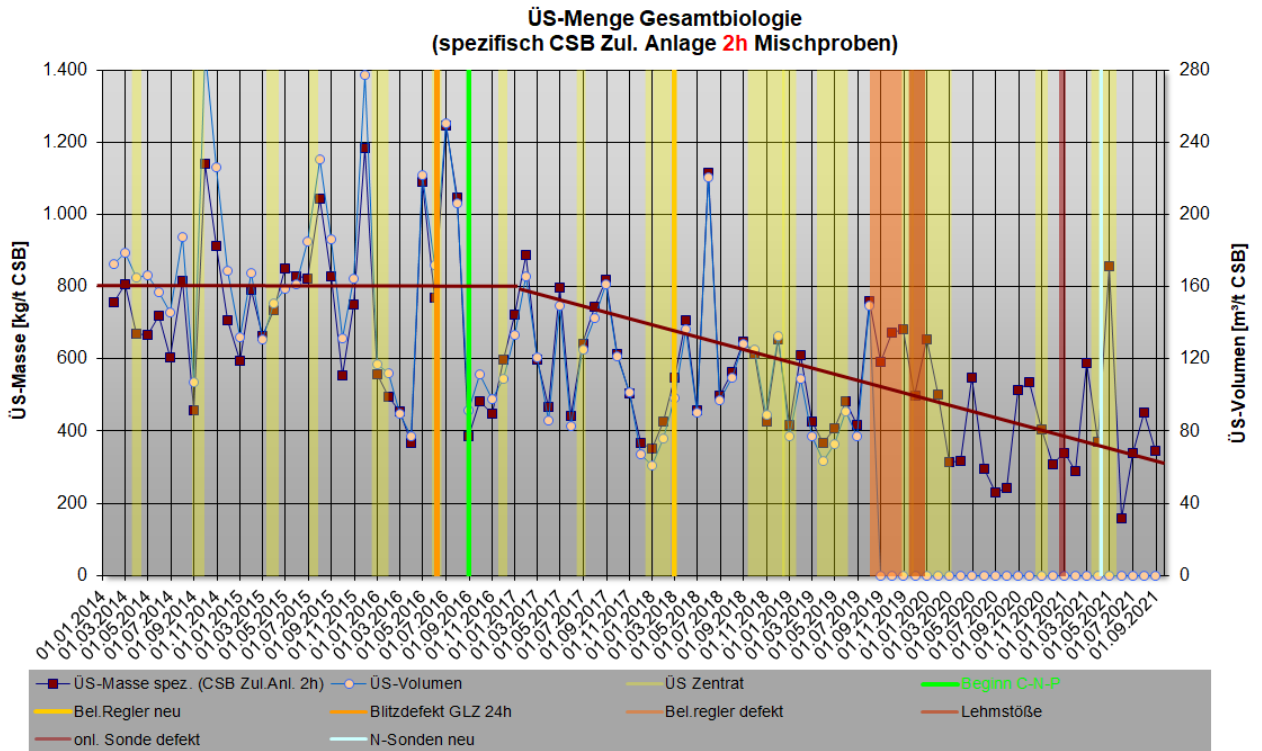
- **Referenzzeitraum** vor Versuchsbeginn mit konventioneller Verfahrensführung:
Sep 2014 - Aug. 2015
- **aktueller Bewertungszeitraum** unter stabilen C-N-P – Verhältnissen:
Sep 2020 – Aug. 2021
- Auf die Werte aus dem Zeitraum 2016 – 2019 wird nicht gesondert eingegangen, da hier die Verfahrensumstellung stattfand, ein neuer Belüftungsregler mit neuen online Sonden angeschafft und einjustiert wurde (Gewährleistungsphase), als auch größere Störfälle (Ausfall von Sonden und Belüftungsregler, Belüftungsleitung durchgerostet....) auftraten.

Hierbei ist zu beachten dass die kostenrelevanten Parameter unmittelbar von der Zulauffracht abhängen, diese aber signifikant angestiegen ist (siehe Diagramm).



