

# Biomechanical Investigation of the Female Pelvic Region

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Maurer, Manfred M.

**Publication date:**

2015

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010568445>

**Rights / license:**

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Diss. ETH No. 22955

# Biomechanical Investigation of the Female Pelvic Region

A dissertation submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES OF ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

MANFRED MATTHIAS MAURER

Dipl.-Ing., RWTH Aachen  
born November 28, 1986  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Edoardo Mazza, examiner  
Prof. Dr. Steven Abramowitch, co-examiner

2015

# Abstract

---

The female pelvic region is a complex mechanical system consisting of a variety of structural elements, such as muscles, ligaments and connective tissues. These are supporting the organs within the pelvic cavity inferiorly against gravitational loads and intra abdominal pressure. Weakness or failure of one or several of the supportive structures can lead to mechanical instability, which in turn may cause pelvic dysfunction, in particular pelvic organ prolapse (POP). While the majority of cases remains without symptoms, 11% of women showing symptomatic POP undergo surgery, amounting to around 300000 patients per year in the US alone. In recent years, treatment included the implantation of synthetic meshes, woven structures based on polymer filaments. These are supposed to restore anatomical form and support the organs, directly inducing a restoration of function. However, 29% of patients require recurrent surgical intervention due to severe clinical complications such as mesh erosion, shrinkage or fibrosis. Recently it has been suggested that these adverse phenomena can be linked to mechanical causes, in particular a mismatch of mechanical properties and behavior of the mesh on several length scales, reaching from a global macro level of the structure down to a local meso or micro scale at a filament or tissue level. This led to the coining of the term "mechanical biocompatibility", or the ability of an implant to display a mechanical behavior compatible with its function and favoring its integration in the surrounding tissue. The assessment of the mechanical biocompatibility of any implant however, requires the knowledge of the mechanical environment, i.e. forces and deformations, in which it is supposed to perform. Not only is the awareness of loads in the pelvic region necessary as a physiological reference for implant design, but it could also serve as a means to detect and track pathologies, such as pelvic muscle weakening or pre-term softening of the uterine cervix during gestation. However, it is intuitively clear that a direct measurement of forces acting on muscles within the pelvic cavity in vivo is challenging if not impossible. In this work, the powerful tool of finite element analysis has applied to investigate the highly complex mechanical system of the female pelvic cavity.

While analytical models based on Laplace's Law of thin walled pressure containers are

used in the context of the female pelvic floor, they can only estimate the global mechanical environment within the pelvic region. The detailed finite element model developed in this work allows for a more in-depth mechanical analysis. The present study allowed for a quantification of tensions and deformations within the pelvic muscles, which were found to be an order of magnitude lower than those within the abdominal wall. Initial analytical calculations based on Laplace's Law could be confirmed. The FE model also gave indications of the effects of local geometry variability on loads within the muscles. It is a valuable tool for in-vivo estimation of forces and deformations of healthy and pelvic prolapse patients. After successful clinical outcomes in the abdominal wall, meshes initially designed for hernia repair were first used for POP repair. However, these implants were designed to fit abdominal loading, exhibiting excessive stiffness compared to the organs and tissues in the pelvic region. The present model can provide an important reference for design and mechanical dimensioning of prostheses for pelvic prolapse repair, since their mechanical biocompatibility, i.e. a match of mechanical properties of implant and tissue, is of major importance when investigating clinical complications.

In a second application, the finite element model was adapted and used to evaluate the physiological mechanical regime in which mesh implants have to perform in the framework of a specific repair strategy. For the first time, a repair method for pelvic prolapse, the sacrocolpopexy after a hysterectomy procedure, has been modeled with the aid of the finite element method, allowing for the analysis of global in vivo forces and displacements in the mesh and vagina. The influence of surgical technique, mesh material and local non-affine deformation patterns on a meso-scale unit cell level have been evaluated and their possible contribution to observed clinical complications discussed. The analysis clearly showed the importance of mesh material and surgical technique when implanting a sacrocolpopexy mesh. A softer implant can reduce forces in vagina and sacrum, however a small amount of prestretch might shift its mechanical response to a zone of higher apparent stiffness, diminishing the force reduction effects. On the other hand, prestretch might be purposefully applied by the surgeon in order to manipulate the mesh compliance to a desired value. The present study gives valuable indications and warrants further, systematic in silico and in vivo studies in order to investigate the complex mechanisms and verify the results, ultimately allowing for a clear set of guidelines for medical doctors.

