

Sachbericht zum Verwendungs nachweis
für das Forschungsvorhaben:
InnoVa – Innovative Valorisierung von Olivenmühlenabwasser

Teil I: Kurzbericht

Forschungsvorhaben:	InnoVa	-
	Innovative Olivenmühlenabwasser	Valorisierung von
Förderkennzeichen:	01DG20005	
Laufzeit des Vorhabens:	01.06.2020 - 31.05.2022	
Kostenneutrale Verlängerung:	31.12.2022	
Gefördert von:	Bundesministerium für Bildung und Forschung	
Betreut von:	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. PT	
Durchführende Institution:	Technische Universität Berlin, Fakultät III Institut für Technischen Umweltschutz Fachgebiet für Umweltverfahrenstechnik Prof. Dr.-Ing. Sven-Uwe Geißen	
Bearbeiter:	MSc. Jonas Pluschke	

GEFÖRDERT VOM



Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01DG20005 gefördert. Die Verantwortung für die Inhalte dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Olivenmühlenabwasser (OMW) ist ein seit Jahrtausenden entstehendes Nebenprodukt der Olivenölherstellung. Durch die Intensivierung des Anbaus haben in den letzten Jahrzehnten die resultierenden Olivenmühlenabwassermengen die natürlichen Kapazitäten in den Olivenanbaustätten überschritten. Dies führt zu einer unkontrollierten Freisetzung von Schadstoffen und kann schwerwiegende Auswirkungen auf die Umwelt haben. Dies kann das Erodieren von Anbauflächen, die Emissionen von Treibhausgasen und eine Verschlechterung der Gewässer- und Grundwasserqualität zur Folge haben.

Um die Umweltwirkungen zu reduzieren und die Anbaugebiete auch langfristig ertragreich zu erhalten, wird seit den neunziger Jahren intensiv an Methoden geforscht, um das Abwasser ökologisch unbedenklich zu transformieren, und möglichst einer mehrwertschaffenden Verwertung zuzuführen. Die ersten Patente zur Behandlung von OMW konzentrierten sich auf die Teil-Oxidation von problematischen, bioakkumulierenden Polyphenolen, mit anschließender klassischen Abwasserbehandlung. Mit steigender Leistungsfähigkeit von Trenn- und Extraktionstechnologien bei gleichzeitig wachsendem Markt für natürliche Antioxidantien, verschiebt sich der Schwerpunkt der Behandlungsmaßnahmen auf die Rückgewinnung von wertvollen Biomolekülen.

Der weiterentwickelte InnoVa-Ansatz verfolgt ein holistisches Verwertungskonzept des Agrar-Abwassers. Dabei sollen biogene Phytomoleküle selektiv abgetrennt und aufbereitet werden, um sie einer kommerziellen Nutzung als Antioxidationsmittel zuführen zu können. Der Großteil der verbleibenden Organik sowie die Nährstoffe sollen über eine anaerobe Vergärung verwertet werden. Hierbei entsteht energiereiches Biogas, welches fossile Energieträger substituieren kann. Außerdem wird die Sauerstoffzehrung und Eutrophierung in natürlichen Gewässern sowie der Stickstoffeintrag in das Grundwasser reduziert, da die Gärreste durch gezielten Einsatz in der Landwirtschaft Wasser- und Nährstoffkreisläufe schließen.

Das Projekt wurde am 01. Juni 2020 gestartet, kurz nach den ersten scharfen Maßnahmen zur Eindämmung der COVID-19-Pandemie. Trotz der schwierigen Rahmenbedingungen aufgrund der Pandemie wurde die Zusammenarbeit mit dem tunesischen Partner konsequent weitergeführt. Technische Detailfragen, die durch einen Besuch einer deutschen Delegation am Standort in Tunesien geklärt worden wären, mussten online durchgeführt werden, was deutlich langwieriger und komplizierter war.

Die Kooperation mit dem Centre de Biotechnology de Sfax war trotz der sehr komplizierten Rahmenbedingungen, mit der Corona-Krise und dem erheblichen Inflationsdruck in Tunesien, vertrauensvoll und erfolgreich. Die Olivenernte in der Saison 21/22 sowie 22/23 fiel deutlich geringer aus als im Durchschnitt, was unter anderem auf einen Mangel an Regen zurückgeführt wurde. Durch den Wassermangel hatten die Oliven einen geringeren Wassergehalt, was zu Problemen in der Ölextraktion und -für das InnoVa-Verfahren sehr negativ- zu stark erhöhten Feststoff-Konzentrationen im Substrat geführt hat.

Ende 2020 wurde die gesamte Wassersparte des Adsorptionsmittelherstellers, welches das Adsorbens für das InnoVa-Verfahren geliefert hat, komplett eingestellt. Dadurch musste kurzfristig ein Ersatz für das Material gefunden werden, was zusätzliche Zeit und Ressourcen erforderte. Mit einem ausführlichen Screening von kommerziellen und neuartigen Adsorptionsmitteln wurde Mitte 2021 ein Ersatz gefunden.

Im April 2021 wurde das gesamte IT-System der TU Berlin durch einen Hackerangriff stillgelegt, womit ein Ausfall der IT-Dienste für alle Angestellten und Studierenden der TU Berlin für mehrere Monate verbunden war. Das betraf auch alle projektverwaltungstechnischen Anwendungen und verzögerte den Fortschritt des Projekts.

Lieferengpässe bei essenziellen Bauteilen, vor allem Mess-, Steuerungs-, Regelungstechnik und Systemautomatisierung der Pilotanlage, verzögerte den Bau der Pilotanlage bis ins Jahr 2022.

Die Zusammenarbeit auf dem Gebiet der anaeroben Vergärung hat sich als sehr gut herausgestellt. Nach der Durchführung mehrerer Biomethanpotentialbestimmungen, mit vielversprechenden Ergebnissen, wurde der Betrieb eines 300L Festbettreaktors über 120 Tage erprobt. Hierbei wurden etwa 3 Tonnen mit dem InnoVa-Verfahren behandeltes OMW als Feed verwendet. Es wurde ein prozesstypisches Mischungsverhältnis zwischen Membrankonzentrat, Sediment und Schwimmschicht aus dem Vorlagetank und entpolyphenolisiertem OMW gewählt. Es soll eine Veröffentlichung zu dem Thema im August 2023 erscheinen, da es ohne die Offenlegung von marktrelevanten Prozessgeheimnissen möglich ist.

Die Pilotanlage ist in Betrieb und arbeitet problemlos. Die Integration in das Forschungszentrum in Sfax ist gelungen. Wertvolle Erfahrungen für die Integration an einem Betriebsstandort wurden gesammelt und festgehalten. Hierfür wurden optimierte Inbetriebnahme-, Wartungs- wie Betriebsprotokolle angefertigt. Mögliche Optimierungen für eine potenzielle weitere und größere Anlage wurden in Abstimmung mit Anwendern und dem Anlagenbauer Delta Umwelttechnik zusammengetragen.

Um die Pilotanlage auch für die Ausbildung zu nutzen, wurden mehrere Besuche der Anlage mit Studierenden des Fachgebiets organisiert. Eine Gruppe von drei Studentinnen betreute die Anlage für mehrere Monate in Sfax, um Daten für ihre Masterarbeiten zu ermitteln. Weiterhin wurden zwei Reisen mit Studierenden im Rahmen von DAAD-Aufenthalten ermöglicht, um Eindrücke von der Technologie unter Praxisbedingungen zu vermitteln.

Die Optimierung der Prozessparameter, eine der zentralen Ziele des Forschungsvorhabens, war sehr aufwendig. Die gesamte Analytik musste anschließend an jeden Versuchsdurchlauf in Laboren durchgeführt werden. Daher standen die Ergebnisse oftmals erst mit Verzögerung zur Verfügung.

