

APPENDIX

- A. Project brief and planning
- B. Interviews
- C. Design aesthetic research
- C. Arduino codes
- D. Python code
- E. User evaluation test
- F. Material cost estimation

A. Project brief and planning

PROJECT TITLE, INTRODUCTION, PROBLEM DEFINITION and ASSIGNMENT

Complete all fields, keep information clear, specific and concise

Project title Development and Validation of a Textile Strain Sensor Wearable for Continuous Knee Flexion Monitoring

Please state the title of your graduation project (above). Keep the title compact and simple. Do not use abbreviations. The remainder of this document allows you to define and clarify your graduation project.

Introduction

Describe the context of your project here; What is the domain in which your project takes place? Who are the main stakeholders and what interests are at stake? Describe the opportunities (and limitations) in this domain to better serve the stakeholder interests. (max 250 words)

This project takes place within the field of Smart Textiles and Wearables, with a specific focus on measuring knee flexion. In various applications, from rehabilitation after knee surgery to sports monitoring and detecting movement patterns, it is valuable to be able to track knee movements in an accurate and accessible way. The degree of knee flexion is an important indicator here.

Current techniques for measuring knee motion, such as IMUs (Inertial Measurement Units), a very often used sensor, are usually complex and prone to drift. This limits their usability in everyday, dynamic environments.

This project investigates whether conductive yarns integrated into textiles can be used as simple, flexible strain sensors to measure knee flexion. Due to their comfortable and lightweight nature, textile sensors offer potential for long-term use, without the need for specialized equipment or knowledge.

At the same time, the project focuses on how this technology connects with users' daily lives. I will look at ease of use, comfort during movement, understandable feedback and practical applicability.

Important stakeholders are rehabilitation patients, physiotherapists and rehabilitation physicians. For patients, the value lies in wearing comfort and accessibility; for healthcare providers, in collecting objective data remotely. The biggest challenge lies in reliable measurement with repeated use and varying placement.

→ space available for images / figures on next page

introduction (continued): space for images

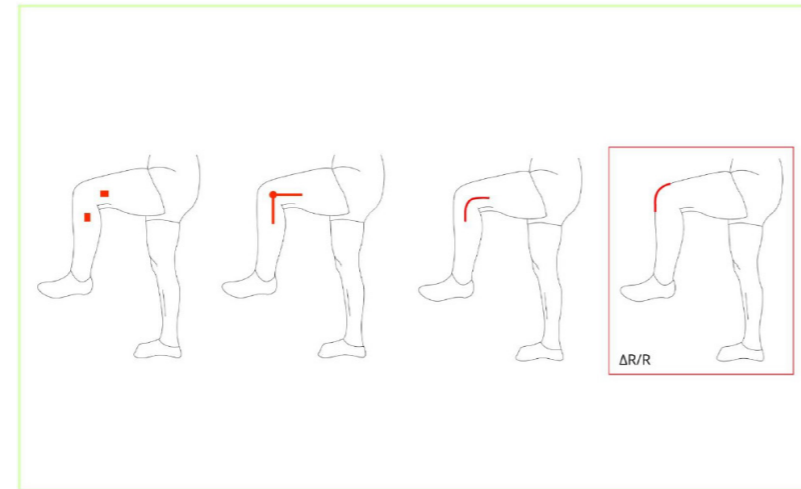


image / figure 1 IMU's, potentiometer, flex sensor/goniometer and stretch sensor (focus)

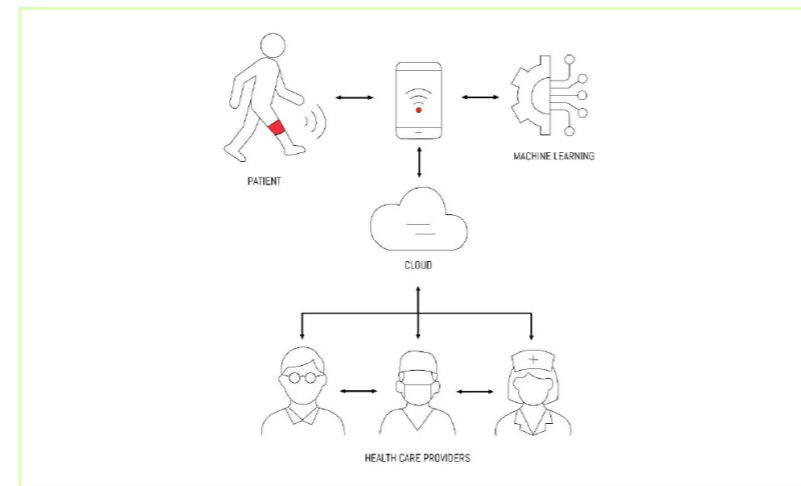


image / figure 2 Interaction between patient, knee sensor wearable and health care providers

DESIGN FOR our future
TUDelft

Personal Project Brief – IDE Master Graduation Project

Problem Definition

What problem do you want to solve in the context described in the introduction, and within the available time frame of 100 working days? (= Master Graduation Project of 30 EC). What opportunities do you see to create added value for the described stakeholders? Substantiate your choice. (max 200 words)

Continuous monitoring of knee flexion allows for objective tracking of changes in motion and provides valuable insights into the progress of rehabilitation patients. Current technologies, such as IMUs or optical systems, while usually providing accurate data, are often (unnecessary) complex, prone to drift and unsuitable for long-term use outside the clinic. As a result, an approachable, simple, comfortable and affordable system for home use is lacking.

This project focuses on exploring an alternative: using conductive yarns, integrated as structures in textiles, as a strain-sensitive sensor for knee angle measurement. The core issue is whether this technology is sufficiently reliable, sensitive and reproducible for the simple application of measuring flexion/extension during daily movements.

Within the time available, I will investigate whether a textile sensor not only measures well technically, but is also comfortable to wear, intuitive to use and suitable for integration into a rehabilitation patient's daily life. I will use feedback to improve the design iteratively.

The added value lies in developing a practically usable and accessible sensor solution for home rehabilitation of the knee that does not aim for maximum precision but rather reliability and applicability in everyday conditions for both patient and caregivers.

Assignment

This is the most important part of the project brief because it will give a clear direction of what you are heading for. Formulate an assignment to yourself regarding what you expect to deliver as result at the end of your project. (1 sentence) As you graduate as an industrial design engineer, your assignment will start with a verb (Design/Investigate/Validate/Create), and you may use the green text format:

Design and validate a knee wearable for rehabilitation that measures and monitors knee flexion, by integrating textile-based sensors in a user-friendly and comfortable way, to gain insight into movement patterns and detect meaningful changes over time for individual patients and healthcare providers in real-life, everyday settings.

Then explain your project approach to carrying out your graduation project and what research and design methods you plan to use to generate your design solution (max 150 words)

To carry out this project, I will start with researching the rehabilitation process by doing field research and interviews with stakeholders, performing tests with varying strain sensors and exploring knee sleeves/braces. Based on this, I will design and realize several prototypes that can be worn around the knee. These will be tested in both controlled and user-oriented situations.

The measured data will be analyzed for reproducibility, sensitivity and practical applicability. At the same time, I will evaluate user experiences such as wearing comfort, correct positioning and ease of use. Feedback from users and healthcare providers will be used to iteratively improve the design.

By combining technical validation with user-centered design, such as short user tests and collaborative reflection, I strive for a prototype that not only functions well technically, but is also acceptable and valuable in rehabilitation environments.