While the assessment of the mechanical environment in-vivo is important to evaluate the mechanical biocompatibility of mesh prostheses, knowledge of the mechanical behavior of the implants themselves is clearly needed to complete the picture. That requires a meaningful definition and general acceptance of mechanical tests and parameters in order to consistently characterize these prostheses. In an effort to provide such data, an extensive, multiscale experimental protocol has been developed and nine different mesh types

have been evaluated in terms of their mechanical properties. A set of nine parameters have been proposed, including uniaxial and biaxial stiffness, anisotropy and the influence of tissue ingrowth or multiple cycles on the mechanical behavior. In order to facilitate simple comparison of meshes, these parameters have been visualized in a circle graph, allowing for immediate evaluation of mesh performance, even for the untrained eye.

Another important organ with a mechanical function in the female pelvic region is the uterine cervix. It closes the uterus inferiorly and is crucial to mechanically maintain pregnancy. At term it softens in a controlled manner and allows for the passage of the fetus through the birth canal. If this change in mechanical properties happens before term, it might lead to preterm birth and thus a high risk of mortality and morbidity for the fetus. In the field of obstetrics, transvaginal quasistatic elastography has been recently suggested to be suitable for the detection of mechanical changes in the cervix during gestation, determining its stiffness. However, with the help of experiments and finite element investigations, it has been shown that the proposed method is not suited to detect cervical softening over time. In fact, quasistatic elastography was developed to evaluate relative differences in tissue compliance based on kinematic data and is successfully used in e.g. liver cancer detection. The working principle of this method has then been translated into a computational elastography approach. A new methodology for detection of pelvic muscle weakness, and thus possibly prolapse, has been proposed, based on finite element analysis and purely kinematic data of the pelvic muscle sheet. As a proof of concept, artificial pelvic organ prolapse cases have investigated using the finite element model developed in this work, showing promising results.

# Zusammenfassung

---

Der weibliche Beckenboden ist ein komplexes mechanisches System, bestehend aus einer Vielzahl an strukturellen Elementen, wie z.B. Muskeln, Bändern und Bindegewebe. Diese unterstützen die Organe der Beckenhöhle und sichern sie gegen Gravitationslasten sowie intraabdominellen Druck. Eine Schwächung oder Versagen eines oder mehrerer solcher stützenden Strukturen kann zu einer mechanischen Instabilität führen, die wiederum Beckenbodendysfunktion hervorrufen kann, insbesondere eine Beckenbodenabsenkung. Während die Mehrheit der Fälle keine Symptome präsentiert, müssen 11% (300000 Fälle alleine in den USA) der symptomatischen Patientinnen operiert werden. In den zurückliegenden Jahren beinhaltete eine Therapie die Implantation von synthetischen Netzen, aus Polymerfasern gewebten Strukturen. Diese sollen die Anatomie der Beckenregion wiederherstellen und die Organe unterstützen, was zu einer Zurückgewinnung der Funktion führen soll. Allerdings benötigen 29% der Fälle einen erneuten chirurgischen Eingriff aufgrund schwerwiegender klinischer Komplikationen, wie z.B. Netzerosion, Netzschrumpfung oder Fibrose. Kürzlich wurde vorgeschlagen, dass diese negativen Phänomene mechanische Ursachen haben, insbesondere eine fehlende Übereinstimmung der mechanischen Eigenschaften der Netzimplantate und des darunter liegenden Gewebes in mehreren Grössenordnungen, vom globalen Makrolevel der Struktur bis hinunter auf ein lokales Mikrolevel der Filamente. Dies hat zur Prägung des Begriffs „mechanische Biokompatibilität“ geführt. Er beschreibt das mechanische Verhalten des Implantats, welches auf der einen Seite kompatibel mit seiner Funktion ist, auf der anderen Seite aber auch die Integration in das umliegende Gewebe begünstigt. Die Einschätzung der mechanischen Biokompatibilität eines Netzes setzt jedoch die Kenntnis der mechanischen Umgebung, also Kräfte und Deformationen, voraus, in der es seine Funktion erfüllen soll. Zudem ist das Wissen um die mechanischen Lasten in der Beckenbodenregion nicht nur nützlich als eine physiologische Referenz für das Design von Netzimplantaten, sondern auch als Möglichkeit der Erkennung und Weiterverfolgung von Pathologien wie z.B. der Schwächung der Beckenmuskulatur oder einer frühzeitigen Erweichung des Gebärmutterhalses während der Schwangerschaft. Es ist allerdings intuitiv ersichtlich,