Ohne Berücksichtigung der Frachten, würde ein unmittelbarer Vergleich von Werten und Kosten zu einer falschen Aussage führen. Folglich müssen die betrachteten Parameter zwingend auf die jeweilige CSB Zulauffracht bezogen werden. Dies ist in den folgenden Diagrammen dargestellt.





Im Anschluss soll eine Kosten- Nutzenrechnung dieser Parameter durchgeführt werden.

Hierbei ist zu beachten das sich während des Betrachtungszeitraums nicht nur die Zulauffrachten, sondern auch die Einheitspreise verändert haben - ein direkter Vergleich deshalb nicht möglich ist. Aus diesem Grund müssen zunächst die Fracht-, Schlamm- und Energieverhältnisse aus dem Referenzzeitraum (2014/ 2015) auf die aktuellen Verhältnisse umgerechnet werden. Hierdurch entstehen „**Fiktivwerte**“ die sich eingestellt hätten, wenn weiter „konventionell“ gefahren worden wäre. Aus der Differenz dieser „fiktiven Ausgangswerte“ und den derzeitigen Werten wird dann die aktuelle Einsparung errechnet. Hierbei wurde zugrunde gelegt dass sich sowohl der Stromverbrauch der Biologie (Belüftung) als auch der Schlammfall proportional zur Zulauffracht verhalten.

Diese Betrachtung basiert also auf der Fragestellung:

„Wie hoch ist die Einsparung aktuell, gegenüber der Konstellation wenn die Kläranlage, mit der heutigen Zulauffracht, weiter konventionell betrieben worden wäre?“

Hierbei wurden die Preise, die uns 2019 von Herrn Hess mitgeteilt wurden, verwendet.

Preise 2019 (jeweils zzgl. MwSt.)

1 kWh Strombezug	= € 0,20 (incl. Leistungsanteil und Stromsteuer)
1 m ³ Nassschlamm Entwässerung	= € 7,65 (ÜSVE zur Entwässerung)
1 t TS _{Schlamm}	= € 484,- (Entsorgkosten, errechnet aus € 106,50 bei 22 % TS)
1 t Kronos Ferrifloc	= € 165,-
1 t ENTEC 118/A	= € 670,-
Frachtkosten (1 Tankzug)	= € 590,- (bei 24 t/Zug: → 0,02458 €/kg)

Bilanz auf Basis der Preissituation von 2019:

Betriebskosten		Tageswert 1.9.14 – 31.8.15 konventionell	Tageswert 1.9.20 – 31.8.21 konventionell (fiktiv)	Tageswert 1.9.20 – 31.8.21 C-N-P	Differenz pro Tag	Differenz pro Jahr	Differenz- kosten [€ / a]
CSB-Zulaufrecht	kg/d	1011	1333	1333			
Strom Belüftung	kWh/d	562	741	530	-211	-77013	-15.403 €
ÜS-VE zur Entwässerung	m³/ d	23,2	30,6	17,2	-13,4	-4887	-37.386 €
TS Masse ÜS Schlammabzug	kg/d	621	819	506	-313	-114167	-55.257 €
Kronos Ferrifloc	kg/d	137	149	0	-149	-54385	-8.974 €
ENTEC 118/A	kg/d	0	0	108	108	39420	26.411 €
Frachtkosten aus (590,00 pro 24t.)	€	3,37	4,44	2,65	-1,79	-652	-652 €
SUMME							-91.259 €

Hierbei ist anzumerken:

- Die Berechnung der CSB Zulaufrechten basiert auf der Messung von 24h Mischproben. Diese wurden dahingehend korrigiert, dass Werte die unterhalb des EW Erwartungswertes lagen als nicht repräsentativ eingestuft, und deshalb auf jeweils 960 kg/d (entsprechend 8000 EW) angehoben wurden.
- Da die Entwässerung des Schlammes nur sporadisch vorgenommen wird (1 – 3-mal pro Jahr), ist eine Zuordnung der Menge des gepressten Schlammes zu einem bestimmten Jahr nicht eindeutig möglich. Wir haben daher die abgezogene Schlammmasse (*ÜS TS Masse aus dem Voreindicker zum Schlammstapelbehälter*) bewertet.
- Die Entwässerungskosten wurde aus dem im jeweiligen Zeitraum, der Presse tatsächlich zugeführte Volumen (Preis 7,65 €/m³ mit TS = 25,5 g/l) berechnet.
- Da der Fällmittelbedarf bei konventioneller Fahrweise (hier FeClSO₄) fast ausschließlich von der P- Zulaufrecht abhängt, darf hier natürlich nicht die CSB Fracht zugrunde gelegt werden. In diesem Fall muss die P- Fracht verwendet werden, die allerdings auch von **13,8 kg/d** im Bezugszeitraum, auf **15 kg/d** im Bilanzzeitraum angestiegen ist. Dies hätte (*gleiche konventionelle Betriebsverhältnisse vorausgesetzt*) eine Erhöhung der Ferrifloc Dosierung auf 149 kg/d erfordert.
- Die Frachtkosten wurden vereinfachend, sowohl für das ehemalige Fällmittel (Ferrifloc) als auch ENTEC 118/A, in jeweils gleicher Höhe angenommen.

Aus der vorausgegangenen Berechnung lässt sich erkennen dass die ehemals prognostizierten Einsparungen auf jeden Fall erfüllt sind.

Würde man den gemessenen Frachtanstieg jedoch (*fälschlicher Weise*) ignorieren und nur die effektiven Messwerte der Zeiträume miteinander vergleichen, ergäbe sich folgender Zusammenhang:

Betriebskosten		Tageswert 1.9.14 – 31.8.15 konventionell		Tageswert 1.9.20 – 31.8.21 C-N-P	Differenz pro Tag	Differenz pro Jahr	Differenz- kosten [€ / a]
CSB-Zulaufrecht	kg/d	1011		1333			
Strom Belüftung	kWh/d	562		530	-32	-11680	-2.336 €
ÜSVE zur Entwässerung	m³/ d	23,2		17,2	-6,0	-2190	-16.754 €
TS Masse ÜS Schlammabzug	kg/d	621		506	-115	-41975	-20.316 €
Kronos Ferrifloc	kg/d	137		0	-137	-50005	-8.251 €
ENTEC 118/A	kg/d	0		108	108	39420	26.411 €
Frachtkosten aus (590,00 pro 24t.)	€	3,37		2,65	-0,71	-260	-260 €
SUMME							-21.505 €

3. Fazit und Ausblick

Der Einsatz des C-N-P - Verfahrens führte zu einer deutlichen Stabilisierung der Prozessführung. Zwischenzeitlich auftretende, erhöhte Ablaufwerte waren auf die Optimierung der Anlagenausrüstung, den Einbau eines neuen Belüftungsreglers (mit Gewährleistungsbedingungen) sowie die experimentelle Einstellung der Betriebsparameter zurückzuführen. Letztere waren insbesondere sinnvoll, um den Einfluss bestehender Störquellen (stoßartige Einleitungen durch die Industriebetriebe) eliminieren zu können. Obwohl diese Probleme aktuell etwas weniger geworden sind, wäre es sicherlich sinnvoll, die entsprechenden Einleiter zu identifizieren und zu kooperativem Verhalten (Streckung der Einleitungen) anzuhalten.

Durch Anwendung des C-N-P - Verfahrens verbraucht die Anlage nun wesentlich weniger Sauerstoff (Belüftungsgrenzwert 0,4 statt 2 mg/l) ohne dass ein Sauerstoffmangel eintritt. Im Rahmen der Zielsetzung sind der Stromverbrauch der Belüftung, und der Überschussschlammfall deutlich gesunken. Nachdem nun auch noch ein Systemfehler im Aqualogic Belüftungsregler behoben wurde, ist mit einer weiteren Reduzierung des Sauerstoffeintrags, des Stromverbrauchs, sowie einer weiteren Verminderung des Schlammfalls zu rechnen.