Das Projekt wird auch in der Lehre des Fachgebiets thematisiert, um die Herausforderungen des Scale-ups zu beleuchten, und die Komplexität von selektiven Trennaufgaben aufzuzeigen. Das Verwenden von Ultrafiltrationsanlagen zur Behandlung dieser hochbelasteten organischen Substrate ist unter realen Betriebsbedingungen eine große Herausforderung, die exemplarisch in den Lehrveranstaltungen vorgestellt wird.

Da die Markteintrittshürden für ein aus Abwasser hergestellten, neuartigen Produkt sehr hoch sind und folglich keine Nachfrage vorhanden ist, soll in einem Folgeprojekt weiter an Produktanwendungen für die Polyphenol-Konzentrate gearbeitet werden. Es sollen unterschiedliche Aufbereitungsansätze sowie Prozessoptimierungen für verschiedene Anwendungsfälle untersucht werden. Hierfür ist geplant zusammen mit einem KMU für angewandte Chemie die Entwicklung zu beginnen.

Mit der Pilotanlage konnte die Konzentratqualität aus den Laborversuchen reproduziert werden. Die Hydroxytyrosol-Massenanteile von etwa 20% sind im Bereich kommerzieller Produkte, die auf online-Portalen für 100-900 €/kg angeboten werden. Schwankungen in der Produktqualität waren teilweise erheblich und sind auf natürliche Schwankungen im Substrat, wie auch bestimmter Prozessparameter zurückzuführen. Im Durchschnitt wurden aus 1t Rohabwasser unter Einsatz von 200 kWh elektrischer Energie und 80 L reinen Ethanols (teilweise recycelt), 12 L Polyphenolkonzentrat und 850 L Biogassubstrat produziert. Durch anaerobe Vergärung können aus dem Gemisch der Reststoffe etwa 22 Nm³ Biogas mit einem Methangehalt von etwa 65% generiert werden. Daraus können mit einem Blockheizkraftwerk jeweils ca. 18 kWh elektrische und thermische Energie generiert werden.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis – Teil I: Kurzbericht

Mehrere Forschungsgruppen beschäftigen sich mit der Verwertung von Olivenmühlenabwasser. Eine erfolgreich an der marktorientierten Erschließung der OMW-Rohstoffe arbeitendes Start-Up ist gaiatech, ein Spin-off eines europäischen Forschungsvorhabens, welches an einem vergleichbaren Prozess forscht. Es wurden zwei Treffen mit der Geschäftsleitung des Unternehmens organisiert, um mögliche gemeinsame Interessen und Herausforderungen zu diskutieren.

Mit dem Centre de Biotechnologie de Sfax wird das Fachgebiet Umweltverfahrenstechnik weiter kooperieren. Ende Mai 2023 wurde, zusammen mit einem Industriepartner aus der Lebensmittelbranche, ein Projektantrag, im Rahmen des TUNGER 2+2 Förderrahmens eingereicht

Sachbericht zum Verwendungsnachweis
für das Forschungsvorhaben:
InnoVa – Innovative Valorisierung von Olivenmühlenabwasser

Teil II: Eingehende Darstellung

Forschungsvorhaben:	InnoVa - Innovative Valorisierung von Olivenmühlenabwasser
Förderkennzeichen:	01DG20005
Laufzeit des Vorhabens:	31.05.2022
Kostenneutrale Verlängerung:	01.06.2020 - 31.12.2022
Gefördert von:	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Betreut von:	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Durchführende Institution:	Technische Universität Berlin, Fakultät III Institut für Technischen Umweltschutz Fachgebiet für Umweltverfahrenstechnik Prof. Dr.-Ing. Sven-Uwe Geißen
Bearbeiter:	MSc. Jonas Pluschke

GEFÖRDERT VOM



Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01DG20005 gefördert. Die Verantwortung für die Inhalte dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Das Projekt InnoVa wurde im Rahmen des German-African Innovation Incentive Award, in Zusammenarbeit zwischen Prof. Sami Sayadi und Prof. Sven Geißen von Juni 2020 bis Dezember 2022 durchgeführt. Es wurde ein konkretes Entwicklungsziel verfolgt, welches auf der vollwertigen Valorisierung und Detoxifizierung von Olivenmühlenabwasser beruht. Dafür wurden Forschungsergebnisse und Erfahrungen aus mehreren Jahren Forschung mit dem Substrat verwertet, um eine hochskalierte Pilotanlage zu konzipieren und in Tunesien zu betreiben. Projektstart war Juli 2020, nach einer kostenneutralen Verlängerung, wurde das Projekt im Dezember 2022 abgeschlossen. Das innovative Konzept zur nachhaltigen Abwasserbehandlung mit Wertstoffrückgewinnung in der Olivenölindustrie wurde in der Projektlaufzeit weiterentwickelt, ausgelegt, gebaut und unter realen Bedingungen in Tunesien erprobt. Das Verfahren wurde in dieser Zeit von dem Technology Readiness Level (TRL) 4 auf TRL 6 gehoben. Der Zeitplan war durch die COVID-19 Pandemie, einem Hackerangriff auf die IT-Systeme der TU Berlin, Lieferengpässe in den Jahren 2020-2022 für Anlagenkomponenten und weiteren Faktoren nicht haltbar. Die Anlage wurde im Februar 2022 exportiert (s. Abbildung 1b) und konnte im Mai 2022 am CBS in Sfax in Betrieb genommen werden. Durch die kostenneutrale Verlängerung bis Ende 2022 konnten alle Arbeitspakete bearbeitet werden.

Die Vergabe des Baus der Forschungsanlage wurde konform mit den vergaberechtlichen Anforderungen an -mit bundesmitteln geförderten- Forschungsvorhaben durchgeführt. Es wurde eine im Vergaberecht definierte Ausnahme von einer beschränkten öffentlichen Ausschreibung für Forschungsvorhaben in Anspruch genommen und eine Verhandlungsvergabe auf Basis von drei eingeholten Angeboten durchgeführt. Der Auftrag wurde an Delta-Umwelt-Technik GmbH in Teltow vergeben, und im Oktober 2020 durch die Vergabestelle der TU Berlin genehmigt.

Die Auslegung, Konstruktion und Bau der Pilot-Anlage wurden in Abstimmung mit dem CBS und im Austausch mit den IngenieurlInnen von Delta Umwelt-Technik vorgenommen. (AP 2.1) Die Anlage wurde vollständig in einem 20 Fuß High cube Standardschiffscontainer installiert. Nach der finalen Montage in Teltow wurden über vier Wochen hinweg alle Funktionalitäten des Systems mit Wasser geprüft. (AP 2.2) Hiermit wurde der Meilenstein 2 erfüllt, jedoch war das Gesamtsystem nicht nach 10, sondern, bedingt durch bereits erwähnte Gründe, erst nach 19 Monaten verfügbar.

Der gesamte explosionsgeschützte Bereich der Ethanolrückgewinnung wurde in einem zweiten kleineren Container installiert, der in dem Schiffscontainer verladen wurde (s. Abb 1a). Bei der Installation der Containeranlage in Sfax, wurde der ex-geschützte Container neben dem Hauptcontainer und der Rotationsverdampfer zur Lösemittelrückgewinnung in einer geschützten Technikums-Halle aufgestellt. Im Herbst 2022 wurde vom CBS zusätzlich ein Sonnen- und Regenschutz über das gesamte Anlagenareal installiert (s. Abb. 1c).

Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Großteil des Gesamtbudgets wurde für den Bau, Transport und Inbetriebnahme der Pilotanlage veranschlagt und verwendet (64.982,87 € statt geplanten 54.909,06 € = 43% des Budgets)

Die Gesamtkosten der Anlage sind über die Projektlaufzeit um etwa 25% gestiegen, was teilweise durch Mittelumwidmung, teilweise durch Rücklagen des Fachgebiets ausgeglichen wurde. Die Angebotsnachträge von Delta Umwelt-Technik GmbH die erforderlich wurden für eine Zuwendungsbescheid-konforme Umsetzung des Vorhabens beinhalteten Folgendes:

- Isolierung und Verkleidung des Containers, um die Optik des Demonstrators zu verbessern und die Gefahr von Überhitzungen durch die Klimabedingungen in Sfax zu reduzieren
- Neukauf eines Lösemittelrückgewinnungssystems, da umfangreiche Reparaturarbeiten an dem bestehenden System am CBS notwendig gewesen wären
- Transportkostenanstieg, durch einen Versicherungsfall im Hafen von Tunis, bei dem ein Gabelstapler den Container an der Seite aufgeschnitten hat, kam es zu kostspieligen Verzögerungen, die schlussendlich nicht von der Versicherung eingefordert werden konnten

Die Personalkosten waren sehr knapp bemessen, und wurden für eine 50% Stelle eines wissenschaftlichen Mitarbeiters über 10 Monate 16 Monate verwendet. (46.137,45 € statt 49.009,11 €)

Zudem wurde zu Beginn des Projektes eine große Menge an Adsorptionsmittel von Blücher Fa. Gekauft, da wir die Nachricht erhalten hatten, dass die Produktion eingestellt werden würde. (1.887,09 €)

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Da das Projekt eine einmalige Gelegenheit war das InnoVa-Verfahren hochzuskalieren und in Richtung Kommerzialisierung weiterzuentwickeln, war die absolute Priorität des Projektes der Bau einer Pilotanlage die belastbar und reproduzierbar verwertbare Ergebnisse produziert.

Die teilweise sehr langen Aufenthalte in Tunesien waren nötig, um das Personal vor Ort zu schulen und Optimierungen an der Verfahrenstechnik vorzunehmen. Das Verfahren ist zwar weitestgehend automatisiert, jedoch hängt die Qualität der erzielten Ergebnisse maßgeblich von den Betreibern der Anlage ab, daher musste ein Schwerpunkt auf deren Ausbildung gelegt werden.

- Nachrüsten von Sicherheitstechnik (Notfallventile, Druckluftventile...) für den explosionsgeschützten Bereich, aufgrund von erhöhten Sicherheitsvorkehrungen für den Ausbildungsbetrieb in Tunesien



Abbildung 1: (a) Ex-geschützter Container; (b) für den Transport nach Tunesien verladen auf einem Sattelschlepper (c) Installation beider Container mit fest montiertem Sonnen- und Regenschutz am CBS in Sfax, Tunesien

Mehrere juristische Herausforderungen stellten sich im Verlauf des Projektes:

- Der Export von Dual-Use-items in das nicht europäische Ausland
- Die arbeits-, umwelt-, und explosions-schutzrechtlich konforme Installation, Montage und Betrieb der Anlage in Tunesien
 - o Warnzeichen und Verbotsschilder (s. Abb. 2b)
 - o Feuerschutzmaßnahmen (z.B. Feuerlöscher, Fluchtwege...)

- Einleitung in das öffentliche Kanalisationsnetz
- Die Übertragung der Betriebsverantwortung auf den Betreiber in Tunesien
- Die Beschaffung und Lagerung von reinem Ethanol in Tunesien in ausreichendem Umfang (>100L), inklusive des Einkaufs von zugelassenem, unproblematischem Vergällungsmittel.



Abbildung 2: (a) Kabel- und Rohrdurchführungen am Container; (b) Gefäß für die Ethanol-Lagerung, (c) kalte Inbetriebnahme der Membrananlage mit Wasser; (d) Gesamtsystem mit 2x6 m³ Vorlagetanks für OMW, Hauptsystem mit allen Anschlüssen (Starkstrom, Druckluft, Deionisiertes Wasser, Leitungswasser, Abwasser), das Exgeschützte System und Vorlage für die anaerobe Stufe, sowie eine neue Erweiterung: ein Absetzbecken für eine optimierte Vorbehandlung des OMW

Über den Zugang der Rechtsabteilung der TU Berlin auf die Elan2k-Plattform beim Bundesamt für Ausfuhrkontrolle wurde für die als Dual-use-items gelisteten Bauteile (Querstrommembranelemente, SPS-Steuerungseinheiten, Adsorptionsmittel und Exgeschützte Membranpumpen) eine Befreiung von einer Exportgenehmigung beantragt.

Diese wurde, nach mehreren technischen Rückfragen, im Februar 2022 gewährt woraufhin der deutsche Zoll den Export freigab.

Um eine rechtssichere Übergabe der Anlage durchführen zu können, alle arbeitssicherheitstechnischen Anforderungen zu erfüllen, hohe Betriebsstabilität und langen wartungsarmen Betrieb zu ermöglichen, mussten eine Vielzahl von Dokumenten in zwei oder drei Sprachen angefertigt werden:

- Explosionsschutzdokumente
- Inbetriebnahme-/Wartungsprotokolle
- Bedienungsanleitung und Bedienungsinterface an der Steuerung
- Abrechnungen



Abbildung 3: (a) 2023 sehr später Beginn der Erntesaison, bei dem ersten Besuch bei einer Partnerolivenmühle Anfang November gab es noch keine Bio-Oliven, (b) Probleme beim Transport einer ersten OMW Charge: ein sonnengebleichter IBC hält die Last des Transports nicht stand

- Zolldokumente (Export und Import)

An einer weitergehenden Optimierung und Bewertung des InnoVa-Verfahrens wurde über die gesamte Projektlaufzeit gearbeitet. Hierfür wurden Gespräche mit einer Vielzahl von WissenschaftlerInnen, BetreiberInnen von Olivenfarmen, Olivenmühlen und Verdunstungsbecken, sowie AnlagenbauerInnen und VerfahrenstechnikerInnen geführt. Da das InnoVa Verfahren eine Kaskade von Verfahrensschritten kombiniert, wurden Fachleute aus einer Vielzahl unterschiedlicher Themengebiete befragt, hauptsächlich jedoch mechanische Vorbehandlung, keramische Membran-Ultrafiltration, Adsorption, Desorption, thermische Lösemittelrückgewinnung, Mess-, Regelungs-, Steuerungstechnik uvm. Viele arbeitsprozesstechnische, logistische und organisatorische Optimierungen, wie auch in der Prozessführung und Hardwareeinstellung wurden vorgeschlagen, und teilweise – im Rahmen des Budgets und der verfügbaren Zeit nach der Inbetriebnahme im Mai 2022- in das bestehende System integriert. Teilweise basierend auf Erkenntnissen aus dem Labor, teilweise auf Beobachtungen aus dem Betrieb. Dies betrifft konkret die Membranbetriebsweise, Geschwindigkeit in der Adsorptionskolonne, Lagerungskonzept für das OMW, Adsorptionsmittelregeneration, Membranreinigung uvm.

Die vier Hauptverfahrensschritte (Membranfiltration, Adsorption/Desorption, Konzentrataufbereitung und anaerobe Vergärung) wurde kontinuierlich über die gesamte

Projektaufzeit im Labor begleitend untersucht und optimiert. Ebenso wurden Daten über die Beschaffenheit des Olivenmühlenabwasser in der Region Sfax gesammelt und dokumentiert. (AP 1) Es wurden, für das Verfahren, zentrale Parameter wie Organik- und Wasseranteil, Polyphenol- und Hydroxytyrosol-Konzentration, pH und Leitfähigkeit dokumentiert. Hierdurch lassen sich Trends und der Einfluss von Umwelteinflüssen abschätzen. Durch das Abgleichen mit Polyphenol-Konzentrat-Qualitätsmerkmalen, lassen sich geeignete Zielwerte für die relevanten Parameter für Olivenmühlenabwasser für das InnoVa-Verfahren ableiten. (AP1.1) Der Schwerpunkt wurde von hohen Hydroxytyrosol zu hohen Polyphenol-Konzentrationen gelegt. Außerdem wurde auf möglichst geringe Feststoffkonzentrationen geachtet, da diese innerhalb einer Saison und zwischen unterschiedlichen Mühlen um 1,5 Größenordnungen schwanken und schnell verfahrenstechnische Schwierigkeiten bereiten.

