



SCIENCE COORDINATOR

Hinweis: Die Anlagen zu diesem Umdruck können über das Internetangebot des Landtages unter [sh-landtag.de](http://sh-landtag.de) → Parlament → Dokumente → Umdrucke aufgerufen und im Ausschussbüro - Zimmer 137 - eingesehen werden

Slesvig, den 15.12.19

Stellungnahme von Svend Duggen, Dr. rer. nat. Dipl. Geol. zum

Bericht

der Landesregierung

Umweltzustand der Schlei und die Pläne der Landesregierung zur Verbesserung der dortigen Wasser- und Umweltqualität

Drucksache 19/1509

Sehr geehrte Damen und Herren,

meine Stellungnahme basiert auf meiner Expertise aus einem Studium in der Chemie, Mineralogie und Geologie an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel und aus zehn Jahren in Forschung und Lehre in den Meeres- und Geowissenschaften am GEOMAR in Kiel, darunter als Leiter einer Nachwuchsforschungsgruppe und Fahrtleiter von Schiffsexpeditionen, einer Lehrstuhlvertretung am Department of Earth Sciences am Royal Holloway College University of London und einem Auslandsforschungsstipendium der Deutschen Forschungsgemeinschaft am Geocenter Copenhagen. Seit 2009 bin ich als Gymnasiallehrer für die Fächer Chemie und Geographie und Naturwissenschaftskoordinator an der A. P. Møller Skolen in Schleswig tätig und habe mich seit Jahren tiefgehend in die komplexen Sachverhalte der Schlei eingearbeitet und hierzu auf der Internetseite des Schleiinformations- und Erlebniszentrum (SIEZ) e.V. einige Artikel publiziert<sup>1,2</sup> (z.B. zur Bedeutung des Faulschlamm für den ökologischen Zustand der Schlei) sowie bei mehreren Gelegenheiten Vorträge über die Schlei gehalten, darunter zur historischen Entwicklung des ökologischen Zustands (z.B. beim Schlei-Forum 2018). Weiterhin bin ich seit einigen Jahren Mitglied der Planungsgruppe Runder Tisch Schlei. Zusammen mit Kollegen an der Schule unterstütze ich durch Informationsaustausch und Datenerhebung unter Einbeziehung von Schülern am Gymnasium mehrere Forschungsprojekte in der Schlei (z.B. der Universität Kiel, des Forschungs- und Technologiezentrum Büsum, des Baltic Rim Projektes des Archäologischen Landesamtes und des Leibniz-Instituts für Gewässerökologie und Binnenfischerei).

### 1.0 Einleitung

Im Folgenden wird zunächst eine allgemeine Betrachtung zum ökologischen Zustand der Schlei dargelegt, welche die Notwendigkeit und Dringlichkeit der Reduzierung der externen und internen Nährstoffbelastung des Systems verdeutlicht. Darauf folgen detailliertere Betrachtungen mit Vorschlägen für ergänzende Maßnahmen bezüglich des (Halb-)Faulschlamm der Schlei, dem Mündungsbereich der Füsinger Au, der Errichtung von Makrophyten-Hotspots und einem Informations- und Erlebniszentrum an der Schlei mit einer Brackwassersystem-Forschungsgruppe.

In der Anlage finden Sie als pdf-Dateien:

- den Artikel „Faulschlamm in der Schlei – Die Bedeutung für einen guten ökologischen Zustand, Probleme und mögliche Lösungen“
- eine Broschüre mit einem Konzept für ein Informations- und Erlebniszentrum an der Schlei.

1



## 1.1 Allgemeine Betrachtung

Der ökologische Zustand von Seen und seenartigen Brackgewässern ändert sich bei zunehmender Nährstoffbelastung meist sprunghaft<sup>3</sup>. Dies hängt damit zusammen, dass sowohl der gute als auch der schlechte ökologische Zustand mit sehr unterschiedlicher Flora-Fauna-Vergesellschaftung jeweils selbststabilisierende Zustände sind<sup>3</sup>.

Die Schlei befand sich um das Jahr 1880 offenbar noch in einem guten ökologischen Zustand<sup>2</sup> und darin zitierte Literatur. Die Schlei unterlag nachfolgend im 20. Jh. sehr ähnlichen Veränderungen wie viele Seen im Land: Nach einer graduellen Verschlechterung geschah die sprunghafte Systemänderung in der Schlei in den 1940er Jahren; die weit verbreitete, bis knapp 2 Meter Tiefe stehende Unterwasservegetation verschwand innerhalb weniger Jahre, das Wasser trübte sich zunehmend durch Planktonmassenaufkommen ein, setzte sich auf dem Grund als Schlamm ab und verdrängte zunehmend eine lebhafte Bodenfauna. Wiederholter, länger wählender und weit verbreiteter Sauerstoffschwund erstickte eine bis Schleswig vorkommende Muschelfauna und verursachte Fischsterben. Dabei fand ein massiver Rückgang der Biodiversität statt. Diese Systemänderung ist bis heute die umfassendste und folgenschwerste Umweltkatastrophe für das System Schlei.

Die Zustandsänderung zurück zu einem ökologisch guten Zustand (wie um 1880), würde sich sehr wahrscheinlich nicht graduell, sondern ebenfalls als Systemsprung vollziehen<sup>3</sup>. Allerdings erfordert dies eine sehr erhebliche Reduzierung der Nährstoffbelastung, welche für den Systemsprung zurück zu einem guten ökologischen Zustand wahrscheinlich weit unter dem Niveau der Nährstoffbelastung liegen muss, wie zum Zeitpunkt des Systemsprungs hin zu einem schlechten ökologischen Zustand. Hauptgrund hierfür ist, dass die bei einem guten ökologischen Zustand vorhandene Unterwasservegetation und Bodenfauna relativ hohe Mengen an Nährstoffen und organischem Material umsetzen konnte, während in einem planktondominierten Gewässer mit schlechtem ökologischen Zustand Nährstoffe in der Wassersäule recycelt und zu einem hohen Planktonbiomassenaufkommen und einer hohen Sedimentationsrate von organischem Material am Grund führt.

Die Nährstoffbelastung ist in der inneren Schlei am höchsten und so verschlechtert sich der ökologische Zustand dementsprechend schleieinwärts. Daraus ergibt sich ein Schwerpunkt für die Situation und die Prozesse der inneren Schlei, denn: Verbessert sich der Zustand der inneren Schlei, folgt der Rest voraussichtlich beinahe von allein. Ein guter ökologischer Zustand würde sich in der inneren Schlei (Schleswig bis Missunde) wie folgt äußern:

- 1) Eine weit verbreitete Vergesellschaftung von Unterwasserpflanzen bis in Tiefen von 1,5-2 Metern (Kammlaichkraut, Durchwachsenes Laichkraut und Baltische Armleuchteralge) mit der Funktion als Laichgebiete für Fische,
- 2) Ausbreitung der marinen Muschelfauna in hoher Bestandsdichte bis Schleswig (Sandklaffmuschel, Lagunenherzmuschel und Baltische Plattmuschel), mit erheblicher Filtrierleistung für das Gewässer,
- 3) Ausbreitung vor allem von Muschelkrebse und Wasserschnecken am Grund, mit erheblichem Umsatz an organischem Material,

- 4) Änderung der stationären Fischvergesellschaftung zu einem höheren Anteil von Raubfisch gegenüber Friedfisch,
- 5) Verbesserung der Sichttiefe (auf geschätzt etwa 1,5-2 Meter im Sommer) durch Abnahme der Planktonbiomasse.

In den letzten rund zehn Jahren zeigen sich graduelle Verbesserungen beim ökologischen Zustand der Schlei. Diese sind vor allem auf die Verringerung der Nährstoffeinträge (z.B. verbesserte Klärwerksleistung, Schließung der Zuckerfabrik bei Schleswig) zurück zu führen. Dies bedingte eine allgemeine Verbesserung der Sauerstoffversorgung bis zum Gewässergrund seit dem Jahr 2012 (laut Holmer Fischer). In den letzten zehn Jahren ist eine Ausbreitung des Kammlaichkrauts entlang der Uferzone der inneren Schlei deutlich, Sandklaffmuschel und Herzmuschel sind wieder bis Schleswig zu finden und es tauchen saisonal wieder Wanderfischarten vor Schleswig auf, welche zuletzt in den 1960er Jahren gesehen wurden. Die frühere Bestandsdichte bei Flora und Fauna wird allerdings bei weitem nicht erreicht und einige der oben genannten, zuvor weit verbreiteten Arten sind bisher nicht wieder aufgetaucht. Die massiven Blaualgenblütenteppiche der 1970-1980er Jahre treten nicht mehr auf. Auch die Sichttiefe hat sich gemäß Aussage der Fischer leicht verbessert, erreicht aber im Frühjahr und Sommer durch Planktonmassenaufkommen weiterhin niedrige Werte um 0,5 Meter, phasenweise weniger, wie in den 1970-80er Jahren.

Wegen der graduellen Verbesserung wird der ökologische Zustand der inneren Schlei von den Fischern oft subjektiv als gut empfunden (verglichen mit dem Zustand vor 15-30 Jahren). Allerdings wird der Zustand basierend auf den offiziellen biologischen Bewertungssystemen weiterhin als schlecht eingestuft. Diese Einstufung wird sich durch die weiterhin relativ hohe Nährstoffbelastung, den selbststabilisierenden Eigenschaften eines schlechten ökologischen Zustands (planktondominiertes Gewässer) und durch das one-out-all-out-Prinzip der Bewertungsverfahren in den kommenden Jahrzehnten sehr wahrscheinlich nicht verbessern lassen.

Der Systemsprung zurück zu einem ökologisch guten Zustand erfordert eine massive Reduzierung der externen und internen Nährstoffbelastung. Die externe Zufuhr von Nährstoffen hat landwärtige Quellen und stammt aus dem Einzugsgebiet der Schlei (Einträge durch Kläranlagen, Landwirtschaft und der Atmosphäre). Die interne Zufuhr von Nährstoffen geschieht durch die Mobilisierung von Nährstoffen (vor allem Phosphat) aus (dem (Halb-)Faulschlamm), einem durch anthropogenen Einfluss gebildeten Sediment mit hohen Gehalten organischer Substanz.

Der Zustand eines Gewässers ist grundsätzlich Ausdruck dafür, wie der Mensch mit dem Einzugsgebiet umgeht. Zur Erreichung des ökologisch guten Zustands auch in der inneren Schlei ist es daher dringend erforderlich, zunächst weiterhin die externe Zufuhr von Nährstoffen so weit wie möglich zu reduzieren. Die derzeitige externe Zufuhr, vor allem aus dem Einzugsgebiet der inneren Schlei (z.B. Besiedlungsgebiet Schleswig, Füsinger Au) ist weiterhin allzu hoch. Die angestrebte Reduzierung der Nährstoffeinträge durch Erreichen der Bewirtschaftungsziele, Schaffung von Vernässungsflächen und Extensivierung ist ein unverzichtbarer Teil der Renaturierung der Schlei. Bedauerlicherweise ist zu erwarten, dass die Wirkung dieser Maßnahmen sich erst in 20-40 Jahren deutlich äußern. Leider ist auch zweifelhaft, ob diese

Maßnahmen für einen Systemsprung zurück zu einem guten ökologischen Zustand ausreichen. Denn das verbleibende Niveau der externen Nährstoffbelastung wird selbst dann noch für ein planktondominiertes und von Natur aus eutrophes Gewässer sehr erheblich sein.

Hinzu kommt das Problem der internen Düngung: Der (Halb-)Faulschlamm, welcher sich seit Mitte der 1930er Jahre aus dem Absatz der Planktonmassenaufkommen gebildet hat, ist flächenhaft am Grund der Schlei verbreitet. Er düngt in den Sommermonaten das Gewässer vor allem mit Phosphat und z.T. mit Ammonium auf<sup>4</sup>. Eine Massenbilanzierung für die innere Schlei zeigt, dass die Menge des in den Sommermonaten mobilisierten Phosphats aus dem (Halb-)Faulschlamm hinsichtlich der Größenordnung der Jahreszufuhr von Phosphat aus dem Einzugsgebiet der Füsinger Au entspricht<sup>5</sup> und eigene Berechnungen<sup>6</sup>. Dies fördert die sommerliche Massenvermehrung von Cyanobakterien (Blaualgen) und die Aufrechterhaltung einer erhöhten Nettoneubildungsrate des (Halb-)Faulschlammes am Grund der Schlei. Dies bedeutet, dass die interne Düngung und das Vorhandensein derartiger Mengen an (Halb-)Faulschlamm – allein – das Potenzial besitzen, die innere Schlei in einem planktondominierten und damit ökologisch schlechten Zustand festzuhalten (insbesondere angesichts des one-out-all-out-Prinzips des Bewertungssystems).

Die geplanten finanziellen Mittel sind, angesichts der Hindernisse für die Wiederherstellung eines ökologischen guten Zustands und der Dringlichkeit der WRRL, sicherlich allzu gering. Bei der Begrenztheit der finanziellen Ressourcen für eine Gewässersanierung halte ich es derzeit basierend auf meinem Verständnis des Systems Schlei für sinnvoll, in den kommenden Jahren den Fokus auf die effektive Reduzierung der externen Nährstoffeinträge zu legen, aber zugleich weitere Maßnahmen zu untersuchen und vorzubereiten.

Wichtig wäre einzugrenzen, wann hinsichtlich der Nährstoffreduzierung ein geeigneter Zeitpunkt erreicht würde, um sich als nächsten Schritt der Problematik der internen Düngung, also dem (Halb-)Faulschlamm, anzunehmen. Hierfür kann neben einer Entfernung und Deponierung eine rohstoffliche Nutzung des entnommenen Materials oder eine umweltverträgliche, oxidative und selektive in-situ-Zersetzung der organischen Substanz des Sediments in Betracht gezogen werden<sup>1</sup>. Die Anlage einer großen Vernässungsfläche bzw. Nährstoffsénke im Mündungsbereich der Füsinger Au kann ebenso in Betracht gezogen werden wie eine Erschaffung von Makrophyten-Hotspots in ausgesuchten Bereichen vor allem der inneren Schlei. Detailliertere Überlegungen hierzu werden im Folgenden dargelegt.

## 1.2 Detaillierte Betrachtungen

### 1.2.1 (Halb-)Faulschlamm

Hinsichtlich der Details zur Bedeutung des (Halb-)Faulschlammes für den ökologischen Zustand der Schlei sei auf den Bericht von Prof. Ripl (1986)<sup>4</sup>, den Artikel von Duggen (2017)<sup>1</sup> (beigefügt) und die aktuelle Untersuchung zum Sedimentinventar der Schlei von Höft et al. (2018)<sup>6</sup> verwiesen. Die Literatur verdeutlicht, dass nach oder neben einer erfolgreichen Reduzierung der landwärtigen, externen Nährstoffeinträge, die nächste Herausforderung die Reduzierung der internen Düngung aus dem (Halb-)Faulschlamm sein wird.

Im Artikel von Duggen (2017) wurde der Betrachtungswinkel für das Sediment der Schlei geändert; statt den (Halb-)Faulschlamm als Altlast zu betrachten, könnte dieser eine Ressource darstellen (Energiegewinnung, Anwendung als Baumaterial oder für den Hochwasserschutz, z.B. Flächenerhöhung, Materialvorspülung für den Küstenschutz oder Deichbau). Hinsichtlich der Energiegewinnung und Mörtelherstellung mit dem (Halb-)Faulschlamm wurden bereits einige Untersuchungen durchgeführt. Die Wirtschaftlichkeit einer Energiegewinnung ist sehr vom Strompreis abhängig, eine Energiegewinnung könnte aber zumindest die Kosten einer Entnahme reduzieren. Mit (Halb-)Faulschlamm kann prinzipiell wie mit Sand Mörtel hergestellt und zusammen mit Pflanzenhalmen/-fasern ökologische Dämmplatten gepresst werden, eine Qualitätsbeurteilung würde allerdings noch nicht durchgeführt. Ob sich das sand- bzw. siltreiche Sediment der Schlei trotz des Anteils an organischen Substanzen für den Küsten- und Hochwasserschutz eignet, ist meines Wissens bisher nicht untersucht worden. In Anbetracht der Verknappung der Ressource Sand und des steigenden Bedarfs des Hochwasserschutzes an der Ostseeküste in den kommenden Jahrzehnten wäre es sinnvoll, die Verwendungsmöglichkeiten des (Halb-)Faulschlammes materialwissenschaftlich untersuchen zu lassen.

Als Alternative zur Entnahme des (Halb-)Faulschlammes kann der oxidative Abbau am Grund der Schlei in Betracht gezogen werden. Die meines Wissens derzeit umweltverträglichste und vielversprechendste Methode wäre das Aufbringen bzw. Injizieren von Calciumperoxid als Sauerstoffträger. Diese Methode des (Halb-)Faulschlammabbaus ist patentiert und wurde von der Firma Söll / Soelltec (<https://www.soelltec.de/de/>) bereits vielfach erfolgreich in Seen durchgeführt. Allerdings ist die Wirksamkeit in einem Brackwassersystem wie der Schlei bisher nicht belegt worden. Die Wirksamkeit müsste am ungestörten Sediment (mit einer ungestörten Zonierung der Redoxpotenziale und die daran angepassten Mikroorganismen) untersucht werden, was sich am besten in situ im Gewässer auf einer ausgesuchten Versuchsfläche durchführen ließe.

Ähnliche Experimente zum oxidativen Abbau wurden in den 1980er Jahren von der Arbeitsgruppe Rippl (1986) in der inneren Schlei in mit Spundwänden abgegrenzten Bereichen durchgeführt. Als Reagenz wurde damals Calciumnitrat genutzt, wobei das Nitrat als Sauerstoffträger das organische Material im (Halb-)Faulschlamm oxidiert und Calciumionen das freiwerdende Phosphat als schwerlösliches Calciumphosphat binden (RiplOx-Verfahren). Die Methode hatte in den abgegrenzten Bereichen eine positive Wirkung auf die Sichttiefe und die Planktonvergesellschaftung<sup>4</sup>. Für das Calciumperoxidverfahren ist eine ähnliche Wirkung zu erwarten, es löst gegenüber dem RiplOx-Verfahren zugleich das Problem, dass kein Nitrat als Nährstoff ins Gewässer eingetragen wird.

Bezüglich des Sediments der Schlei sei abschließend ein Abschnitt in der Drucksache 19/1509 kommentiert. Dieser enthält eine meiner Meinung nach nicht robuste Schlussfolgerung auf Seite 8: *„Mit Hilfe von Methoden zur Altersbestimmung konnten an den Sedimenten zudem die Ablagerungsraten ermittelt werden. In früheren Studien der 1980er Jahre sind Ablagerungsraten von rund 4 bis 8 mm pro Jahr dokumentiert. Die jetzigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass trotz der weiterhin weiten Verbreitung des Schlicks die Ablagerungsrate seit den 1980er Jahren um etwa die Hälfte zurückgegangen ist.“*

Kommentar: In der Studie der 1980er Jahre (Ripl 1986) wurde ein Bohrkern beim Wikingturm vor Schleswig untersucht und eine Ablagerungsrate von 4-8 mm abgeleitet. In der aktuellen Studie wurde ein Sedimentkern aus der mittleren Schlei untersucht und etwa die Hälfte der Ablagerungsrate ermittelt. Es handelt sich grundsätzlich um zwei räumlich getrennte (ca. 20 km Abstand) und unterschiedliche Becken und daher Ablagerungsräume mit unterschiedlichen Nährstoffeinträgen und Strömungsverhältnissen. Aus den Karten der aktuellen Studie zum Sedimentinventar der Schlei geht sogar hervor, dass sich die Mächtigkeit der (Halb-)Faulschlammschicht in windgeschützten und wellenexponierten Bereichen unterscheidet, was sehr wahrscheinlich auf erhebliche Umlagerungsprozesse des organikhaltigen, siltigen Materials hinweist. Für Ergebnisse physikalischer Berechnungen zu Umlagerungsprozessen sei auf Abschnitt 2.1.2 in Duggen (2017) verwiesen. Die (Halb-)Faulschlammschicht weist sogar kleinskalig (auf einer der 10 bis 100 Meterskala) eine erhebliche Heterogenität auf, was auch vor Ort bei der Probenahme deutlich wird. Für die Schlussfolgerung, dass die Ergebnisse darauf hindeuten, dass (in der gesamten Schlei) die „Ablagerungsrate seit den 1980er Jahren um etwa die Hälfte zurückgegangen ist“, gibt es somit keine ausreichende Datengrundlage. Über die Sedimentdynamik (Umlagerungsprozesse) in der Schlei ist leider wenig bekannt, wäre aber für das Verständnis der natürlichen Abbauprozesse der organischen Substanz und der daraus abzuleitenden Notwendigkeit der Entnahme bzw. des Abbaus des (Halb-)Faulschlamms von wesentlicher Bedeutung.

### 1.2.2 Makrophyten-Hotspots in der inneren Schlei

Die Ausbreitung von Unterwasservegetation ist ein Ausdruck eines sich verbessernden Zustands der inneren Schlei. In den letzten zehn Jahren wird die Ausbreitung des Kammlaichkrauts entlang der Uferzone der inneren Schlei beobachtet<sup>2</sup>. Das Kammlaichkraut ist in manchen Seen und Brackwassersystemen Pionierpflanze für die Wiederausbreitung der Unterwasservegetation<sup>3</sup>. Andere Makrophyten wie Durchwachsenes Laichkraut und Baltische Armleuchteralge, welche Ende des 19. Jh. in Vergesellschaftung mit dem Kammlaichkraut die üppige Unterwasservegetation der inneren Schlei dominierten, sind bislang in der inneren Schlei nicht wieder verbreitet (sind aber als Reliktbestände im Unterlauf der Füsinger Au oder im Haddebyer und Selker Noor vorhanden). Es wäre meiner Meinung nach sinnvoll, eingehender beurteilen bzw. untersuchen zu lassen, ob die Errichtung von Makrophyten-Hotspots in ausgesuchten und geeigneten Bereichen der inneren Schlei, die Wiederherstellung der weit verbreiteten Unterwasservegetation in Tiefen bis 1,5-2 Metern beschleunigen könnten. Der Vorgang entspräche an Land einer Wiederaufforstung.

Meine Überlegungen basieren auf dem Inhalt des Buches von Prof. Scheffer (Ecology of Shallow Lakes)<sup>3</sup>. Makrophyten-Hotspots wären Senken für Nährstoffe, würden das Sediment mit Sauerstoff versorgen und zum Abbau organischen Materials beitragen, Habitat für diverse Fauna (Laichgrund für Fische, Versteck für kleine Fische und Krebstiere) und Quellen von Diasporen (Samen, Sporen, Fruchtknospen) für die Gewässerumgebung. Durch Abschattung und andere Effekte wären Mikroalgen, darunter Blaualgen, in diesen Bereichen benachteiligt. Makrophyten-Hotspot ab einer gewissen Größe könnten sich ggf. selbst stabilisieren und positiv auf die Umgebung der inneren Schlei einwirken. Ob und ggf. zu welchem Zeitpunkt ein solches Projekt für die innere Schlei sinnvoll sein könnte, würde die Einbeziehung von und Prüfung durch Biowissenschaftler mit einer tiefgehenden Expertise für Brackwasserökosysteme erfordern.

### 1.2.3. Füsinger/Loiter Au

Hauptquelle für die externe Nährstoffzufuhr in die Schlei ist das Einzugsgebiet der Füsinger/Loiter Au. Dies ist besonders problematisch, da die Au in die innere Schlei mündet.

Zusätzlich zu den bereits vorgeschlagenen Maßnahmen (Bewirtschaftungszielen, Schaffung von Vernässungsflächen entlang der Au und Extensivierung) könnte geprüft werden, ob die Niederung vor der Brücke der Kreisstraße westlich von Füsing in eine großflächige, schilffreie Überflutungsfläche umgewandelt werden könnte und ob diese geeignet wäre, den Großteil der verbleibenden Nährstoffe im Wasser der Füsinger Au noch vor der Mündung in einem großflächigen Flachwasserbiotop zurückzuhalten. Dies wäre ohne ein kleineres Querbauwerk an der Brücke und eine Öffnung des Deiches und Umlenkung der Wassermassen über die Fläche kaum zu erreichen, so dass die Aufrechterhaltung der Durchgängigkeit für Organismen und kleinere Boote durch geeignete technische Lösungen möglichst aufrecht erhalten werden sollte. Aber diese Option der Nährstoffrückhaltung erscheint derzeit für die Füsinger Au die einzige zu sein, welche relativ kurzfristig (d.h. innerhalb der Zeitskala der Erreichung der Ziele der WRRL) umsetzbar wäre. Zugleich könnte ein flächiges Biotop für Wasservögel, Amphibien, Krebstiere und Insekten erschaffen werden. Es ist erwähnenswert, dass die Fläche in den kommenden Jahrzehnten wegen des Anstiegs des Meeresspiegels ohnehin weiter vernässen und häufiger überflutet wird. Das Projekt würde diesem Prozess vorgreifen. Ob ein solches Projekt durchführbar ist, und ob die Vorteile der Nährstoffrückhaltung den Nachteilen überwiegen, müsste allerdings erst noch untersucht werden.

Alternativ hat Rippl (1986) vorgeschlagen, eine niedrige, bis zur Wasseroberfläche reichende Spundwand in der Füsinger Bucht der Kleinen Breite, d.h. schleiwärts vor der Mündung der Füsinger Au, einzuziehen. Die Abtrennung einer 25-30 ha großen Sedimentationsfläche war für die Rückhaltung von Partikeln (und daran gebundenem Phosphat) aus dem Wasser der Füsinger Au vorgeschlagen worden.

### 1.2.4. Ein Informations- und Erlebniszentrum für die Schlei

Die Ökologie der Schlei ist einzigartig und ihre Zustandsänderung von überregionalem Interesse. Durch ihre sehr langgezogene Form variiert die Ökologie der Schlei von fast limnisch im inneren Teil, über einen weit ausgedehnten Brackwasserbereich bis hin zu marin im äußeren Bereich.

Zum Einen bietet ihre Geschichte jene Erzählungen der Wechselwirkung zwischen Mensch und Natur, einer Umweltkatastrophe von der viele andere Gewässer ebenfalls betroffen sind, und den jahrzehntelangen Bemühungen verschiedener Berufsgruppen, Gemeinden und politischen Entscheidungen, welche zu einem besseren Zustand führten und weiterhin führen sollen. Zum Anderen bietet die Schlei Möglichkeiten zu zeigen, wie exemplarisch Nachhaltigkeit und die Erreichung der Ziele der WRRL trotz der enormen Hindernisse nach und nach gelebt und umgesetzt wird.



A. P. MØLLER SKOLEN

SCIENCE COORDINATOR

Slesvig, den 15.12.19

Um die Öffentlichkeit bei diesem Prozess einzubinden und mitzunehmen, wurde ein Konzept für ein Schlei- Informations- und Erlebniszentrum entwickelt (siehe beigefügte Broschüre des SIEZ). Es verbindet in einzigartiger Weise Vermittlung von vielfältigen Informationen zur Schlei-Region, Natur- und Kulturerlebnis, regionale Nachhaltigkeit und Brackwassersystem-Forschung.

Angesichts der Größe des Systems und den Herausforderungen, eine Verbesserung des Zustands herbeizuführen, wäre heute eine noch stärkere Betonung der Brackwassersystem-Forschung in diesem Konzept sinnvoll. Eine Brackwassersystem-Forschungsgruppe, angegliedert an die Universitäten in Kiel und Flensburg, könnte sich schwerpunktmäßig der Zustandsverbesserung der Schlei widmen und treibende Kraft vor Ort sein. Ebenso bedeutend wie die Durchführung von Forschungsprojekten in der Schlei, darunter solcher zur Gewässerrestaurierung, wäre die Einbindung in die Lehre (z.B. an den Universitäten in Kiel und Flensburg und vor Ort mit Exkursionen an der Schlei) und die Vermittlung der Zusammenhänge bezüglich der Zustandsänderungen der Schlei in der Öffentlichkeit.

