

# Linking Hydraulic Resistance to the Physical Structure of Membrane Biofilms

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Desmond, Peter

**Publication date:**

2018

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000296862>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH NO. 25134

# Linking hydraulic resistance to the physical structure of membrane biofilms

---

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

**Peter Desmond**

MSc Biotechnology and Business, University College Dublin, Ireland

Born on 11.11.1990

Citizen of the Republic of Ireland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Eberhard Morgenroth, examiner

Prof. Dr. Johannes Vrouwenvelder, co-examiner

Prof. Dr. Eoin Casey, co-examiner

Dr. Nicolas Derlon, co-examiner

2018

## Summary

Gravity driven membrane (GDM) ultrafiltration is a continuous dead-end filtration process for potable and non-potable water production. GDM operates on the principle of tolerating biofilm development on the membranes surface for the benefit of minimum membrane maintenance, stable flux production, and improved permeate quality. The biological activity afforded by the tolerated biofilm allows degradation of foulants that would otherwise accumulate on the surface of the membrane, decreasing permeate flux. However, membrane biofilms are not without problems. The presence of a biofilm increases the hydraulic resistance, which exceeds the intrinsic resistance of the membrane, leading to low yet stable permeate flux. The purpose of the presented thesis is to evaluate what structural feature of the biofilm can exert a resistance to hydraulic passage and how hydraulic resistance is influenced by the biofilms mechanical response to changes in process operation (e.g., transmembrane pressure (TMP), cross-flow). Towards this goal, the approach taken to determine the link between hydraulic resistance and the biofilms structural and mechanical characteristics shall examine: (a) how different biofilm physical structures affect hydraulic resistance; (b) how compression affect physical structure and related hydraulic resistance; (c) how hydraulic resistance changes over the biofilms depth. A key advancement of the current study is evaluating the link between biofilm physical structure and resulting hydraulic resistance using in-situ and non-invasive methods for chemical, structural and mechanical characterization, using 2D confocal Raman microscopy and optical coherence tomography, respectively.

Results of the presented thesis indicate that the formation of GDM biofilms is influenced by the nutrient availability (carbon, nitrogen, and phosphorus), which determined composition and micro-scale spatial distribution of extracellular polymeric substances (EPS). High concentrations of anionic polymers, homogeneously distributed in space, led to the formation of thin dense homogenous physical structures which had a higher hydraulic resistance. Low

concentration of anionic polymers, heterogeneously distributed in space, led to the formation of thick heterogeneous physical structures with a low hydraulic resistance. Taken together, it is demonstrated that thicker heterogeneous structures imposed less hydraulic resistance than thin dense homogeneous structure, indicating density rather than thickness is the structural determinant of a biofilms hydraulic resistance.

The hydraulic resistance of membrane biofilms is also linked to their structural response to perpendicular and parallel flow. With increasing perpendicular flow, heterogeneous biofilms became irreversibly compressed, while homogeneous biofilms were reversibly compressed. Irreversible compression results from the reduction of the biofilm roughness and porosity and led to an irreversible increase in hydraulic resistance. With increasing hydraulic shear stress (flow parallel to the membrane), we demonstrated stratification in the physical structure, cohesion and hydraulic resistance of GDM biofilms. Detachment of a thick surface layer roughness had limited impact on hydraulic resistance due to retention of a cohesive base layer with a high hydraulic resistance.

The presented thesis provides a fundamental understanding of how hydraulic resistance is linked to a biofilms composition, physical structure and mechanical strength. Our evaluation of biofilm physical structure and hydraulic resistance in GDM systems has demonstrated that heterogeneous physical structures exert limited hydraulic resistance and have a low mechanical strength. Greater hydraulic resistance is exerted by thin dense base layer at the surface of the membrane. We suggest GDM membrane operators (a) maintain constant transmembrane pressure to avoid compaction of heterogeneous structure, (b) avoid hydraulic shear due to limited effect on resistance due to retention of thin and dense cohesive base layer and (c) focus on efforts to decrease the hydraulic resistance by increasing structural heterogeneity “in-place” by way of predation and/or nutrient enrichment.