Die OMW-Verfügbarkeit und Beschaffenheit war über die Projektaufzeit stark variabel. Zwischen 2015 und 2020 wurden pro Saison in Tunesien im Schnitt 257.000t Oliven geerntet. 2021/22 waren es 240.000t und 2022/23 waren es knapp 200.000t. Im Raum Sfax sank die Ernte 22/23 um 45% auf nur 70.000t. Unter anderem wird anhaltende Dürre verantwortlich gemacht.¹ In der Master Abschlussarbeit von Massoumeh Khorshidipajji sind die OMW-Proben und Trends charakterisiert. Die Zusammenarbeit mit den Verdunstungsbecken von Agareb wurde eingestellt, da erhebliche Mengen von andersartigem Abwasser in die Verdunstungsbecken eingeleitet wurden, keine Einigung zu separaten Verdunstungsbecken mit rein biologischen OMW erzielt wurde und unklar war was für Kontaminationen in OMW-Proben zu erwarten sind (s. Abb. 4a). Die Agareb-OMW-Proben waren bisher hervorragend für das InnoVa-Verfahren geeignet, da das OMW durchgereift war, d.h. die makromolekularen Polyphenole waren in die kommerziell interessanteren Monomere zerfallen. Außerdem waren durch die hohen Standzeiten von

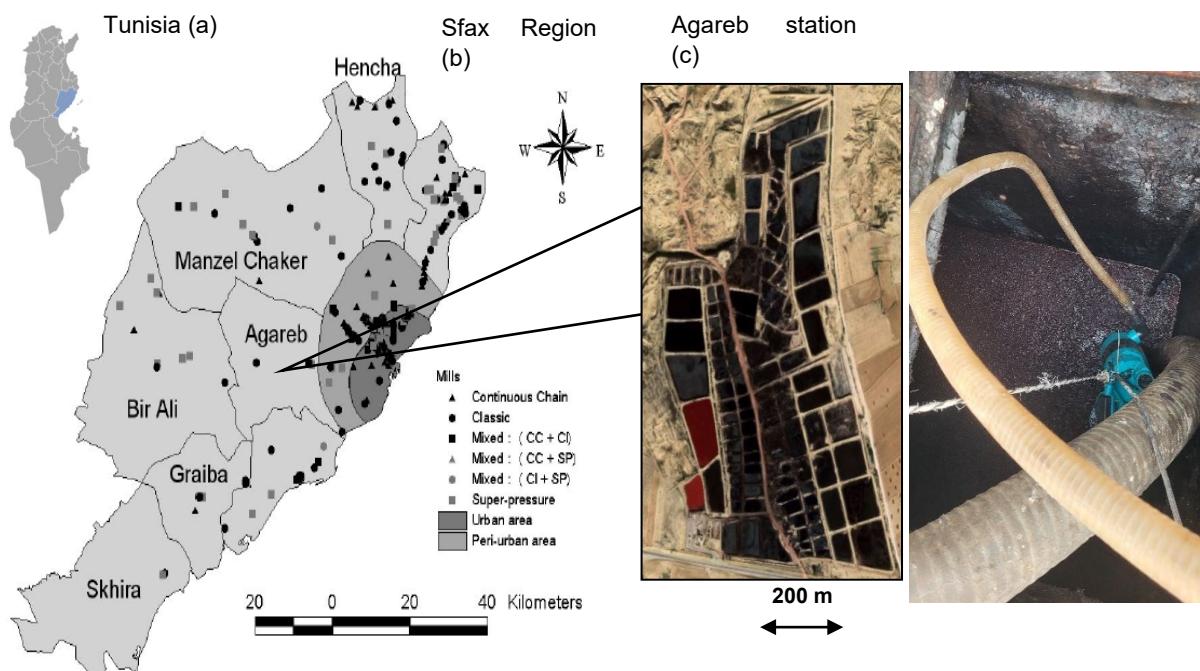


Abbildung 4: (a) Olivenmühlen in der Region Sfax inklusive Verdunstungssystem in Agareb; (b) Probenahme aus einem OMW-Speicher in einer Partner-Olivenmühle

mehreren Wochen und Monaten die Trüb- und Schwebstoffkonzentrationen sehr gering.

¹ <https://www.oliveoiltimes.com/production/tunisian-olive-oil-production-falls-to-23-percent-below-five-year-average/112431>

Die Lagerung einer adäquaten Menge Substrat ist eine Herausforderung. Es wurden zwei 6m³ Stahltanks als Vorlagebehälter vom CBS zur Verfügung gestellt (s. Abbildung 2d). Diese soll in Zukunft mit einer Frischhaltebelüftung erweitert werden, um anaerobe Lagerungsbedingungen zu vermeiden, aber auch keine Antioxidantien auszublasen oder zu oxidieren.

Die Daten-Logging-Software wurde nach der Inbetriebnahme nachgerüstet (AP 3.2), ein remote-controlling war durch das begrenzte Budget nicht möglich. Mittels SD-Karten können XLMS-Dateien extrahiert werden, in denen die Messwerte aller Messgeräte sowie die Position verschiedener Ventile erfasst wurden. Die Definition von angemessenen Speicherparameter, Zeitintervalle und Einheiten ist noch nicht finalisiert. Die Datenmengen müssen handhabbar bleiben und trotzdem eine hohe Dichte an Datenpunkten liefern.



Abbildung 5: (a) Nachtschicht November 2022, (b) Human-machine-interface Beispielaufnahme, (c) gereinigte Anlage für Einlagerung

Die Automatisierung des Verfahrens ist eine große Herausforderung, da durch das begrenzte Budget viele verfahrenstechnisch wichtige Betriebsparameter nicht kontinuierlich gemessen und anschließend verarbeitet werden konnten. Ebenso gab es keine programmierbaren Aktoren, wie beispielsweise Frequenzumrichter oder Druckhalteventile, um das gesamte Verfahren zu automatisieren. Die Bedienung der Anlage ist somit auf die Einschätzung und das Eingreifen der betreibenden Person angewiesen. Da viele Einstellungen über Zeitschaltuhren umgesetzt wurden, deren Optimum empirisch erst noch zu bestimmen war und auf Basis von theoretischen Überlegungen ausgelegt waren, musste der Prozess über die gesamte Einfahrphase sehr intensiv betreut werden. Da eine Automatisierung des gesamten Prozesses nicht möglich war, wurde das Verfahren 12h pro Betriebstag gefahren. Abbildung 9a zeigt eine „Nachschicht“ in der Anlage.

Die mechanische Vorbehandlung im InnoVa-Verfahren besteht aus einer Kombination aus Sedimentation und Filtration. Aufgrund von auffällig trockenen Jahren, waren in den Erntezeiträumen 2021 und 2022 erhöhte Organikkonzentrationen im OMW messbar. Durch die trockenen Oliven hatten die Betreiber der Mühlen sehr mit Verstopfungen und Überhitzung der Malaxationsmaschinen und Zentrifugen zu kämpfen und die optimalen

Betriebseinstellungen in den Mühlen wurden lange nicht gefunden. Hierdurch verschlechterte sich die Trennleistungen sowohl hinsichtlich des Öls als auch der Feststoffe. Dadurch wurde im drei Phasen Olivenölherstellungsverfahren sowohl erhöhte Organik-, Öl- und Feststoffkonzentrationen in der wässrigen Phase gemessen. Verschiedene Maßnahmen wurden erprobt um auf die erhöhten oTS-, TSS-Werte wie Fettanteile zu reagieren.