#### Ausgewählte Literatur

- <sup>1</sup> <https://schleinfozentrum.de/faulschlamm-in-der-schlei-die-bedeutung-fuer-einen-guten-oekologischen-zustand-problemstellungen-und-moegliche-loesungen/>
- <sup>2</sup> <https://schleinfozentrum.de/flora-und-fauna-der-inneren-schlei/>
- <sup>3</sup> Scheffer M (2004) Ecology of Shallow Lakes. Principal Ed. Usher MB Population and Community Biology Series 22. Dordrecht / Boston / London. Kluwer Academic Publishers. 356 S.
- <sup>4</sup> Rippl W (1986) Restaurierung der Schlei. Bericht über ein Forschungsvorhaben. – Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten, Kiel: D 5. 86 S.
- <sup>5</sup> Ohlendieck, U (2009) Zustand und Verbesserungspotenzial der Schlei. Eine Informations- und Planungsgrundlage für Maßnahmen zur Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie. Im Auftrag des Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR).
- <sup>6</sup> [https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/K/kuestengewaeser/Downloads/vortrag12\\_2018.html](https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/K/kuestengewaeser/Downloads/vortrag12_2018.html)
- <sup>7</sup> Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein (1978) Die Schlei. Bericht über die Untersuchung des Zustandes und der Benutzung von August 1974 bis Dezember 1977. Band 1 – Durchführung und Auswertung.



# Faulschlamm in der Schlei – Die Bedeutung für einen guten ökologischen Zustand, Probleme und mögliche Lösungen

## Faulschlamm in der Schlei – Die Bedeutung für einen guten ökologischen Zustand, Probleme und mögliche Lösungen

Verfasser: Svend Duggen, Dr. rer. nat., Dipl. Geol.,

Geowissenschaftler, Gymnasiallehrer für Chemie und Geographie an der A. P. Møller Skolen in Schleswig.

Wenn Sie diesen Artikel zitieren möchten, geben Sie bitte Folgendes an:

Duggen S (2017) Faulschlamm in der Schlei – Die Bedeutung für einen guten ökologischen Zustand, Probleme und mögliche Lösungen. Erstmals erschienen auf der Internetseite des Schleiiinformations- und Erlebnis zentrums, SIEZ. [www.schleiiinfozentrum.de](http://www.schleiiinfozentrum.de) am 25. Januar 2016. Letzte Aktualisierung: 30. März 2017.

### Zusammenfassung

Der ökologische Zustand der Schlei steckt in einem Dilemma. Einerseits haben verschiedene Maßnahmen seit den 70er und 80er Jahren eine merkliche Verbesserung bewirkt. Andererseits reichen diese bisher nicht aus, um die Schlei in einen guten ökologischen Zustand – wie von der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) gefordert – zurück zu führen.

Dabei wäre ein guter ökologischer Zustand der Schlei und ihrer Zuläufe für die Lebensqualität der Menschen in der Region und für wirtschaftliche Faktoren direkt oder indirekt sehr förderlich (Fischerei, Gewerbe im Bereich Freizeit und Erholung, Immobilienwerte, Nahrungsmittelqualität, Landwirtschaft). Eine Rückführung der Schlei in einen ökologisch guten Zustand wäre daher nicht nur umweltmäßig, sondern auch politisch, sozial und ökonomisch nachhaltig.

In dem Bestreben, diesen Zustand zu erreichen, erhalten die Quellen und die Verringerung der Nährstoffeinträge hohe Aufmerksamkeit. Es sind dies vor allem die heutigen Einträge aus den Kläranlagen und der Landwirtschaft im Einzugsgebiet der Schlei. Die Nährstofffreisetzung aus dem Faulschlamm am Grund der Schlei findet Erwähnung, konkrete Lösungsansätze für das Faulschlammproblem werden in der Literatur besprochen, spielen in der öffentlichen Debatte seit einigen Monaten auch wieder eine zunehmende Rolle, sind aber noch nicht Teil der aktuellen Restaurierungsstrategien.

Aus der Literatur, hierunter den Ergebnissen wissenschaftlicher Untersuchungen seit den 1980/90er Jahren, kann jedoch abgeleitet werden, dass die Rückführung der Schlei in einen guten ökologischen Zustand ohne eine großflächige Bearbeitung bzw. Entnahme des Faulschlammes in absehbarer Zeit sehr wahrscheinlich nicht möglich ist. Maßnahmen wie die starke Einschränkung der externen Nährstoffeinträge aus kommunalen Abwässern und der Landwirtschaft sind weiterhin von zentraler Bedeutung, aber allein offenbar nicht ausreichend, um die Schlei in naher Zukunft wieder in einen guten ökologischen Zustand zu versetzen.

Dadurch wird die Sanierung der Schlei noch problematischer: Einerseits ist es schwierig genug, die externen Einträge aus Kläranlagen und der Landwirtschaft zu verringern; die hier verzeichneten Erfolge haben immerhin ein halbes Jahrhundert in Anspruch genommen. Die Bearbeitung bzw. Entfernung des Faulschlammes wird im Allgemeinen als aufwändig und teuer angesehen; aber wie soll verfahren werden, wenn sich ebendies für die Rückführung der Schlei in einen besseren ökologischen Zustand als unverzichtbar herausstellte?

Mit einer Kombination von Strategien kann der ökologische Zustand der Schlei in naher Zukunft erheblich verbessert werden. Hierzu gehören weiterhin die Verbesserung der Kläranlagen, die Verringerung der Nährstoffeinträge aus dem Einzugsgebiet der Schlei, Ansiedeln von Unterwasserpflanzen (Makrophyten), Verringerung des Anteils von Friedfisch im Vergleich zum Anteil von Raubfisch sowie sehr wahrscheinlich der umfassende Einsatz technischer Verfahren zur Faulschlammbehandlung bzw. -entnahme. Wenn die Maßnahmen in diesen Bereichen umgehend außerordentlich verstärkt würden, könnte die Schlei innerhalb von etwa 20 Jahren in einen erheblich besseren, wahrscheinlich sogar guten Zustand zurückgeführt werden.

Wie dieser hinsichtlich Wasserqualität, Flora und Fauna aussieht, wird in wissenschaftlichen Schriften in den Jahrzehnten um 1900 herum beschrieben; eine weit verbreitete Unterwasservegetation mit Laichkräutern und Makroalgen bis in etwa 2,5 m Tiefe, ganzjährige Besiedlung der tieferen Bereiche der Schlei mit Muscheln, Schnecken und Würmern, die als Nahrungsgrundlage für Fische und Wasservögel dienen, eine günstigere Planktonvergesellschaftung und Sichttiefen von etwa 1,5 bis 2 Metern sogar im Sommer in der inneren Schlei.

Der Schwerpunkt dieses Artikels ist, die Bedeutung des Faulschlammes für den ökologischen Zustand der Schlei zu ergründen und Mechanismen für die noch anhaltende Faulschlammneubildung darzulegen. Weiterhin werden Möglichkeiten zur Bearbeitung bzw. Entnahme des Faulschlammes besprochen. Zusätzlich zu bereits in der Literatur diskutierten werden neue Lösungsansätze dargelegt, die anderenorts bereits entwickelt oder in Teilen genutzt werden.

Für die Schlei-Region werden hier die Möglichkeiten zur Nutzung des Faulschlammes als Rohstoff zur Gewinnung von Energie, als Baumaterial, als Düngemittel und zur Gewinnung von Metallen diskutiert. Gelingt eine rohstoffliche Nutzung des Faulschlammes, würde dies zur Finanzierbarkeit der Entnahme des Faulschlammes und somit zu einer Restaurierungsstrategie beitragen können. Mit diesem Konzept würden ökologische Zielsetzungen mit wirtschaftlichen Interessen vereint werden.

## **Inhaltsverzeichnis**

1. Einleitung
  - 1.1. Was ist Faulschlamm?
  - 1.2. Ausbreitung und Menge des Faulschlammes in der Schlei
  - 1.3. Historische Ursachen für die Bildung des Faulschlammes in der Schlei
2. Welche Probleme verursacht der Faulschlamm in der Schlei?
  - 2.1. Phosphat-Mobilisierung und interne Düngung der Schlei
    - 2.1.1. Mobilisierung von Phosphat aus dem ruhig am Grund liegenden Faulschlamm
    - 2.1.2. Mobilisierung von Phosphat bei Aufwirbelung der Faulschlamm-Oberfläche
  - 2.2. Biologische Folgen der internen Düngung
  - 2.3. Das Faulschlammproblem zusammenfassend graphisch dargestellt
  - 2.4. Problem Schwermetallbelastung
3. Mögliche Lösungen
  - 3.1. Direkte und indirekte Beeinflussung der Faulschlammoberfläche
  - 3.2. Entnahme von Faulschlamm und Nutzung als Rohstoff
  - 3.3. Verringerung der Faulschlammneubildung
4. Schlussfolgerungen
5. Literatur zur Vertiefung
6. Danksagung

## **1. Einleitung**

### **1.1. Was ist Faulschlamm?**

Faulschlamm (Fachbegriff: Sapropel) in Gewässern ist eine dunkle schlammige Ablagerung mit einem relativ hohen Anteil an organischem Material, welches unter sauerstofffreien Bedingungen zersetzt wird. Typisch ist ein fauliger Geruch nach Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S).

Faulschlamm entsteht in Gewässern, wenn die Produktion von organischem Material

höher ist als durch den im Wasser gelösten Sauerstoff wieder zersetzt werden kann. Überschüssiges organisches Material setzt sich am Grund ab und färbt diesen unter sauerstofffreien Bedingungen zusammen mit gebildetem Eisensulfid schwarz ein (siehe Abb. 1).



**Abbildung 1:** Faulschlammreiches Sediment aus der Mitte der Kleinen Breite. Die Schalen toter Muscheln und Wasserschnecken können bei Sturm eingetragen worden sein. Alternativ können Muscheln wie die Herzmuschel und Wasserschnecken bei ausreichender Sauerstoffversorgung im Winter und Frühjahr eingewandert und dann beim sommerlichen Sauerstoffschwund abgestorben sein. Lebendige Muscheln und Wasserschnecken konnten in dieser Probe nicht nachgewiesen werden. Photo: S. Duggen.

## 1.2. Ausbreitung und Menge des Faulschlamms in der Schlei

Ein hoher Nährstoffeintrag führt in der Schlei zu einer Erhöhung der biologischen Produktion, vor allem durch Algenblüten im Frühjahr und Sommer. Die Reste der abgestorbenen Algen sinken auf den Grund und tragen zum Aufbau des Faulschlamms bei.

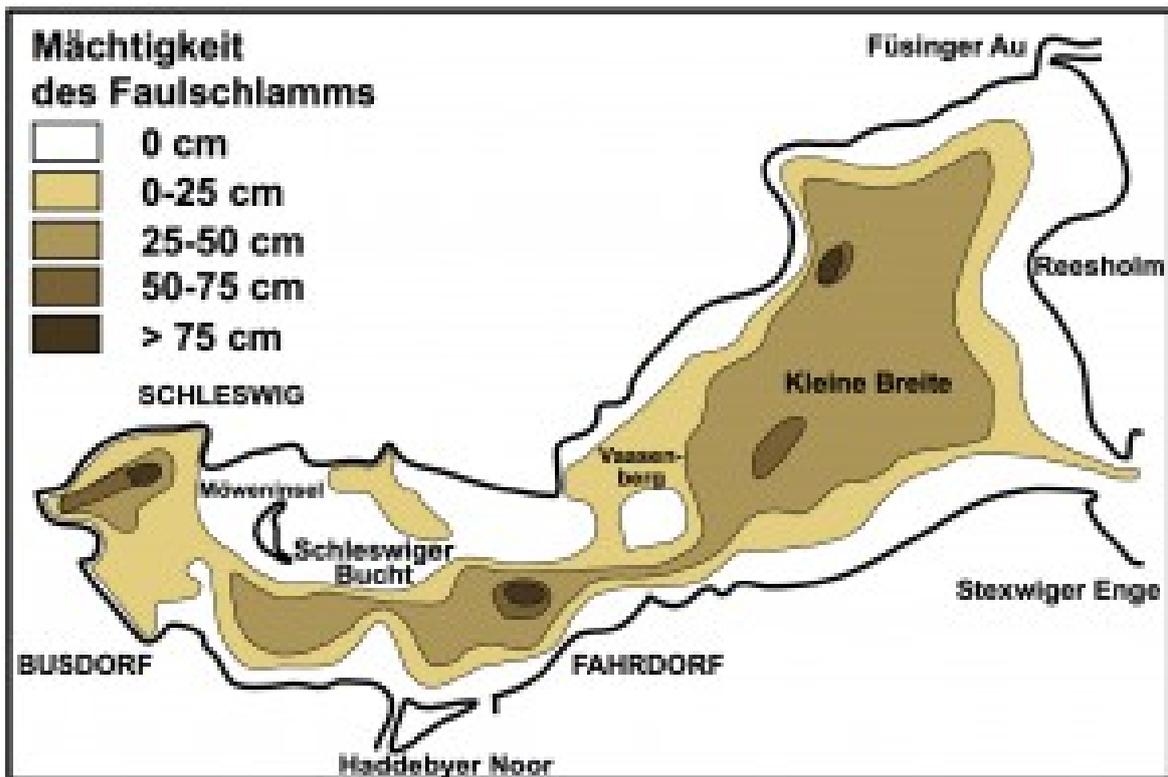
Als Vorboten für die Verschlechterung des ökologischen Zustandes der Schlei traten bereits 1874 Blaualgenblüten auf. Dies geht einher mit einem sprunghaften rund

15-fachen Anstieg der Ablagerungsrate zum Ende des 19. Jahrhunderts (von etwa 0,5 mm/Jahr auf 8 mm/Jahr) vor Schleswig. Von der Bildung erster deutlicher Faulschlammager in ruhigeren Buchten und der Fahrrinne der inneren Schlei wurde in den 1930er Jahren berichtet (mit „innerer Schlei“ ist hier der Bereich von Schleswig bis zur Missunder Enge gemeint). Im Zuge der raschen Ausbreitung der Faulschlammager und des Aufkommens von Algenblüten verschwand bis 1947 die reichhaltige Unterwasservegetation der inneren Schlei einschließlich der an diese gebundene Fauna (Magnus 1874, Hoffmann 1937, Remane 1937, Nellen 1967, Samtleben 1981, Ripl 1986, Feibicke 2005).

Abbildung 2a zeigt eine Karte mit den Mächtigkeiten des Faulschlamms des innersten Bereiches der Schlei in der Schleswiger Bucht und der Kleinen Breite. Die Werte sind zu Beginn der 1980er Jahre ermittelt worden; seither hat die Mächtigkeit durch die anhaltende Faulschlammneubildung wahrscheinlich zugenommen. Belege für einen Rückgang der Faulschlammager gibt es derzeit nicht, allenfalls Hinweise für lokale Umlagerungen durch geänderte Strömungsverhältnisse bzw. Stürme.

Die Mächtigkeit des Faulschlamms nimmt generell mit der Tiefe zu. Proben aus flacheren Bereichen bis etwa 1-2 Meter Tiefe zeigen, dass das Sediment aus einem hohen Anteil an Sand mit organischem Material in den Zwischenräumen besteht (z.B. Randzonen entlang des Ufers, der Bereich um die Möweninsel und Sandbänke wie der Vaasenberg). In den tieferen Bereichen ist der Anteil an Sand geringer und der Anteil an organischem Material entsprechend deutlich höher, begleitet von einem fauligen Geruch nach Schwefelwasserstoff. Die Mächtigkeit des Faulschlamms ist weit verbreitet mehr als 25 Zentimeter, in einigen tieferen Bereichen über 75 Zentimeter. In der Großen Breite liegen ähnliche Verhältnisse vor wie in der Schleswiger Bucht und der Kleinen Breite.

Die in Abb. 2a dargestellte Verteilung weist auf eine Anhäufung in den tieferen Bereichen der inneren Schlei hin. Zwar wird organisches Material durch die Algenblüten relativ gleichmäßig gebildet und am Grund der Schlei abgesetzt. Aber durch Wellenbewegung kommt es durch häufigeres Aufwirbeln in den flacheren als in den tieferen Bereichen in diesen zu einer Anhäufung. Außerdem ist in flacheren Bereichen die Sauerstoffversorgung am Grund besser, so dass Faulschlamm dort leichter abgebaut werden kann.



**Abbildung 2a:** Mächtigkeiten der Faulschlammablagerungen in der Schlei basierend auf Daten von Sedimentkartierungen anhand von 280 Bohrkernen zu Beginn der 1980er Jahre. Nachgezeichnet nach Karten von Rippl 1986 und Feibicke 2005. Zeichnung: S. Duggen.

Daten von 280 Bohrkernen der inneren Schlei aus den 1980er Jahren ermöglichen eine Bilanzierung der Bildung und des Abbaus des organischen Materials (Rippl 1986, Feibicke 2005). Rund 55 % des aus Algenblüten (insbesondere Blaualgenblüten) gebildeten organischen Materials wird demnach noch in der Wassersäule unter Sauerstoffzehrung abgebaut. Von dem am Grund abgelagerten Anteil von rund 45 % wird etwas mehr als 35 % zersetzt. Dies geschieht entweder unter Sauerstoffzehrung (aerob) oder durch Fäulnisprozesse ohne Sauerstoff (anaerob). Die übrigen etwa 7 % des abgelagerten organischen Materials tragen zum langfristigen Aufbau der Faulschlammschicht bei. Dies entspricht einer Netto-Sedimentationsrate von 3-4 mm/Jahr in der inneren Schlei. In den Akkumulationszonen der Faulschlamm-Flächen lag die Rate bei etwa 5 bis 10 mm/Jahr (Rippl 1986). Es gibt keine Daten von neueren Studien, die zeigen würden, ob die Akkumulationsrate sich bis heute verändert hat.

Bis zu Beginn der 1980er Jahre sind auf den 10 km<sup>2</sup> der innersten Schlei (Schleswiger Bucht und Kleine Breite) rund 1,3 Millionen Tonnen Faulschlamm am Grund gebildet worden, mit einer Faulschlammneubildung von 30.000 bis 40.000 Tonnen pro Jahr (Rippl 1986). Übertragen auf die gesamte Fläche (19 km<sup>2</sup>) der inneren Schlei (d.h. einschließlich der Großen Breite) (Gocke et al. 2003), ergibt dies etwa 2,5 Mio Tonnen Faulschlamm mit einer Faulschlammneubildungsrate von etwa 57.000 Tonnen pro Jahr. In der Literatur

wird im Allgemeinen eine jährliche Rate von gerundet 60.000 Tonnen angenommen (Ripl 1986, LANU 2001). Unter der Annahme, dass die Akkumulationsrate sich seit den 1980ern nicht verändert hat, lässt sich näherungsweise hochrechnen, dass seitdem erhebliche Mengen an Faulschlamm hinzugekommen sind, und heute etwa 4,2 Mio. Tonnen in der inneren Schlei vorkommen.

Über die Netto-Sedimentationsrate von 3-4 mm/Jahr in der Fläche und 5 mm/Jahr in den Akkumulationszonen lässt sich ebenfalls eine Abschätzung zur Faulschlammmenge in der inneren Schlei machen. Bei 4 mm/Jahr im Mittel in der gesamten inneren Schlei ergäbe dies bei 60 Jahren Faulschlambildung bis in 1985 mit einer Bedeckungsfläche von 60 % der 19 km<sup>2</sup> rund 2,7 Mio. m<sup>3</sup>, welche mit einer mittleren Dichte von etwa 1,15 Tonnen/m<sup>3</sup> (Ripl 1986) rund 3,1 Mio. Tonnen Faulschlamm entsprechen. Die Faulschlammengen der letzten 30 Jahre hinzugerechnet (unter der Annahme unveränderter Akkumulationsraten) ergibt hochgerechnet bis 2015 etwa 4,7 Mio. Tonnen Faulschlamm für die innere Schlei von Schleswig bis Missunde.

4,2 bis 4,7 Mio. Tonnen Faulschlamm ergäben verteilt auf eine Bedeckungsfläche von etwa 60 % der inneren Schlei (d.h. 60 % von 19 Mio. m<sup>2</sup> (= 19 km<sup>2</sup>)) eine mittlere Faulschlammmächtigkeit von etwa 32 cm bis 36 cm. Dies stimmt von der Größenordnung mit den in Abb. 2 dargestellten Mächtigkeiten des Faulschlamms zu Beginn der 1980er Jahre gut überein.

Im Jahr 2016 gezogene Sedimentkerne aus der Mitte der Kleinen Breite belegen den Beginn der Faulschlambildung. In Abbildung 2b werden zwei deutliche Sedimentschichten deutlich. Zuoberst liegt eine ca. 30 cm Schicht schwarzer Faulschlamm (Sapropel), in dem praktisch keine Organismen wie Muscheln oder Schnecken gefunden werden können. Die Sapropel-Schicht bildet sich bei hohem Nährstoffeintrag mit hohen Sedimentationsraten und unter Sauerstoffschwund. Unter solchen Bedingungen ist eine Besiedlung mit Muscheln und Schnecken außerordentlich erschwert bzw. gar unmöglich.

Unter dem schwarzen Sapropel liegt eine Schicht, deren Material unmittelbar nach der Entnahme braun ist, sich an der Luft aber rasch schwarz einfärbt. Diese Schicht enthält mit etwa 10-15 % einen relativ hohen Anteil an Resten von weißen Schnecken- und Muschelschalen. Diese sind in der Abbildung als helle Punkte sichtbar. Es handelt sich um Gyttja, einem subhydrischen Seeboden, der sich in nährstoffreicheren Seen und inneren Küstengewässern bildet. Gyttja bildet sich allerdings im Gegensatz zu Sapropel in sauerstoffreichen Gewässern (<http://www.bodentypen.de/gyttja/>). Eine gute Sauerstoffversorgung ermöglicht eine umfangreiche Besiedlung mit Schnecken und Muscheln.

Der Übergang von Gyttja zu Sapropel zeigt somit eine drastische Änderung des ökologischen Zustands der Schlei an. Die Gyttja ist eher der natürlichen Seebodenbildung zuzuordnen. Sapropel wurde als Folge des massiv erhöhten Nährstoffeintrages aus Siedlungsgebieten und intensiv landwirtschaftlich genutzten Flächen abgelagert. Der Übergang von brauner Gyttja zu schwarzem Sapropel zeigt daher den Wandel von einem guten zu einem schlechten ökologischen Zustand der Schlei an. Beobachtungen zur ersten Bildung deutlicher Faulschlamm lager in den 1930er Jahren und der raschen Ausbreitung der Faulschlamm lager bis in die Mitte der 1940er Jahre ermöglicht eine ungefähre zeitliche Eingrenzung des Übergangs im Zeitraum etwa 1935 bis 1945 (Abb.

2b) (Magnus 1874, Hoffmann 1937, Remane 1937, Nellen 1967, Samtleben 1981, Ripl 1986, Feibicke 2005).



**Abbildung 2b:** Sedimentkern aus der Mitte der Kleinen Breite. Zu sehen ist zuunterst braune Gytja als natürliche Seebodenbildung bei ausreichender Sauerstoffversorgung und zuoberst schwarzer Sapropel (der eigentliche Faulschlamm), der durch Überdüngung des Gewässers unter Sauerstoffmangel entsteht. Anhand der Berichte über die Faulschlamm-Bildung in der inneren Schlei lässt sich der Übergang von Gytja zu Sapropel bei etwa 1935-1945 eingrenzen. Der sandige Horizont wurde bisher nur bei einem Sedimentkern nachgewiesen, weshalb die Herkunft unklar ist. Denkbar wäre, dass es sich um die Ablagerung eines Sturmflutereignisses handelt, z.B. der Sturmflut 1872, was aber überprüft werden muss. Photos: M. Seifert 2016.

Die Übereinstimmung hinsichtlich der Bildung von Gytja und Sapropel in der Schlei und dem Trummen See in Schweden ist in diesem Zusammenhang bemerkenswert. Basierend auf den Daten eines Langkerns am Wikingturm lag die Sedimentationsrate der Gytjabildung um 1890 bei etwa 0,5 mm/Jahr, stieg in den folgenden Jahrzehnten rapide an und erreicht um 1930 knapp 8 mm/Jahr (Ripl 1986). Im ebenfalls hoch nährstoffbelasteten Trummen See wurde 1970 eine 30 cm mächtige schwarze Sapropelschicht nachgewiesen. Die oberen 20 cm hatten sich mit einer Sedimentationsrate von etwa 8 mm/Jahr gebildet, die unteren 10 cm mit lediglich 2,5 mm/Jahr. Die Sedimentationsrate in der darunterliegenden braunen Gytja wird mit etwa 0,4 mm/Jahr angegeben und der zeitliche Übergang von Gytja zu Sapropel mit etwa

1940 (Björk 2014). Der Trummen See ist als Vergleich für die Schlei von besonderem Interesse, da die Entfernung des Sapropels zu Beginn der 1970er Jahre rasch zu einer sehr deutlichen Verbesserung des ökologischen Zustands des Trummen Sees geführt hat (Björk 2014).

### **1.3. Historische Ursachen für die Bildung des Faulschlammes in der Schlei**

Die Ursachen für die Faulschlamm-Bildung werden in der Literatur herausgestellt (z.B. Rippl 1986, Sterr und Mierwald 1991, Feibicke 2005, Ohlendieck 2009). Der Anstieg der Ablagerungsrate von 0,5 mm/Jahr auf 8 mm/Jahr, das Entstehen von Blaualgenblüten und das Auftreten von großen Fischsterben seit der Mitte des 19. Jahrhunderts geht vor allem mit der Entwicklung von Besiedlung und Gewerbe im innersten Bereich der Schlei einher, hier insbesondere mit der Entwicklung der Stadt Schleswig. Es sind dies vor allem der rapide Ausbau der Mischkanalisation, dem Anstieg und stoßweisen Einleiten ungeklärter Abwässer aus Haushalten, Straßen und Gewerbe.

In der Literatur wird deutlich, dass bereits bis 1947 auf diese Weise der ursprüngliche gute ökologische Zustand der Schlei verloren gegangen war. Dieser war geprägt durch eine ausgedehnte Unterwasservegetation mit erheblichen Sichttiefen und einem größeren Artenreichtum sowohl bei Flora als auch Fauna (Rippl 1986, Nellen 1967, Samtleben 1981, Feibicke 2005).

Bis 1945 spielte dagegen die Einleitung von Nährstoffen aus der Landwirtschaft eine untergeordnete Rolle (Feibicke 2005). Das Klärwerk in Schleswig ging 1956 in Betrieb und wurde seit den 1960er Jahren um weitere Reinigungsstufen erweitert (mechanische Reinigung, Phosphat- und Stickstoffeliminierung), wodurch die Nährstoffeinträge aus kommunalen Abwässern erheblich reduziert wurden. Mitte des 20. Jahrhunderts stieg allerdings der Eintrag von Nährstoffen durch die notwendig gewordene Intensivierung der Landwirtschaft und geänderter Flächennutzung an (Sterr und Mierwald 1991, Feibicke 2005). Dadurch wurde die Quelle für den Nährstoffeintrag in die Schlei zwar verlagert, war aber weiterhin hoch, so dass die Faulschlammneubildung als Folge von Algenblüten aufrechterhalten wurde – bis heute.