Project planning and key moments

To make visible how you plan to spend your time, you must make a planning for the full project. You are advised to use a Gantt chart format to show the different phases of your project, deliverables you have in mind, meetings and in-between deadlines. Keep in mind that all activities should fit within the given run time of 100 working days. Your planning should include a kick-off meeting, mid-term evaluation meeting, green light meeting and graduation ceremony. Please indicate periods of part-time activities and/or periods of not spending time on your graduation project, if any (for instance because of holidays or parallel course activities).

Make sure to attach the full plan to this project brief. The four key moment dates must be filled in below

Kick off meeting	8 Sep 2025
Mid-term evaluation	27 Oct 2025
Green light meeting	19 Jan 2025
Graduation ceremony	23 Feb 2025

In exceptional cases (part of) the Graduation Project may need to be scheduled part-time. Indicate here if such applies to your project

Part of project scheduled part-time	<input type="checkbox"/>
For how many project weeks	20
Number of project days per week	5

Comments:

Motivation and personal ambitions

Explain why you wish to start this project, what competencies you want to prove or develop (e.g. competencies acquired in your MSc programme, electives, extra-curricular activities or other).

Optionally, describe whether you have some personal learning ambitions which you explicitly want to address in this project, on top of the learning objectives of the Graduation Project itself. You might think of e.g. acquiring in depth knowledge on a specific subject, broadening your competencies or experimenting with a specific tool or methodology. Personal learning ambitions are limited to a maximum number of five. (200 words max)

For my thesis project, I want to delve into a technical field in which I still have relatively little experience: measuring and interpreting human motion using sensor technology. I see this as an opportunity to broaden my knowledge in physical computing, data analysis and the integration of electronics in a comfortable wearable and apply it to a realistic and meaningful design project.

This project appeals to me because it combines multiple design disciplines: from textiles and electronics to testing and improving a physical product based on measured data and user feedback. I also see translating raw sensor information into understandable feedback for end users as a valuable design challenge. I am also curious about how to integrate technology into users' daily lives in an accessible way, and how design choices contribute to wearability, understandability and motivation to use.

- Personal learning ambitions:
- Gain more insight into the rehabilitation process and the role of movement monitoring in it.
 - Acquiring knowledge about the functioning and testing methods of conductive yarns in textiles as sensor technology.
 - Develop skills in iterative prototyping and interim testing to improve both the technical performance and user experience of the concept.
 - Learn how to analyze and interpret sensor data, and translate it into clear information for both patients and healthcare providers.

PLANNING GRADUATION PROJECT

PCT OF TASK COMPLETE	PHASE 1			PHASE 2			PHASE 3										PHASE 4		PHASE 5						
	WEEK 1	WEEK 2	WEEK 3	WEEK 4	WEEK 5	WEEK 6	WEEK 7	WEEK 8	WEEK 9	WEEK 10	WEEK 11	WEEK 12	WEEK 13	WEEK 14	WEEK 15	WEEK 16	WEEK 17	WEEK 18	WEEK 19	WEEK 20					
	09/14/09	15/09-21/09	22/09-28/09	29/09-05/10	6/10-12/10	13/10-19/10	20/10-26/10	27/10-2/11	3/11-9/11	10/11-16/11	17/11-23/11	24/11-30/11	1/12-7/12	8/12-14/12	15/12-21/12	22/12-28/12	29/12-4/01	5/01-11/01	12/01-18/01	19/01-25/01	26/01-02/02	3/02-9/02	10/02-16/02	17/02-23/02	24/02-01/03
1 Discover (research and inspiration)	Kickoff meeting																								
1.1 Additional literature research	o/e																								
1.1.1 Orientation of the knee and knee rehabilitation	o/e																								
1.1.2 Orientation existing techniques (Barriers) (party already done)	o/e																								
1.1.3 Orientation chosen technique (conductive yarn) (Working yarn materials, Yarn patterns, Opportunities and barriers)	o/e																								
1.1.4 Orientation existing sleeves/braces (material, composition)	o/e																								
1.1.5 Doing tests with existing samples	o/e																								
1.2 Learning to handle testing equipment, stretchers and sewing equipment	o/e																								
1.3 Interviews and context mapping	o/e																								
1.3.1 Make HREC Checklist and informed consent	o/e																								
1.3.2 Orientation rehabilitation process	o/e																								
1.3.3 Orientation currently used measure tools	o/e																								
1.3.4 Orientation requirements for knee sleeve	o/e																								
1.4 Report writing	o/e																								
2 Define (set boundaries & focus)	o/e																								
2.1 Summarize and clustering insights from Discover phase	o/e																								
2.2 Make patient journey	o/e																								
2.3 Defining problem, goals and target group	o/e																								
2.4 Formulate design criteria	o/e																								
2.5 Decide on testing approach (which materials, how many prototypes, what forms of feedback)	o/e																								
2.6 Report writing	o/e																								
3 Develop (Ideas, prototyping, iterative testing)	o/e																								
3.1 Sensor tests	o/e																								
3.1.2 Small tests with yarns (measuring elongation vs. resistance)	o/e																								
3.1.3 Compare influence of pre-stretching/positioning	o/e																								
3.1.4 Compare tape vs. sewn etc. different prototypes	o/e																								
3.2 User focus and tests	o/e																								
3.2.1 Explore user impact in textile choices (comfort/putting on and off, staying in place)	o/e																								
3.2.2 Creating several prototypes focused on user testing	o/e																								
3.2.3 User tests with prototypes (plan 1 week ahead)	o/e																								
3.3 Selection, creating and testing Material and manufacturing selection (yarn + substrate)	o/e																								
3.3.1 Create 2-3 sensor designs	o/e																								
3.3.2 Prototype check with rehabilitation physician (feasibility / placement / movements) (plan 2 weeks ahead)	o/e																								
3.3.3 Making textile brace	o/e																								
3.3.4 Designing user interaction (UI for revealing data) and/or simple feedback forms	o/e																								
3.3.5 User feedback on comfort, fit and interaction	o/e																								
3.4 Finish textile brace and user interaction	o/e																								
3.5 Report writing	o/e																								
4 Deliver (Validate and Delivering)	o/e																								
4.1 Final testing for accuracy with final textile brace	o/e																								
4.2 User test in realistic context (e.g. practice session + interview) (plan 2 weeks ahead)	o/e																								
4.3 Final check and feedback physical therapist: interpretation of output / applicability in counseling (plan 2 weeks ahead)	o/e																								
4.4 Report writing	o/e																								
5 Analysis, conclusion & report	o/e																								
5.1 Analyzing and tabulating results	o/e																								
5.2 Drawing conclusions: where is it working well, what could be better?	o/e																								
5.3 Finalize report	o/e																								
5.4 Prepare final presentation (slides + practice)	o/e																								

B. Interviews

Interview questions

Patient

Ervaring & achtergrond

- Kunt u vertellen voor welke knieoperatie u bent behandeld en waarom dit nodig was?
- Hoe heeft uw revalidatieproces eruit gezien? Welke fases of stappen heeft u doorlopen
- Hoe vaak had u afspraken en met wie? Hoe zagen deze afspraken eruit?
- Hoe werd uw voortgang gemeten?
- Hoe heeft u het hele proces ervaren? Wat was fijn, wat was frustrerend?

Oefeningen & zelfmonitoring

- Welke oefeningen deed u thuis en hoe vaak? Wie gaf u advies over deze oefeningen
- Hoe duidelijk waren de oefeningen voor u? Hoe ging het onthouden van de oefeningen?
- Wat het makkelijk of moeilijk om vol te houden?
- Moest u ook zelf uw kniebuiging meten thuis? Zo ja, hoe deed u dat?