- Sedimentation: sehr hohe Standzeiten von mehreren Tagen mit anschließender Abtrennung einer Schwimm- und einer Sinkschicht, um eine wirksame Abtrennung der Schwebstoffe, sowie der Fette zu erreichen
- Flockung: Zugabe von Flockungsmittel (Eisenchlorid) zur Herstellung von stabilen Flocken mit verbesserten Sedimentationseigenschaften. Abbildung 5a zeigt den Effekt von Flockungsmittel. Vorerst wurde auf den Einsatz von weiteren chemischen Zusätzen zur Verbesserung der Sedimentation und Eindickung des Schlammes verzichtet, um Kontaminationen des Polyphenol-Konzentrates zu vermeiden.
- Siebung: Um die Abtrennung von Partikeln >2mm bereits vor dem Bogensieb zu gewährleisten, wurde ein Ansaugkorb mit Edelstahlgewebe an dem Ansaugschlauch befestigt. Anschließend wurde sowohl der Betrieb mit 150 und 300 µm Bogensieben getestet. Der Austrag von Feststoffen wurde qualitativ beobachtet und

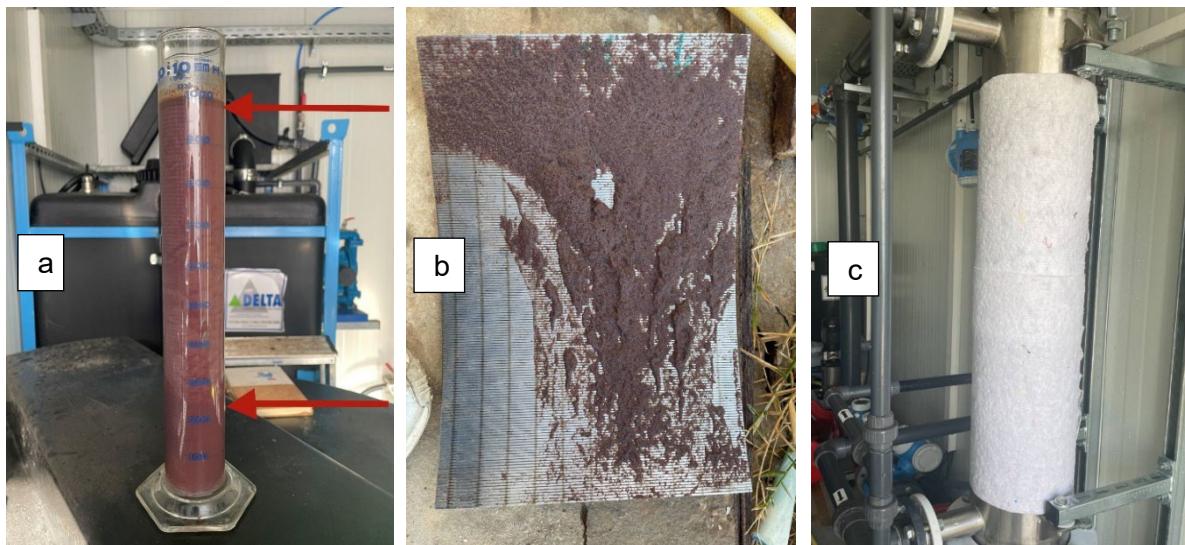


Abbildung 6: (a) Flockungsversuche mit Eisen-(III)-Chlorid mit erkennbaren Phasen; (b) Feststoffrückstände auf dem Bogensieb nach kurzer Betriebsdauer; (c) Membranmodul umwickelt mit nassen Tüchern zur Kühlung

Überströmungsgeschwindigkeiten angepasst. (s. Abb. 5b)

Der Permeatvolumenstrom war jedoch unter den Auslegungswerten, die auf Laborergebnissen mit einer gleichartigen keramischen Membran und OMW beruhen, was auf mehrere Faktoren zurückzuführen ist, vorrangig jedoch auf den sehr hohen Trockensubstanzgehalt im OMW in der Betriebsperiode. Durch Anpassungen im Betrieb, sowie der Rückspülprogramme und Reinigungsintervallen wurde die Permeatausbeute verbessert.

Betriebsparameteroptimierung bezüglich der Rückspülintervalle, -drücke, und -dauer wurden bei jedem Durchgang durchgeführt. Die in den Feed-Kreislauf durch das Rückspülen zurückgeführte Permeatmenge muss der erhöhter Permeatproduktion gegenübergestellt werden. Technisch war Rückspülen erst nach der Produktion der ersten 115L Permeat möglich.

Das festinstallierte Cleaning in place-System (CIP) wurde vor jeder mehrtägigen Betriebspause verwendet, um ein Reinigungsprogramm mit hochkonzentrierter Natronlauge bei etwa 45°C durchzuführen. Dadurch sollte das Bio-Fouling im Membranmodul und den Rohrsystemen kontrolliert werden. Die Natronlauge wurde bei geschlossener Permeateleitung zirkuliert, anschließend durch die Membranen gefördert und abschließend wieder zurück auf die Konzentratseite gepresst.

Die hohe Viskosität des OMW ab etwa 3% TS wurde als der Hauptgrund für die geringe Permeabilität identifiziert. Der Dauerbetrieb der Membranfiltration war dadurch nur eingeschränkt möglich. Bei erhöhter Außentemperatur löste der Temperaturschutzschalter nach einigen Stunde Betrieb aus, da zum Schutz der Zielmoleküle keine Temperaturen über 45°C für lange Zeit überschritten werden sollten. Die thermische Energie die in das OMW, durch die Motoren der Pumpen übertragen wurde, konnte in warmen Nächten, selbst bei geöffnetem Container nicht an die Umgebung abgegeben werden. Nur bei Öffnung des Feedtanks war eine Absenkung messbar was jedoch zu einer erheblichen Verdunstung, und somit weiteren TS-Aufkonzentrierung geführt hat. Daraufhin wurde das System auf eine so genannte Feed & Bleed-Betriebsweise umgestellt, bei welcher die abgeführte Permeatmenge dem Substratfeed entsprechen soll. Frequenzumrichter müssen nachgerüstet werden, um den Energieeintrag zu reduzieren und nicht nur durch das Schließen von Drosselventilen die Volumenströme zu regulieren zu müssen.

Die Rohrmodule produzieren im Betrieb mit unterschiedlichen Substraten eine durchgehend hohe Permeatqualität, die frei von Trübstoffen ist (< 0,1g TSS/L). Das filtrierte OMW war hervorragend geeignet für die Adsorption in der Kolonne, da eine fast unveränderte



Abbildung 7: (a) für das Screening vorbereitete Adsorptionsmittel; (b) beispielhafte Desorbat-Reihe eines Versuches; (c) auswiegen eines Konzentrates nach der Aufkonzentrierung im Rotationsverdampfer Konzentration an Polyphenolen in einer Lösung ohne abfiltrierbare Stoffe vorliegt.

Kurz nach Projektbeginn verkündete die Fa. Blücher, dass das gesamte Wassergeschäft eingestellt wird und dass das für das InnoVa-Verfahren ausgewählte Adsorptionsmittel mittelfristig nicht mehr zu Verfügung stehen wird. Daher wurde kurzfristig eine große „letzte“

Charge des Adsorptionsmittels eingekauft, und die Suche nach einem geeigneten Ersatz begonnen. Das Screening für ein Ersatzmaterial basierte auf einer ausgiebigen Literatur- und Marktrecherche. Es wurden vorrangig kommerzielle Adsorptionsmittel ausgewählt, um ihre Leistungsfähigkeit und Anwendbarkeit in diesem sehr spezifischen Anwendungsfall zu vergleichen. Extensive Adsorptions- und Desorptionsversuche wurden in Berlin und Sfax vorbereitet und durchgeführt (AP 1.2). Alle 12 ausgewählten Adsorptionsmittel wurden anschließend präpariert und sukzessiv in Gruppen mit realen Olivenmühlenabwasserproben, die aus Tunesien importiert wurden, erprobt (s. Abb 6a). Die Ergebnisse sind in der Masterarbeit von Sebastian Redner einzusehen.