Im Zuge der historischen Entwicklung hat sich die Faulschlamm-Bildung offenbar von der inneren Schlei her in Richtung Ostsee ausgebreitet. Dies liegt daran, dass die Nährstoffeinträge in der inneren Schlei historisch am höchsten waren bzw. sind: Hauptquellen sind kommunale Abwässer im Zusammenhang mit relativ hoher Besiedlungs- und Gewerbedichte und der Umstand, dass rund 55 % des Einzugsgebietes der Schlei mit intensiver Landwirtschaft über die Füsinger Au in die Kleine Breite entwässert (Ohlendieck 2009).

## **2. Welche Probleme verursacht der Faulschlamm in der Schlei?**

Der in rund hundert Jahren gebildete Faulschlamm beeinflusst massiv die chemischen und biologischen Vorgänge in der Schlei. Eine ausgeprägte Sprungschicht zwischen dem oberen und unteren Wasserkörper, sei es durch Unterschiede in der Temperatur (wie in

tiefen Seen) oder des Salzgehalts (wie in tieferen Bereichen der Ostsee), ist in der inneren Schlei nicht nachgewiesen worden und wegen der geringen durchschnittlichen Tiefe von 2-3 Metern auch nicht zu erwarten. Daher kann der Nährstoffkreislauf und die biologische Produktion der gesamten Wassersäule direkt und rasch von den chemischen Vorgänge im Faulschlamm beeinflusst werden.

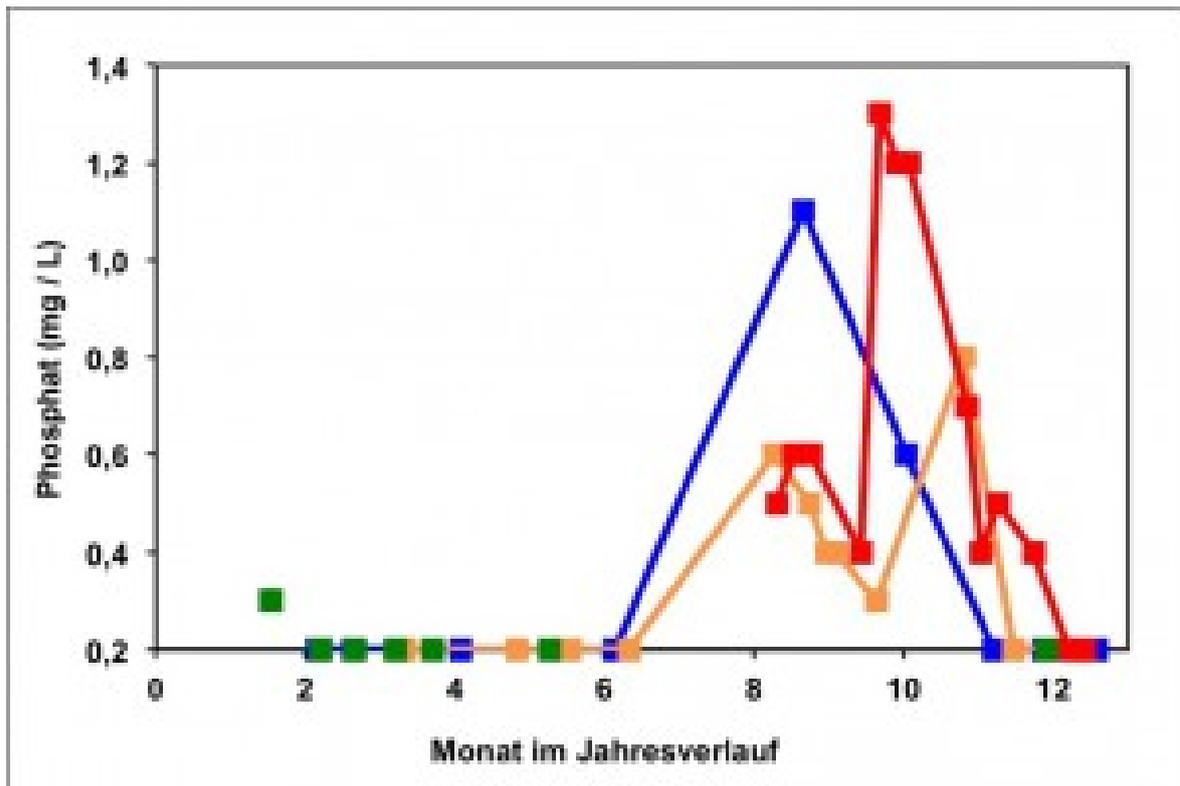
Die biochemischen Prozesse in Faulschlämmen sind komplex (Ripl 1986, Fossing et al. 2002, Feibicke 2005, Ohlendieck 2009). Hier werden einige Hauptprobleme hervorgehoben, die für den ökologischen Zustand der Schlei und Lösungsstrategien direkt relevant sind. Eine zentrale Rolle für das Verständnis dieser Vorgänge und Strategien spielt das Phosphat.

### **2.1. Phosphat-Mobilisierung und interne Düngung der Schlei**

Die biochemischen Prozesse im Zusammenhang mit Faulschlämmen sind komplex (Ripl 1986, Fossing et al. 2002, Scheffer 2004, Feibicke 2005, Ohlendieck 2009). Hier werden einige Hauptprobleme hervorgehoben, die für den ökologischen Zustand der Schlei und Lösungsstrategien direkt relevant sind. Eine zentrale Rolle für das Verständnis dieser Vorgänge und Strategien spielt die Mobilisierung von Phosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Der alljährliche Anstieg des Phosphat-Gehaltes im Wasser der Schlei zeigt, dass Phosphat in den Sommermonaten in großen Mengen mobilisiert wird (Abb. 3). Dies verursacht eine interne Düngung des Gewässers.

Für die Mobilisierung von Phosphat gibt es grundsätzlich zwei unterscheidbare Situationen:

- 1) die Mobilisierung aus dem ruhig am Grund liegenden Faulschlamm, und
- 2) die Mobilisierung bei Aufwirbelung der Faulschlamm-Oberfläche.



**Abbildung 3:** Gehalte an gelöstem und damit biologisch verfügbarem Phosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) in filtrierten Wasserproben aus 1 Meter Tiefe aus der Kleinen Breite in der Schlei (rot – 2012, orange – 2013, grün – 2014, blau – 2015). Für eine genauere Beschreibung der Methode siehe Duggen (2015) auf [www.schleiinfozentrum.de](http://www.schleiinfozentrum.de).

### 2.1.1 Mobilisierung von Phosphat aus dem ruhig am Grund liegenden Faulschlamm

Jedes Frühjahr entsteht in der inneren Schlei durch die im Winter und Frühjahr erhöhten Nährstoffgehalte eine Algenblüte – die Frühjahrsblüte. Diese besteht überwiegend aus Grünalgen und Kieselalgen. Die Frühjahrsblüte stirbt im Frühsommer ab und setzt sich als jüngste Schicht auf den älteren Faulschlammschichten ab. Das organische Material der Frühjahrsblüte wird unter wechselnden Sauerstoffbedingungen zersetzt und gibt dabei erhebliche Mengen Phosphat und andere Nährstoffe in die Wassersäule frei (Ripl 1986, Meyerhöfer 1997, Scheffer 2004, Ohlendieck 2009). Durch diesen Prozess werden die im Frühjahr an die erste Algenblüte gebundenen Nährstoffe bereits im Frühsommer wieder mobilisiert.

Die Zersetzung der Frühjahrsblüte verbraucht Sauerstoff an der Grenzschicht zwischen Wassersäule und Faulschlamm. Sauerstoffschwund an der Oberfläche des Faulschlamms ermöglicht die Rücklösung von Phosphat auch aus den älteren Faulschlammschichten, wenn die im Faulschlamm vorhandenen Eisen(III)-Verbindungen zersetzt werden.

Eisen(III)-Verbindungen enthalten Eisen als  $\text{Fe}^{3+}$ -Ion. Phosphat kann dann entweder als Eisen(III)phosphat ( $\text{FePO}_4$ ) vorliegen oder an Eisen(III)oxidhydroxid ( $\text{FeOOH}$ ) gebunden

sein. Letzteres ist übrigens Hauptbestandteil von Rost und kann an der Faulschlamm-Oberfläche zeitweise zur einer rostbraunen Färbung führen.

Beide Eisen(III)-Verbindungen sind in Wasser schwer löslich. Der größte Teil des Phosphats wird dadurch im Faulschlamm chemisch gebunden und steht für Algen als Nährstoff nicht zur Verfügung. Ein geringer Teil des Phosphats liegt aber gelöst im Porenwasser des Faulschlammes vor und kann von dort in die Wassersäule entweichen. Letztlich besteht ein Gleichgewicht zwischen Phosphat in Eisen(III)-Verbindungen und Phosphat im Porenwasser. Bei einem Abbau der Eisen(III)-Verbindungen würde mehr Phosphat ins Porenwasser des Faulschlammes abgegeben werden und in die darüber liegende Wassersäule entweichen und die Schlei aufdüngen (Ripl 1986, Fossing et al. 2002, Scheffer 2004, Feibicke 2005, Ohlendieck 2009).

Ein sehr wesentliches Problem für die Stabilität der Eisen(III)-Verbindungen ist der Meerwasseranteil in der Schlei. Salz- und auch Brackwasser enthält Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), welches durch Bakterien bereits wenige Zentimeter Tief im Faulschlamm abgebaut wird. Dabei entsteht Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Solange in den oberen Zentimetern des Faulschlammes Sauerstoff (oder Nitrat) eindringt, wird der aufsteigende Schwefelwasserstoff zu Schwefel (S) umgesetzt. Fehlen durch frühsummerlichen Sauerstoffschwund sowohl Sauerstoff als auch Nitrat, reagieren stattdessen die Eisen(III)-Verbindungen mit dem aufsteigenden  $\text{H}_2\text{S}$  und werden abgebaut. Dabei wird  $\text{Fe}^{3+}$  zu  $\text{Fe}^{2+}$  umgesetzt und Phosphat wird nicht mehr gebunden. Der Nährstoff Phosphat steigt dann in gelöster Form aus dem Faulschlamm in das Wasser der Schlei auf. Folglich steigen im Sommer die Phosphatgehalte in der Schlei rasch an (Abb. 3).

Sauerstoffschwund wird über die Zersetzung der abgelagerten Frühjahrsblüte hinaus auch durch andere Prozesse verursacht:

1) Die frühsummerliche Nährstofffreisetzung aus der abgelagerten Frühjahrsblüte fördert die sommerliche Blaualgenblüte. Diese trägt in der Schlei zu einer sehr hohen biologischen Produktion bei. Herabsinkendes organisches Material abgestorbener Blaualgen wird unter erheblicher Sauerstoffzehrung umgesetzt und führt in der unteren Wassersäule zu Sauerstoffschwund. Auch das Absterben der Blaualgenblüte und ihre Ablagerung am Grund der Schlei trägt im Spätsommer und im frühen Herbst zum Sauerstoffschwund bei.

2) Eingeleitete und noch nicht oxidierte Nährstoffe wie Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) und organische Stickstoff-Verbindungen (z.B. Harnstoff, Aminosäuren) aus kommunalen Abwässern, der Landwirtschaft und der Sportschifffahrt werden unter Sauerstoffzehrung in der Schlei abgebaut. Die Zufuhr von Nährstoffen aus diesen Quellen und ihre Bedeutung schwankt saisonal.

### **2.1.2 Mobilisierung von Phosphat bei Aufwirbelung der Faulschlamm-Oberfläche**

Durch Wind und Wellen können ganzjährig leicht Faulschlamm-Partikel von der Oberfläche des Faulschlammes aufgewirbelt werden. An der Oberfläche der in der

Wassersäule schwebenden Faulschlamm-Partikel kann sich Phosphat entweder absetzen oder aber abgegeben werden. Das Absetzen (Adsorption) an bzw. die Abgabe (Desorption) von Phosphat an Faulschlamm-Partikeln ist abhängig vom Phosphat-Gehalt im Wasser: Phosphat wird bei hohen Gehalten an den Faulschlamm-Schwebstoffen gebunden und bei niedrigen Gehalten abgegeben. Hierbei spielt auch der pH-Wert eine Rolle; bei alkalischen pH-Werten, wie sie generell und vor allem im Sommer in der Schlei vorliegen (um pH = 9), wird Phosphat noch leichter von aufgewirbelten Faulschlammteilchen abgegeben (Scheffer 2004).

Die Aufwirbelung von Faulschlamm kann daher einen sehr starken und raschen Einfluss auf die Phosphat-Gehalte in der Schlei haben. Wie bedeutend dieser Prozess für die Schlei sein kann, zeigen Untersuchungen am Arresø in Dänemark. Diese weisen darauf hin, dass die Mobilisierung von Phosphat durch Aufwirbelung etwa 20-30 Mal höher ist, als aus dem ungestörten, ruhig auf dem Grund liegenden Faulschlamm (Scheffer 2004 und Literaturverweise darin, Seite 59).

Maßgeblich für die Aufwirbelung von Faulschlamm ist die Größe der Wellen, welche sich in der Wellenlänge widerspiegelt. Als Daumenregel gilt, dass dort aufgewirbelt wird, wo die Wellenlänge (Abstand von Wellenkamm zu Wellenkamm) doppelt so groß ist wie die Tiefe ( $L_w > 2D$ ) (Scheffer 2004). Beispielsweise würde bei einer Wellenlänge von 2 Metern Schlamm bis in 1 Meter Tiefe aufgewirbelt. In der Mitte der Kleinen Breite mit einer Tiefe von rund 3-5 Metern, je nach Wasserstand, würde bei einer Wellenlänge von etwa 6-10 Metern Faulschlamm großflächig aufgewirbelt werden. Bei starken Westwindlagen und daran geknüpftem Niedrigwasser sind geringere Wellenlängen erforderlich, weshalb die Schlei dann besonders anfällig für das Aufwirbeln von Faulschlamm ist.

Die Wellenlänge ist u.a. abhängig von der Windstärke, der Anlaufstrecke und der Dauer des Windeinflusses. Mit Hilfe des Swellbeat Wave Calculator (<https://swellbeat.com/wave-calculator/>) lässt sich abschätzen, dass bei einer Windstärke von 6 Bft, einer Anlaufstrecke von 4 Kilometern (z.B. Wind aus SW) und mindestens 1-2 Stunden Dauer eine Wellenlänge erreicht wird, die genügen würde, um die Faulschlamm-Oberfläche in der Mitte der Kleinen bzw. Großen Breite aufzuwirbeln. Bei Windstärken von 5 Bft bzw. 4 Bft unter gleichen Bedingungen würde bis in etwa 2,8 Meter bzw. 1,7 Meter Tiefe Faulschlamm aufgewirbelt werden. Da diese Windbedingungen häufig in der Region auftreten, kommt das Aufwirbeln von Faulschlamm in den flacheren Bereichen bis etwa 2 Metern in der Schlei sehr häufig und in den tieferen Bereichen der Becken mit rund 4 Metern recht häufig vor.

Es gibt auch einen Zusammenhang zwischen der Mobilisierung von Phosphat aus Faulschlamm und der Menge von Fischen (z.B. Brassen in der Schlei), die ihre Nahrung am Grund suchen (benthivore Fische). Bei der Nahrungssuche werden selbst in windärmeren Phasen erhebliche Mengen an Faulschlamm aufgewirbelt (Scheffer 2004).

Das Aufwirbeln von Faulschlamm durch Wind oder Fische kann in der Schlei zu einem sehr schnellen Austausch von Phosphat zwischen dem Faulschlamm und dem Wasser führen. Problematisch hierbei ist, dass Phosphat bei niedrigen Gehalten im Wasser von aufgewirbelten Faulschlamm-Partikeln abgegeben werden kann. Dadurch entsteht durch folgende Mechanismen die Möglichkeit, dass eine Algenblüte die Mobilisierung von Phosphat verstärkt oder gar verursacht: Eine beginnende Algenblüte würde die Phosphat-Gehalte im Wasser durch Aufnahme in die Zellen senken. Dies würde dazu führen, dass

Phosphat verstärkt von der Oberfläche aufgewirbelter Faulschlamm-Partikel an das Wasser abgegeben wird. Dies führt wiederum zu einer weiteren Massenvermehrung der Algen, im Sommer insbesondere von Blaualgen, die durch Nutzung anderer Stickstoffquellen als Nitrat einen Konkurrenzvorteil gegenüber Grün- und Kieselalgen haben. Der Vorgang ist also selbstverstärkend.

Bei häufigem Aufwirbeln von Faulschlamm kann auf diese Weise eine hohe Biomasse mit Blaualgen aufgebaut werden, die sich auch noch selbst mit Nährstoffen unterhält; Absterbende Blaualgen würden noch in der Wassersäule rasch umgesetzt und Nährstoffe freigeben, die sofort für das Wachstum von lebendigen Blaualgen genutzt werden.

Was kann diesen selbstverstärkenden Kreislauf unterbrechen? Letztlich würde die Verringerung der Lichtmenge im Herbst die Blaualgenblüte zusammenbrechen lassen. Das dabei in das Wasser freigesetzte und gelöste Phosphat würde dann wieder im Faulschlamm festgelegt werden. Das Absetzen von Phosphat an durch Herbststürme aufgewirbelte Faulschlamm-Partikel würde dann die Festlegung im Faulschlamm beschleunigen.

## 2.2. Biologische Folgen der internen Düngung

Die Phosphat-Rücklösung aus dem Faulschlamm fördert massiv das Entstehen der spätsommerlichen Blaualgenblüte. Daran sind mehrere Probleme geknüpft, welche nicht nur die Wasser- und Badequalität betreffen, sondern auch den Zustand des Ökosystems Schlei sehr verschlechtern. Einige wichtige biologische Folgen der internen Düngung mit Phosphat aus dem Faulschlamm werden im Folgenden dargelegt:

1) Bei den Blaualgen handelt es sich nicht, wie der Name andeutet, um planktonische Pflanzen wie z.B. die Grünalgen, welche auch in der Schlei vorkommen. Blaualgen sind Cyanobakterien, also Bakterien, die in der Lage sind, das Sonnenlicht für die Photosynthese zu nutzen. In der Schlei kommt vor allem die Art *Microcystis aeruginosa* vor, welche im Sommer in der inneren Schlei rund 70 % der Algenmasse ausmacht (LANU 2001). *Microcystis* kann Giftstoffe, sog. Cyanotoxine bzw. Microcystine, freisetzen, hierunter Hautgifte, Lebergifte, Nervengifte, Zellgifte und entzündlich wirkende Substanzen (siehe <http://toxische-cyanobakterien.de>, Cyanocenters UBA Entscheidungsunterstützungssystem).

Von der deutschen Schwimm- und Badebeckenkommission wurde ein Grenzwert von 100 µg/l für Microcystine festgelegt. Oberhalb dieses Wertes dürfen Oberflächengewässer nicht mehr als Badegewässer benutzt werden (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, 2001). Siehe auch „Zur Empfehlung zum Schutz von Badenden vor Cyanobakterien-Toxinen“ des Umweltbundesamtes (2003).

Die Blaualgenblüten in der inneren Schlei fallen seit etwa 10-20 Jahren erheblich geringer aus als in den 1970er und 1980er Jahren. Allerdings kann eine zeitweise Überschreitung der Microcystin-Grenzwerte im Sommer bei dem derzeitigen ökologischen Zustand der Schlei nicht ausgeschlossen werden. Schlieren zusammengetriebener Blaualgen werden auch heute noch zeitweise beobachtet (Abb. 4).



**Abbildung 4:** Blaualgenblüte in der inneren Schlei im September 2015. Schlieren von Blaualgenblüten driften mit der Strömung aus dem Haddebyer Noor auf den inneren Bereich der Schlei hinaus. Photo: S. Duggen.

2) Die Blaualgenblüte verstärkt Sauerstoffschwund und Phosphat-Rücklösung. Abbildung 3 zeigt den Verlauf von Phosphat-Gehalten in den letzten vier Jahren. Auffällig ist der Anstieg im Juli/August, oft gefolgt von einem zweiten und stärkeren Anstieg im September/Oktober. Der erste Anstieg kann durch das Zersetzen der Frühjahrsblüte an der Oberfläche des Faulschlammes erklärt werden, was sowohl Sauerstoffschwund als auch Phosphat-Rücklösung nach sich zieht. Der zweite Anstieg ist wahrscheinlich auf das Zersetzen der Spätsommer-Blaualgenblüte zurückzuführen, was zu noch stärkerem Sauerstoffschwund sowie Phosphat-Rücklösung führt. Ausgeprägter Sauerstoffschwund kann zu einem Absterben und von bodenlebenden Organismen (z.B. Muscheln, Schnecken, Würmern) und Fischen führen. Blaualgenblüten können also ein „Umkippen“ von Gewässern verursachen.

3) Konkurrenzvorteil von Blaualgen: Im Sommer kommt in der stark mit Nährstoffen belasteten Schlei größere Mengen Phytoplankton vor als im Winter. In Folge dessen ist das Wasser sehr trüb, das Licht dringt nur etwa 1 m tief in das Wasser ein. Biologische Untersuchungen zeigen, dass im Sommer von Schleimünde bis Schleswig das Phytoplankton von Cyanobakterien, also Blaualgen (mit einem Anteil von über 50 %, z.T. bis 70 %), dominiert wird (Meyerhöfer 1997). Noch bis Mitte der 1980er Jahre erreichten Blaualgen im Sommer einen Anteil von etwa 30 mg/L (Ripl 1986), entsprechend 30 g pro Kubikmeter.

Die Dominanz der Blaualgen hängt damit zusammen, dass Cyanobakterien, vor allem das Cyanobakterium *Microcystis aeruginosa* bei hohen Phosphatgehalten im Schlei-Wasser einen Konkurrenzvorteil gegenüber anderem Phytoplankton wie z.B. Kieselalgen, Grünalgen, Goldbraune Algen und Dinoflagellaten hat. In der inneren Schlei kommen im Sommer neben Blaualgen vor allem Grünalgen (ca. 20-30 %), Goldbraune Algen (ca. 5 %) und Kieselalgen (unter 5 %) vor. In den 1980er Jahren traten im Sommer gelegentlich mit kurzzeitiger Blütenbildung auch Augen- und Dinoflagellaten auf.

Der Konkurrenzvorteil der Blaualge *Microcystis aeruginosa* besteht darin, dass diese außer Nitrat auch andere Stickstoffquellen nutzen kann, z.B. organische Verbindungen wie Harnstoff. Dieser kommt in Urin vor und kann direkt in die Schlei durch Sportschiffahrt und ggf. Klärwerksabläufe eingetragen werden oder durch den Eintrag aus landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten (Ohlendieck 2009). Auch Ammonium, welches unter Sauerstoffschwund aus dem Faulschlamm freigesetzt wird, kann zur Aufrechterhaltung der Blaualgenblüte beitragen. Die Blaualge *Microcystis aeruginosa* kann wiederum molekularen Stickstoff aus der Luft (N<sub>2</sub>) nicht nutzen, wohl aber die Blaualge *Anabaena spiroides*, die im Hochsommer sehr untergeordnet in der inneren Schlei vorkommen kann (Ripl 1986).

Da *Microcystis* Gasvesikel besitzen, verbleiben sie lange nahe der Wasseroberfläche und werden nach dem Absterben sogleich mikrobiologisch abgebaut. Dabei freigesetzte stickstoffhaltige organische Verbindungen werden sofort wieder von lebendigen *Microcystis* aufgenommen. Auf diese Weise können selbst relativ geringe Mengen an stickstoffhaltigen organischen Verbindungen eine massive Blaualgenblüte unterhalten – vorausgesetzt Phosphat steht im Überfluss zur Verfügung, wie dies im Spätsommer durch die Mobilisierung aus dem Faulschlamm durch Sauerstoffschwund der Fall ist.

Erst mit der Rückbindung des Phosphats an den Faulschlamm im Herbst und Zufuhr von neuem Nitrat stellt sich ein günstigeres Nährstoffverhältnis für anderes Phytoplankton wie Grünalgen und Kieselalgen ein (Meyerhöfer 1997). Dadurch geht die Blaualgenblüte zurück, trägt aber bei ihrem Absterben zur Faulschlammneubildung bei.

4) Geringe Sichttiefe: Durch die sommerliche Massenvermehrung von Blaualgen wird das Wasser der Schlei trübe. Die verringerte Sichttiefe begrenzt die Eindringtiefe des Sonnenlichts. Aus älterer Literatur kann abgeleitet werden, dass die sommerliche Sichttiefe zum Ende des 19. Jahrhunderts ungefähr 1,5-2 m war (Magnus 1875). Als es in den 1970er und 1980er Jahren am schlechtesten um die Schlei stand, lag die Sichttiefe bei 20-30 cm (Ripl 1986). Während massiver, vom Wind zusammengetriebener Blaualgenblüten betrug die Sichttiefe im Spätsommer in den 1970er und 1980er Jahren häufig großflächig nur wenige Zentimeter (eigene Beobachtungen des Autors). Messungen der letzten Jahre zeigen, dass die sommerlichen Sichttiefen in der inneren Schlei aktuell im Bereich 40 bis 75 cm liegen.

Die Sichttiefe ist ein Maß für die Eindringtiefe des Sonnenlichts. Bei etwas mehr als doppelter Sichttiefe sind etwa 1 % des vollen Tageslichtes für Photosynthese und Sauerstoffproduktion übrig. Während der sommerlichen Blaualgenblüte in der inneren Schlei entspricht dies aktuell etwa einer Tiefe von 80 bis 150 cm. Unterhalb dieser Tiefe ist das Pflanzenwachstum durch fehlendes Licht stark begrenzt bzw. kaum möglich.

Bis Ende des 19. Jahrhunderts wies die Schlei eine weitverbreitete Unterwasservegetation mit Laichkräutern und Makroalgen bis in 2-3 m Tiefe sogar in der Kleinen und Großen Breite auf (Magnus 1975). Mitte des 20. Jahrhunderts ging diese durch wiederkehrende Algenblüten verloren. Mit den heutigen Sichttiefen wäre das Wachstum von Laichkräutern und Makroalgen in der inneren Schlei bis bestenfalls in 1,5 m Tiefe möglich. Die Ausbreitung des Kammlaichkrautes in den flachen Uferzonen der inneren Schlei in den letzten etwa 5 Jahren deutet eine Verbesserung der Sichttiefe seit den 1980er Jahren an. Bei zunehmender Verbesserung der Sichttiefe würden Makroalgen auch wieder in tiefere Bereiche vordringen können. Derzeit verhindern die sommerlichen Blaualgenblüten (und massive Faulschlamm lager) allerdings eine Wiederbesiedlung der tieferen Bereiche der inneren Schlei mit Makroalgen.

Da Laichkräutern und Makroalgen in der Wurzelzone Sauerstoff abgeben, würden sie zu einer Sauerstoffversorgung des Sediments und somit zur Bindung von Phosphat und zu einem Abbau des Faulschlamm beitragen können. Eine Ausbreitung der Unterwasservegetation würde außerdem in flacheren Bereichen die Wellenbewegung beruhigen und zu einem beschleunigten Absatz von wassertrübenden Partikeln beitragen. Dieser Effekt ist in der Vegetationsperiode gut in den Kammlaichkrautfeldern vor Weseby in der Großen Breite zu beobachten. Dieser Prozess trägt zu einer Verbesserung der Sichttiefe bei.