dass die direkte in vivo Messung von Kräften, die auf die Muskeln und inneren Organe wirken, schwierig oder sogar völlig unmöglich ist. In dieser Arbeit wurde daher das wirkungsvolle Werkzeug der Finite Elemente Analyse angewendet, um das hochkomplexe mechanische Systems der weiblichen Beckenhöhle zu untersuchen.

Analytische Modellbeschreibungen des weiblichen Beckenbodens basierend auf dem Laplace Gesetz für dünnwandige Druckbehälter wurden bereits angewendet, um die globale mechanische Umgebung abzuschätzen. Das in dieser Arbeit entwickelte detaillierte finite Elemente Modell erlaubt jedoch für eine tiefergehende mechanische Analyse. Es ermöglichte eine Quantifizierung von Membranspannungen und Deformationen in den Beckenmuskeln. Analytische Berechnungen mit dem Laplace Gesetz konnten bestätigt werden, Spannungen waren eine Größenordnung kleiner als die in der Bauchdecke. Das FE Modell konnte zusätzlich Hinweise bezüglich der Effekte lokaler geometrischer Variationen auf die Belastungen der Muskeln liefern. Es ist ein wichtiges Werkzeug für die Abschätzung von in vivo Kräften und Deformationen in gesunden Patienten und solchen mit Beckenbodenschwäche. Nach erfolgreichem Einsatz von Implantaten in der Abdominalwand wurden diese ursprünglich für die Hernienreparatur entwickelten Netze auch zur Unterstützung einer Beckenbodenabsenkung verwendet. Allerdings wurden diese für abdominale Lastszenarien ausgelegt und besaßen eine exzessive Steifigkeit im Vergleich zu den Organen und Geweben im Beckenboden. Das hier entwickelte Modell kann wichtige Referenzen für das Design und die mechanische Auslegung von Netzen im Beckenboden liefern, da deren mechanische Biokompatibilität, also die Übereinstimmung der mechanischen Eigenschaften von Implantat und Gewebe, eine wichtige Rolle bei der Untersuchung von klinischen Komplikationen spielt.

In einer zweiten Anwendung wurde das Finite Elemente Modell angepasst und zur Untersuchung des physiologischen mechanischen Umfelds im Rahmen einer speziellen Reparaturmethode eingesetzt. Erstmals wurde eine Reparaturmethode für Beckenbodenabsenkung, nämlich die Sakrokolpopexie nach einer totalen Hysterektomie, erfolgreich in einem Computermodell simuliert. Es ermöglicht die Analyse von globalen in vivo Kräften und Verschiebungen im Netzimplantat und im Vaginalstumpf. Der Einfluss der operativen Methode, des Netzmaterials sowie lokaler nicht affiner Deformationsmuster auf dem Level der Einheitszellen des Netzes wurden untersucht und deren möglicher Beitrag zu den im klinischen Alltag beobachteten Komplikationen beurteilt. Die Analyse hat gezeigt, dass das Netzmaterial sowie das operative Verfahren wichtig sind bei der Implantation von Sakrokolpopexienetzen. Ein weiches Netz kann zu reduzierten Kräften im Vaginalstumpf und Sakrum führen, allerdings kann eine geringe Vordehnung sein mechanisches Verhalten in eine Zone höherer offensichtlicher Steifigkeit verschieben und so die Effekte der Kraftreduktion wieder vermindern. Andererseits kann die Vordehnung des Netzes be-