Die Selektivität und Ausbeute der Extraktion waren einer der zentralen Optimierungsaufgaben. In den zwei Betriebsphasen im Dezember 2022 und Februar 2023 konnte die Konzentratreinheit der vorangegangenen Laborversuchen -hochskaliert- reproduziert werden. Durch die Limitierung der Verweilzeit des OMWs, durch die Erhöhung der Durchflussgeschwindigkeit in der Adsorptionskolonne, wurde bewusst eine geringere Ausbeute für eine höhere Reinheit des Desorbats akzeptiert. Durch eine erhöhte Durchflussgeschwindigkeit in der Adsorptionskolonne, konnte die schnellere Adsorptionskinetik von Polyphenolen im Vergleich zu Kohlenhydraten und Proteinen genutzt werden, um die Selektivität des Prozesses zu erhöhen. Die Polyphenole konnten so von 1,8-8,5 g/L in einen Kubikmeter OMW in 40L Ethanol mit 210-400 g/L Polyphenole aufkonzentriert werden. Die Qualität konnte vorrangig bei der selektiven Adsorption verbessert werden. Die Ausbeute war maßgeblich von der Desorption abhängig, weshalb mehrere Versuche zur optimalen Desorptionsprotokollen durchgeführt wurden. Der Effekt von Waschgängen des Adsorptionsmittels nach der Beladung wurde untersucht, die Anzahl, Art von Zusatzstoffen und Dauer wurden dabei variiert. Durch das Einstellen des pH-Wertes der Desorptionslösung, konnte die Ausbeute der Polyphenole verbessert werden. Zusätzlich wurde ein Desorptionsprotokoll entwickelt, welches verschiedene Organik-Faktionen in sukzessiven Desorptionsvorgängen löst, wodurch Konzentrate mit unterschiedlichen Zusammensetzungen entstehen.

Meilenstein 3, die Produktion von 1.000kg Hydroxytyrosol-Konzentrat wurde teilweise umgesetzt. Es wurden etwa 450L Desorbat hergestellt und auf 40 kg aufkonzentriert. Die geringe Konzentrationsmenge ist zum einen durch die erzielte hohe Reinheit der Konzentrate bedingt und zum anderen durch die späte Inbetriebnahme wegen der Verzögerung des Meilensteins 2 (Fertigstellung der Anlage).

Desorbate die mit recyceltem Ethanol produziert wurden, ergaben weniger reine und hochkonzentrierte Desorbate, so dass ein Verhältnis aus frischem und recyceltem Ethanol gefunden werden musste, welches keine Qualitätsverluste zur Folge hat. Grund für die geringere Leistung ist der etwas höhere Wasseranteil im Ethanol nach der Rückgewinnung im Rotationsverdampfer. Durch das Beimengen von reinem Ethanol, konnte der Effekt reduziert werden. Mittelfristig muss der Effekt von Wasser in der Desorptionslösung weiter untersucht werden. Für einen wirtschaftlichen Prozess muss das Verfahren zur Desorbat-Aufkonzentrierung und Lösemittelrückgewinnung umgestellt werden, da der Rotationsverdampfer hohe Verweilzeiten bei hohen Temperaturen des Desorbates bedingt und die Qualität des rückgewonnenen Ethanol nach einer einstufigen Destillation nicht zur Wiederverwendung ausreicht.

Damit das Verfahren als ganzheitliche Lösung zur OMW-Behandlung gelten kann, muss die nach der Rohstoffrückgewinnung im OMW verbleibende Organik, sowie die zuvor abgetrennten Schwimmschicht, das Sediment und das Membrankonzentrat verwertet werden (s. Abbildung 7).

Das Gemisch der Reststoffe des Verfahrens charakterisiert:

- Hohe Konzentrationen an leichtabbaubarer Organik ($BSB_5 > 40\text{g/L}$ und $BSB_5:\text{CSB} > 1:2$)
- Polyphenol-Konzentration unter potenziellem Hemmschwellwert ($TPP < 2\text{g/L}$)
- leicht saurer pH-Wert,

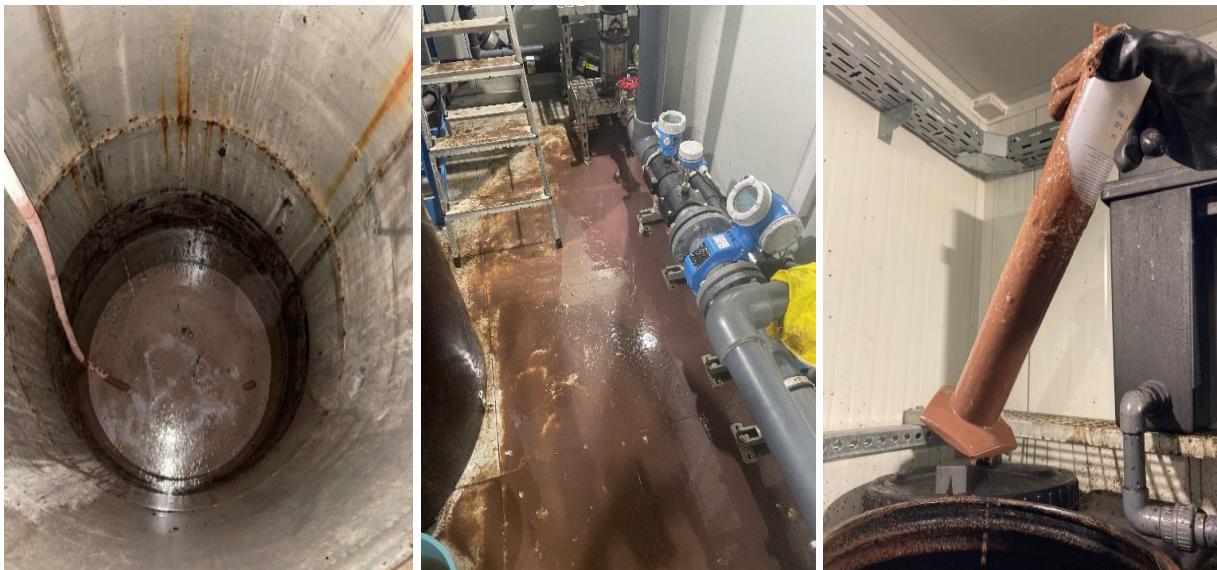


Abbildung 8: (a) Das Sediment im Vorlagetank hatte dreifach höhere oTS-Konzentrationen als die OMW-Mischprobe, (b) Entlüftungsprobleme bei der Feedpumpe der CMF führen zu einer Überschwemmung mit Olivenmühlenabwasser in der Pilotanlage, (c) das Retentat der Membranfiltration erhält die Viskosität von warmer Schokolade