5) In den 1980er Jahren dominierten im Sommer während der Blaualgenblüte kleinwüchsige Rädertiere (Rotarien) das Zooplankton. Diese verzehren Mikroalgen (z.B. Grünalgen) und Bakterien, können jedoch die koloniebildenden Blaualgen *Microcystis aeruginosa* nicht als Nahrungsquelle nutzen (Ripl 1986). Einige Arten von Blattfußkrebse könnten *Microcystis aeruginosa* fressen, kamen aber nicht in größeren Beständen vor, möglicherweise weil sie eine beliebte Nahrungsgrundlage von Friedfischen sind und somit einem hohen Fraßdruck unterliegen. Das Sommerplankton der inneren Schlei wurde

bereits in den 1930er Jahren als Blaualgen-Rädertier-Plankton bezeichnet. In dieser Situation wird relativ wenig Blaualgenmasse von Zooplankton verwertet, was erheblich zum einem hohen Absatz von organischen Material auf den Grund der Schlei und somit zur Faulschlammablagung beiträgt (Ripl 1986).

Ob und wie sich die Situation der Phyto- und Zooplanktonvergesellschaftung seit den 1980er Jahren verändert hat, bedarf einer eingehenden Untersuchung. Die biologischen Untersuchungen von 1996 (Meyerhöfer 1997), das heutige Auftreten der hohen Phosphatgehalte und der Blaualgenblüte im Sommer weist jedoch darauf hin, dass sich die Zusammensetzung der Phyto- und Zooplanktonvergesellschaftung zumindest im Sommer nicht sehr wesentlich verändert hat.

6) Faulschlamm stellt in der Schlei wie anderswo auch eine lebensfeindliche Umgebung dar (Samtleben 1981). An der Grenzschicht zwischen Faulschlamm und Wassersäule kommt in der Schlei im Sommer über 2-3 Monate extremer Sauerstoffschwund vor (Duggen 2015, siehe [www.schleiiinfozentrum.de](http://www.schleiiinfozentrum.de)). Außerdem kann bei anhaltendem Sauerstoffschwund im und aus dem Faulschlamm Schwefelwasserstoff aufsteigen, welcher für Sauerstoff atmende Organismen äußerst giftig ist (Fossing et al. 2002).

In einer Untersuchung zur Ökologie und Fauna der Schlei wurde in den 1960er Jahren die Ausbreitung von Faulschlammbezirken und als Folge dessen eine Einengung des Lebensraumes für individuen- und artenreiche Lebensgemeinschaften hervorgehoben, sowie die Befürchtung tiefgreifender fischereibiologischer Folgen (Nellen 1967). Einige Fischarten wie Dorsch, Makrele und Hornhecht verschwanden in den 1960ern auch aus der inneren Schlei. Diese sind erst 2014-2015 wieder in der Kleinen Breite gefangen worden (persönliches Gespräch mit Holmer Fischern).

Die Ausbreitung des Faulschlammes sowohl in der inneren Schlei als auch schleiabwärts im Laufe des 20. Jahrhunderts ging mit einem Rückgang und der Zerstörung des Bodenlebens einher. Dies wird bei den Muschelgemeinschaften mit einem Rückgang der Siedlungsdichte und der Abnahme der Körpergröße besonders deutlich. Die Muschelfauna hatte sich bis zum Beginn der 1980er Jahre aus dem inneren Teil der Schlei bis auf einige Relikte auf sandig-schlickigem Grund zurückgezogen und zeigte sich in der mittleren Schlei mit deutlich geringeren Siedlungsdichten (Samtleben 1981).

In der inneren Schlei zwischen Schleswig und der Missunder Enge traten ursprünglich weit verbreitet Herzmuscheln (z.B. Gemeine Herzmuschel *Cerastoderma edule* und Lagunen-Herzmuschel *Cerastoderma glaucum*) und Baltische Plattmuscheln (auch: Rote Bohne, *Macoma baltica*) auf. Der Rückgang der Baltischen Plattmuschel setzte dabei früher und stärker ein als jener der Herzmuschel. Die noch 1960 in der Kleinen Breite vorkommende Sandklaffmuschel (*Mya arenaria*) wurde 1980 bereits nicht mehr lebend vorgefunden. Schließlich tötete die Ausbreitung des Faulschlammes auch die anderen Muschelarten und verhinderte durch wiederkehrenden Sauerstoffschwund eine Neubesiedlung (Samtleben 1981).

In der mittleren Schlei führten erhöhte Nährstoffangebote zu einem Konkurrenzvorteil der vorher untergeordnet vorkommenden Miesmuschel (*Mytilus edulis*) und der Sandklaffmuschel, die zeitweise muschelbankartig auftraten. Dabei wurden die Herzmuschel und die Plattmuschel zurückgedrängt. Als Folge der Ausbreitung der Faulschlammablagung verschwand auch die Miesmuschel in der mittleren Schlei, der

Anteil der Herzmuschel nahm weiter ab, aber der Anteil der Sandklaffmuschel nahm zunächst durch abnehmenden Konkurrenzdruck zu. 1980 war die Sandklaffmuschel aber bis Lindaunis zurückgedrängt worden (Samtleben 1981).

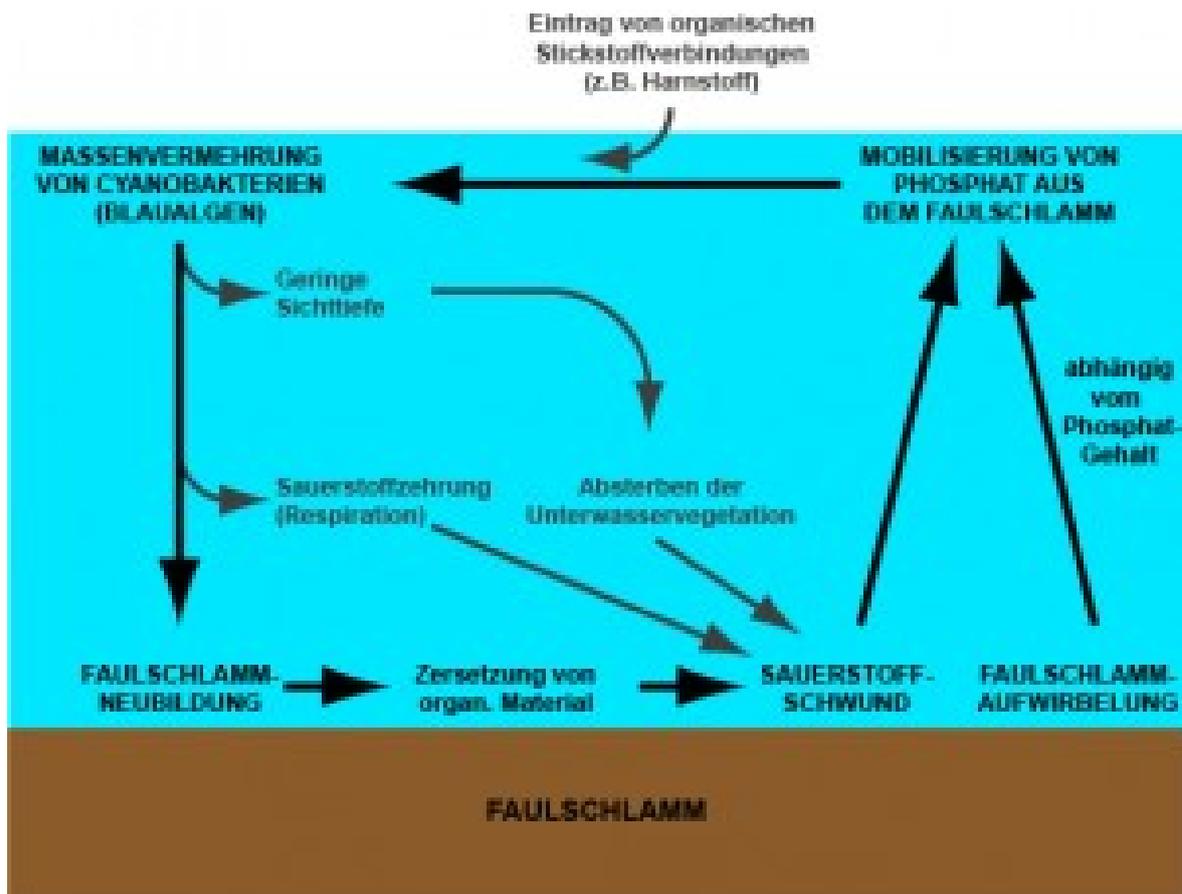
In den breiten Bereichen der Schlei mit geringerer Durchströmung verschlechterte sich der Zustand früher als in den engeren, flussartigen Bereichen der Schlei, wo die stärkere Strömung eine bessere Sauerstoffversorgung sowie eine Erschwerung der Faulschlammablagerung bewirkte.

Bei einer Verbesserung des Zustandes der Schlei, insbesondere bei einem Rückgang der Faulschlammablagerungen, würden die Flächen der inneren Bereiche der Schlei relativ rasch neu besiedelt werden können. Heute kommt die Miesmuschel wieder bis Ulsnis vor (persönliches Gespräch mit Holmer Fischern) und die Herzmuschel und Sandklaffmuschel wieder in der Großen Breite auf sandig-schlickigem Untergrund in den Kammlaichkrautwiesen vor Weseby (Untersuchung des Autors 2015). Die Ausbreitung der Sandklaffmuschel ist heute sogar wieder bis zur Stexwiger Enge vorgerückt (Untersuchung des Autors 2017). Auch die weitverbreitete Unterwasservegetation der inneren Schlei, welche noch bis in die 1930er Jahre vorhanden war, erfordert eher sandiges Substrat (Hoffmann 1937, Sterr und Mierwald 1991). Der weit verbreitete Faulschlamm (Abb. 2) stellt daher einen sehr ungünstigen Untergrund dar.

### **2.3. Das Faulschlammproblem zusammenfassend graphisch dargestellt**

Aus der Literatur wird deutlich, dass der Faulschlamm für den ökologischen Zustand der Schlei ein zentrales Problem darstellt. Dies wird in Abbildung 6 bildlich dargestellt: Die im Frühsommer abgestorbene und abgelagerte sowie der Faulschlamm führen zu Sauerstoffschwund, und zur Mobilisierung von Nährstoffen wie Phosphat und Ammonium aus der Faulschlamm-Oberfläche. Die Aufwirbelung von Faulschlamm durch Wind, Welle und am Grund nach Nahrung suchenden Fischen sowie der Phosphat-Verbrauch der Algen verursacht ebenfalls häufig eine Mobilisierung von Phosphat. Die Frühjahrsblüte sowie die durch interne Düngung entstandene sommerliche Blaualgenblüte führt zu geringen Sichttiefen. Die schlechten Lichtverhältnissen und die weit verbreiteten Faulschlamm lager verhindern somit die Wiederbesiedlung des Schleigrundes mit einer ausgedehnten Unterwasservegetation. Die Blaualgenblüte unterdrückt anderes Phytoplankton, verarmt das Artenreichtum beim Zooplankton und verkürzt die Nahrungskette, was Einfluss auf den Fischbestand hat. Der Sauerstoffschwund an der Faulschlammoberfläche verhindert eine dauerhafte Wiederbesiedlung der tieferen Bereiche der Schlei mit Muscheln und anderer Fauna.

Es wird deutlich, dass die Rückführung der Schlei in einen guten ökologischen Zustand (vergleichbar mit dem Zustand des 19. Jahrhunderts), ohne eine Bearbeitung oder sogar eine Entnahme des Faulschlammes sehr wahrscheinlich nicht möglich ist.



**Abbildung 6:** Graphische Darstellung des Faulschlammproblems (vereinfacht mit den Hauptfaktoren). Zeichnung: S Duggen.

#### 2.4. Problem Schwermetallbelastung

In der Schlei werden gelöste Schwermetalle durch chemische Prozesse rasch ausgefällt und im Faulschlamm festgelegt. Der Faulschlamm der Schlei ist somit prinzipiell eine Schwermetallsenke, obwohl einige Schwermetalle unter wechselnden Sauerstoffgehalten wieder mobilisiert werden können (Ripl 1986, Köhn 2001, Fossing 2005).

Schwermetalle sind in der Vergangenheit in unterschiedlichen Mengen aus verschiedenen Quellen eingetragen worden. Quellen sind mit dem Wind und durch Fließgewässer eingetragene Stäube und Partikel, Sportboote mit zinn- oder kupferhaltigen Anti-Fouling-Anstrichen, Wässer aus Siedlungsgebieten mit ihren Dächern und Rohren aus Blei, Kupfer oder Zink. Gewerbe wie Lederfabriken (z.B. auf der Freiheit) hatten erhebliche Mengen an Abwässern mit Chrom- und Bleiverbindungen ins Erdreich und in die Schlei eingetragen. Der erhöhte anthropogene Eintrag von Schwermetallen geht mit dem sprunghaften Anstieg der Sedimentationsraten und somit Faulschlammneubildung in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts einher (Neubaur 1931, Löwenstein 1985, Ripl 1986, Feibicke 2005), begann demnach vor etwa 130 Jahren.

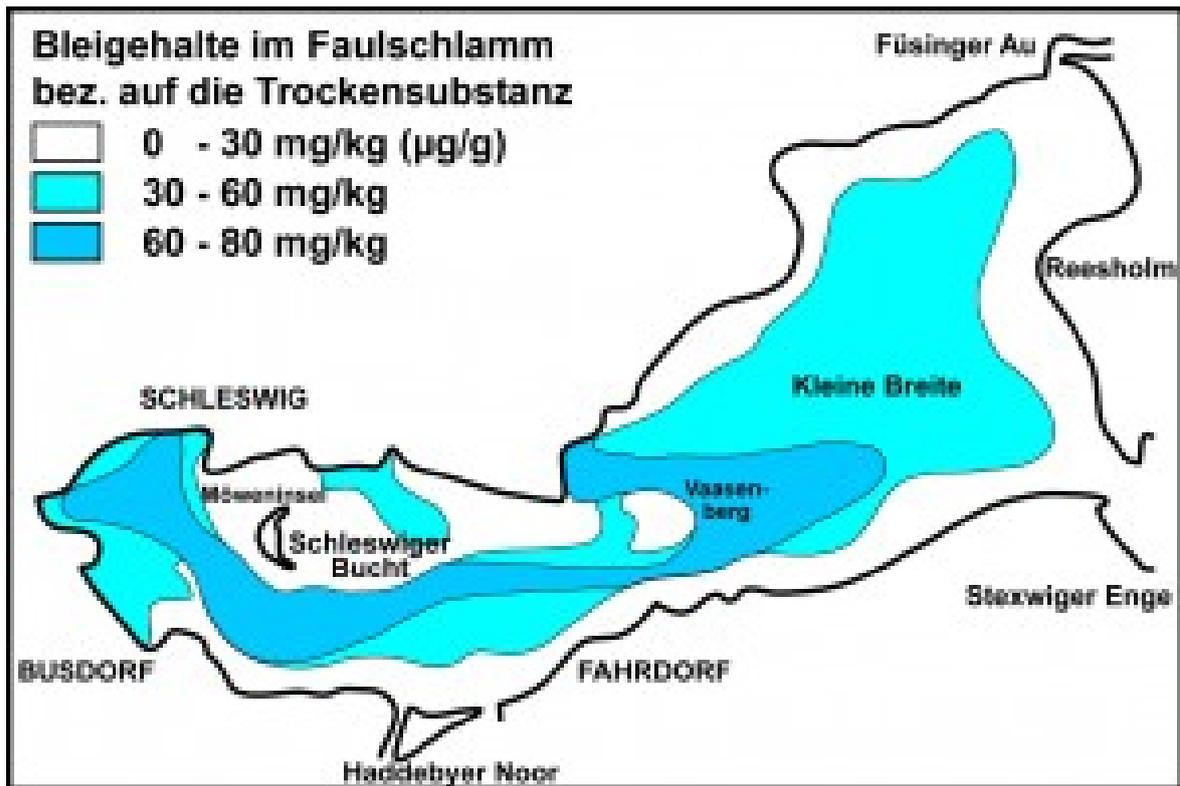
Tabelle 1 zeigt die Durchschnittsgehalte verschiedener Schwermetalle in Vertikalprofilen

von rund 25 Sedimentkernen aus dem Bereich der Schleswiger Bucht und der Kleinen Breite. Abbildung 5 zeigt exemplarisch eine Verteilungskarte für Blei in Sedimenttiefen bis zu 10 cm.

**Tabelle 1:** Schwermetallgehalte in faulschlammreichen Sedimenten der Schlei. Abgelesene Mittelwerte bis 25 cm Tiefe von rund 25 Sedimentkernen der innersten Schlei (Schleswiger Bucht und Kleine Breite) sowie im Langkern bis 100 cm Tiefe am Wikingturm in Schleswig (Löwenstein 1985, Rippl 1986) und Schwermetallgehalte in der Schlei (Köhn 2001, Tabelle 10) im Vergleich zu Grenzwerten für Faulschlamm aus Klärwerken gemäß Klärschlammverordnung (AbfKlärV) ([http://www.gesetze-im-internet.de/abfkl\\_rv\\_1992/\\_4.html](http://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_1992/_4.html)). Der Trockensubstanzgehalt der Sedimentproben der Schlei beträgt etwa 15-20 %.

|             | Langkern bei Schleswig bezogen auf die Trockensubstanz | Innerste Schlei bezogen auf das Nassvolumen | Innerste Schlei bezogen auf die Trockensubstanz | Schlei          | Grenzwerte in Faulschlamm bezogen auf die Trockensubstanz |
|-------------|--|---|---|-----------------|---|
| Blei        | 200 mg/kg  | 10 mg/L                                     | 50 mg/kg (= µg/g)                               | 34-67 mg/kg     | 900 mg/kg   |
| Cadmium     | 3,5 mg/kg  | 0,2 mg/L                                    | 1,2 mg/kg                                       | 0,9-1,9 mg/kg   | 10 mg/kg  |
| Chrom       | 150 mg/kg  | 12 mg/L                                     | 75 mg/kg  | 52-73 mg/kg     | 900 mg/kg   |
| Kupfer      | 75 mg/kg   | 5 mg/L                                      | 40 mg/kg  | 23-41 mg/kg     | 800 mg/kg   |
| Nickel      |  |   |   | 20-26 mg/kg     | 200 mg/kg   |
| Quecksilber |  |   |   | 0,28-0,78 mg/kg | 8 mg/kg   |
| Zink        | 700 mg/kg  | 50 g/L                                      | 250 mg/kg                                       | 110-200 mg/kg   | 2500 mg/kg  |

Eine höhere Schwermetallbelastung ist demnach im innersten Bereich der Schlei vorhanden, wo die höchste Besiedlungsdichte vorkommt. Nahe der Einleitungsstellen, z.B. am Wikingturm, am Schleswiger Hafen und an der Freiheit werden die höchsten Schwermetallbelastungen erreicht. Allerdings werden in der Trockensubstanz der Sedimente im Mittel die Grenzwerte der untersuchten Schwermetalle gemäß Klärschlammverordnung (AbfKlärV) offenbar nicht überschritten.



**Abbildung 5:** Verteilung von Blei im Faulschlamm in 5-10 cm Tiefe (Anfang der 1980er Jahre) in Sedimenten der Schleswiger Bucht und der Kleinen Breite basierend auf Sedimentkernen von 26 Probennahmestellen (nachgezeichnet nach Rippl 1986). Im Gutachten von Rippl 1986 sind auch Verteilungskarten für Chrom, Cadmium, Kupfer und Zink für unterschiedliche Sedimenttiefen dargestellt. Zeichnung: S Duggen.

### 3. Mögliche Lösungen

Faulschlamm stellt nicht nur in der Schlei, sondern mittlerweile im gesamten Ostseeraum und ein großes Problem für Ökosysteme dar. Im Folgenden sollen mögliche Lösungen für die Schlei besprochen werden.

Für die Schlei sind bereits verschiedene Sanierungsmaßnahmen vorgeschlagen worden. Einige Maßnahmen, welche anderenorts für tiefere Küstengewässer oder Seen genutzt wurden, sind für die flache Schlei bisher wenig in Betracht gezogen worden, sollen aber der Vollständigkeit halber hier Erwähnung finden. Schließlich werden auch neue Lösungsansätze vorgeschlagen, welche meines Wissens in der Literatur zur Schlei bisher nicht in Erwägung gezogen worden sind.

Welche Maßnahmen am besten für die Schlei im Rahmen der finanziellen und politischen Möglichkeiten geeignet sind, wird Gegenstand von Diskussion und wissenschaftlichen Begutachtungen sein müssen. Soll in einem angemessenen Zeitraum der Zustand der Schlei die Forderungen der Wasserrahmenrichtlinie erfüllen können, besteht allerdings äußerst dringender Handlungsbedarf.

### 3.1. Direkte und indirekte Beeinflussung der Faulschlammoberfläche

Es gibt mehrere Möglichkeiten in das in der Abbildung 6 dargestellte Faulschlammproblem einzugreifen. Bei einer Beeinflussung der Faulschlammoberfläche ginge es letztlich darum, die Mobilisierung von Phosphat, also die interne Düngung des Gewässers, zu vermeiden. Der Faulschlamm würde allerdings in der Schlei liegen bleiben, was die Wiederbesiedlung großer Flächen der Schlei (Abb. 2) mit weitverbreiteter Flora und Fauna erschweren würde.

#### Abdeckung des Faulschlamm

Eine Abdeckung des Sediments durch geeignetes Material kann das Entweichen von Phosphat und das Aufwirbeln von Faulschlamm effektiv unterbinden (Schauer 20043). Eine Abdeckung des Faulschlamm scheint bei der Gesamtfläche der Schlei und zeitweise rauen Wind- und Strömungsverhältnissen für die Schlei schwierig umsetzbar.

#### Oxidation mit Sauerstoff

Die Mobilisierung von Phosphat aus dem Faulschlamm zu unterbinden kann dadurch erreicht werden, dass die Faulschlammoberfläche ganzjährig und vor allem im Sommer mit ausreichend Sauerstoff versorgt wird. In der kälteren Jahreszeit ist dies durch eine Reihe natürlicher Prozesse der Fall. Im Sommer müssten unterschiedliche Technologien zur Anwendung kommen.

In tieferen Gewässern, die typischerweise ausgeprägte Sprungschichten ausbilden, kann dies auf unterschiedliche Weise erfolgen. Hierbei wird Sauerstoff, Luft oder sauerstoffreiches Oberflächenwasser in die Tiefe unterhalb der Sprungschicht und ggf. direkt auf die Faulschlammoberfläche mittels Pumpen befördert. Umweltschonend können die Pumpen von Windrädern angetrieben werden (Björk 2014, Grüneberg et al. 2009, <https://de.wikipedia.org/wiki/Seesanieung>, <http://www.inocean.no/box-windturbine>).

Auf Grund der großen Fläche und geringen Gewässertiefe der inneren Schlei wäre diese Lösung schwieriger umzusetzen und würde wahrscheinlich eine Großzahl kleinerer Pumpen erfordern. Denkbar wäre eine Lösung mit einigen größeren Pumpen, die in Bereichen mit der höchsten Faulschlammmächtigkeit stationiert werden (siehe Abbildung 2), wahrscheinlich einschließlich der Auslegung von perforierten Leitungen bzw. Schläuchen auf der Faulschlammoberfläche. Die Flächen könnten auch mit Hilfe von einigen autonomen, wind- und solarenergiebetriebenen Belüftungsschiffen belüftet werden, welche sauerstoffreiches Oberflächenwasser auf den Faulschlamm pumpen. Diese Lösungen würden sehr wahrscheinlich die Schifffahrt auf der Schlei beeinträchtigen.

Diese Lösungen würden sehr wahrscheinlich die Schifffahrt auf der Schlei beeinträchtigen.

### Oxidation mit Nitrat durch Denitrifikation (Nitrat aus Klärwässern oder Kalksalpeter)

Faulschlamm kann durch Oxidation mit Nitrat statt Sauerstoff zersetzt werden. Bei der Behandlung des Faulschlammes mit Nitrat würde das Eisen(III)oxidhydroxid ( $\text{FeOOH}$ ) im Faulschlamm stabilisiert werden und Phosphat an den Faulschlamm binden. Experimente im Labor und in abgegrenzten Becken der inneren Schlei in den 1980er Jahren belegen eine relativ hohe Effektivität dieser Methode (Ripl 1986, Feibicke 2005). Die Methode wurde als RIPLOX-Verfahren erfolgreich an einem kleineren See in Schweden angewendet (Björk 2014).

Für die Experimente wurde Calciumnitrat (chemische Formel:  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) verwendet, welches als Kalk- oder Norgesalpeter als Düngemittel bekannt und zu relativ geringen Preisen in großen Mengen erhältlich ist (Ripl 1986). Das Calciumnitrat wurde im Rahmen eines Feldexperiments in der Schlei auf eine Versuchsfläche aufgebracht und eingeharkt. Dies kann mit Hilfe des Feststoffs oder einer Lösung geschehen. Während das aus dem Calciumnitrat freigesetzte Nitrat organische Substanz im Faulschlamm oxidiert, würden freigesetzte Calciumionen ( $\text{Ca}^{2+}$ ) dazu beitragen, Phosphat als sehr schwer lösliches Calciumphosphat im Faulschlamm zu binden.

Als Sanierungsmaßnahme wurde außerdem für die innere Schlei die Aufbringung nitrathaltiger Klärwässer aus dem Klärwerk Schleswig auf den Faulschlamm vorgeschlagen (Ripl 1986). Im vorgelegten Konzept sollten Stickstoffverbindungen in den gereinigten Klärwässern zu Nitrat oxidiert und Phosphat entfernt werden. Die phosphatarmen aber nitrathaltigen Abwässer hätten dann über Düker direkt auf die Flächen mit hoher Faulschlammmächtigkeit geleitet werden können. Dort würde das Nitrat zu Stickstoff umgewandelt (Denitrifikation) und dabei Faulschlamm zersetzen.

Dieses Sanierungskonzept wurde nie verwirklicht. Eine gewollte Einleitung größerer Mengen des Nährstoffes Nitrat in die Schlei stand nicht im Einklang mit den politischen Bemühungen, den Eintrag von Nährstoffen in Gewässer zu senken. Da Algen für ihr Wachstum sowohl Stickstoffverbindungen als auch Phosphat in einem bestimmten Verhältnis benötigen (Minimumgesetz), wäre bei erhöhtem Eintrag von Nitrat eine Algenblüte vermeidbar, wenn der Gehalt von Phosphat im Gewässer kontrolliert sehr niedrig gehalten würde. Das Sanierungskonzept sah dies durch unterschiedliche Strategien (Entphosphatisierung von Klärwerkswässern, Rückhaltebecken im Mündungsbereich der Füsinger Au) vor (Ripl 1986).

Im Jahre 1998 wurde das Klärwerk Schleswig mit einer Denitrifikationsstufe erweitert. Seitdem wird das im Klärwerk gebildete Nitrat zum Abbau des dort anfallenden Faulschlammes genutzt (Feibicke 2005).

### Bindung des Phosphats an die Faulschlammoberfläche

Phosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) bildet mit verschiedenen Metallionen schwer lösliche Verbindungen. Dies sind beispielsweise einige Phosphate des Calciums (z.B.  $\text{CaHPO}_4$ ,  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{Cl}, \text{F})$ ), des Eisens in dreiwertiger Form (z.B.  $\text{FePO}_4$ ) und des Aluminiums

( $\text{AlPO}_4$ ). Es wäre denkbar, durch jährliches zeitiges Aufbringen geeigneter Salze auf die Faulschlammoberfläche (z.B. während des Absterbens der Frühjahrsblüte), die Bildung von schwerlöslichen Phosphaten zu fördern und somit die sommerliche Mobilisierung von Phosphat in die Wassersäule zu verringern.