Feedback op sensorband concept

- Droeg u een knieband of brace? Welke soort(en), en wat vond u prettig of juist niet?
- Wat vindt u van het idee van een textiele kniesensorband die uw bewegingen continu meet tijdens oefeningen of zelfs dagelijkse activiteiten?
- Wat zou volgens u de voordelen kunnen zijn van een kniesensorband die uw bewegingen meet?
- Ziet u mogelijke nadelen of zorgen bij het gebruik van een dergelijke sensorband? (bijv. comfort, privacy, betrouwbaarheid)
- Zou u bereid zijn de sensorband te gebruiken tijdens uw revalidatie? (Tijdens oefeningen, gedurende de hele dag)
- Welke informatie zou u willen ontvangen van de knieband? In welke vorm (grafieken, meldingen, app)?
- Wat zou voor u belangrijk zijn bij het dragen van een dergelijke knieband (comfort, draagduur, uiterlijk)?

- Heeft u suggesties of wensen die ik mee zou moeten nemen in het ontwerp?
- Is er nog iets belangrijks dat u zou willen delen waar nog geen vraag over gesteld is?

Physical therapist

Context & huidige praktijk

- Welke knieklachten of behandelingen ziet u het meest in uw praktijk (bijvoorbeeld knieoperaties, ernstige blessures)? Zijn dit patiënten van een bepaalde leeftijd of varieert dit sterk?
- Kunt u kort uitleggen hoe een knie-revalidatieproces er gemiddeld uitziet? Is dit verschillend per knieklacht? (Zijn er ook al afspraken vóór een operatie?)
- Hoe lang duurt de revalidatie gemiddeld?
- Hoe wordt de voortgang van patiënten momenteel gemeten en bijgehouden? Hoe vaak gebeurt dit?
- Welke metingen of parameters vindt u het belangrijkste om te monitoren (bijv. flexie/extensie, belasting, pijnniveau)?
- Welke uitdagingen of knelpunten ervaart u bij het monitoren van herstel?

Oefeningen & motivatie

- Welke oefeningen of bewegingen doen patiënten het vaakst thuis?
- Hoe geeft u uitleg over deze oefeningen?
- Hoe controleert u of patiënten thuis voldoende en correct oefenen?
- Wat is de invloed van de motivatie van de patiënt op de oefenfrequentie en het herstel in het algemeen?
- Heeft u hierbij ook contact met andere zorgverleners zoals de orthoped?
- Hoe wordt bepaald dat de patient klaar is met revalideren? Wordt er iets van een preventie plan opgesteld?

Kniesensorband

- Worden er vaak kniebraces of andere hulpmiddelen gebruikt tijdens de revalidatie? Zo ja, welke, en met welk doel?

- Wat vindt u van het idee van een textiele kniesensorband die bewegingen continu meet tijdens oefeningen of zelfs dagelijkse activiteiten?
- Op welke momenten in het hersteltraject zou zo'n sensorband volgens u het meeste waarde kunnen bieden? Waarom? (Thuisrevalidatie, tijdens oefeningen of gedurende de hele dag)
- Voor welke knieklachten/gevallen zou de kniesensorband het meest waardevol zijn?
- Welke inzichten of data zouden volgens u het meest waardevol zijn om de behandeling en adviezen aan patiënten te verbeteren?
- Hoe nauwkeurig moeten deze metingen zijn om bruikbaar te zijn?/Hoeveel progressie wordt gemiddeld per week gemaakt (graden)? (Om nodige nauwkeurigheid van de sensor te bepalen)
- Hoe zou u de data uit zo'n sensor het liefst terugzien (grafieken, visualisaties, meldingen)?
- Welke eigenschappen zijn belangrijk bij zo'n hulpmiddel (gebruiksgemak, betrouwbaarheid, feedback)?
- Welke risico's of nadelen ziet u bij het gebruik van zo'n band?
- Heeft u suggesties of wensen die ik mee zou moeten nemen in het ontwerp?
- Is er nog iets belangrijks dat u zou willen delen waar nog geen vraag over gesteld is?

Orthopedist

Achtergrond & ervaring

- Kunt u kort vertellen welke knieoperaties u het vaakst uitvoert en waardoor dat kan komen?
- Is er een bepaalde leeftijdsgroep die je vooral veel ziet of varieert dit sterk?
- Welke factoren beïnvloeden het herstel na een knieoperatie volgens u het meest?
- Hoe lang duurt de revalidatie gemiddeld?

Revalidatie & monitoring

- Hoe wordt het herstel van patiënten momenteel gevolgd na een knieoperatie? Hoe ziet dit proces er globaal uit?
- Hoe lang hebben patiënten na de operaties afspraken bij u? Worden deze redelijk snel doorverwezen naar fysio, lopen de afspraken gelijktijdig?
- Hoe controleert u de voortgang van de patient? En hoe vaak en op welke manier (consult, klinische tests, vragen)?
- Welke metingen of parameters vindt u het belangrijkste om te monitoren (bijv. flexie/extensie, belasting, pijnniveau)?
- Heeft u hierbij ook contact met andere zorgverleners zoals de fysiotherapeut?
- Welke uitdagingen of knelpunten ervaart u bij het volgen van het herstel van patiënten?

Kniesensorband

- Worden er vaak kniebraces of andere hulpmiddelen gebruikt tijdens de revalidatie? Zo ja, welke, en met welk doel?
- Wat vindt u van het idee van een textiele kniesensorband die bewegingen continu meet tijdens oefeningen of zelfs dagelijkse activiteiten?
- Op welke momenten in het hersteltraject zou zo'n sensorband volgens u het meeste waarde kunnen bieden? Waarom? (Thuisrevalidatie, tijdens oefeningen of gedurende de hele dag)
- Voor welke knieklachten/gevallen zou de kniesensorband het meest waardevol zijn?
- Welke inzichten of data zouden volgens u het meest waardevol zijn om de behandeling en adviezen aan patiënten te verbeteren?
- Hoeveel progressie wordt gemiddeld per week gemaakt (graden)? (Om nodige nauwkeurigheid van de sensor te bepalen)
- Hoe zou u de data uit zo'n sensor het liefst terugzien (grafieken, visualisaties, meldingen)?
- Welke eigenschappen zijn belangrijk bij zo'n hulpmiddel (gebruiksgemak, betrouwbaarheid, feedback)?
- Welke risico's of nadelen ziet u bij het gebruik van zo'n band?
- Is de knie gevoelig en/of pijnlijk op bepaalde plekken waar ik rekening

Consent form

- mee moet houden?
- Heeft u suggesties of wensen die ik mee zou moeten nemen in het ontwerp?
- Is er nog iets belangrijks dat u zou willen delen waar nog geen vraag over gesteld is?

Participant Information/Opening Statement

You are being invited to participate in a research study titled "Development and Validation of a Textile Strain Sensor Wearable for Continuous Knee Flexion Monitoring". This study is being done by Nienke Ickenroth from the TU Delft.

The purpose of this research study is to get to know the rehabilitation process, the perceived value of the knee sensor sleeve and the requirements of the knee sensor sleeve, and will take you approximately 30 minutes to complete. The data will be used for improving the design of the knee sensor sleeve within the researcher's master thesis. We will be asking you to answer questions in an interview about your experiences with knee rehabilitation and your thoughts on the potential use, requirements and concerns regarding a textile knee sensor sleeve.