## **Zusammenfassung**

Gravity Driven Membrane (GDM) Ultrafiltration ist ein kontinuierlicher dead-end Filterprozess für die Trink- und Abwasserbehandlung. Beim Betrieb von GDM wird in der Regel ein Membranbiofilm beibehalten, um einen stabile Flux und eine verbesserte Permeatqualität zu erreichen. Die biologische Aktivität des Biofilms erlaubt den Abbau von großen Biopolymeren, welche andernfalls auf der Oberfläche des Membran akkumulieren würden. Der resultierende Flux ohne Biofilm wäre kleiner als der Flux mit Biofilm. Andererseits verursacht der Biofilm aber auch Probleme. Strukturell kann der Biofilm einen hydraulischen Widerstand erzeugen, der den intrinsischen Widerstand der Membran übersteigt, was zu einem niedrigen, aber stabilen Flux führt. Die vorliegende Doktorarbeit soll deshalb genauer untersuchen, welche strukturellen Eigenschaften des Biofilms zu hydraulischem Widerstand führen, und wie Prozess-Parameter (z.B. TMP, Crossflow) die Struktur und den damit verbundenen hydraulischen Widerstand in GDM Biofilmen beeinflussen können.

Um den Zusammenhang zwischen hydraulischem Widerstand und den strukturellen und mechanischen Eigenschaften des Biofilms herzustellen, sollen folgende Fragen beantwortet werden: (a) wie kontrastierende physikalische Eigenschaften des Biofilms den hydraulischen Widerstand beeinflussen; (b) wie Kompression die Struktur und den damit verbundenen hydraulischen Widerstand des Biofilms beeinflussen; (c) wie Biofilm-Ablösung die Struktur und den hydraulischen Widerstand des Biofilms beeinflusst. Einer der Haupt-Aspekte dieser Arbeit ist die Herstellung des Zusammenhangs zwischen Form (Struktur) und Funktion (hydraulischer Widerstand) durch die Anwendung von in-situ, nicht-invasiven Methoden für chemische, strukturelle und mechanische Charakterisierung des Biofilms mithilfe von 2D konfokaler Raman-Mikroskopie und optischer Kohärenz Tomographie. Die strukturelle Entwicklung von GDM Biofilmen ist beeinflusst von der charakteristischen Zusammensetzung und der räumlichen Verteilung auf der Mikro-Skala von extrazellulären polymere Substanzen

(EPS). Dünne, homogene Biofilme zeigten eine homogene Verteilung von anionischen Biopolymeren bei gleichzeitig höherem hydraulischen Widerstand. Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass dickere, heterogene Strukturen zu weniger hydraulischem Widerstand führen, als dünn-schichtige, homogene Strukturen. Dies zeigte, dass die Biofilm-Dichte statt der Biofilm-Dicke die massgebende strukturgebende Grösse des hydraulischen Widerstands des Biofilms ist.

Der hydraulische Widerstand von Membran-Biofilmen ist auch mit deren mechanischer Reaktion auf hydraulischen Stress verbunden. Mit zunehmend senkrechtem Zufluss konnte gezeigt werden, dass es zu irreversibler Kompression in Biofilmen mit heterogener Struktur kommt, während reversible Kompression in Biofilmen mit homogener Struktur beobachtet wurden. Irreversible Kompression könnte mit einer Abnahme der Oberflächen-Rauheit, sowie der Porosität einhergehen. Mit zunehmendem hydraulischem Scherstress konnte gezeigt werden, dass es zu Schichtbildung (Stratifizierung) in der Struktur und der Kohäsion des GDM Biofilms kommt. Das Auswaschen der dicken heterogenen Oberflächenschicht und die gleichzeitige Beibehaltung einer dünnen und dichten Basisschicht hatte keinen Einfluss auf den hydraulischen Widerstand. Dies bekräftigt die Annahme, dass dünne, homogene Strukturen grösseren hydraulischen Widerstand erzeugen, als dicke, heterogene Strukturen.

Die Resultate der Arbeit zeigten auf, wie hydraulischer Widerstand mit Komposition, Struktur und dem mechanischen Widerstand des Biofilms verknüpft ist. Die Evaluierung der Form und Funktion von Biofilmen in Membran-Systemen zeigte auf, wie GDM-Filtrations-Systeme intelligent konzipiert und betrieben werden können. Auch wurden dafür erwünschte strukturelle und mechanische Funktionen von GDM-Biofilmen aufgezeigt. Deshalb schlagen wir GDM-Membran-Betreibern vor (a) konstanten Transmembrandruck beizubehalten, um Kompaktierung zu vermeiden, (b) hydraulische Scherung zu vermeiden um den Effekt auf den hydraulischen Widerstand zu limitieren und (c) die Fokussierung auf die Minimierung von

hydraulischem Widerstand durch die Erhöhung der strukturellen Heterogenität des Biofilms  
«in-Situ» durch Prädation bzw. Anreicherung von Nährstoffen.