Im Grunde wurde dieser Ansatz durch die Aufbringung von Calciumnitrat bereits im Rahmen von Feldexperimenten in der inneren Schlei untersucht. Dabei kam es zu einer deutlichen Verbesserung der Wasserqualität in den Versuchsbecken (Ripl 1986). Aus dem löslichen Calciumnitrat werden sowohl Calciumionen als auch Nitrat freigesetzt. Die Verbesserung kann einerseits durch den Eintrag von Nitrat in die Faulschlammoberfläche verursacht worden sein, was zur Oxidation und Stabilisierung des Phosphat bindenden  $\text{FeOOH}$  führte. Andererseits kann der Eintrag von Calciumionen und die Bindung des Phosphats in schwer löslichen Calciumphosphaten wesentlich zur Verringerung der Phosphatmobilisierung und daraus erfolgenden Verbesserung der Wasserqualität beigetragen haben.

Wenn eine Bindung von Phosphat mit Hilfe von Calciumionen erwünscht wäre, aber ein Nährstoffeintrag durch Calciumnitrat vermieden werden soll, böte sich möglicherweise als Alternative die Einbringung von löslichem Calciumchlorid ( $\text{CaCl}_2$ ) in die Faulschlammoberfläche an.

Die Phosphatfällung mit Calciumionen würde allerdings mit der Fällung von Calciumionen als Calciumcarbonat konkurrieren, welches unter alkalischen Bedingungen ähnlich schwer löslich ist wie die schwer löslichen Calciumphosphate. Die Bildung von Calciumcarbonat wird in der Schlei auf Grund der alkalischen pH-Werte (etwa pH 8 bis 9) begünstigt, die wiederum auf die Algenblüten zurückzuführen sind (Köhn 2001). Ein Überschuss an Calciumionen in der Faulschlammoberfläche könnte diesen Effekt jedoch ausgleichen.

Neuere Methoden nutzen Erdalkaliperoxide, z.B.  $\text{CaO}_2$ , im Gemisch mit anderen Ca-Salzen (Willuweit et al. 1999). Bei diesem relativ rasch wirkenden Verfahren wird der Faulschlamm durch die Sauerstofffreisetzung aus dem Peroxid oxidiert und abgebaut und das Phosphat wahrscheinlich als sehr schwer lösliches und stabiles Hydroxylapatit,  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ , festgelegt. Bei diesem Verfahren wird im Gegensatz zum RIPLOX-Verfahren kein Nährstoff wie Nitrat ins Gewässer eingetragen. Das Calciumperoxid löst sich über einen Zeitraum von etwa acht Wochen auf und kann die Phosphatgehalte im Gewässer sehr effektiv verringern. Neben dem Faulschlammabbau ließe sich mit Hilfe dieser Methode der sommerliche Sauerstoffschwund an der Faulschlammoberfläche und die Phosphatmobilisierung aus dem Faulschlamm sehr wahrscheinlich erheblich eindämmen. Als Folge dessen würde die Massenvermehrung der Cyanobakterien stark verringert und die Sichttiefe verbessert werden können. Eine Anfrage beim Hersteller ergibt, dass für die Schleswiger Bucht und Kleine Breite in der Größenordnung 150 Tonnen und für die Große Breite zusätzlich rund 220 Tonnen benötigt werden würden. Da die Methode relativ preisgünstig zu sein scheint, kann in Betracht gezogen werden, diese Methode hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und Nachhaltigkeit in der inneren Schlei zu testen. Eine solche Untersuchung ließe sich in einer abgegrenzten Versuchsfläche ähnlich der Feldversuche von Ripl 1986 verwirklichen.

#### Verringerung der Sulphatreduktion

Der Salzgehalt in der inneren Schlei liegt durch einströmendes Ostseewasser bei etwa 4-10 ‰. Meerwasser enthält Sulphat, welches im Faulschlamm mit Hilfe von sulphatreduzierenden Bakterien zu Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) umgesetzt wird. H<sub>2</sub>S destabilisiert die im Faulschlamm enthaltene Eisen(III)-Verbindungen und trägt damit zur Mobilisierung von Phosphat in die Wassersäule bei (Ripl 1986, Fossing 2002). Basierend auf Modellrechnungen spielt dieser Effekt in der Schlei eine erhebliche Rolle (Ripl 1986).

Als Teil des Sanierungskonzeptes für die Schlei wurde daher vorgeschlagen, den Einstrom von Ostseewasser in die innere Schlei zu verringern. Dies hätte durch den Einbau einer Unterwasserschwelle, z.B. in der Missunder Enge erreicht werden können (Ripl 1986). Hierbei gilt zu bedenken, dass der Einstrom von Ostseewasser in anderer Hinsicht für den ökologischen Zustand der Schlei förderlich ist.

### **3.2. Entnahme von Faulschlamm und Nutzung als Rohstoff**

Eine Entfernung des Faulschlammes aus dem biogeochemischen Kreislauf der Schlei wäre eine sehr wahrscheinlich eine effektive Vorgehensweise, um das Faulschlamm-Problem der Schlei zu lösen. Am Trummen See in Schweden hat die Entnahme von etwa 600.000 m<sup>3</sup> Faulschlamm über zwei Sommer hinweg sofortige und nachhaltige positive Wirkung für das Ökosystem gehabt (Björk 2014). Mit dieser Strategie, kombiniert mit einer raschen Reduzierung der externen Nährstoffeinträge, ist es denkbar, dass die Schlei innerhalb von 10-20 Jahren in einen guten oder sogar sehr ökologischen Zustand zurück geführt werden kann.

Nach der Entnahme des Faulschlammes bieten sich zwei grundsätzlich unterschiedliche Vorgehensweisen an: 1) die Deponierung ohne weitere Nutzung und 2) die Nutzung als Rohstoff.

#### **3.2.1. Deponierung von Faulschlamm – Überführung in land- oder seewärtige Becken**

Der Abbau von Faulschlamm durch Luftsauerstoff wäre auch in land- oder seewärtigen Becken möglich. Hierzu müsste der Faulschlamm der Schlei aufgenommen und in Becken angemessener Größe überführt werden. Die notwendige Größe solcher Becken lässt sich aus der Faulschlammmenge der Schlei ableiten. Die durchschnittliche Dichte des Faulschlammes in der Schlei liegt in den oberen 25 cm bei 1,1 bis 1,2 g/cm<sup>3</sup> (bzw. Tonnen/m<sup>3</sup>) und nimmt mit der Tiefe leicht zu (Ripl 1986). Demnach nimmt eine Tonne Faulschlamm etwa 0,8 bis 0,9 m<sup>3</sup> Raum ein. Eine Million Tonnen Faulschlamm würden somit etwa 0,8 bis 0,9 Mio. m<sup>3</sup> füllen.

Ein Becken mit den Außenmaßen 500 m x 500 m und einer Tiefe von 4 Metern würde 1 Mio. m<sup>3</sup> aufnehmen können. Für den gesamten Faulschlamm der inneren Schlei wären demnach etwa vier solcher Becken erforderlich. Diese könnten an Land oder seewärtig errichtet werden. An Land stünden ggf. die Becken der alten Zuckerfabrik bei Schleswig zur Verfügung, die vormals den Schlamm der Zuckerrübenverarbeitung aufnehmen sollten. Seewärtig in der Schlei, z.B. in der Kleinen oder Großen Breite, würden derartige

Becken wahrscheinlich über die Hochwasserlinie hinausreichen müssen. Daraus könnten Lagunen ähnliche Biotope mit Flachwasserbereichen und flachen kleineren Inseln entstehen, welche die Grundlage für Flora und Fauna und ein reiches Vogelleben bilden könnten. Außen umgeben mit großen Steinen (z.B. Betonklötzen) würde um ein Becken herum ein Steinriff entstehen, welches Lebensgrundlage für Fische, Muscheln und Makroalgen etc. bilden könnten. Es ist allerdings ungeklärt, wie effektiv eine Mobilisierung von Nährstoffen und Schadstoffen aus dem Faulschlamm in solchen Becken verhindert werden kann.

### 3.2.2. Nutzung von Faulschlamm als Rohstoff

Die Nutzungsmöglichkeiten von Faulschlamm (Sapropel, Gytija) oder seiner Bestandteile sind vielfältig: Zur Energiegewinnung als Primär- oder Sekundärbrennstoff, zur Herstellung von umweltfreundlichen Baustoffen, als Dünger und zur Bodenverbesserung in der Landwirtschaft, als qualitätsverbessernde Zuschläge in der Töpferwaren- und Ziegelherstellung, als förderlicher Futterzusatz in der Viehwirtschaft, in Heilbädern, in der Human- und Tiermedizin und für kosmetische Anwendungen. Die Nutzung ist abhängig von der chemischen Zusammensetzung des Faulschlammes (Stankevica et al. 2012, Obuka et al. 2015, <http://www.sapropel.org/en/sapropel-application/>).

#### Nutzung zur Energiegewinnung

Weltweit kommen große Mengen Faulschlamm vor und man hat begonnen diesen als Ressource zu betrachten. Auch der Faulschlamm der Schlei kann als Rohstoff angesehen werden.

Ein Großteil der Faulschlämme von Klärwerken werden als Sekundärbrennstoffe in Kraft- und Zementwerken verbrannt (<http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/abfallarten-abfallstroeme/klaerschlamm/>). Wissenschaftliche Studien zeigen, dass aus Faulschlamm mit einem hohen Anteil an organischem Material zusammen mit Stroh, Torf oder Sägemehl bzw. -späne Brikettes gepresst werden können, welche nach Trocknung als Heizmaterial verwendet werden können (Kozlovska u.a. 2012). Empfohlen werden hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften und des Brennwertes Mischungen von Faulschlamm mit Stroh oder Sägespäne im Mischungsverhältnis von etwa 1:1. Der erste Brikett aus Schlei-Faulschlamm und Holzspäne ist in Abbildung 7a zu sehen.

Der Brennwert (Heizwert) von getrocknetem Faulschlamm in der Studie von Kozlovska et al. liegt bei etwa 20 MJ/kg. Holzarten wie Birke, Buche, Eiche, Esche und Kiefer haben Brennwerte von etwa 15 MJ/kg, Holzbriketts etwa 18 MJ/kg (~5 kWh), Heizöl etwa 43 MJ/kg und Kohle etwa 28-35 MJ/kg (Kozlovska et. al. 2012, <https://de.wikipedia.org/wiki/Brennholz#Heizwert>).

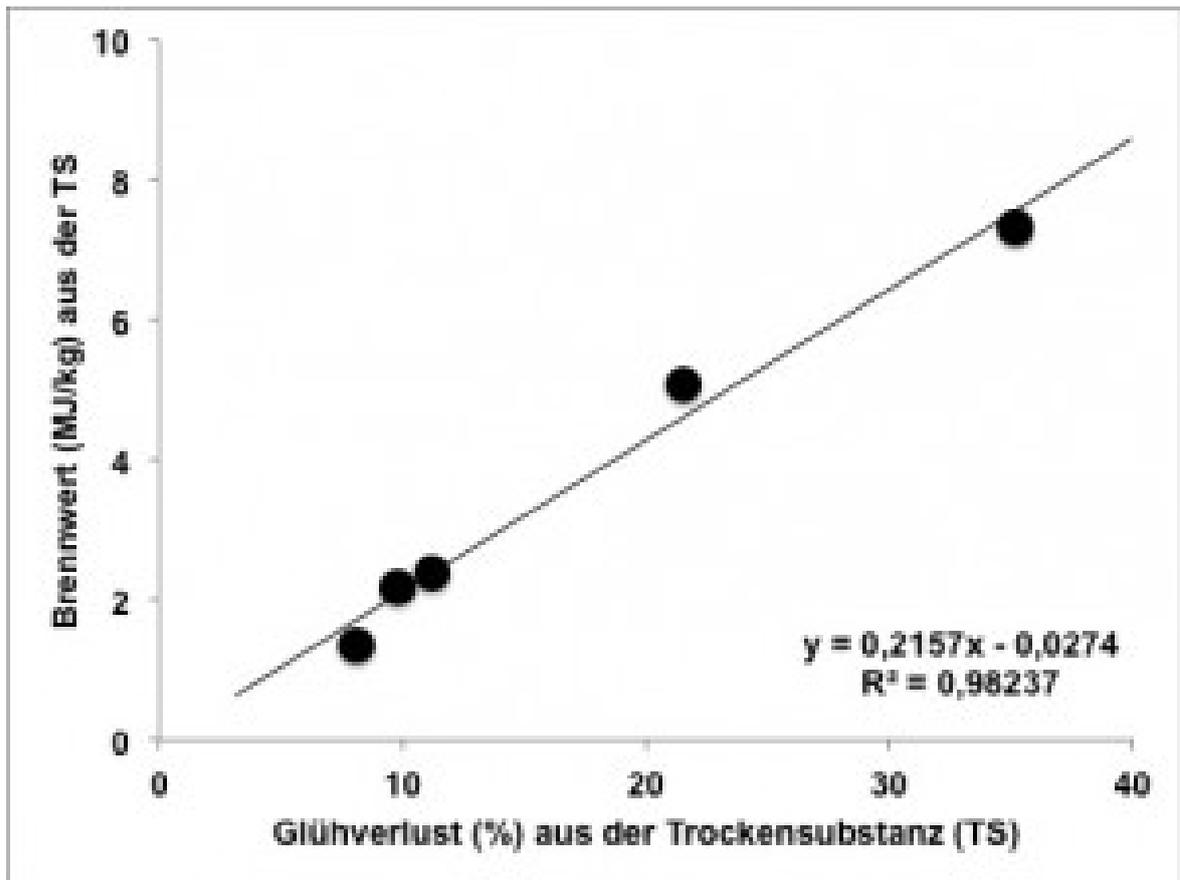


**Abbildung 7a:** Aus Faulschlamm der Schlei und Sägespäne gepresster Brikette. Auf Grund des hohen Mineralgehaltes glüht dieser allerdings im Ofen eher durch als eigenständig zu brennen. Photo: Karl Walther.

Erste Analysen von Faulschlamm in der inneren Schlei ergeben einen niedrigen bis moderaten Anteil von organischem Material (ca. 9-22 % in der Trockenmasse bzw. etwa 4-5 % im nassen Faulschlamm) mit einem Brennwert von etwa 2,2 bis 5,5 MJ/kg in der Trockenmasse. Im Labor konnte durch Zentrifugieren der Gehalt an organischem Material in einer Teilprobe auf 35 % angereichert werden. Die wenigen Proben zeigen bereits einen linearen Zusammenhang zwischen Glühverlust und Brennwert (Abb. 7b). Durch weitere Daten sollte dieser Zusammenhang gern bestätigt werden. Dann wäre es möglich durch einfache und kostengünstige Bestimmung des Glühverlustes den Brennwert des Faulschlammes der Schlei zu ermitteln.

Gemäß der Ergebnisse von Rippl (1986) sind die Glühverluste und somit der Gehalt von organischem Material in den obersten 10 cm des Faulschlammes in der Kleinen Breite am höchsten. Die Glühverluste liegen großflächig um 20-25 %, örtlich über 30 %. Dies entspräche gemäß Abb. 7b Brennwerten von 4-7 MJ/kg.

Die gesamte Variation des Glühverlustes und der Brennwerte des Faulschlammes in der Schlei ist leider nicht bekannt und muss noch untersucht werden. Es ist denkbar, dass örtlich, z.B. in stark mit Faulschlamm verfüllten Senken oder in den Nooren, durch die Beimischung organischen Materials wie Schilf- und Blattresten deutlich höhere Brennwerte vorgefunden wird.



**Abbildung 7b:** Zusammenhang zwischen Glühverlust und Brennwert von Faulschlamm aus der Kleinen Breite in der Schlei. Unveröffentlichte Daten.

Bei niedrigem Brennwert ist eine direkte Nutzung als Primärbrennstoff weniger sinnvoll. Als Sekundärbrennstoff könnte der Faulschlamm der Schlei mit seinem Anteil von Tonmineralien und Kalzit allerdings Interesse finden, z.B. in der Mörtel- oder Zementherstellung. Aus den soeben angegebenen Werten lässt sich aber auch ableiten, dass der reine organische Anteil, sofern er separiert würde, einen Brennwert von etwa 20 MJ/kg haben würde. Dieses Material wäre wiederum sehr gut als Brennstoff geeignet. Ein effektives Separierungsverfahren, z.B. mit Hilfe von Industriezentrifugen, könnte für die Gewinnung des organischen Anteils notwendig werden.

Als weitere Schritte für die Abschätzung der Nutzbarkeit des Faulschlammes in der Schlei ist es erforderlich, eine bessere Datengrundlage für die Variation der chemischen Zusammensetzung zu erhalten. Begleitend sollten Wirtschaftlichkeitsanalysen für geeignete Konzepte durchgeführt werden, um abzuschätzen, ob die Nutzung des Faulschlammes als Rohstoff die Kosten der Entnahme teilweise oder gänzlich ausgleichen könnten.

#### Nutzung als umweltfreundliches Baumaterial

Faulschlamm kann zu einem umweltfreundlichem Baustoff verarbeitet werden (Obuka et al. 2015). Dazu wird der Faulschlamm mit Holzfasern, Holzstaub oder Hanffaser vermischt und zu Platten gepresst. Gelegentlich werden bindende Additive wie pyrogene Kieselsäure (z.B. Aerosil) hinzugegeben, um eine geschmeidigere Konsistenz zu erreichen. Das aus Naturstoffen hergestellte Material wird auch als Sapropel-Beton bezeichnet. Dieser hat in luftgetrockneter Form eine relativ geringe Dichte von rund  $150\text{-}350\text{ kg/m}^3$  ( $= 0,15\text{-}0,35\text{ g/cm}^3$ ).

Dadurch entsteht ein leichtes Material mit relativ geringer Wärmeleitfähigkeit von etwa  $0,055$  bis  $0,080\text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Diese Werte liegen in der gleichen Größenordnung wie Vermiculitgranulat ( $0,065\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) und etwas höher als die Wärmeleitfähigkeit von Glaswolle ( $0,040\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), Leichtbeton ( $0,010\text{-}0,030\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), Steinwolle ( $0,045\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) und Styropor ( $0,030\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) ([http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\\_429.html](http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html)). Sapropel-Beton kann daher als aus Naturstoffen und daher umweltfreundliches Isolierungsmaterial beim Bau von Gebäuden Verwendung finden.

Versuche zur Herstellung von umweltfreundlichen Baumaterial mit Faulschlamm aus der Schlei sind bisher nicht durchgeführt worden. Der Marktwert eines solchen Materials ist bisher nicht abgeschätzt worden.

#### Nutzung für den Deichbau

Durch den Anstieg des Meeresspiegels wird in den kommenden Jahrzehnten eine Erhöhung bzw. Neuanlage von Deichen erforderlich werden. Der Faulschlamm der Schlei hat einen hohen Anteil an Sand, was bei Entwässerung bzw. Trocknung deutlich wird. Bei niedrigem Wassergehalt bricht die kolloidale Struktur des Faulschlammes zusammen und übrig bleibt ein sandiges Material mit variablem Anteil an organischem Material. In diesem Zusammenhang wäre es sinnvoll zu untersuchen, ob der Faulschlamm der Schlei für den Deichbau geeignet ist.

#### Nutzung als Dünger

Faulschlamm enthält Nährstoffe. Faulschlämme aus Klärwerken werden wegen ihres Gehaltes an Stickstoff- und Phosphorverbindungen als Dünger in der Landwirtschaft verwendet. Dies erfordert eine strenge Kontrolle der Inhaltsstoffe und der Aufbringung gemäß Klärschlammverordnung (AbfKlärV), um die Belastung mit anorganischen und organischen Schadstoffen zu begrenzen (<http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/abfallarten-abfallstroeme/klaerschlamm/>). Dabei gelten zahlreiche Einschränkungen in Abhängigkeit von der Art des Bodens, seines pH-Wertes und der Vorbelastung mit Schwermetallen. Außerdem sind Grenzwerte für die Schwermetallgehalte des Faulschlammes festgelegt worden.

Diese sind in Tabelle 1 zusammen mit den Schwermetallgehalten des Faulschlammes der Schlei eingetragen einzusehen. Die Aufbringung von Faulschlamm auf landwirtschaftliche (und auch gärtnerisch genutzte) Böden ist verboten, wenn der Gehalt mindestens eines der Schwermetalle den jeweiligen Grenzwert überschreitet. Basierend auf den in Tabelle

1 eingetragenen Daten liegen die Schwermetall-Gehalte der Faulschlämme der Schlei unterhalb der Grenzwerte. Dies weist darauf hin, dass die Nutzung des Faulschlammes der Schlei als Dünger Verwendung finden könnte. Allerdings wären weitergehende Untersuchungen notwendig, um sämtliche Schadstoffe, sowohl anorganische als auch organische, zu erfassen. Es müsste außerdem geklärt werden, ob der Salzgehalt des Schlei-Faulschlammes auf Böden ein Problem darstellen könnte.

Vor dem Hintergrund knapper werdender Phosphor-Lagerstätten ([https://de.wikipedia.org/wiki/Peak\\_Phosphor](https://de.wikipedia.org/wiki/Peak_Phosphor)) würde die Anwendung von Faulschlamm als Phosphor-Dünger oder die Rückgewinnung von Phosphor aus Faulschlamm in naher Zukunft möglicherweise eine zunehmende Bedeutung finden können. Im Mittel enthält der Faulschlamm der Schlei etwa 0,2 mg/L P (Sedimentnassvolumen) (Ripl 1986). Dies entspricht bei einer mittleren Dicht von 1,15 Tonnen/m<sup>3</sup> gerundet etwa 0,2 kg P pro Tonne. In Abschnitt 1.2. (siehe oben) wurde abgeschätzt, dass in der inneren Schlei zwischen Schleswig und Missunde derzeit etwa 4,5 Millionen Tonnen Faulschlamm vorkommen. In der Annahme, dass 2/3 entnommen und genutzt werden können, errechnet sich in der Größenordnung von 900.000 kg bzw. 900 Tonnen Phosphor für die innere Schlei und in der gesamten Schlei entsprechend mehr.

Die direkte Aufbringung von Faulschlamm als Phosphor-Dünger ist wahrscheinlich unmittelbar die kostengünstigste Lösung. Dabei würde allerdings die Möglichkeit der Nutzung als Energieressource verloren gehen. Außerdem geht damit eine zusätzliche Belastung von Agrarflächen mit Schwermetallen und anderen Schadstoffen einher. Laut dem Bericht zur Phosphor-Rückgewinnungsstrategie des Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2012) kann aus entwässertem Klärwerks-Faulschlamm rund 70 % des Phosphors und aus Faulschlamm-Asche rund 80 % des Phosphors zurück gewonnen werden. Für die innere Schlei entspräche dies umgerechnet rund 630 bis 720 Tonnen Phosphor. In einer neu erbauten Anlage entziehen die Berliner Wasserbetriebe dem Klärschlamm Phosphor (<http://green.wiwo.de/wertvolles-abwasser-berliner-gewinnen-duenger-im-klarwerk/>). Der übrig gebliebene Schlamm lässt sich nach dem Phosphor-Entzug besser trocknen. Möglich wäre auch ein Entzug des Phosphors aus der Asche nach der Verbrennung im Rahmen einer Energieerzeugung.

Durch knapper werdende Ressourcen unterliegt der Preis für Rohphosphat seit etwa zehn Jahren erheblichen Schwankungen und variierte zwischen 55 und 310 €/Tonne. Im November 2015 lag er bei rund 100 €/Tonne (<http://www.indexmundi.com>). Rohphosphat hat einen Standardphosphorgehalt von etwa 25 % ([www.helmag.com/de/](http://www.helmag.com/de/)). Der Preis pro Tonne P variierte umgerechnet etwa zwischen 200 € und 1.200 €/Tonne. Aus dem Faulschlamm der inneren Schlei könnte somit möglicherweise Phosphor in einem Marktwert in der Größenordnung 125.000 € bis 865.000 € gewonnen werden. Dem gegenüber stünden die Kosten für die Gewinnung von 3.000 € und 12.000 € pro Tonne, je nach Verfahren (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2012)). Die Ermittlung der tatsächlichen Kosten der Phosphor-Rückgewinnung aus Faulschlamm aus der Schlei würde sehr wahrscheinlich eine Versuchsanlage erfordern. Eine erste Abschätzung könnten die Erfahrungswerte der Anlage der Berliner Wasserbetriebe erlauben.

#### Extraktion von Schwermetallen

Bei steigenden Metallpreisen könnte die Gewinnung von Metallen aus Faulschlamm ebenfalls zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Aus der Asche und Verbrennungsgasen des verbrannten Faulschlammes ließen sich auch Schwermetallverbindungen wie Blei, Kupfer, Cadmium und Zink zurück gewinnen. Pro Tonne trockenen Faulschlamm sind etwa 50 g Blei, 1,2 g Cadmium, 75 g Chrom, 25 kg Eisen, 40 g Kupfer, 1 kg Mangan, 25 g Nickel und 250 g Zink enthalten (Tabelle 1 und Rippl 1986). In der Annahme, dass von den geschätzt 4,5 Mio. Tonnen Faulschlamm der inneren Schlei etwa 3 Mio. Tonnen entnommen und genutzt werden können, ergäben sich bei einem Wassergehalt von rund 80 % etwa 0,6 Mio. Tonnen Trockensubstanz mit einer Gesamtmasse von etwa 30 Tonnen Blei, 0,72 Tonnen Cadmium, 45 Tonnen Chrom, 15.000 Tonnen Eisen, 24 Tonnen Kupfer, 600 Tonnen Mangan, 15 Tonnen Nickel und 150 Tonnen Zink.

Die Metallpreise variierten in den letzten Jahren je Tonne Metall bei etwa 1.400-1.900 € für Blei, 1.000-4.000 € für Cadmium, 4.800-5.600 € für Chrom, 40-130 € für Eisen, 4.700-7.200 € für Kupfer, 2.500-4.000 € für Mangan, 9.000-20.000 € für Nickel, 1.400-2.000 € für Zink ([www.indexmundi.com](http://www.indexmundi.com), [www.boerse-online.de/rohstoffe](http://www.boerse-online.de/rohstoffe), [www.metalprices.com](http://www.metalprices.com)).

Im Faulschlamm der inneren Schlei könnten daher Metallwerte in der Größenordnung von 2,8 bis 5,4 Millionen Euro enthalten sein. Demgegenüber stünden die Kosten für die Gewinnung. Denkbar wäre eine elektrolytische Gewinnung der Edelmetalle vor Ort (z.B. mit überschüssigem Strom aus Windkraftanlagen) oder ein Weiterverkauf des Rückstands an die chemische Schwermetallindustrie.

### Entnahme des Faulschlammes und Separierung des organischen Anteils

Derzeit werden Möglichkeiten für eine umweltverträgliche Entnahme des Faulschlammes aus der Schlei diskutiert. Eine vielversprechendes Konzept sieht vor, mit Hilfe einer Schiffsbaueinheit (außenbords mit einem mehrere Meter breiten Trichter mit zwei innenliegenden Förderspiralen (Dickstoffpumpensystem) den Faulschlamm verwirbelungsfrei mit minimalen Mengen Beimischung von Schleiwasser aufzunehmen. Diese sollte, wie in der Literatur empfohlen, möglichst präzise arbeiten können (Björk 2014), z.B. mit einer Genauigkeit von 5 Zentimetern.

Der Faulschlamm würde sogleich auf einen benachbarten Ponton gefördert werden, auf dem Industriezentrifugen montiert wären. Diese erste würde das Porenwasser entfernen, welches einer nachgeschalteten Anlage zur Phosphatfällung zugeführt würde. Der Feststoff würde, mit recyceltem Prozesswasser zu passender Konsistenz vermischt, in eine weitere Industriezentrifuge eingeleitet, welche den organischen Anteil vom mineralischen Anteil trennt.