As with any online activity the risk of a breach is always possible. To the best of our ability your answers in this study will remain confidential. We will minimize any risks by not collecting identifying information such as full name or contact details in the interview transcript. All data will be anonymized during transcription; audio files and transcripts will be stored securely on TU Delft's protected storage, only accessed by the researcher and deleted when processed.

Your participation in this study is entirely voluntary and you can withdraw at any time. You are free to omit any questions. If you wish to withdraw your data after the interview, you may request this within a week of participation, after which the data will be anonymized and removal will no longer be possible.

Corresponding Researcher: Nienke Ickenroth (Master's Student, TU Delft) – email: N.M.Ickenroth@student.tudelft.nl
Responsible Researcher: Kaspar Jansen (Professor/chair, TU Delft – email: K.M.B.Jansen@tudelft.nl

Explicit Consent points


PLEASE TICK THE APPROPRIATE BOXES	Yes	No
A: GENERAL AGREEMENT – RESEARCH GOALS, PARTICIPANT TASKS AND VOLUNTARY PARTICIPATION		
1. I have read and understood the study information dated 26/09/2025, or it has been read to me. I have been able to ask questions about the study and my questions have been answered to my satisfaction.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. I consent voluntarily to be a participant in this study and understand that I can refuse to answer questions and I can withdraw from the study at any time, without having to give a reason.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. I understand that taking part in the study involves: [see points below]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<ul style="list-style-type: none"> • An audio-recorded interview. • Audio on phone will be used to record the interviews. • Audio recording will be transcribed as text after this the recording will be destroyed. 		
4. I understand that the study will end 1/03/2025		
B: POTENTIAL RISKS OF PARTICIPATING (INCLUDING DATA PROTECTION)		
5. I understand that taking part in the study involves the following risks: I may experience minor mental or emotional discomfort when discussing my professional experiences or personal experiences related to knee rehabilitation, and I might feel hesitant to answer some questions honestly. I understand that these will be mitigated by allowing me to skip any question or stop the interview at any time without consequences, by conducting the interview respectfully and non-judgmentally, and by anonymizing all responses to protect privacy.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. I understand that taking part in the study also involves collecting specific personally identifiable information (PII) such as my age, gender, or professional role and associated personally identifiable research data (PIRD) such as my experiences and opinions regarding knee rehabilitation with the potential risk of my identity being revealed. I understand that these risks are minimal because all information will be anonymized, stored securely, and reported only in non-identifiable form.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. I understand that the following steps will be taken to minimise the threat of a data breach, and protect my identity in the event of such a breach: All data collected will be anonymized, stored securely, and accessible only to me. Interview recordings and transcripts will be kept confidential, and any reporting of results will use non-identifiable information to ensure that individual participants cannot be recognized.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. I understand that personal information collected about me that can identify me, such as name and email address, will not be shared beyond the study team.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9. I understand that the (identifiable) personal data I provide will be destroyed after the interview is incorporated and no follow up meetings will be planned.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
C: RESEARCH PUBLICATION, DISSEMINATION AND APPLICATION		
10. I understand that after the research study the de-identified information I provide will be used for reports, publications, and presentations related to my graduation project. This may include anonymized quotes from interviews to illustrate experiences and insights, but no identifiable information such as names or direct contact details will be published. The information will be used to inform the development of a textile knee sensor sleeve.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>


PLEASE TICK THE APPROPRIATE BOXES	Yes	No
11. I agree that my responses, views or other input can be quoted anonymously in research outputs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
D: (LONGTERM) DATA STORAGE, ACCESS AND REUSE		
12. I give permission for de-identified or pseudo-anonymized data, such as age, gender and/or professional role, and anonymized interview quotes, that I provide to be archived via the final research report so it can be used for future research and learning. No direct personal identifiers, such as my name or contact details, will be included.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13. I understand that access to this repository is open.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Signatures

Name of participant [printed] Signature Date

I, as researcher, have accurately read out the information sheet to the potential participant and, to the best of my ability, ensured that the participant understands to what they are freely consenting.

Nienke Ickenroth  26/09/2025
Signature Date



C. Design aesthetic research



D. Arduino codes

Left knee sleeve

This Arduino code turns the microcontroller into a wireless knee angle sensor. The sensor on analog pin A2 is read and converted to a resistor via a voltage divider. Using a calibration table, this resistance is then converted to a knee angle in degrees. The resistor values (float resistances) used must be determined using a calibration method. The measured angle is filtered to reduce fluctuations and then sent, along with the resistance, to a connected device via Bluetooth Low Energy (BLE).

The code also includes a button that turns an LED on and off, including a short delay to prevent contact bounce.

```
#include <ArduinoBLE.h>

/* ===== KNOP & LED ===== */
const int knopPin = D10;
const int ledPin = 10;

bool ledStatus = false;
bool vorigeKnop = HIGH;
/* =====
*/

#define SENSOR_PIN A2
#define R_FIXED 100.0
#define VCC 3.3

BLEService sensorService("19b10000-e8f2-537e-4f6c-d104768a1214");

BLEUnsignedShortCharacteristic hoekChar(
  "19b10001-e8f2-537e-4f6c-d104768a1214",
  BLERead | BLENotify
);
```

```
BLEUnsignedShortCharacteristic weerstandChar(
  "19b10002-e8f2-537e-4f6c-d104768a1214",
  BLERead | BLENotify
);

// FILTER
float hoekFiltered = 0.0;
const float alpha = 0.1;

// KALIBRATIE LINKS
const int numPoints = 11;
float angles[numPoints] = {0,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100};
float resistances[numPoints] = {135.0,135.9,136.3,137.6,141.7,149.5,158.3,162.4,164.6, 165.8,166.8};

float resistanceToAngle(float R) {
  if (R <= resistances[0]) return angles[0];
  if (R >= resistances[numPoints-1]) return angles[numPoints-1];
  for (int i=0;i<numPoints-1;i++){
    if (R >= resistances[i] && R <= resistances[i+1]){
      float t = (R - resistances[i]) / (resistances[i+1] - resistances[i]);
      return angles[i] + t * (angles[i+1] - angles[i]);
    }
  }
  return angles[0];
}
```

```
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  BLE.begin();
```

```
  BLE.setLocalName("KnieSensor_L");
  sensorService.addCharacteristic(hoekChar);
  sensorService.addCharacteristic(weerstandChar);
  BLE.addService(sensorService);
```

```
  BLE.setAdvertisingInterval(100);
  BLE.advertise();
```

```
  /* ===== NIEUW: KNOP & LED SETUP ===== */
  pinMode(knopPin, INPUT_PULLUP);
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
  digitalWrite(ledPin, LOW);
  /* ===== */
```

```
  Serial.println("Linker knieband gestart");
}
```

```
void loop() {
```

```
  /* ===== KNOP LOGICA ===== */
  bool huidigeKnop = digitalRead(knopPin);
```

```
  if (vorigeKnop == HIGH && huidigeKnop == LOW) {
    ledStatus = !ledStatus;
    digitalWrite(ledPin, ledStatus);
    delay(200); // debounce
  }
  vorigeKnop = huidigeKnop;
  /* ===== */
```

```
  BLEDevice central = BLE.central();
  if (!central) return;
```

```
  while (central.connected()) {
    int rawADC = analogRead(SENSOR_PIN);
    float Vout = (rawADC / 1023.0) * VCC;
    float R = (Vout > 0.001) ? R_FIXED * (VCC - Vout) / Vout : 0;
```

```
    float hoek = resistanceToAngle(R);
    hoekFiltered = alpha * hoek + (1.0 - alpha) * hoekFiltered;
```

```
    //Serial.print("R=");
    Serial.println(R,1);
    //Serial.print(" Ohm | Hoek raw=");
    //Serial.print(hoek,1);
    //Serial.print(" | Hoek filt=");
    //Serial.println(hoekFiltered,1);
```

```
    hoekChar.writeValue((uint16_t)(hoekFiltered * 10));
    weerstandChar.writeValue((uint16_t)(R * 10));
```

```
    delay(100);
  }
}
```