Dieses Reststoffgemisch wurde zur Biogasproduktion durch anaerobe Vergärung mit folgenden Zielen verwendet:

i) Energetische Valorisierung durch Biogasproduktion

Das Substratgemisch aus abgeschöpften fettigen Schwimmschicht, TS-reichem Sediment des Vorlagebehälters, Membrankonzentrat und OMW nach der Adsorption, produziert Biogasmengen knapp unter der dafür angebauten nachwachsenden Rohstoffe wie Maissilage ($300\text{-}350 \text{Nm}^3/\text{t oTS}$). Der Methananteil wird stark vom Fettgehalt des Substrats beeinflusst und beträgt zwischen 64 und 71%. Je nach Dimensionierung des Verfahrens ist es möglich den gesamten Energiebedarf des Verfahrens über die Verstromung des produzierten Biogases zu decken und einen variablen Überschuss zu erzielen. Pro Tonne OMW werden, mit einer Varianz von 30%, 90 kWh für die Aufbereitung und Rohstoffextraktion benötigt und es können etwa 105 kWh elektrische Energie produziert werden (mit einem BHKW mit 39% elektrischen Wirkungsgrad)

ii) Energieeffiziente Elimination der organischen Verunreinigungen

Das Verfahren hat, im Vergleich zu aeroben oder oxidativen Reinigungsverfahren, einen sehr niedrigen Eigenenergiebedarf, wodurch eine positive Energiebilanz ermöglicht wird. Es wird eine Reduktion der gelösten und partikulären Organik von über 75% erreicht; mit steigender Aufenthaltszeit wurden bis zu 93% gemessen. Die Gärreste sind weitestgehend stabilisiert und sind für die Ausbringung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen geeignet (hoher Mineralisierungsgrad der beinhalteten Organik)

iii) Nährstoffkreislaufführung durch Gärrestkonzept (AP 5.2)

Die Gärreste enthalten erhebliche Mengen an Phosphor, Stickstoff und Kalium. Der Stickstoff liegt als Ammonium vor. Phosphat und Kalium sind pflanzenverfügbar ionisch gelöst. Die Konzentrationen variieren im einstelligen Grammbereich. Die Gärreste sind somit relevante Lieferanten von Nährstoffen. Die aus den Böden entnommenen Mineralien können durch das Ausbringen der Gärreste größtenteils gedeckt werden. Die Stickstofffracht zwischen Feed und Gärrest reduziert sich um etwa 30%, während die restlichen Frachten in etwa gleichbleiben.

Die Dünge- und Bewässerungskonzepte wurden an mehreren Olivenhainen betrachtet und der Austausch mit potenziellen Anwendern gesucht. Einige Olivenmühlen, meist in Olivenhainen, waren interessiert, da sie selbst die Grenzen der Aufnahmekapazitäten von unbehandeltem OMW auf ihren Anbauflächen beobachten können.

Um potenzielle phytotoxische Effekte der Gärreste zu untersuchen, wurde die Keimfähigkeit von Tomaten untersucht, die mit Frischwasser oder unterschiedlichen Verdünnungen von Rohabwasser und Gärresten gekeimt wurden. Die verdünnten flüssigen Gärreste zeigten einen positiven Effekt auf die Keimung. Bei Pflanzen mit ausgebildetem Wurzelwerk wurde qualitativ auch unverdünnt ein wachstumsfördernder Effekt beobachtet. Die Ergebnisse sind in einer Masterarbeit dokumentiert.

Um den Einfluss der Polyphenol-Konzentrationen und des Mischungsverhältnisses der verschiedenen Reststoffe zu testen wurden Biomethanpotentialversuche am CBS und an der TUB durchgeführt (AP 1.3). In der Bachelorarbeit von Hanna Proft sind die Ergebnisse der Depolyphenolisierung zusammengefasst. Die Masterarbeit von Katharina Faßlirinner die BMPs der Reststoffgemische. Das Gemisch aus Sediment, Schwimmschicht, Membrankonzentrat und entpolyphenolisiertem OMW in den Verhältnisse wie es im InnoVa-Prozess anfällt (1:2:15:30) eignet sich hervorragend zur Biogasproduktion und erreicht Biomethanausbeuten vergleichbar mit anderen kommerziellen Biogas-Substraten (350 L CH₄/ g CSB_{eliminiert}

Die anaerobe Vergärung wurde vom CBS mit einem bestehendem 300L Festbettreaktor durchgeführt. (AP3.4) Der Hauptvorteil des Reaktortypes ist die sehr gute Biomasseretention, die vor allem bei mittlerer biologischer Abbaubarkeit von Vorteil ist, da sich so langsam wachsende Mikroorganismen anreichern können. Nachteilig ist die Gefahr von Verstopfung und tendenziell schlechte Entgasung des Substrats. Für eine optimale Umsetzung des OMW in Biogas werden Internal Circulation (IC) oder Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reaktoren vorgeschlagen. Meilenstein 5 – ein ganzheitliches Verwertungskonzept – wurde somit aufgezeigt und teilweise demonstriert.

Die Desorption der Zielmoleküle vom Adsorptionsmittel war verfahrens- und steuerungstechnisch komplex, und musste im ex-geschützten System durchgeführt werden. Die Qualität der Desorbate wurde über neun Versuchsdurchläufe untersucht. Meilenstein 4, ausführliche Untersuchungen zur Qualität der produzierten Konzentrate, wurde umgesetzt. Die Zusammensetzung von etwa 60% der Inhaltsstoffe ist bekannt, so wie die präzisen Konzentrationen selektierter Zielmoleküle (AP 4.1). Am CBS wurden elf und an der TUB zwölf Polyphenole mittels Hochdruck Flüssigchromatographie kalibriert und analysiert. Die unbekannten Konzentratbestandteile werden vorrangig aus langen Kohlenwasserstoffen, Huminsäuren und Ligno-Cellulose-Komplexen bestehen. Es wurden Summenparameter für Zucker und Proteine bestimmt.

Der Polyphenolgehalt wurde mittels Folin-Ciocalteu-Reagenz bestimmt. Die Methode wurde am Fachgebiet, auf Basis eines standardisierten Verfahrens aus Literatur für die Konzentrat-Proben optimiert und unterschiedliche Einflussfaktoren untersucht. Es wurden Polyphenol-

Konzentrationen von über 40% nachgewiesen. Da die Proben aber teilweise 1000-fach verdünnt wurden, ist von einem relativ großen Fehler auszugehen. Die antioxidative Wirkung der Konzentrate konnte mittels DPPH-Methode bestimmt werden.

Für die Analysen, sowie die Lagerung, ist die Aufkonzentrierung im Rotationsverdampfer ungünstig, da die Konzentrate sehr stark verdünnt werden müssen, um in dem kalibrierten Konzentrationsbereich der Messmethoden zu sein. Zudem sind die Konzentrate nicht lagerstabil. Sie verfärbten sich stärker und werden schlussendlich dunkelbraun. Dies ist vermutlich auf eine Quervernetzung der Polyphenole zurückzuführen.

Den Einfluss der Betriebsparameter in der Adsorption und Desorption auf die Polyphenol-Konzentratqualität beispielsweise, ist erst nach langwierigen Labormessungen feststellbar, daher gibt es zeitverzögert Informationen zu Einstellungsanpassungen. Das System hängt von einer Vielzahl von relevanten Variablen ab, daher soll zukünftig eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, um den Einfluss bestimmter Parameter besser quantifizieren zu können.

Die weitergehende Aufkonzentrierung und Trennung der Zielmoleküle aus den Konzentraten nach der Aufkonzentrierung im Rotationsverdampfer wurde mit mehreren Ansätzen versucht (AP 4.1)

- Schonungs-Trocknung zu einem Feststoff
- Lyophilisation zu einem Feststoff
- Ausfällung durch Ausnutzen der Mischungslücke im „Tertiärgemisch Alkohol-Wasser-Polyphenole“ (Raki-Effekt) und anschließender Zentrifugation
- Solid Phase Extraction mit kommerziellen Probenaufbereitungsprodukten

Es wurde eine Analyse des bestehenden Marktes, der Marktentwicklung sowie die Einbindung potenzieller Anwender (AP 5.2) durchgeführt. Die Abschlussarbeit von Isabelle Weller führt hierzu Ergebnisse aus. Es wurden öffentlich verfügbare Informationen zum Polyphenolmarkt auf Basis von „polyphenol market size & share analysis - growth trends & forecasts (2023 - 2028)“ gesichtet.