Der organische Anteil, der in der Schlei die ökologischen Probleme wie Sauerstoffschwund und Phosphatmobilisierung verursacht, würde entwässert zur Energieerzeugung abtransportiert werden. Der mineralische Anteil, der nur sehr geringen oder praktisch keinen Einfluss auf den Sauerstoffhaushalt der Schlei nimmt, würde sogleich direkt und verwirbelungsarm auf den Grund der Schlei (z.B. mit

Schleppschläuchen) zurückgelegt werden. Das gereinigte Porenwasser kann dann der Anlage als Prozesswasser wieder zugeführt bzw. in die Schlei zurückgeleitet werden. Das gefällte Phosphat der Phosphatfällungsanlage kann entnommen und als Dünger verwendet werden.

Auf diese Weise würden in einem kontinuierlichen Prozess im Idealfall der problematische organische Anteil und das Phosphat des Porenwassers vom mineralischen Anteil getrennt und der Schlei entnommen werden. Diese Verfahren würde effektiv und nachhaltig in den Phosphathaushalt zu Gunsten des ökologischen Zustandes der Schlei eingreifen können.

Die Verarbeitungsmengen eines solchen Verfahrens werden derzeit auf bis zu rund 5.000 Tonnen pro Werktag geschätzt. Bei dieser Rate könnte der Faulschlamm der inneren Schlei innerhalb von etwa 5 Jahren und der gesamten Schlei innerhalb von etwa 10 Jahren verarbeitet und vom organischen Anteil weitestgehend gereinigt werden. Diese Zeitspannen liegen in etwa innerhalb des Zeitraumes für die Erreichung der Ziele der EU-Wasserrahmenrichtlinie.

Erforderlich ist, die Leistungsfähigkeit des Verfahrens besser abschätzen zu können. Die technischen Komponenten sind für sich genommen bekannt und erprobt. Ungeklärt ist derzeit wie effektiv das kontinuierliche Verfahren für den Faulschlamm der Schlei ist; wie effektiv das organische Material vom mineralischen Anteil getrennt wird, wie hoch die Beimischungen von Tonmineralen in der organischen Fraktion sind, wie vollständig die Phosphatfällung aus dem Porenwasser ist.

Es muss auch geklärt werden, welchen Weg die anorganischen und organischen Schadstoffe nehmen. Auf Grund der chemischen Eigenschaften des organischen Materials ist es denkbar, dass der größte Teil der Schadstoffe in der organischen Fraktion angereichert ist. Allerdings könnte ein Teil der Schadstoffe nach der Trennung auch in der Phosphatfällung oder im mineralischen Anteil vorzufinden sein. Dies wird maßgeblich davon beeinflusst sein, ob in der Anlage reduzierende oder oxidierende Bedingungen vorliegen und wie Tonminerale mit ihren hohen adsorbierenden Oberflächen auf die Fraktionen verteilt sein werden. Wenn ein bedeutender Teil der Schadstoffe im mineralischen Anteil vorzufinden sind, ist zu klären, ob die Schadstoffe wie zuvor im Faulschlamm stark gebunden sind oder leicht mobilisiert werden können.

Chemische Untersuchungen und Experimente können hier Klarheit schaffen. Diese Daten würden nicht nur eine bessere ökologische Entscheidungsgrundlage schaffen, sondern wären auch für robuste Wirtschaftlichkeitsanalysen von zentraler Bedeutung. Voruntersuchungen werden derzeit vom SIEZ exemplarisch durchgeführt. Eine systematische Untersuchung der ganzen Schlei kann der Verein mit seinen wenigen Mitgliedern allerdings nicht leisten.

#### Nutzungsmodell 1: Verbrennung in Kraftwerken in der nahen Ostseeregion

Wenn der organische Anteil vom Faulschlamm abgetrennt würde könnte dieser der Energieerzeugung durch Verbrennung in Kraftwerken zugeführt werden. Bei einer relativ hohen Verarbeitungsmenge würde sich ein Transport des entwässerten organischen Materials zu Kraftwerken in der nahen Ostseeregion anbieten.

Da Faulschlamm bzw. der organische Anteil daraus den (partiell) erneuerbaren Energiequellen zugeordnet werden kann (Kozlovska et al. 2012, Stankevica et al. 2014), würde die Verbrennung des organischen Anteils in Faulschlamm zu einer Verringerung des Verbrauchs fossiler Brennstoffe beitragen.

Bei Verarbeitungsmengen von etwa 5.000 Tonnen nassen Faulschlamm pro Tag würde bei einem Gehalt von rund 5 % täglich etwa 250 Tonnen organischen Materials anfallen. So könnte wöchentlich ein Transportschiff mit einer Kapazität von etwa 1.000-1.500 Tonnen die Schlei verlassen. Denkbar wäre ein Transport zu Kraftwerken in der nahegelegenen Ostseeregion, z.B. in Kiel, Flensburg oder Sønderborg.

Daher wäre zu untersuchen, nahe gelegene Kraftwerke den entwässerten organischen Anteils des Faulschlamm der Schlei als Primär- oder Sekundärbrennstoff nutzen könnten/würden. Ein Vorteil bestehender Kraftwerke wäre, dass die Infrastruktur für die Abgasreinigung und Aschebeseitigung vorhanden ist.

#### Nutzungsmodell 2: Eine Anlage zur Faulschlamm-Verarbeitung an der Schlei

Bei einer niedrigeren Verarbeitungsmenge könnte der Transport des entwässerten organischen Materials zu einem eigens erbauten Kraftwerk an der inneren sinnvoll werden.

Bei Verarbeitungsmengen von etwa 1.000-2.000 Tonnen nassen Faulschlamm pro Tag würde bei einem Gehalt von rund 5 % täglich etwa 50-100 Tonnen organischen Materials anfallen. Diese könnten täglich von der Entnahmeeinheit auf der Schlei herantransportiert und kontinuierlich in Strom und Wärme umgesetzt werden. Bei dieser Verarbeitungsrate würde das Kraftwerk rund 10-20 Jahre mit dem Faulschlamm der inneren Schlei und rund 20-40 Jahre mit dem Faulschlamm der gesamten Schlei versorgt werden können. Diese Zeitspanne entspricht in etwa der Lebensdauer eines Kraftwerks. Später könnte die Nutzung auf andere Materialien umgestellt werden.

Das Gelände der ehemaligen Zuckerfabrik unmittelbar östlich von Schleswig könnte für die Platzierung eines Kraftwerks gut geeignet sein. Hier können Schiffseinheiten anlanden und weitere Gebäude zur Faulschlammverarbeitung Platz finden, z.B. zur Gewinnung von Metallen aus des Verbrennungsrückstandes, Gewinnung von Phosphat, Herstellung von umweltfreundlichen Baumaterialien. Durch die Nähe zur Kläranlage Schleswigs könnte bei Bedarf der Klärschlamm in der Verbrennung mit einbezogen werden.

Im SIEZ werden derzeit Voruntersuchungen und eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt.

### **3.3. Verringerung der Faulschlammneubildung**

Für die Rückführung der Schlei in einen guten ökologischen Zustand muss außerdem die Faulschlammneubildung erheblich verringert werden. Eine jährliche Faulschlammneubildung von 60.000 Tonnen in der inneren Schlei auf einer Fläche von 19

km<sup>2</sup> entspricht jährlich pro Quadratmeter etwa 3,1 kg neuen Faulschlamm. Alternativ errechnen sich mit einer Sedimentationsrate von 3-4 mm/Jahr und einer Dichte von 1,1 g/cm<sup>3</sup> rund 3,3 bis 4,4 kg neuer Faulschlamm pro Quadratmeter. Mit dieser Größenordnung ist die innere Schlei offensichtlich übermäßig belastet.

### Verringerung der Algenmassenvermehrung

Die Massenvermehrung von Algen, vor allem von Blaualgen, in der Schlei erhöht massiv die Faulschlammneubildung (siehe Abbildung 6). Hauptursache hierfür sind die hohen Nährstoffeinträge (Ripl 1986, LANU 2005, Ohlendieck 2009). Ein komplexes Wechselspiel von Nährstoffeintrag, Nährstoffrücklösung und Nährstoffverbrauch steuert dabei maßgeblich die Vermehrung unterschiedlicher Algen.

Die im Winter in der Schlei angesammelten Nährstoffe führen im Frühjahr zu einer ersten Massenvermehrung von hauptsächlich Grünalgen und Kieselalgen. Zum Übergang Frühjahr/Sommer sind die gelösten Nährstoffe durch Aufnahme in Biomasse (und auch durch die Denitrifikation des Nitrats) erschöpft und ein Großteil der Algen der Frühjahrsmassenvermehrung stirbt, etwa 50 % der Biomasse setzt sich auf dem Grund ab und trägt zur erneuten Faulschlamm-Bildung bei (Ohlendieck 2009). Ein großer Teil dieses frischen Faulschlamm wird zersetzt, wodurch wiederum Nährstoffe freigesetzt werden und es zu Sauerstoffschwund an der Faulschlammoberfläche kommt. Dadurch wird zusätzlich Phosphat aus dem Faulschlamm mobilisiert. Das Überangebot des Nährstoffes Phosphat und ein Mangel an Nitrat fördert die Massenvermehrung von Blaualgen. Vor allem deren Absterben im Herbst trägt erheblich zur jährlichen Faulschlammneubildung bei.

Bei dem gegebenen hohen Phosphat-Nitrat-Verhältnis im Sommer haben die Blaualgen einen Konkurrenzvorteil gegenüber Grünalgen und Kieselalgen. Blaualgen können Stickstoff aus anderen Quellen als Nitrat nutzen, wie z.B. Ammonium oder Harnstoff (Ripl 1986, Ohlendieck 2009). Freilandversuche in mit Spundwänden erbauten Versuchsbecken in der Schlei in den 1980er Jahren zeigen, dass die Einbringung von Nitrat, z.B. als Calciumnitrat, auf die Faulschlammoberfläche das Phosphat-Nitrat-Verhältnis im Schleiwasser günstiger einstellt, wodurch Blaualgen durch Grünalgen und Kieselalgen zurückgedrängt werden. Dabei wird die Sichttiefe erhöht und eine bessere Grundlage für das gesamte Nahrungsnetz (Zooplankton, Fisch) geschaffen, was für das Ökosystem Schlei förderlich ist (Ripl 1986).

Durch die Vermeidung von Algenmassenvermehrungen würde die Faulschlammneubildung in der Schlei markant verringert werden. Dazu ist es erforderlich, ganzjährig die Nährstoffeinträge vor allem in die innere Schlei zu senken. Dies gilt für die winterlichen Nährstoffeinträge insgesamt, die Einträge von vor allem organischen Stickstoffverbindungen im Sommer sowie die Vermeidung der internen Düngung mit Ammonium und Phosphat als Folge des sommerlichen Sauerstoffschwunds.

### Nährstoffeinträge in die Schlei – Kläranlagen – insbesondere die Kläranlage in Schleswig

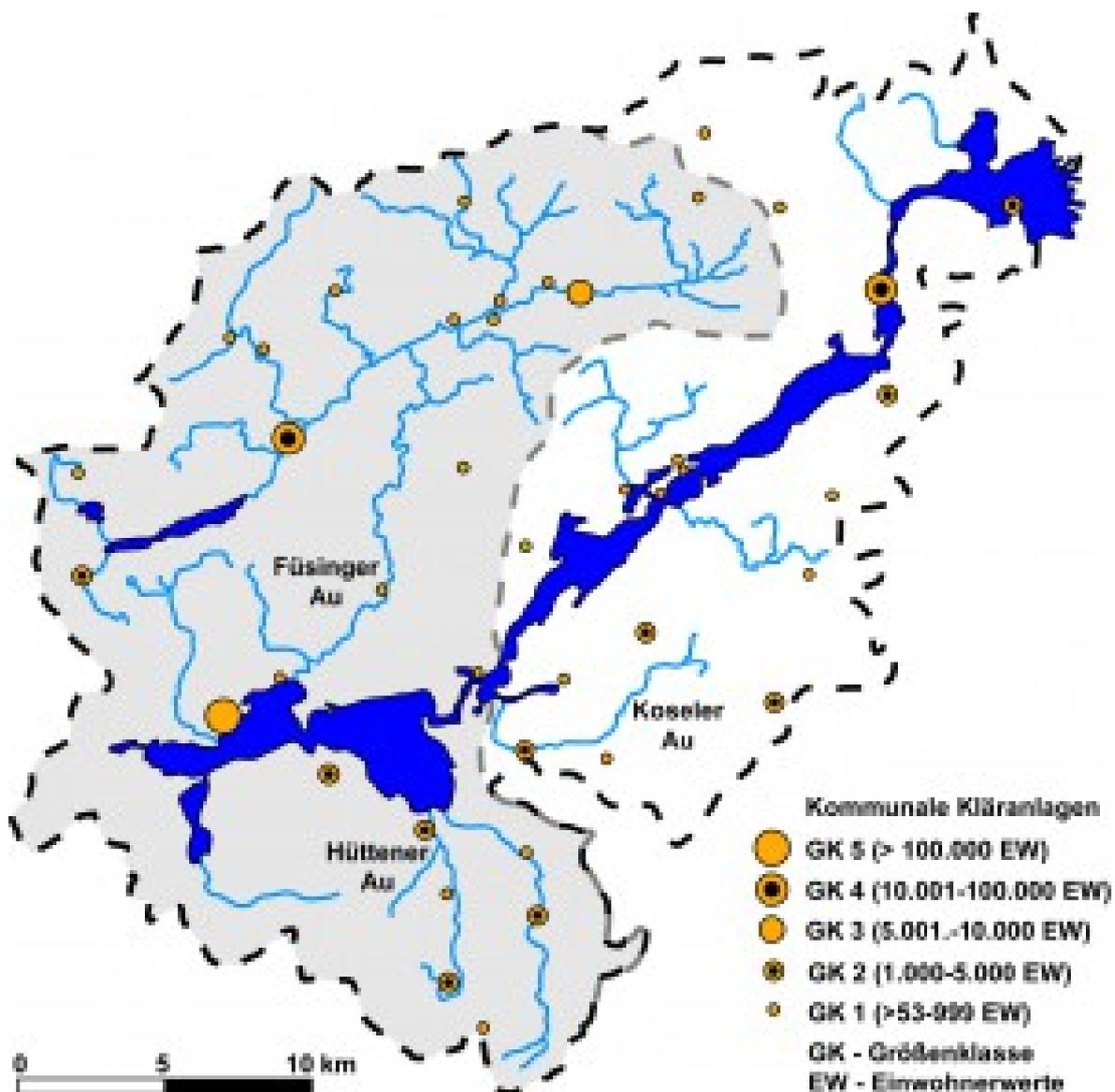
Hauptquellen für Nährstoffeinträge in die innere Schlei sind derzeit die Kläranlage Schleswig und Fließgewässer wie die Füsinger Au (Ohlendieck 2009) (Abb. 8). Zusätzlich werden Nährstoffe über Niederschläge aus der Luft, undichte Abwasserleitungen, kleinere Kläranlagen, stark gedüngte Gartenflächen in Gewässernähe und die Sportschifffahrt eingetragen.

Die Kläranlage in Schleswig ist mit über 100.000 Einwohnergleichwerten (EW) die größte Kläranlage an der Schlei. Zugleich hat sie sich seit ihrer Inbetriebnahme im Jahre 1956 im Rahmen mehrerer mechanischer und (bio)chemischer Ausbau- und Modernisierungsmaßnahmen insbesondere in den letzten Jahrzehnten zu einer sehr leistungsfähigen Kläranlage entwickelt (siehe Zusammenfassungen in Feibicke 2005 und Ohlendieck 2009, <http://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/A/abwasser/kommAbwasserbeseitigung.html>). Durch die Zuleitung von Abwässern aus angrenzenden Gemeinden mit weniger ausgerüsteten Kläranlagen wurde eine bessere Reinigungsleistung für Abwässer aus diesen Gemeinden und zugleich höhere Auslastung der Kapazität der Kläranlage Schleswig erreicht (LANU 2001).

Die Steigerung der Leistungsfähigkeit zur Phosphor- und Stickstoffeliminierung der Kläranlagen, vor allem der Kläranlage Schleswig, hat maßgeblich zu einer Verringerung der Nährstoffeinleitung in die Schlei und somit zur Reduzierung der Faulschlammneubildung in der inneren Schlei beigetragen. Dennoch verbleibt ein Restgehalt an Nährstoffen im Ablauf, wodurch jährlich etwa 0,5 Tonnen Phosphor und 23 Tonnen Stickstoff in organischer und anorganischer Form in die Kleine Breite der innersten Schlei eingeleitet wird (Ohlendieck 2009). Von den 23 Tonnen Stickstoff entfallen rund 17 Tonnen auf anorganische Stickstoffverbindungen wie Nitrat, Nitrit und Ammonium sowie etwa 5 Tonnen auf organische Stickstoffverbindungen wie Harnstoff und Aminosäuren (Ohlendieck 2009).

Obwohl der Gehalt an organischen Stickstoffverbindungen lediglich 25 % vom Gesamtstickstoff ausmacht, ist die Einleitung in der wärmeren Jahreszeit problematisch. Im Sommer, während der Vegetationsperiode und einem Zeitraum mit geringeren Niederschlägen, nehmen die externen Einträge von Nährstoffen über die Auen aus dem Einzugsgebiet der Schlei ab. Dadurch bekommen die Einleitungen insbesondere des organischen Stickstoffs und des Ammoniums aus den Kläranlagen mehr Bedeutung, verstärken den Konkurrenzvorteil der Blaualgen und somit die Faulschlammneubildung in der inneren Schlei (Meyerhöfer 1997, Ohlendieck 2009) (siehe Abschnitt „Verringerung der Blaualgenmassenvermehrung“ in diesem Kapitel).

Ohlendieck (2009) schlägt im Sanierungskonzept zur Schlei vor zu überprüfen, ob der Eintrag von Stickstoff aus der Kläranlage Schleswig weiter gesenkt werden kann. Dies gilt insbesondere für Ammonium und organische Stickstoffverbindungen während des Sommers. Weiterhin wird vorgeschlagen, alle kleineren Kläranlagen mit einer Nitrifizierungsstufe auszustatten, so dass weniger Ammonium in die Auen und die Schlei eingeleitet wird.



**Abbildung 8:** Eine Karte mit den kommunalen Kläranlagen und größeren Fließgewässern im Einzugsgebiet der Schlei (Lage und Größe der Klärwerke nach Ohlendieck (2009), Fließgewässer nach Rippl (1986), Einzugsgebiet der inneren Schlei mit der Füsinger/Loiter Au und der Hüttener Au nach Gocke et al. (2003)). Zeichnung: S Duggen.

#### Nährstoffeinträge in die Schlei – Die Auen, insbesondere die Füsinger/Loiter Au

Das Einzugsgebiet der Schlei zeichnet sich durch einen hohen Anteil recht schwerer Böden unter intensiver landwirtschaftlicher Nutzung mit umfangreicher Drainage und verrohrten Gewässern aus (LANU 2001, Ohlendieck 2009).

Für den Zeitraum 1999-2007 wurde der Nährstoffeintrag in die innere Schlei aus Fließgewässern abgeschätzt. Demnach werden jährlich hochgerechnet etwa 1.000 Tonnen Stickstoff und 20 Tonnen Phosphor in die innere Schlei eingetragen.

Hauptbelastungsquelle für Stickstoff und Phosphor ist mit einem Anteil von über 75 % die Landwirtschaft (Ohlendieck 2009).

Durch die Füsinger Au, welche mit rund 243 km<sup>2</sup> ungefähr 55 % des Einzugsgebietes der inneren Schlei entwässert, werden etwa 615 Tonnen Stickstoff und 12 Tonnen Phosphor in die innere Schlei eingetragen (Ohlendieck 2009). Der Eintrag schwankt mit der Jahreszeit und ist im Sommer während der Vegetationsperiode und bei geringeren Niederschlägen niedriger als in der kühleren Jahreszeit. Die Stickstofffracht aus der Füsinger Au besteht im Mündungsbereich zu etwa 85 % aus Nitrat, zu etwa 5 % aus anderem anorganischem Stickstoff wie Ammonium und Nitrit und zu etwa 10 % aus organischem Stickstoff wie Harnstoff.

Es wurden verschiedene Strategien vorgeschlagen, um die Nährstofffracht aus den Fließgewässern, vor allem aus der Füsinger Au, in die innere Schlei zu verringern (Ripl 1986, Sterr und Mierwald 1991, Ohlendieck 2009):

1) Schaffung und Ausweitung von gewässernahen Uferstrandstreifen (Gewässerrandstreifen) und Retentionsbereichen. Durch extensive Grünlandnutzung oder Bewaldung wird der Nährstoffeintrag in Gewässernähe verringert und einfließende Nährstoffe landwärtig zurückgehalten und z.T. abgebaut (z.B. Stickstoffverbindungen durch Denitrifikation, Umsetzung organischer Stickstoffverbindungen wie Harnstoff, Aufnahme durch die Vegetation). Drainagerohre würden in diesen Bereichen entfernt und zwischen gewässernahen und intensiv genutzten Flächen könnten uferparallel Knicks errichtet werden. Dabei würde die intensive Nahrungsmittelproduktion auf höher gelegene Weide- und Ackerflächen verlagert werden. Auf diesen sollte ein nachhaltigerer Einsatz von Dünger angestrebt werden. Die gewässernahen Flächen würden für die Beweidung oder Gewinnung nachwachsender Rohstoffe genutzt werden können.

2) Schaffung von größeren Retentionsflächen im unteren Verlauf der Auen, vor allem der Füsinger Au. Vorgeschlagen wurde ein Phosphat-Sedimentationsbecken im Mündungsbereich der Füsinger Au. Das Sanierungskonzept von Ripl 1986 sah vor, in der Kleinen Breite unmittelbar vor dem Mündungsbereich der Füsinger Au eine Unterwasserschwelle anzulegen, wodurch an Partikel gebundenes Phosphat in der flachen Bucht vor Füsing abgelagert und Schlamm durch die gute Durchlüftung in dem flachen Becken abgebaut würde. Als Alternative wird in Betracht gezogen, eine weiträumige Niederung unmittelbar vor der Brücke der Kreisstraße vor Füsing in eine Retentionsfläche umzuwandeln. Dies könnte den Einbau einer Schwelle vor der Brücke der Kreisstraße und einen Rückbau des Deiches zwischen der Niederung und der Füsinger Au beinhalten. Das Wasser der Füsinger Au würde in die Niederung einströmen und Partikel und Nährstoffe durch die Verlangsamung der Fließgeschwindigkeit abgesetzt und abgebaut bzw. von der Vegetation (z.B. Schilf) aufgenommen werden. Zugleich würde ein wertvolles Biotop mit entstehen. Ähnliche Maßnahmen sind für die anderen größeren Auen (z.B. Hüttener Au, Koseler Au) wünschenswert.

#### **4. Schlussfolgerungen**

Durch den Eintrag großer Mengen Nährstoffe aus Besiedlungsgebieten und landwirtschaftlichen Flächen haben sich in der Schlei innerhalb eines knappen

Jahrhunderts mehrere Millionen Tonnen Faulschlamm gebildet. Die größten Mengen an Faulschlamm kommen in der inneren Schlei von Schleswig bis zur Missunder Enge vor. In der inneren Schlei bedeckt Faulschlamm etwa 60 % der Fläche, d.h. die tieferen Bereiche ab etwa 1,5-2 m Tiefe. Die Faulschlammneubildung war in den 1980er Jahren erheblich und mit durchschnittlich 3-4 mm, örtlich über 5 mm, entsprechend rund 60.000 Tonnen pro Jahr in der inneren Schlei am höchsten. Die heutige Neubildungsrate ist nicht bekannt, aber es ist denkbar, dass sie sich wegen der hohen winterlichen Nährstoffgehalte und insbesondere der sommerlichen internen Düngung nicht wesentlich verändert hat.

Der Faulschlamm hat einen sehr nachteiligen Einfluss auf den ökologischen Zustand der Schlei. Dies wird alljährlich durch sommerliche Algenblüten, vor allem Blaualgenblüten, niedrige Sichttiefen, monatelangem extremen Sauerstoffschwund an der Faulschlammoberfläche, das Fehlen einer weitverbreiteten Unterwasservegetation und dem Fehlen zahlreicher Pflanzen- und Tierarten und letztlich durch Einschränkungen der Wasser- und Badequalität sicht- und spürbar.

Es besteht das Potenzial, den ökologischen Zustand der Schlei innerhalb von 20 Jahren wesentlich zu verbessern. Die Strategie, die externen Nährstoffeinträge aus dem Einzugsgebiet der Schlei, d.h. aus Kläranlagen und landwirtschaftlichen Flächen, zu verringern ist ein sehr wichtiger Teil einer Gesamtstrategie, ist aber allein offenbar nicht ausreichend, um die Schlei wieder in einen ökologisch guten Zustand zurück zu führen. Daher sollten zusätzlich zeitnah Strategien entwickelt und möglichst umgesetzt werden, welche eine Bearbeitung von einigen Millionen Tonnen Faulschlamm beinhalten. Der geographische Schwerpunkt der Sanierung der Schlei sollte zunächst bei der inneren Schlei liegen, denn diese ist Nährstoffquelle für den mittleren und äußeren Bereich der Schlei.

Eine mögliche Strategie wäre, den Faulschlamm in der Schlei zu belassen und Faulschlammoberfläche mit unterschiedlichen Techniken zu bearbeiten, so dass die Mobilisierung von Phosphat verringert würde. Eine andere Strategie wäre, den Faulschlamm aus der Schlei zu entfernen. Bei dieser Vorgehensweise besteht die Wahl, den Faulschlamm land- oder seewärtig in großen Becken zu deponieren oder stattdessen als Rohstoff zu betrachten und als solchen zu nutzen.

Es ist zu erwarten, dass Faulschlamm auf Grund der Verknappung von Ressourcen und steigenden Preisen als Rohstoff zunehmende Bedeutung finden wird. Faulschlamm könnte zur Gewinnung von Energie, Dünger und der Herstellung von umweltfreundlichem Baumaterial (z.B. Wärmedämmung) verarbeitet werden oder im Deichbau Verwendung finden. Dadurch könnten die Kosten für die Entnahme aus der Schlei teilweise oder im Idealfall gänzlich ausgeglichen werden.

Die Nutzung des Faulschlammes der Schlei als Rohstoff könnte maßgeblich dazu beitragen, die Schlei in einen guten ökologischen Zustand, wie von der EU-Wasserrahmenrichtlinie gefordert, zurück zu versetzen.

Um eine bessere Entscheidungsgrundlage zu erhalten, sind entsprechende wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Untersuchungen erforderlich.

## 5. Literatur

Björk S (2014) Limnological Methods for Environmental Rehabilitation. The Fine Art of Restoring Aquatic Ecosystems. Schweizerbart Science Publishers, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller). Stuttgart. 381 S.

Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (April 2001) Stellungnahme der ZKBS zur Risikobewertung von *Microcystis aeruginosa* PCC 7806, *Nostoc punctiforme*,

*Nostoc* sp. PCC 7120, *Cyanothece* sp. und *Planktothrix agardhii* als Spender- oder Empfängerorganismen bei gentechnischen Arbeiten gemäß § 5 Absatz 1 GenTSV. Az. 6790-05-01-0098.

Feibicke M (1991) Informationen zur Sanierung der Schlei. Presse-Info TU Berlin, GF Limnologie, 12.5.1991.

Feibicke M (2005) Konzept zur Restaurierung des Schlei-Ästuars / Concept for restoration of the Schlei estuary. Rostock. Meeresbiolog. Beitr., Heft 14, S. 69-82. Download unter: [http://www.oekologie.uni-rostock.de/fileadmin/Mathnat\\_Bio\\_Oekologie/RMB/RMB\\_14/RMB\\_14-06.pdf](http://www.oekologie.uni-rostock.de/fileadmin/Mathnat_Bio_Oekologie/RMB/RMB_14/RMB_14-06.pdf)

Fossing H, Berg P, Thamdrup B, Rysgaard S, Munk Sørensen H, Nielsen K (2002) Ilt- og næringsstofffluxmodel for Århus Bugt og Mariager Fjord. Modelopsætning og scenarier. Faglig rapport fra DMU, nr. 417. 73. S.