Right knee sleeve

```
#include <ArduinoBLE.h>

/* ===== NIEUW: KNOP & LED ===== */
const int knopPin = D10; // momentknop
const int ledPin = 10; // LED

bool ledStatus = false;
bool vorigeKnop = HIGH;
/* ===== */

#define SENSOR_PIN A2
#define R_FIXED 100.0
#define VCC 3.3

BLEService sensorService("19b10000-e8f2-537e-4f6c-d104768a1214");

// BLE characteristics
BLEUnsignedShortCharacteristic hoekChar(
  "19b10001-e8f2-537e-4f6c-d104768a1214",
  BLERead | BLENotify
);

BLEUnsignedShortCharacteristic weerstandChar(
  "19b10002-e8f2-537e-4f6c-d104768a1214",
  BLERead | BLENotify
);

// FILTER
float hoekFiltered = 0.0;
const float alpha = 0.1;

// KALIBRATIE RECHTS
const int numPoints = 11;
float angles[numPoints] = {0,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100};
float resistances[numPoints] = {66.8,67.4,69.4,72.3,75.8,80.8,
```

```
86.2,91.4,95.1,97.0,97.3};
```

```
float resistanceToAngle(float R) {
  if (R <= resistances[0]) return angles[0];
  if (R >= resistances[numPoints-1]) return angles[numPoints-1];
  for (int i=0;i<numPoints-1;i++){
    if (R >= resistances[i] && R <= resistances[i+1]){
      float t = (R - resistances[i]) / (resistances[i+1] - resistances[i]);
      return angles[i] + t * (angles[i+1] - angles[i]);
    }
  }
  return angles[0];
}
```

```
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  BLE.begin();
```

```
  BLE.setLocalName("KnieSensor_R");
  sensorService.addCharacteristic(hoekChar);
  sensorService.addCharacteristic(weerstandChar);
  BLE.addService(sensorService);
```

```
  BLE.setAdvertisingInterval(100);
  BLE.advertise();
```

```
/* ===== KNOP & LED SETUP ===== */
pinMode(knopPin, INPUT_PULLUP);
pinMode(ledPin, OUTPUT);
digitalWrite(ledPin, LOW);
Serial.println("Rechter knieband gestart");
}
```

```
void loop() {
```

```
/* ===== KNOP LOGICA ===== */
bool huidigeKnop = digitalRead(knopPin);
```

```
if (vorigeKnop == HIGH && huidigeKnop == LOW) {
  ledStatus = !ledStatus;
  digitalWrite(ledPin, ledStatus);
  delay(200); // debounce
}
vorigeKnop = huidigeKnop;
/* ===== */
```

```
BLEDevice central = BLE.central();
if (!central) return;
```

```
while (central.connected()) {
  int rawADC = analogRead(SENSOR_PIN);
  float Vout = (rawADC / 1023.0) * VCC;
  float R = (Vout > 0.001) ? R_FIXED * (VCC - Vout) / Vout : 0;
```

```
  float hoek = resistanceToAngle(R);
  hoekFiltered = alpha * hoek + (1.0 - alpha) * hoekFiltered;
```

```
  Serial.println(hoekFiltered,1);
```

```
  hoekChar.writeValue((uint16_t)(hoekFiltered * 10));
  weerstandChar.writeValue((uint16_t)(R * 10));
```

```
  delay(100);
}
}
```

E. Python code

This Python code creates a graphical application that reads and displays the resistance of a left and right knee sensor via Bluetooth Low Energy (BLE) in real time. Using the bleak library, it automatically searches for both sensors and establishes a connection. The measured resistance values are continuously received and stored in queues.

The left sensor is converted to the equivalent right resistance using a linear calibration (numpy.polyfit) so that both measurements are comparable. In addition, a low-pass filter is applied to both signals to reduce noise.

Using tkinter and matplotlib, a graphical interface is displayed in which the resistances are plotted against time in real time. The user can save the measured data as a CSV file via a button.

```
import asyncio
import threading
import queue
import csv
from datetime import datetime
import os
import tkinter as tk
from tkinter import messagebox
```

```
from bleak import BleakClient, BleakScanner
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
import numpy as np
```

```
# ===== BLE INSTELLINGEN =====
DEVICE_R = "KnieSensor_R"
DEVICE_L = "KnieSensor_L"
WEERSTAND_UUID = "19b10002-e8f2-537e-4f6c-d104768a1214"
```

```
MAX_POGINGEN = 10
SCAN_DUUR = 5
PAUZE_TUSSEN = 2
```

```
# ===== DATA QUEUES =====
data_queue_R = queue.Queue()
data_queue_L = queue.Queue()
```

```
# ===== BLE THREAD =====
def start_ble_thread(device_name, data_queue):
    async def ble_loop():
        device = None
        for _ in range(MAX_POGINGEN):
            devices = await BleakScanner.discover(timeout=SCAN_DUUR)
            device = next((d for d in devices if d.name == device_name), None)
            if device:
                break
        await asyncio.sleep(PAUZE_TUSSEN)
```

```
if not device:
    print(f" {device_name} niet gevonden")
    return
```

```
async with BleakClient(device.address) as client:
    print(f" Verbonden met {device_name}")
```

```
def handler(sender, data):
    waarde = int.from_bytes(data, byteorder="little")
    R = waarde / 10.0
    data_queue.put(R)
```

```
await client.start_notify(WEERSTAND_UUID, handler)
```

```
while True:
    await asyncio.sleep(1)
```

```
threading.Thread(target=lambda: asyncio.run(ble_loop()), daemon=True).
start()
```

```
start_ble_thread(DEVICE_R, data_queue_R)
```

```
start_ble_thread(DEVICE_L, data_queue_L)
```

```
# ===== KALIBRATIE (NIEUWE WAARDES)
===== (change to correct values)
rechts_points = np.array([
66.84847344, 67.38908406, 69.43345044, 72.30007026, 75.78004216,
80.78802529, 86.23281518, 91.49968911, 95.09981346, 96.97988808,
97.30793285, 96.46475971, 94.63885582, 92.10331349, 91.3019881,
92.54119286, 94.04471571, 95.10682943, 95.90409766, 96.22245859,
94.93347516, 93.56008509, 91.89605106, 90.05763063, 87.99457838,
85.07674703, 82.08604822, 79.29162893, 77.25497736, 75.55298641,
73.85179185, 72.39107511, 71.27464507, 70.36478704, 69.73887222,
69.12332333, 68.433994, 67.9003964, 67.38023784, 67.0681427,
67.40088562, 67.28053137
])
```

```
links_points = np.array([
135.0381788, 134.9067251, 135.2947076, 137.5762953, 141.6934067,
149.5253847, 158.2777693, 162.3944385, 164.646107, 165.8022749,
164.7515924, 162.8161147, 160.2912803, 156.4838962, 154.9287273,
155.9401091, 157.6380764, 159.0366535, 160.6156574, 164.0309602,
167.2916721, 168.7041705, 169.4829193, 167.7180435, 164.2926305,
161.1448413, 157.2913889, 153.1539723, 149.4177806, 146.4424464,
144.2097125, 142.4667987, 141.7567591, 140.5997314, 139.459812,
138.3318684, 137.3623079, 136.6836155, 136.0585309, 135.4409716,
135.1886801, 134.6820761
])
```

```
a, b = np.polyfit(links_points, rechts_points, 1)
print(f"Omrekening links [] rechts: a={a:.6f}, b={b:.6f}")
```

```
def convert_left(R_left):
    return a * R_left + b
```

```
# ===== FILTER INSTELLINGEN =====
ALPHA_R = 0.4 # rechter knie
```

```
ALPHA_L = 0.3 # linker knie (sterker filter)
```

```
filtered_R = None
filtered_L = None
```

```
# ===== GUI =====
root = tk.Tk()
root.title("Weerstand Meting – Links & Rechts")
```

```
weerstand_data_R = []
tijd_data_R = []
weerstand_data_L = []
tijd_data_L = []
```

```
starttijd = datetime.now()
```

```
fig, ax = plt.subplots(figsize=(6, 4))
lijn_R = ax.plot([], [], label="Rechter knie", color="blue")
lijn_L = ax.plot([], [], label="Linker knie (omgerekend)", color="red")
ax.set_xlabel("Tijd (s)")
ax.set_ylabel("Weerstand (Ω)")
ax.legend()
```

```
canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=root)
canvas.get_tk_widget().pack(fill=tk.BOTH, expand=True)
```

```
# ===== OPSLAAN =====
SCRIPT_MAP = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))
METINGEN_MAP = os.path.join(SCRIPT_MAP, "metingen")
os.makedirs(METINGEN_MAP, exist_ok=True)
```

```
def opslaan():
    filename = os.path.join(
        METINGEN_MAP,
        f"weerstand_{datetime.now().strftime('%Y%m%d_%H%M%S')}.csv"
    )
```

```

max_len = max(len(tijd_data_R), len(tijd_data_L))
with open(filename, "w", newline="", encoding="utf-8") as f:
    writer = csv.writer(f)
    writer.writerow(["Tijd_R (s)", "R_rechts (Ω)", "Tijd_L (s)", "R_links_omgere-
kend (Ω)"])
    for i in range(max_len):
        writer.writerow([
            tijd_data_R[i] if i < len(tijd_data_R) else "",
            weerstand_data_R[i] if i < len(weerstand_data_R) else "",
            tijd_data_L[i] if i < len(tijd_data_L) else "",
            weerstand_data_L[i] if i < len(weerstand_data_L) else ""
        ])