Ergänzend zu einer Marktteilnehmer-Umfrage aus dem Jahr 2020, wurde über das Bio-PAT e.V. Netzwerk, mit Hilfe der Geschäftleiterin Dr. Anika Bockisch, eine Umfrage an relevante Stakeholder der high-value, low-volume Biotechnologie-Branche versendet.

Um das Know-How und das Netzwerk aller Beteiligten in den Businessplan und das Start-Up einfließen lassen zu können, wurden alle relevanten Stakeholder und die lokale Industrie zu einer Informationsveranstaltung in Tunesien eingeladen. Bei diesem Treffen wurde die Demonstrationsanlage vorgestellt, um potenzielle Anwender einzubeziehen und die Projektergebnisse auch unter politischen Entscheidungsträgern und Unternehmern in Tunesien zu verbreiten. Das Interesse sowohl von Verwaltungs- als auch Anwenderseite war groß. Das Verfahren, samt seines Potentials, wurde beispielsweise auch jordanischen Ministeriumsvertretern vorgestellt. (AP 6.1)

Im November 2022 wurde im Rahmen eines Innovationforums zum Thema der energetischen Verwertung von organischen Reststoffen, das InnoVa Verfahren wichtigen Stakeholder der Region vorgestellt, inklusive des Gouverneurs der Region Sfax (s. Abb 8). Die Innovationsforen von SUSPIRE (BMBF) und die Vernetzungstreffen von TWEED (DAAD) wurden genutzt, um synergetisch maximale Reichweite für das Verfahren und potenziellen Produkten zu erreichen.



Abbildung 9: InnoVa Stakeholder Konferenz in Sfax, eine synergetisch mit dem SUSPIRE-Projekt umgesetzte Veranstaltung in Sfax, inklusive des Gouverneurs der Region Sfax

Das Projekt InnoVa wurde zusätzlich in der Lehre aufgegriffen und diente als Rahmen für mehrere Abschlussarbeiten. Die Inhalte und Ergebnisse von InnoVa werden sowohl von Prof. Sami Sayadi an der University of Qatar als auch von Prof. Geißen an der Technischen Universität Berlin verwendet. Das Projekt kann beispielhaft für die Herausforderungen von Maßstabsvergrößerungen aus dem Labor in Feldanwendung genutzt werden. Auch sind technische Detailaspekte wie die Teilautomatisierung, die Prozessführung und -optimierung während der Inbetriebnahme Inhalt der Lehre.

Vier Masterarbeiten und eine Bachelorarbeit wurden, erfolgreich abgeschlossen. Das Feedback von potenziellen Arbeitgebern hinsichtlich der Abschlussarbeiten an existierenden Pilotanlagen war durchwegs positiv. Eine Übersicht der Arbeiten ist in Tabelle 1 gezeigt

Tabelle 1: Übersicht der Abschlussarbeiten im Rahmen von InnoVa

Name	Datum	Titel
Hanna Proft	24.11.2022	Einfluss der selektiven Extraktion von Polyphenolen auf das Biomethanpotential von Olivenmühlenabwasser
Sebastian Render	22.06.2022	Bewertung ausgewählter Adsorbenzien für den Einsatz in einer Bioraffinations-Pilotanlage - selektive Rückgewinnung von Polyphenolen aus Olivenmühlenabwasser
Massi Khorshidipajji	September 2023	Treatment and membrane process for the valorization of olive mill effluents
Isabelle Weller	August 2023	Operation of a pilot plant for valorization of olive mill effluents: recovery and purification of polyphenols by solid phase extraction
Katharina Faßlirinner	Juli 2023	Development of a holistic waste stream concept for the anaerobic valorization of olive mill effluents on a pilot scale

Der Austausch innerhalb des Fachgebiets und mit den tunesischen Partnern hat viel Mehrwert für weitere Projekte geschaffen. Beispielsweise wird im Rahmen des BMBF geförderten Projektes SUSPIRE, viel der Erfahrungen zum Bau, Export und Inbetriebnahme von Container-Anlagen in Tunesien verwertet.

Meilenstein 6 ein Buisnessplan für ein deutsch-tunesisches Spin-off wurde nicht erstellt. Jedoch Kostenrechnungen die hierfür genutzt werden können. Fragen wie Finanzierungskosten, Verwertungsstrategien wurden aufgrund von Zeitmangel nicht abschließend diskutiert.



Abbildung 10: (a) Ausbildung von tunesischem Personal und deutschen Studentinnen bei der Bedienung der Pilotanlage, (b) Bauarbeiten im Feedtank im deutsch-tunesischem Team

Es werden momentan zwei Veröffentlichungen zu zwei Teilauspekten des Verfahrens vorbereitet. Beide sollen in relevanten und referierten Journals einem Fachpublikum zugänglich gemacht werden und für den wissenschaftlichen Diskurs zur Verfügung stehen. Zum einen die anaerobe Vergärung zum Abbau der organischen Fracht und zur Biogasproduktion. Zum anderen die Ultrafiltration des Olivenmühlenabwasser mit keramischen Membranen im Querstromverfahren.

Die Projektkoordination war deutlich aufwendiger und zeitintensiver als vorgesehen, da bedingt durch die COVID-19 Pandemie direkte Kommunikation in gemeinsame Projekttreffen anfangs nicht möglich war. Der Totalausfall der IT-Systeme der TU Berlin, aufgrund eines Hackerangriffes im Jahr 2021, zwang die TUB-Projektbeteiligten auf private E-Mail-Adressen über mehrere Monate hin zurückzugreifen. Weiterhin gab es Datenverluste in der gemeinsamen TUB-Cloud, durch fehlerhafte Synchronisation.

Im Laufe des Betriebs muss das OMW-Verwertungsverfahren in einem iterativen Prozess evaluiert werden. Mittels Life Cycle Assessment soll die tatsächliche ökologische Wirkung des Verfahrens auf die Anbaugebiete untersucht werden. (AP4.3) Hierfür sollten unter anderem der Einfluss des Verfahrens auf i) fossile Ressourcen (die Substitution von

mineralischem Dünger durch Gärreste, von natürlichen Antioxidantien gegenüber im Labor hergestellten Verbindungen), ii) das Klima (Erzeugung von erneuerbarer Energie, und Reduzierung von Ausgasungen in Verdunstungsbecken), iii) den Wasserhaushalt untersucht werden. Die Umsetzung war im Zeitrahmen des Projektes nicht mehr möglich, da viele Ergebnisse, die für die Evaluierung nötig waren nicht rechtzeitig vorlagen.

Die Verwertung des InnoVa-Verfahrens soll in mehrere Richtungen erfolgen. Das Centre of Entrepreneurship der TU Berlin hat eine Förderung über ein bundesdeutsches Förderprogramm zur Ausgründung vorgeschlagen und würde bei der Akquise unterstützen.

Zur Erstellung eines Businessplans wurden Daten aus mehreren Wochen des Betriebs der Pilotanlage zusammengetragen. Die zentralen Kostenfaktoren wurden quantifiziert, vorrangig Strom-, Wasser-, Chemikalienverbrauch. Die für den Volllastbetrieb nötigen Personenstunden sind zurzeit nicht sinnvoll zu bestimmen.

Momentan wird in Zusammenarbeit mit dem CBS und einem tunesischen Industriepartner geprüft, ob ein importiertes Antioxidantiengemisch, welches zur Stabilisierung von Tiernahrung verwendet wird, durch das InnoVa-Polyphenol-Konzentrat ersetzt werden kann. Hierbei werden am CBS-Untersuchungen zur antioxidativen Wirkung, ebenso wie mehrmonatige Haltbarkeitstest durchgeführt.