Gocke K, Rheinheimer G, Schramm W (2003) Hydrographische, chemische und mikrobiologische Untersuchungen im Längsprofil der Schlei. Schr. Naturwiss. Ver. Schlesw. Holst. Bd. 68, 31-62.

Grüneberg B, Ostendorp W, Leßmann D, Wauer G, Nixdorf B (2009) Restaurierung von Seen und Renaturierung von Seeufern. In: Zerbe S und Wiegand G (Hrsg.) Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg, s. 125-151.

Hoffmann, C (1937) Die Pflanzenwelt. In: Neubaur, R. und S. Jaeckel (Eds.)(1936/37) Die Schlei und ihre Fischereiwirtschaft III. Schr. Nat. Ver. Schlesw.-Holst. 22: 230-248.

Kozlovská J, Valancius K and Petraitis E (2012) Sapropel use as a Biofuel Feasibility Studies. Research Journal of Chemical Sciences Vol. 2(5), 29-34.

Köhn H (2001) Chemische Untersuchungen ausgewählter Seensedimente in Schleswig-Holstein. Hrsg.: LANU (Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein), Schriftenreihe LLUR SH – Gewässer (bis 2009: Schriftenreihe LANU SH – Gewässer). – Kiel: 51 S. plus Anhang.

LANU (Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein) (2001): Ergebnisse langjähriger Wasseruntersuchungen in der Schlei. – Kiel: 23 S. plus Anhang.

LLUR (Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes

Schleswig-Holstein) (2014) Nährstoffe in Gewässern Schleswig-Holsteins. Entwicklung und Bewirtschaftungsziele. Schriftenreihe LLUR SH – Gewässer; D 24.

Löwenstein J (1985): Schwermetallablagerungen in den Sedimenten der "Inneren Schlei" als Ausdruck für den anthropogenen Einfluß auf das Ökosystem. – Diplomarbeit, Fachbereich Biologie, Freie Universität, Berlin.

Magnus P (1875) Bericht über die botanischen Ergebnisse der Untersuchung der Schlei vom 7. bis 10. Juni 1874. – Verh. bot. Ver. Prov. Brandenburg, 17: 1-8.

Meyerhöfer M (1997) Bericht über die Pilotphase des Projektes: Untersuchungen des Auftretens und der Verbreitung der Cyanobakterien in der Schlei sowie ihrer Rolle im Hinblick auf die zeitliche Sukzession der Phytoplankton-Gemeinschaften unter Anwendung des Konzeptes von Markerpigmenten-Analysen mittels HPLC. In: LANU (Landesamt für Natur und Umweltschutz des Landes Schleswig-Holstein (2001): Ergebnisse langjähriger Wasseruntersuchungen in der Schlei. – Kiel: 23 S. plus Anhang.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hrsg.) (2012) Phosphor-Rückgewinnungsstrategie Baden-Württemberg. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg Referat 46 „Siedlungsabfallwirtschaft, Abfalltechnik“(Red.).

Nellen W (1967) Ökologie und Fauna (Makrovertebraten) der brackigen und hypertrophen Ostseeförde Schlei. – Archiv für Hydrobiologie, 63: 273-309.

Neubaur R (1931): Großes Fischsterben in der Schlei. – Fischerei-Zeitung (Neudamm) 34: 475.

Neubaur R. und Jaeckel S (Eds.) (1936/37): Die Schlei und ihre Fischereiwirtschaft. I-III. – Schr. Nat. Ver. Schlesw.-Holst., 21: 314-360, 440-482, 22: 190-249.

Obuka V, Sinka M, Klavins M, Stankevica K, Korjakins A (2015) Sapropel as a Binder: Properties and Application Possibilities for Composite Materials. 2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 96, 012026.

Ohlendieck, U (2009) Zustand und Verbesserungspotenzial der Schlei. Eine Informations- und Planungsgrundlage für Maßnahmen zur Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie. Im Auftrag des Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR).

Remane, A (1937) Die übrige Tierwelt. In: Neubaur, R. und S. Jaeckel (Eds.)(1936/37) Die Schlei und ihre Fischereiwirtschaft III. Schr. Nat. Ver. Schlesw.-Holst. 22: 209-224.

Ripl W (1986) Restaurierung der Schlei. Bericht über ein Forschungsvorhaben. – Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten, Kiel: D 5. 86 S.

Samtleben M (1981) Die Muschelfauna der Schlei (Westliche Ostsee) – aktuopaläontologische Untersuchungen an einem sterbenden Gewässer. Meyniana 33, S. 61-83.

Schauser I, Lewandowski J, Hupfer M (2003) Seeinterne Maßnahmen zur Beeinflussung des Phosphor-Haushaltes eutrophierter Seen. Leitfaden zur Auswahl eines geeigneten Verfahrens. Berichte des IGB, Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Heft 16. 113 S.

Scheffer M (2004) Ecology of Shallow Lakes. Principal Ed. Usher MB Population and Community Biology Series 22. Dordrecht / Boston / London. Kluwer Academic Publishers. 356 S.

Stankevica K, Klavins M, Rutina L, Cerina A (2012) Lake Sapropel: a Valuable Resource and Indicator of Lake Development. In: Oprisan S, Zaharim A, Eslamian S, Jian MDS, Aiub CAF, Azami A (Editors), Advances in Environment, Computational Chemistry and Bioscience, WSEAS Press, 2012, pp. 247D252.

Stankevica K, Bulakovs J, Klavins M (2014) Organic rich freshwater sediment (sapropel) as potential soil amendment for recultivation of areas contaminated with heavy metals. GeoConference on Water Resources, Forest, Marine and Ocean Ecosystems. Section Soil.

Sterr H und Mierwald U (1991) Naturräumliche Ausstattung und ökologische Probleme der Schlei und ihrer Uferlandschaft. Kieler Geographische Schriften 80: 343-367.

Umweltbundesamt (2003) Empfehlung zum Schutz von Badenden vor Cyanobakterien-Toxinen. Bundesgesundheitsbl. – Gesundheitsforsch. – Gesundheitsschutz (Springer Verlag), 46: 530 – 538.

Willuweit T, Nowicki S, Ulrich KU, Jakobsen DR (1999) Precipitation of phosphate and heavy metals from water or sediment using alkaline earth metal peroxide, giving high level of phosphate removal German Patent DE19821609.

#### Weitere Internetseiten

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2015) <http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/abfallarten-abfallstroeme/klaerschlamm/>

Cyanocenter UBA Entscheidungsunterstützungssystem (2015) <http://toxische-cyanobakterien.de>

Duggen S (2015) Nährstoff- und Sauerstoffgehalte in der Schlei. Erschienen auf der Internetseite des SchleiiInformations- und Erlebnis zentrums, SIEZ. [www.schleiiinfozentrum.de](http://www.schleiiinfozentrum.de) am 18. Dezember 2015.

## 6. Danksagung

Dank ist hier gerichtet an Fachleute und Laien, Kollegen und Schülern, Unternehmern

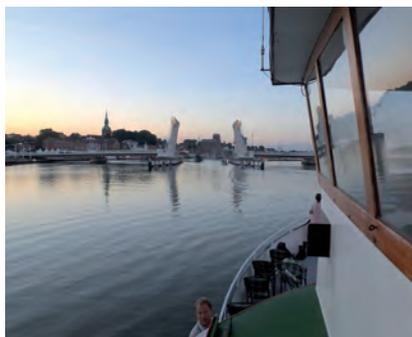
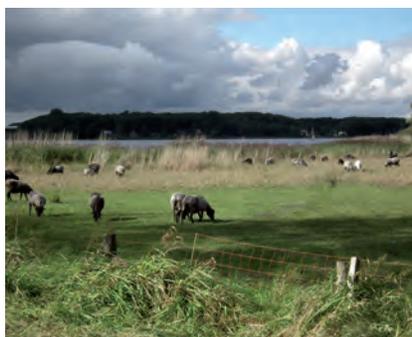
sowie den Mitgliedern des SIEZ, die durch Unterstützung bei der Literatursuche und zahlreiche Diskussionen zur Weiterentwicklung des Konzepts beigetragen haben und weiterhin beitragen.

# SIEZ

Schlei Informations- und Erlebnis-Zentrum



# Die Vielfalt



braucht ein Zentrum.

## Liebe Freunde der Schlei,

die Schlei ist das Herz unserer Region. Vielfältig reicht sie vom Meer bis tief ins Land und prägt unser Leben. Brackwasserförde der Ostsee, Naturpark mit einzigartiger Entstehungsgeschichte und vielfältiger kultureller Entwicklung: die Schleiregion ist ein bedeutendes Natur- und Kulturerbe. Dieses gilt es wertzuschätzen, zu pflegen und zu vermitteln.

Nicht immer sind die Schlei und ihre Landschaft gut behandelt worden. Hohe Nährstoffeinträge über Wasserläufe, Klärwerke und aus Siedlungsgebieten haben im vorherigen Jahrhundert zu bedenklichen Wasserwerten, Algenblüten und Faulschlammablagerungen geführt. Salzwiesen und Ufer gingen vielerorts in die Sukzession. Die Vielfalt der Lebensraumtypen nahm ab.

Aber vieles hat sich in den letzten zehn Jahren gebessert. Marine Flora und Fauna rücken erneut tiefer in die Schlei vor. Die Artenvielfalt in der Schlei steigt an. Die Wasserqualität verbessert sich. Dies gilt es zu fördern. Aber es erfordert unser aller Einsatz, denn es geschieht nicht von allein. Unsere Vision ist es, zu einer der saubersten und vielfältigsten Brackwasserregionen Europas zu werden.

Wir, die Mitglieder des Vereines SchleiiInformations- und Erlebniszentrum e.V. (SIEZ), wollen mit Ihnen zusammen ein Zentrum an der Schlei aufbauen. Dieses Zentrum zum Natur- und Kulturerbe Schleiregion soll uns Anrainer verbinden, vernetzen und erfreuen. Es soll dazu beitragen, unsere regionale Identität zu stärken.

Das Zentrum gibt Antworten zu Fragen der eiszeitlichen Entstehung der Schlei, zu ihrer Flora und Fauna und zur Besiedlungsgeschichte. Das Zentrum zeigt die Problematik der Nährstoffbelastung und Flächennutzung auf und verpflichtet sich, zu Lösungen beizutragen.

Es macht die Veränderungen des ökologischen Zustandes der Schlei durch die Geschichte erlebbar – wie es früher war, wie es heute ist, wie es wieder werden kann. Das Zentrum weist auf die vielfältigen Sehenswürdigkeiten der Schlei hin und bietet Produkte der Region an.

Das Zentrum will ein Ort der Fürsorge und Aufmerksamkeit gegenüber der Schlei sein.

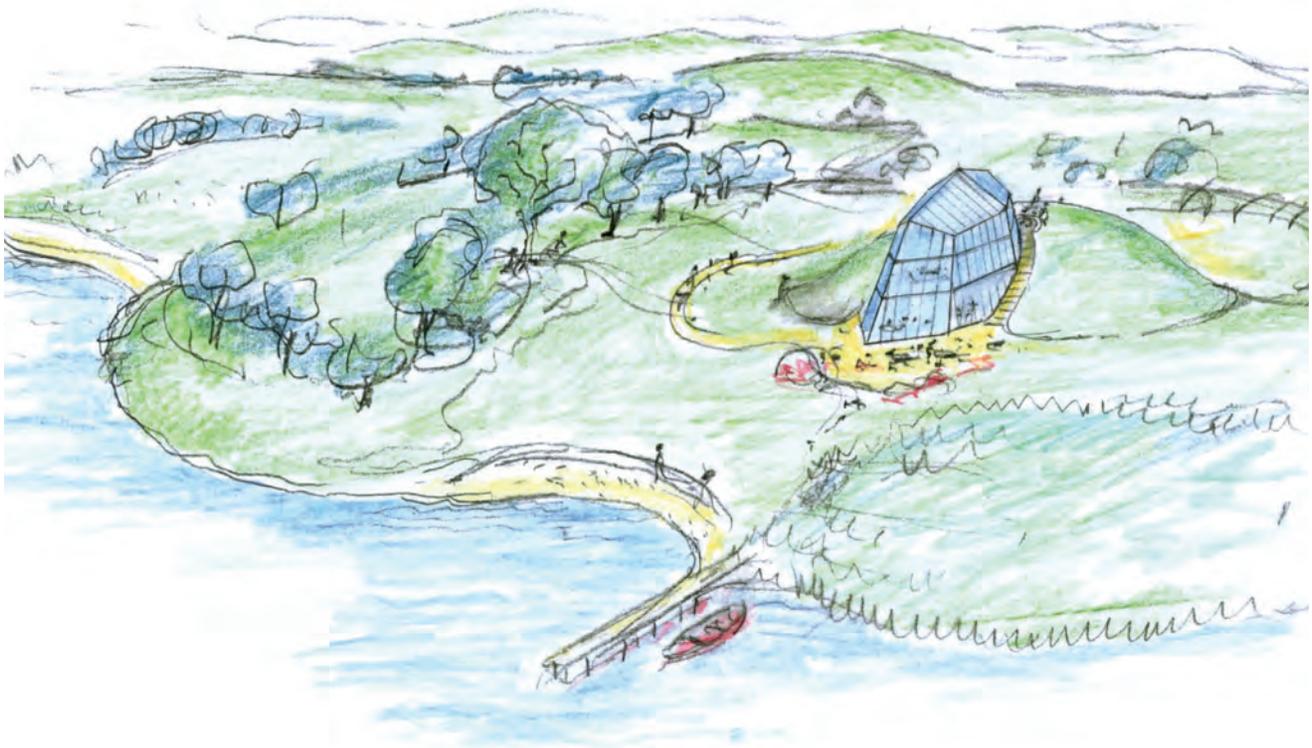
Das SIEZ sollte direkt an der Schlei liegen, mitten in der Vielfalt der typischen Landschaftselemente – ein Informationszentrum mit einer einzigartigen Verknüpfung von Forschung und Vermittlung der Brackwasserthemen, ein Naturparkpflegezentrum und gleichzeitig ein Publikumsmagnet für unsere Gäste, ein Kulturzentrum als Ort des Schleilerlebens und der Begegnung mit einem Konferenzraum und rundem Tisch aller Beteiligten, einem Café mit Schleibibliothek.

Die Wirkung des SIEZ möge ein verstärktes, gemeinsames Eintreten für die weitere Gesundung der Schleiregion sein – ein klares Signal dafür, die mit den Wasserrahmenrichtlinien gesteckten Zielen erreichen zu wollen.

Folgen Sie uns in dieser Broschüre durch die verschiedenen Ebenen unseres Konzeptes.

Die Mitglieder des Vereines SchleiiInformations- und Erlebniszentrum e.V. (SIEZ)





## Die Vielfalt braucht ein Zentrum

Die Schlei, lange Zeit war sie eine Grenzregion. Längst ist sie zum Herz der Naturparkregion geworden und hilft, die Grenzen zwischen Angeln und Schwansen, den Ämtern, Kreisen und Gemeinden, Stadt und Land zu überwinden.

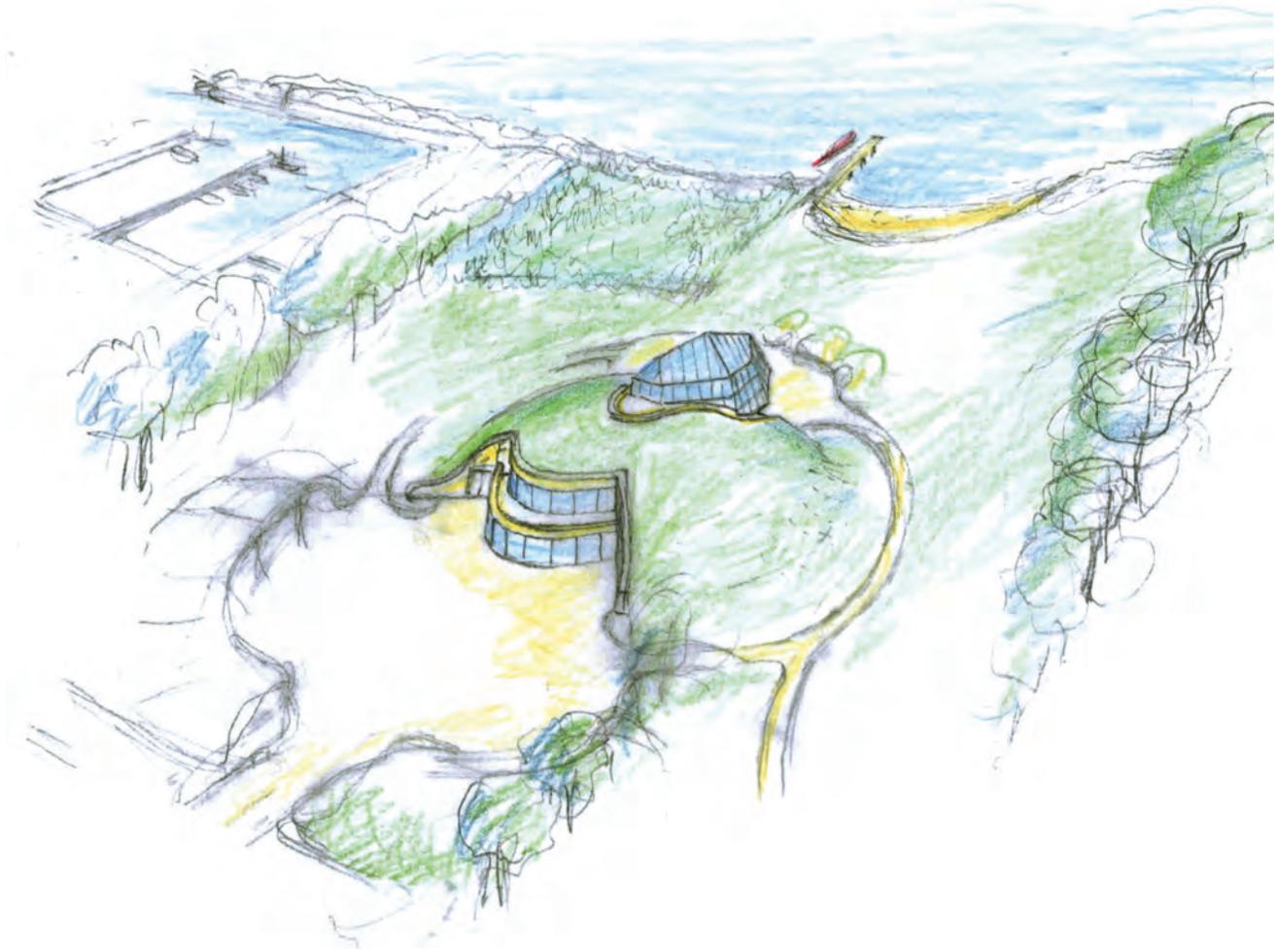
Die vielfältigen Einzelbilder der Schlei können im Schleizentrum für uns und unsere Gäste zu einem Gesamtbild werden.

Wir stellen uns das Zentrum dort vor, wo die Schlei sich schon allein durch ihren Anblick dem Betrachter mitteilt. Eine Möglichkeit bietet sich evtl. am Ortsrand des Schleidorfes Fleckeby zwischen Schleswig und Eckernförde an – östlich eines Hafetriebes auf einem Grundstück von 2 ha., schleinah und doch nicht im FFH-Gebiet, gut von der B76 zu erreichen.

Aus einem grünen, grasbewachsenen Hügel der großen Breite sticht zur Wasserseite scheinbar eine Gletscherzunge hervor. Segler erkennen es mit dem Fernglas: An Cafétischen außen und innen sitzen Menschen, lesend und sich unterhaltend. Auf dem Gelände, im Gletscher und Hügel bewegen sie sich interessiert und staunend. Es sind Gäste, Besucher/innen und Mitarbeiter des SIEZ.

Von der Schlei aus wird kein eigentliches Gebäude sichtbar, wohl aber ein Glasbau, der an einen eiszeitlichen Gletscher erinnert, als Symbol für die mächtigen Prägekräfte unserer Landschaft. Er beherbergt das Café mit Schleibibliothek, eine Verkaufsstelle für regionale Produkte und führt ins Innere des Hügels zu einer lebendigen und dynamischen Schleiausstellung, zu Konferenz- und Büroräumen, zur Kleinen Schleischule und dem Labor der Brackwasserforschung.





Landseitig von Süden, bei der Anfahrt und vom Parkplatz aus erkennt man eine klare Steinfassade im SIEZ-Hügel. Die Glas- spitze des „Gletschers“ überragt den Hügel. Im Außen- bereich des SIEZ gibt es eine Terrasse des Gletschercafés mit Eiszeitspielplatz und einem Geländemodell der eiszeitlichen Binnensanderfläche. Es gibt einen Schilflehrpfad mit Hän- gebrücke sowie einen Glastunnel in die Unterwasserwelt der Schlei. Es gibt eine Schleipflanzenarche als Teil eines Na- turparkpflegebetriebes. Das grüne Dach des SIEZ ist be- gehbar. Von dort aus können Besucher weit über die Schlei blicken.

Besucher betreten den SIEZ-Hügel durch das Gletscherca- fé auf der Nordseite. Angrenzend gibt es eine Verkaufs- möglichkeit für Produkte der Schleiregion. Treppe und Auf- zug bieten barrierefreien Zugang zur oberen ruhigen Etage des Cafés mit Schleibibliothek, zu Konferenz- und Büro- räumen. Nach dem Eingangsbereich folgt an der Informa- tion mit der Kasse der Zugang zur großen Innenhalle mit der dynamischen und lebendigen Schlei-Ausstellung.



## *Gletscher-Café mit Schleibibliothek*

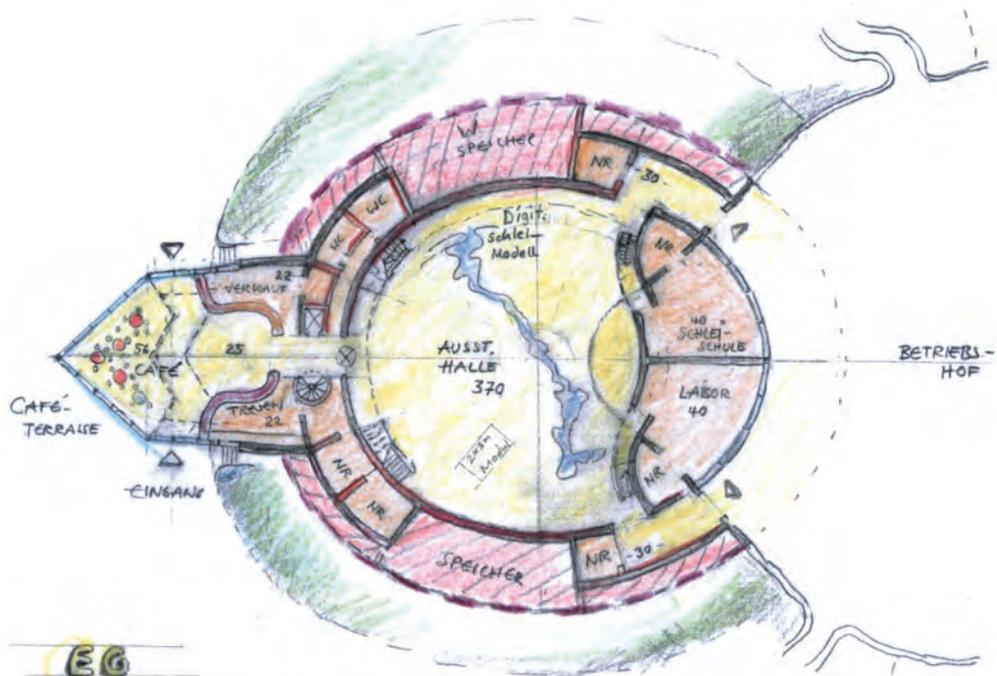
Das Café im SIEZ-Gletscher bietet regionale Gerichte, Kuchen und Getränke an. Besucher/innen können hier zur Ruhe kommen und die Umgebung genießen. In der oberen, ruhigeren Etage des Cafés befindet sich die Schleibibliothek. Sie löst ein Problem: ein Großteil der Schleiliteratur ist für Anrainer und Besucher/innen sehr schwer zugänglich. Sämtliches Infomaterial zur Schlei soll hier zu finden sein: wissenschaftliche Artikel, Berichte, Erzählungen, Bildbände, Filme und Audiodateien. Die Schleibibliothek wird Portal für Erkenntnis, regionale Bildung und für Problemlösungen.



## Verkaufsmöglichkeiten für regionale Produkte

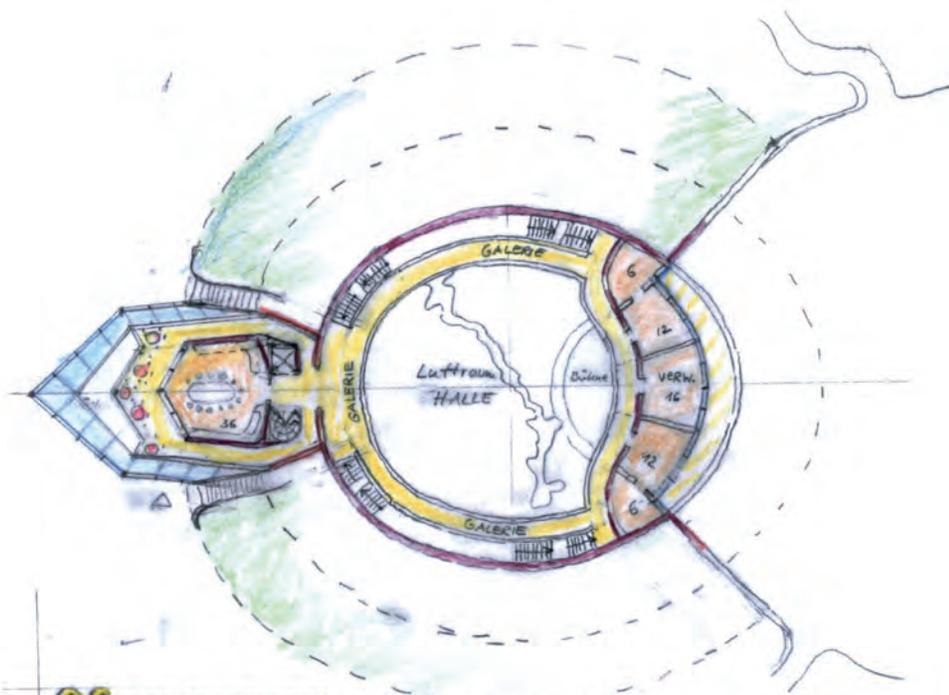
Die Schleiregion bietet eine Vielfalt an Produkten: Lebensmittel, Getränke, Töpferwaren, Textilien, Bekleidung, Lederwaren, Kunsthandwerk, Bücher. Die Verkaufsstelle im SIEZ bietet dem Besucher eine Übersicht zur Produktpalette der Schleiregion. Hersteller können exemplarisch Waren zum Verkauf anbieten mit Verweis an den Hauptverkaufsort. Bei Besucherinnen und Besuchern wird das Interesse geweckt, die Schleiregion zu erkunden.