```

```

messagebox.showinfo("Opgeslagen", f"Data opgeslagen:\n{filename}")

```

```

tk.Button(root, text="Opslaan", command=opslaan).pack(pady=10)

```

```

# ===== UPDATE LOOP =====

```

```

def update():
    global filtered_R, filtered_L

    while not data_queue_R.empty():
        R = data_queue_R.get()
        filtered_R = R if filtered_R is None else ALPHA_R * R + (1 - ALPHA_R) *
filtered_R
        t = (datetime.now() - starttijd).total_seconds()
        weerstand_data_R.append(filtered_R)
        tijd_data_R.append(t)

```

```

while not data_queue_L.empty():
    R = data_queue_L.get()
    filtered_L = R if filtered_L is None else ALPHA_L * R + (1 - ALPHA_L) *
filtered_L
    t = (datetime.now() - starttijd).total_seconds()
    weerstand_data_L.append(convert_left(filtered_L))
    tijd_data_L.append(t)

```

```

lijn_R.set_data(tijd_data_R, weerstand_data_R)
lijn_L.set_data(tijd_data_L, weerstand_data_L)

```

```

ax.relim()
ax.autoscale_view()
canvas.draw()

```

```

root.after(100, update)

```

```

update()
root.mainloop()

```

F. User evaluation test

Testing plan physical therapist

Loop met de fysiotherapeut door de Figma interface heen.

Vragen over de interface

- Wat vind je van het op deze manier registreren van de kniebewegingen van patienten?
- Wat vind je van het op deze manier live kunnen zien van de beweging van de knie en de referentie en voortgang informatie?
- Wat vind je van de informatie die wordt gedeeld?
- Wat vind je van de manier waarop deze wordt gedeeld?
- Vind je deze duidelijk en overzichtelijk?
- Is deze informatie op dit moment al bekend over patiënten?
- Denk je dat patienten zulke specifieke informatie interessant zouden vinden?
- Hoe voegt dit waarde toe aan de behandeling?/ Hoe zou dit je helpen?
- Zou u voorkeur hebben voor een app dat iedereen op zijn eigen telefoon kan kijken of eerder een groter scherm via een website?
- Welke informatie mis je nog?
- Is er onnodige informatie?

Verdiepende vragen

- Zou je dit in de praktijk gebruiken? Waarom wel/niet?
- Op welk moment in het behandelingsproces is dit het meest waardevol?
- Zie je beperkingen?
- Is er iets dat er nog nodig is om dit daadwerkelijk te gaan gebruiken?
- Welke verbeteringen of aanvullingen zijn er?
- Zou het bijhouden van kniebewegingen gedurende de dag waardevol kunnen zijn?
- Denk je dat dit concept patiënten de mogelijkheid biedt om ook thuis te oefenen in plaats van alleen in de praktijk?
- Overige vragen
- Wat dragen patienten normaal gesproken tijdens het oefenen? (Om te weten of de knieband direct op de huid gedragen zou worden of overheen of onder)
- Welke vorm van asymmetrie is er? Verschil in hoek? Ook verschil in snelheid van bewegen?
- Is er nog iets anders dat u wilt toevoegen dat nog niet is besproken?

Door het testplan van de patient heen lopen om de fysiotherapeut uit te leggen wat hoe ik wil gaan testen

- Zijn er nog vragen die ik mis maar wel interessant zouden kunnen zijn of vragen die ik beter anders kan formuleren?

Testing plan patient

Since the test was performed with dutch participants, the testing plan below is described in Dutch including Dutch questions.

Fase 1: Introductie

Leg uit:

Wie ik ben, wat mijn project en het systeem inhoudt, waarvoor de test wordt uitgevoerd en hoe deze eruit zal zien. Vraag hem/haar de consent form door te lezen en deze te ondertekenen.

Vraag naar:

- Soort knieklacht/operatie
- Hoe lang in revalidatie

Fase 2: Interface deel 1 en positioneren knieband

Doorloop het eerste deel van de gebruikersinterface; pagina voor aanmelden en verbinden/voorbereiding

- Leg uit over de bijbehorende app/website en doorloop de inlogpagina en start pagina

Opdracht

- Vraag de deelnemer de knieband aan te trekken
- Corrigeer bij verkeerde plaatsing

Fase 3: Oefening met live grafiek

Opdracht

Vraag de deelnemer een squat oefening uit te voeren.

Leg uit:

Over het invullen van oefeningen en de grafiek die in beeld komt na het drukken op “Laten we beginnen!”. Leg uit wat de grafiek laat zien en de verschillende onderdelen (doellijn, voortgangsbalk etc)

Vragen

- Wat vind je ervan om op deze manier je beweging te kunnen zien?
- Wat vind je van het hebben van een doellijn?
- Wat vind je van het kunnen zien van je voortgang gedurende de oefening dmv de balk die volloopt?