wusst vom Chirurgen eingesetzt werden um seine mechanischen Eigenschaften gezielt auf ein gewünschtes Niveau zu bringen. Die hier vorgestellte Studie zeigt wertvolle Trends und setzt den Grundstein für weitere systematische in silico und in vivo Untersuchungen, um die komplexen Mechanismen zu erforschen und Resultate zu verifizieren. Das ultimative Ziel sollten transparente Richtlinien für Ärzte und Chirurgen zur optimalen Implantation von Netzen im Beckenbodenbereich sein.

Während die Beurteilung des mechanischen Umfelds im Körper wichtig für die Analyse der mechanischen Biokompatibilität der Netzimplantate ist, ist für die Vervollständigung des Gesamtbildes ebenfalls fundierte Kenntnis über das mechanische Verhalten der Prothesen vonnöten. Das wiederum erfordert eine sinnvolle Definition und Akzeptanz von mechanischen Tests und Parametern um Netze konsistent zu charakterisieren. Um eine solche Grundlage an Daten zu liefern, wurde ein weitreichendes experimentelles Protokoll auf mehreren Längenskalen entwickelt und neun verschiedene Netzimplantattypen in Bezug auf ihre mechanischen Eigenschaften untersucht. Neun Parameter wurden vorgestellt, unter anderem uniaxiale und biaxiale Steifigkeit, Anisotropie sowie der Einfluss von eingewachsenem Gewebe oder mehreren zyklischen Belastungen auf das mechanische Verhalten. Um einfache, visuelle Vergleichbarkeit von Netztypen zu erleichtern, wurden diese Parameter in einem Kreisgraphen visualisiert, was eine direkte Analyse der Netze ermöglicht, selbst für ungeschulte Personen.

Ein weiteres wichtiges Organ mit einer mechanischen Funktion im Beckenbodenbereich ist der Gebärmutterhals. Er bildet den unteren Abschluss des Uterus und ist massgeblich für die mechanische Aufrechterhaltung der Schwangerschaft. Kurz vor dem Geburtstermin erweicht er in einem kontrollierten Prozess um die Passage des Fötus durch den Geburtskanal zu ermöglichen. Wenn diese Veränderungen der mechanischen Eigenschaften des Gebärmutterhalses schon frühzeitig einsetzen, kann es zur Frühgeburt kommen und damit zu einem hohen Risiko für Morbidität und Mortalität für das Kind. Im Bereich der Geburtshilfe wurde unlängst die transvaginale, quasistatische Elastographie als mögliche Erfassungsmethode für die mechanischen Änderungen des Gebärmutterhalses während der Schwangerschaft vorgeschlagen. In dieser Arbeit konnte allerdings mit Hilfe von Experimenten und finite Elemente Untersuchungen gezeigt werden, dass die vorgelegte Methode nicht dazu geeignet ist, die Erweichung des Gebärmutterhalses im Zeitverlauf der Schwangerschaft festzustellen. In der Tat wurde die quasistatische Elastographie entwickelt, um relative Unterschiede in Gewebenachgiebigkeit basierend auf rein kinematischen Daten abzuschätzen und wurde erfolgreich z.B. zur Detektion von Leberkrebs eingesetzt. Die Arbeitsweise dieser Methode wurde hier in einem Computermodell gestützten Elastographie Ansatz eingesetzt. Eine neue Methodik zur Erkennung von Muskelschwäche im Beckenboden, und somit möglicher Beckenbodenabsenkung, wurde aufgezeigt, basierend



auf einer finite Elemente Analyse und rein kinematischen Daten der Beckenbodenmuskulatur. Als ein Machbarkeitsnachweis wurden mit Hilfe des in dieser Arbeit entwickelten finite Elemente Modells künstliche Fälle von Beckenbodenschwäche in silico untersucht und vielversprechende Ergebnisse gezeigt.