**EG**

0 5 10 m 20 m  
M. 1:200



**OG** = GALERIE UMLAUFEND

0 5 10 m  
M. 1:200

22. 2. 2017

## Das Ausstellungskonzept

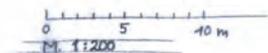
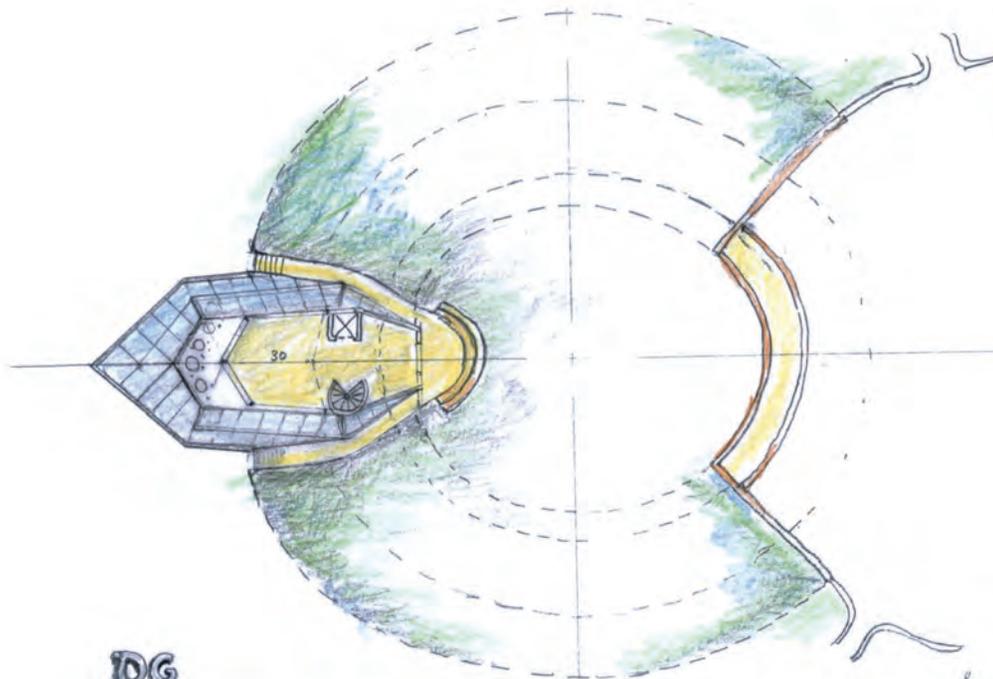
Der große Raum im Inneren des SIEZ-Hügels bietet Platz für wechselnde Ausstellungen, Exponate und Experimente in Bezug auf die Schlei. Mittels modernster Lichttechnik werden die Wände, der Boden und sogar die Decke der Halle in die Darstellung miteinbezogen. Dadurch entsteht ein dynamisches und lebendiges Zentrum.

Wechselnde und animierte Projektionen zeigen die vielfältigen und veränderlichen Aspekte der Schleiregion in der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft: Eiszeitliche Vorgänge, Landschaftsentstehung, Geländestrukturen, Entstehung der Schlei durch Meeresspiegelanstieg und Landsenkung, Ökologie der Schlei als Küstengewässer mit ihrer besonderen Variation an Flora und Fauna, Lebensraumtypen, Besiedlungsgeschichte der Gemeinden und Städte, Landnutzung entlang der Schlei, Land- und Forstwirtschaft, Fischerei und Handwerk, Veränderungen durch Umstellungen

der Nährstoffkreisläufe, aktuelle Indikatoren der Verbesserung des ökologischen Zustands, Möglichkeiten der Nutzung von Faulschlamm als Rohstoff, Sturmfluten und Hochwasserrisiken, erwartete Folgen der Klimaveränderung in der Schleiregion.

In der oberen Etage umrahmt eine Galerie den oberen Bereich der Kuppel; von hier aus haben Gäste eine bessere Übersicht über die gesamte Ausstellung und Projektionen auf dem Boden der Halle. In der Halle gibt es eine kleine Bühnenplattform für Vorträge, Vorführungen und Konzerte.

Darüber hinaus wäre es möglich, das Innere des SIEZ-Hügels zeitweise als Planetarium mit dem Sternenhimmel über der Schlei zu nutzen, als Projektionsfläche für Historisches oder Kunst in Bildern der Schlei oder in den grauen Wintermonaten als Lichthaus mit der Animation von Sommerbildern und Sonnenlicht.



## Brackwasserforschung

Im SIEZ sollen Forschung, Lehre und Vermittlung im Einklang sein. Angesichts der Komplexität und Problematik des Ökosystems Schlei besteht dringender Forschungsbedarf. Zugleich möchten die Menschen und Besucher der Region erfahren, wie es um das Sorgenkind Schlei bestellt ist.

Die Öffentlichkeit soll daher in die Forschung und Entwicklung der Schlei auf innovative Weise miteinbezogen werden. Eine kleine Gruppe von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern führt Forschungsprojekte in der Schlei durch. Ausgestattet ist die Gruppe mit Büro und Forschungslabor, Messgeräten und einem Forschungsboot. Besucher können mehrmals pro Woche zusammen mit dem Team des SIEZ vom Mehrzweckboot aus Messungen durchführen, Proben entnehmen und Feldexperimente überwachen. Aktuelle Daten von Messreihen aus der Schlei werden im Ausstellungsbereich im SIEZ-Hügel und der Internetseite dargestellt und erläutert. Die Wissenschaftler schreiben Veröffentlichungen, welche die Literatur zur Schlei und die Schleibibliothek laufend erweitern. Schüler/innen und Studierende können teilnehmen und Projektarbeiten sowie Abschlussarbeiten erstellen.

Ein weiteres Thema ist das der Nährstoffkreisläufe. Das ständige Monitoring der SIEZ-Brackwasserforschung fließt in die Darstellung der jeweiligen Nährstoffsituation ein. Wie kommen der Phosphor und das Nitrat zu welcher Zeit, wo und in welchen Frachten in die Schlei? Was bewirken die Nährstoffe dort? Welche Folgen hat das für die Ökologie? Was ist zu tun? Welche Erfolge können wir bisher verzeichnen? Hier können Informationen und Strategien verschiedener Einzugsgebiete mittels der leuchtenden Fußbodenkarte deutlich gemacht werden. Wo liegt Faulschlamm in welcher Mächtigkeit? Wo ist der Schleigrund bereits weitgehend intakt? Welche Unterwasservegetation findet man wo?

oben: Bernstein-Ringelwurm bei Weseby  
Mitte: Holz mit Brackwasserseepocken  
unten: Faulschlammprobenentnahme



## Die kleine Schleiforschung für Kinder und Jugendliche

Was blüht dort an der Schlei? Wie schmeckt das Löffelkraut? Was gibt es über Pflanzen zu lernen? Diese Fährte dort durchs Schilf sieht wie ein kleiner Tunnel aus. Flugs wird eine Spur mit Gips ausgegossen und später im SIEZ bestimmt. Das war ein Bisam. Mit Keschern, Lupen und Eimern versehen bahnt sich eine Gruppe den Weg an den Graben. Aha, das da ist ein Bachflohkrebs. Ist die Wasserqualität im Graben o.k.?



Besucher/innen können Libellen beobachten, Schmetterlinge bestimmen, den Adler vom Bussard unterscheiden, den Eisvogel heraushören und Wildgänse zählen in den Wiesen.

Kleine Bohrkerne des Faulschlammes zeigen graue Sandstreifen mit winzig kleinen Herzmuscheln. Was ist da geschehen? Wie leben Muscheln? Sind sie für die Schlei wichtig? Wie sieht ein Barsch aus? Und bei Sturm und Regen sind die Sagen und Geschichten von Pukern und Riesen an der Schlei ein Thema. Wie viele unterschiedliche Steine gibt es doch, die man auch schleifen kann! Nahtlos geht die „kleine Schleiforschung“ in die größere über.

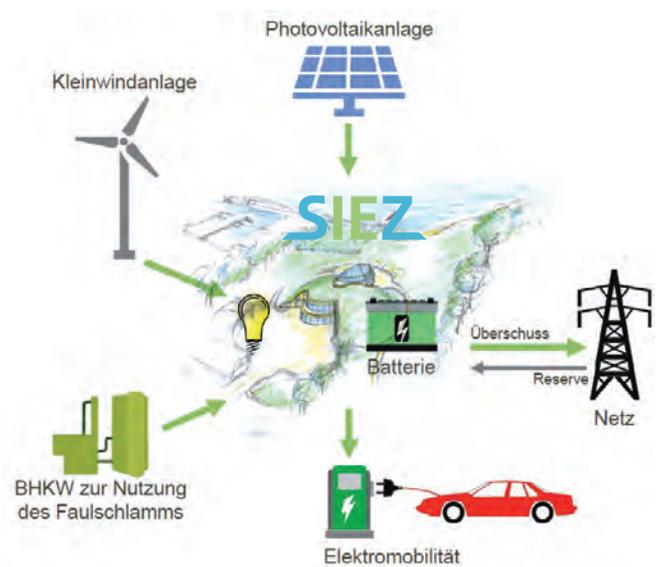
Das SIEZ beherbergt südlich der Ausstellungshalle eine „kleine Schleiforschung“ mit einem eigenen Raum und der Ausstattung für viele Experimente. Ein/e Erzieher/in und ein/e Praktikant/in bieten den Kindergärten und Schulen landesweit die Schlei als Thema an. Auch die Jugendherberge Borgwedel arbeitet an solch einem Konzept gerne mit. Finden keine Kurse statt, bietet die „kleine Schleiforschung“ eine offene Tür und Führungen und Experimente für die Besucherkinder des SIEZ an. Wenn bei den Jüngsten die Artenkenntnis und das Wissen um die Zusammenhänge an der Schlei wachsen, dann ist es um die Zukunft unserer Umwelt gut bestellt.





## Die Energieversorgung des SIEZ

Das SIEZ ist weitgehend energieautark. Das gläserne Gletscherhaus fängt Sonnenwärme ein. Der sommerliche Wärmeüberschuss wird in Latentwärmespeichern aufgenommen und in der kalten Jahreszeit wieder genutzt. Elektrizität wird mit Solarpanelen und kleinen Windkraftanlagen erzeugt und u. a. im Gleichstromnetz mit Speichern für LED-Beleuchtung und Lüftung genutzt. In einem Pionierprojekt wird im Betriebshof Faulschlamm aus der Schlei entsandet und getrocknet. Der Faulschlamm liefert mittels eines Blockheizkraftwerks Strom und Wärme. Wir wollen hier die klimafreundlichen Verwertungspotentiale demonstrieren und mit anderen erneuerbaren Energien kombinieren.





## *Der Außenbereich, die eiszeitliche Schlei*

Nachdem wir die Räumlichkeiten des Zentrums erkundet haben, führen wir Sie nun in den Außenbereich. Wir stehen auf der Caféterrasse, der Blick schweift bei ruhiger oder rauher See in die Ferne über die Große Breite bis zur schönen Landschaft Angeln gegenüber. Man erblickt schilfgesäumte Hügel und sandige Kliffs.

Gleich in der Nähe des gläsernen Gletschers des SIEZ-Hügels fließt Schmelzwasser über eine steinige und sandige Rinne in die Schlei. Dargestellt wird die Schlei als Modell. Skandinavische Steine, Sand und Mergel stellen die Situation zum Ende der Eiszeit mit Schmelzwasserflächen, Eis-

resten, Toteislöchern und Eisstauseen dar. Das eiszeitliche Landschaftsmodell bildet das Ambiente des Terrassencafés. Besucher/innen blicken vom Eiszeitspielplatz für die Kinder, neben dem Gletscher, ein paar tausend Jahre in die Zukunft auf die Segelboote der jungen Brackwasserförde Schlei. Das Modell lädt zur Erkundung der näheren Umgebung unter besonderem Blickwinkel ein.

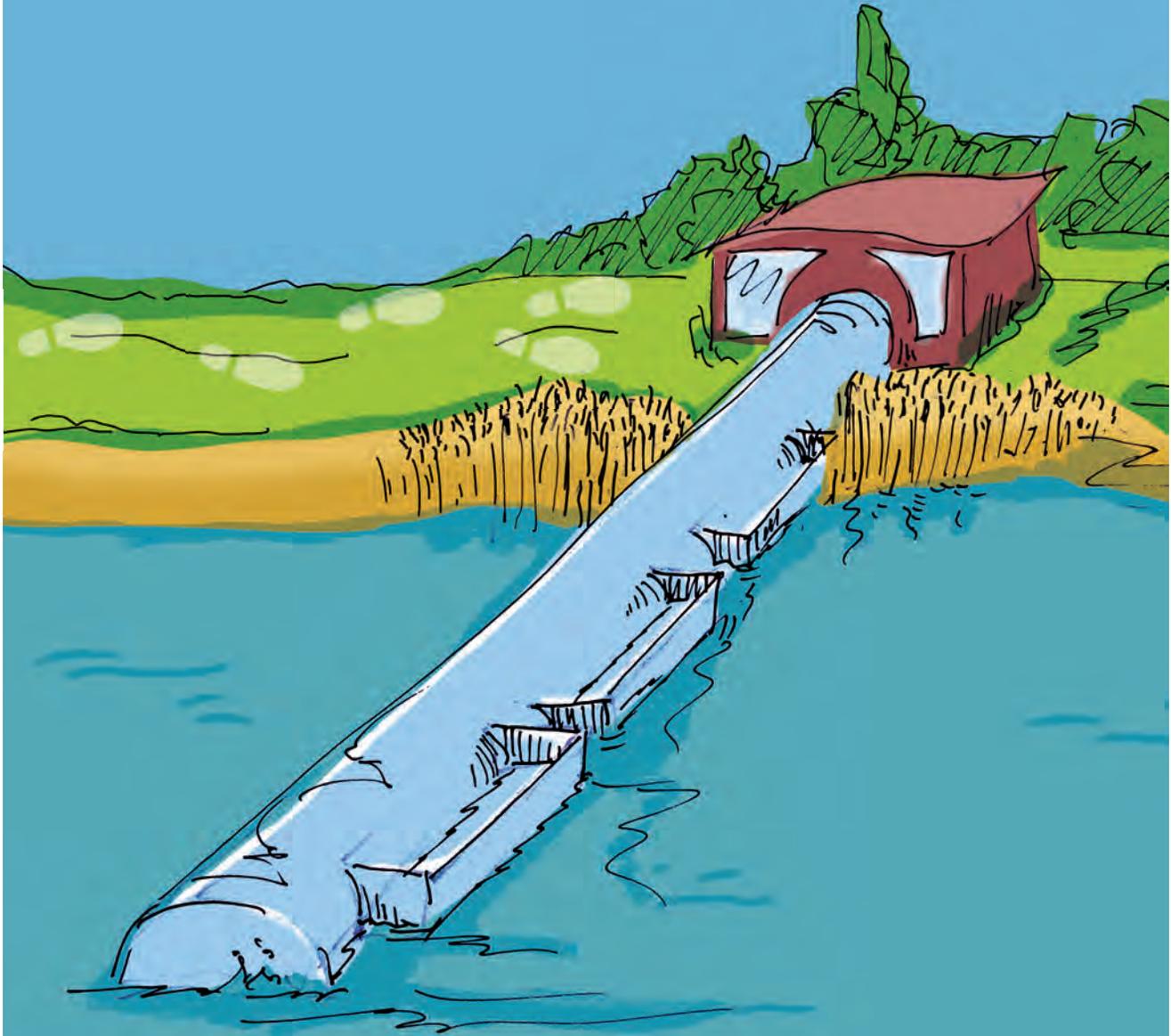


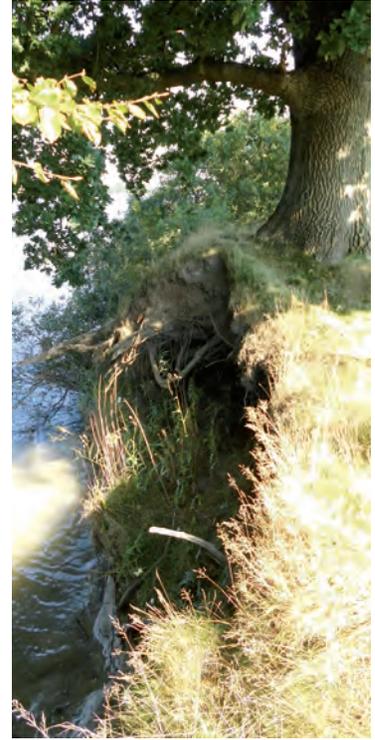
## Glastunnel in die Schlei

Folgen Sie uns zum Schleiufer, dort führt ein Glasgang schräg nach unten in die Schlei. Er endet im mannstiefen Wasser und führt den Besucher in eine Tiefe, die einen deutlichen Blick auf den Schleigrund bietet. Man erhält einen einzigartigen Eindruck von den Wellenbewegungen, der wechselnden Färbung und der sich ändernden Lichtverhältnisse des Wassers. Aus dem Tunnel heraus kann die Faulschlammoberfläche mit starken Taschenlampen beschienen werden; grüne und braune Ringelwürmer, rote Zuckmückenlarven und Gasblasen von ausgasendem Methan können betrachtet werden.

Schnecken bewandern von außen die Glasoberfläche des Tunnels, gelegentlich nähern sich Garnelen, Quallen, Fische und Wasservögel. Auf der anderen Seite des Tunnels haben wir mit einer weiteren Glaswand ein Brackwasser-aquarium geschaffen und für sichtiges Wasser gesorgt. Kammlaichkraut, Armleuchteralgen, Muscheln und Schleifische haben hier ihr Zuhause. Im Glastunnel vermitteln sich den Besuchern der aktuelle und der Sollzustand der Schlei.

In naher Zukunft sollen sich die Bilder der linken und rechten Glasgangwand angeglichen haben.





## Die schleipflanzenarche

Landseitig bietet die Schleiregion faszinierende Flora. Es gibt selten gewordene und anspruchsvolle Pflanzen, die unserer Zuwendung bedürfen und entlang der Schlei oftmals schwer einzusehen sind. Folgen Sie uns im ansteigenden Gelände des SIEZ vom Uferbereich bis auf den SIEZ-Hügel hinauf. Hier sind etliche natürliche Standorte für selten gewordene Schleipflanzen zu finden bzw. können erschaffen werden: Flohkraut, Geflecktes Knabenkraut, Kuckucksblume, Löffelkraut, Meeresstrandaster, Schlangenauch, selten ge-

wordene Gräser, Wasserfenchel, Wiesenraute und Wiesen-schaumkraut können hier gepflegt werden. Vermehrte Exemplare können an interessierte Paten abgegeben werden. Die Schleipflanzenarche als Garten der Schleibotanik vermittelt die Bedeutung der Artenvielfalt der Schleiregion.



## Schilflehrpfad

Schilf säumt die Ufer der Schlei und bildet ausgedehnte Röhrichte. Das Schilf liebt Brackwasser und macht sich mit zunehmendem Salzgehalt und Wellenschlag rar. Es dämpft die Wellenerosion und bietet einen ganz eigenen, geschützten Lebensraum. Ein Schilflehrpfad mit einer Hängebrücke er-



möglicht die Betrachtung aus verschiedenen Blickwinkeln. Dadurch erhalten Besucher einzigartige Einblicke in die Bedeutung der Schilfröhrichte als Lebensraum, für Nährstoffkreisläufe und als Baumaterial in Form von Reet sowie für den Küstenschutz.



## Faulschlamm

Auf einem abgelegenen Teil des Geländes im Betriebshof befindet sich das Faulschlammager. Es wird durch Faulschlammnahmen aus der Schlei stets aufgefüllt und dient neben der Entwicklung von Verfahren zur Aufbereitung für die energetische Nutzung auch der kleinen Schleiforschung als Rohstoff. Wie fühlt sich Faulschlamm an?



Wie riecht er? Was enthält er? Wie kann man die mineralischen Anteile von den organischen trennen? Was kann man daraus machen? Ein spannendes Feld der kleinen Schleiforschung mit vielen Angeboten zum Mitmachen und Ausprobieren tut sich auf.



## Naturparkpflegebetrieb

Uferschilf und Niederungsflächen, Wald und Wiesen, grünes Hügelland, orchideenbestandene Salzwiesen, Strände mit Salzmieren und Strandastern, Uferwege, Ackerland bis hin zur Schlei, so vielfältig ist die Schlei mit ihren Engen, Breiten und Nooren, ihren wenigen Inseln.

Manche Teile dieser Landschaftsvielfalt unterliegen einem unaufhaltbaren Wandel: Wenn sich die Bewirtschaftung der Salzwiesen nicht mehr lohnt, dann verschilfen sie. Kleine Partien höheren Grünlands verbuschen, wenn sich die Heuwerbung dort nicht mehr lohnt. Nicht immer ist die Beweidung ein Allheilmittel. Strände, Kliffs und Ufer gehen in die Sukzession. Manche Eigentümer verlieren das Interesse an „ihrem“ Schleistück.

Im SIEZ beheimatet könnte ein Naturparkpflegebetrieb sein, der seine Räume im Betriebshof hat und der mit den Flächeneigentümern über die Pflege der wertvollen Lebensraumtypen verhandelt. So könnten diese für die Allgemeinheit erhalten werden, letztlich zum Nutzen aller. Der Pflegebetrieb organisiert neue Hotspots an der Schlei und ist selber Hotspot, wenn er wie vor 100 Jahren Salzwiesenheu „macht“.

Mit zunehmender Sichttiefe der Schlei und besserer Wasserqualität nimmt das Kammlaichkraut zu. An den kleinen Gemeindebadestellen sollte es entfernt werden, nur dort. Wer aber macht das? – Der Naturparkpflegebetrieb mit dem Mehrzweckboot.

Solch ein großer Naturpark wie die Schlei mit all seinen Wasserflächen braucht einen Pflegebetrieb. Wir sollten die Vielfalt der Schlei neu denken – von einem gemeinsamen Zentrum aus – das sich in Zusammenarbeit mit den kommunalen Strukturen fürsorglich um die Schlei und ihre Ufer und Wege kümmert, mit Verstand, Herz und Hand. Wir sollten die Vielfalt der Schlei nicht nur als „glückliche Erben“ betrachten. Dieses Kultur- und Naturerbe kann uns unter den Händen zerrinnen, wenn wir uns seiner Pflege verweigern und wenn nicht alle Akteure gut zusammenarbeiten.

In Bezug auf die Landschaftsschönheit und Einzigartigkeit steht unserer Schleilandschaft in Schleswig-Holstein ein Spitzenplatz zu. Ein Naturparkpflegebetrieb hilft dabei enorm. Seinen Kosten steht ein erheblicher Mehrwert gegenüber. Für den regionalen Verband, der das SIEZ trägt, bedeutet der Naturparkpflegebetrieb eine neue gemeinschaftliche Handlungskompetenz.





## Die nähere Umgebung des SIEZ

Nachdem Sie das Zentrum innen und außen kennen gelernt haben, können Sie entlang empfohlener Wanderrouten die Umgebung erkunden. Gerade am Standort nahe Fleckeby an der Großen Breite bietet die Schlei eine erstaunliche geologische, landschaftliche und ökologische Vielfalt.

Das schleinahe Wegenetz in der näheren Umgebung des SIEZ reicht von der Borgwedeler Ziegelei, in der eiszeitliche Bändertone eines Gletscherstausees abgebaut und gebrannt wurden, über das herrschaftliche Louisenlund bis zu den lieblichen Orten Weseby und Missunde. Besucher/innen bewegen sich entlang der Uferzone der Schlei, bewundern eine der großen Schleiauen, ausgedehnte Schilfröhrichte, Salzwiesen, Strände, Strandseen, Kliffs, Nehrungshaken, Binnensanderdünen, Buchenwälder und Waldmoore. In den Holmer Wiesen findet auch ein Vogelbeobachtungsturm seinen Platz. In unmittelbarer Nachbarschaft landeinwärts fußläufig zu erreichen sind eiszeitliche Ablagerungen wie Grundmoränen, Randmoränen und Toteislöcher, die heute Seen mit klarem Wasser beherbergen. Mit mietbaren SIEZ-Tretbooten und Kanus können die Ufer der Großen Breite auch von der Wasserseite aus erkundet werden. Desweiteren gibt es in der Schlei und in nahegelegenen klaren Seen gute Bademöglichkeiten.

## Die gesamte Schlei

Das Schleiiinformations- und Erlebniszentrum hat stets die gesamte Schlei im Blick. Das SIEZ weist auf die Sehenswürdigkeiten und Treffpunkte der Region hin und bietet dafür Plattform und Forum. Alle Gemeinden im Einzugsgebiet können sich vorstellen und für sich werben. Nur wenn sich jede der unterschiedlichen Teilregionen im Schleizentrum wiederfindet, können wir das Bild der vielfältigen Schlei wiedergeben. Welch ein Erlebnis, mit dem Boot von Schleimünde nach Schleswig zu kommen. Oder mit dem Rad die Schleidörfer zu erkunden. Es ist die gesamte Schlei mit ihren Themen, die uns am Herzen liegt.



## Von der Vision zur Realität

Der Verein SIEZ e.V. hat die Vision eines Schleiinformations- und Erlebniszentrums entwickelt. Wir danken Ihnen für die Teilnahme an der Führung durch diese Vision. Wir haben damit an einem EU-Wettbewerb teilgenommen. Wir konnten noch keine Möglichkeit der Gegenfinanzierung durch die Region anbieten. Trotzdem haben das Umweltministerium und das Wirtschaftsministerium sowie die Investitionsbank uns nach Kiel zu einem Gespräch eingeladen und uns aufgefordert, an der Schlei für solch ein Projekt zu werben.

Wir wollen aus den Schönheiten, aus der Vielfalt, aus der Geschichte und der Liebe zur Schlei ein Tuch weben, in dem Fürsorge, Heimatliebe und Gewässerschutz sowie unsere touristische Zukunft sicher und untrennbar eingebettet sind.

Der Naturpark Schlei braucht eine intensive ökologische Fürsorge und Betreuung. Die Vielfalt braucht ein Zentrum. Zu diesem Zweck haben wir unseren Verein gegründet und das vorliegende Konzept entwickelt. Die Planung eines Schleiinformations und Erlebniszentrums (SIEZ) führt zu einer starken und handlungsfähigen Naturparkverwaltung. Wenn die Schleiregion weiter zusammenwächst, kann sie mit Hilfe des Landes und der EU solch eine Aufgabe stemmen.

Welche Kraft doch in der Vorstellung einer ökologisch gesunden Schlei steckt, welche Zukunft auch für den nachhaltigen, sanften Tourismus. Wir bitten Sie um Unterstützung für dieses Konzept, diese Vision.



## Impressum

V.i.S.d.P. Karl Walther und Hartmut Keinberger aus Kosel  
(Vorsitzende des SIEZ, gemeinnütziger e.V.)  
©SIEZ 2017

Wir danken allen Freunden, Förderern und Mitgliedern  
des Vereins für das Abdrucksrecht von Fotos und Skizzen.

Autoren:

**Dieter Beyer** Krankenpfleger

**Svend Duggen** Dr. rer. nat., Dipl. Geol. Geowissenschaftler und Gymnasiallehrer

**Helmut Herzog** Dipl.-Ing. Architekt und Musiker

**Hartmut Keinberger** Bürgermeister der Gemeinde Kosel; stellvertr. Amtsvorsteher des Amtes Schlei-Ostsee

**Ina Möbius** Erziehungswissenschaftlerin, StR an berufsbildenden Schulen

**Marten Seifert** Dipl.-Ing. Regenerative Energie

**Karl Walther** Dipl.-Ing.-agr. und Obstgärtner

Gestaltung:

Katharina Mahrt, GraFisch, Eckernförde

Auflage: 500 Stück, August 2017

Spendenkonto:

Förde Sparkasse

IBAN DE 06 2105 0170 1002 2678 78

**SIEZ**  
[www.schleiinfozentrum.de](http://www.schleiinfozentrum.de)