- Zou je meldingen willen krijgen over je beweging zoals “probeer een iets consistente bewegingssnelheid aan te houden”.
- Hoe comfortabel vind je de knieband? Voel je hem zitten tijdens het bewegen?
- Heb je het idee dat hij goed op zijn plek blijft zitten?
- Vond je het duidelijk hoe deze geplaatst moet worden op de knie?
- Wat vind je van het uiterlijk van de knieband?

Fase 4: Interface deel 2

Loop door het oefeningenoverzicht en ligt de termen/informatie toe.

Vraag

- Heb je interesse in deze informatie? Zou je hier naar kijken?

Loop door het voortgangs overzicht en licht deze toe

Vraag

- Zou je interesse hebben in deze informatie?
- Zou het je motiveren?

Fase 5: Ervaring en mening

Wat vindt je van deze manier van informatie ontvangen over je beweging en voortgang?

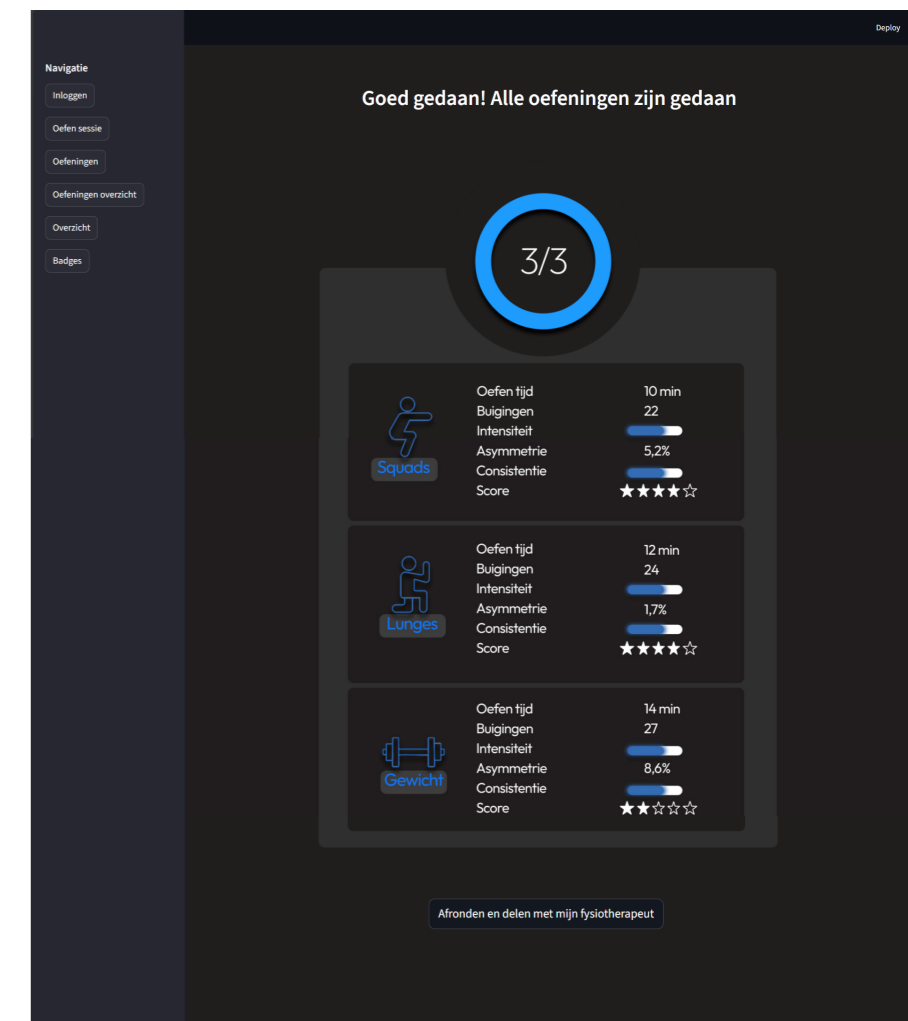
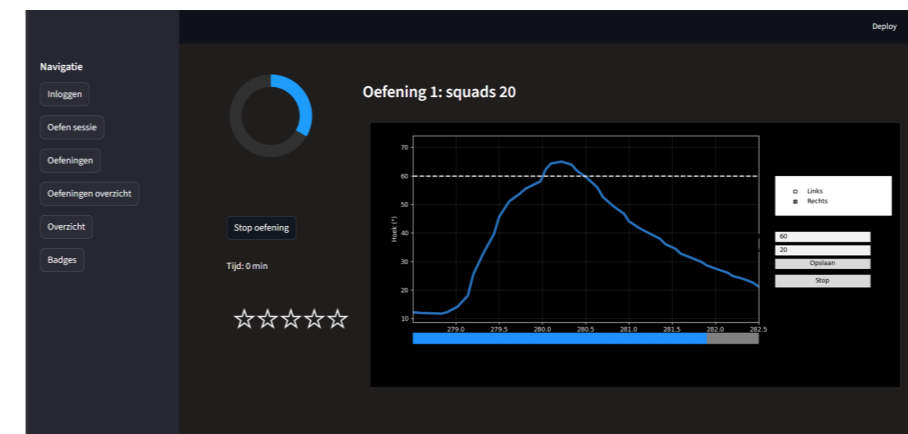
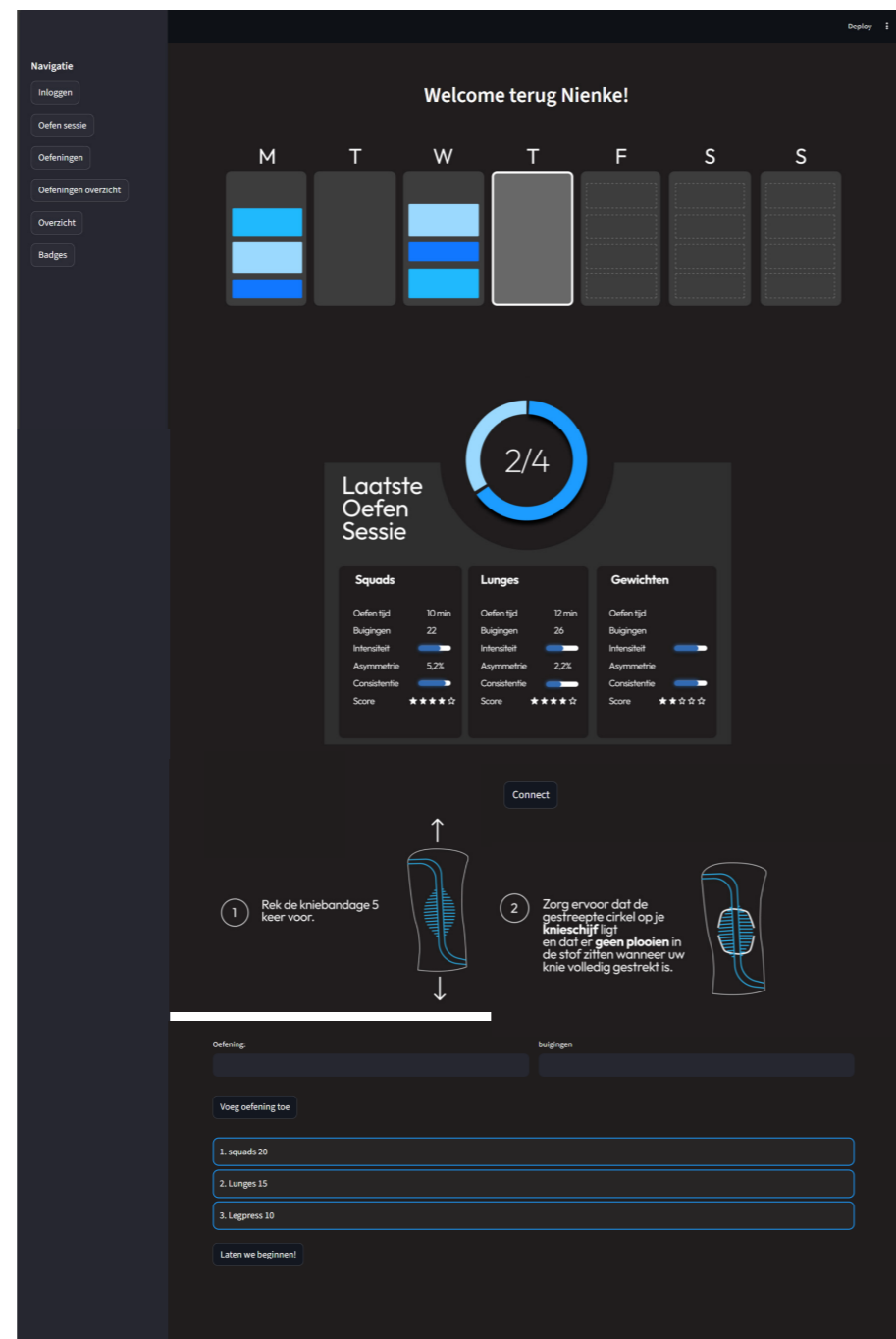
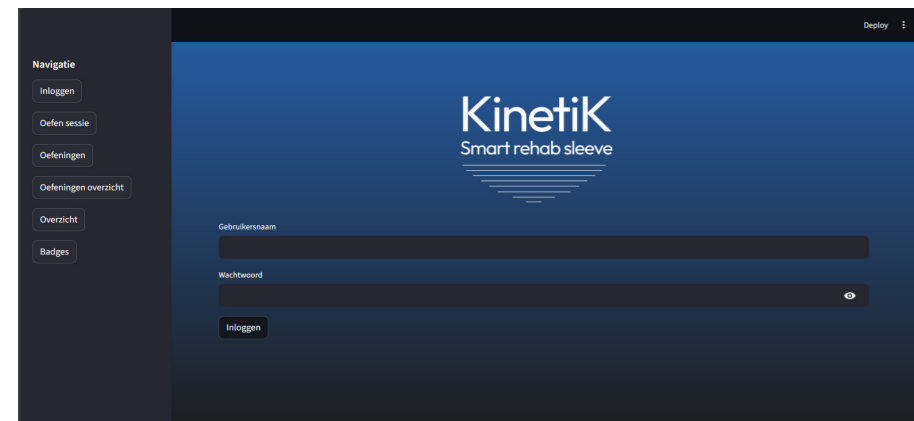
Zie je waarde in:

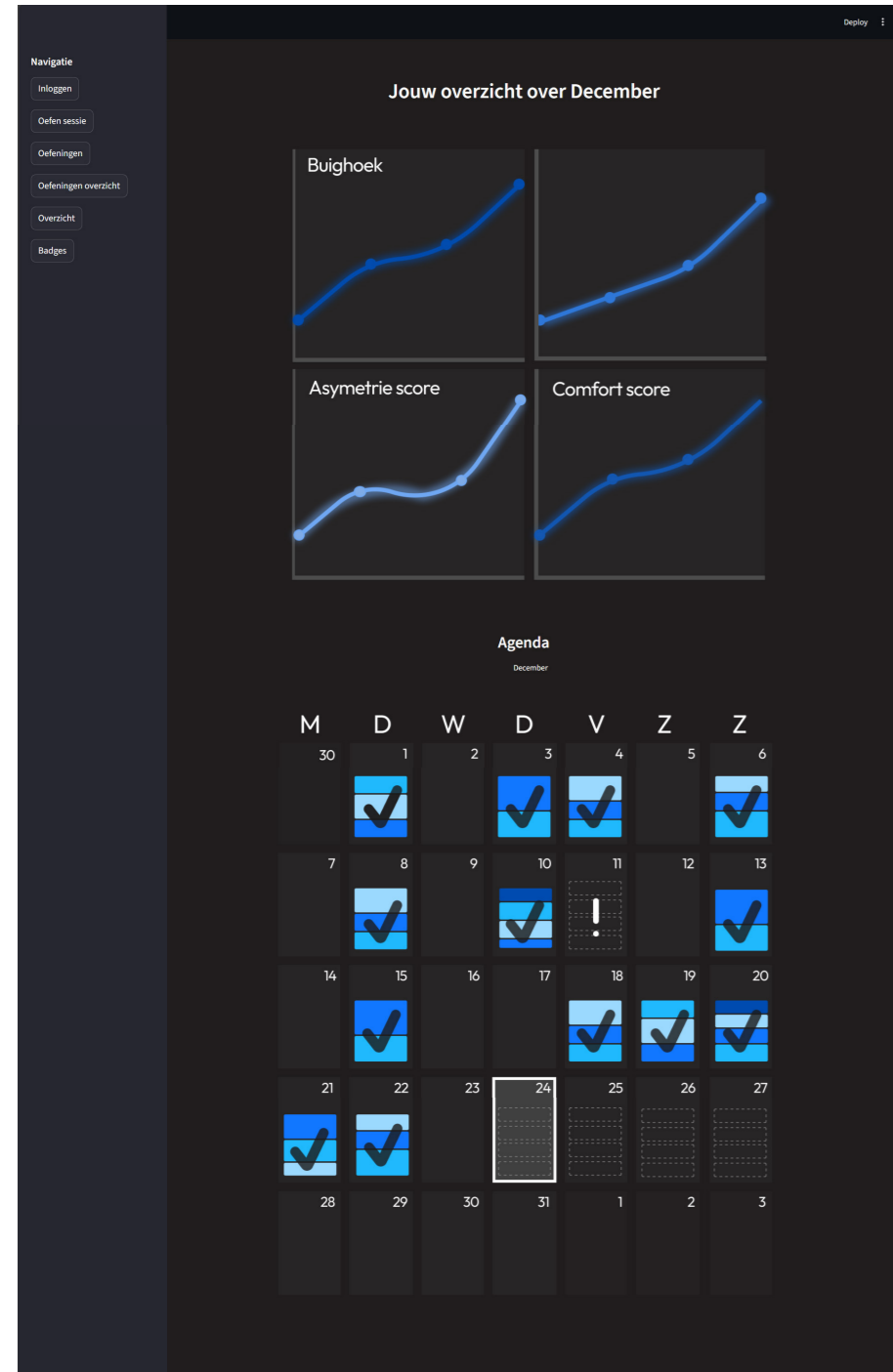
- de live grafiek?
- de informatie over je bewegingen na de trainingssessie?
- het overzicht van het hele revalidatieproces?

- Helpt deze informatie je om meer inzicht te krijgen in je herstel?
- Zou je de knieband dragen tijdens je revalidatieoefeningen (als dit je herstel zou verbeteren)?
- Voer je momenteel vooral de oefeningen binnen de praktijk uit? Zou je dit ook buiten de praktijk willen gebruiken?
- Welke informatie mis je nog?
- Wat zou je veranderen?

Streamlit environment

Since the test was performed with dutch participants, the text in the streamlit interface below is in Dutch.





Live angle graph (python)

This Python code creates a real-time application that reads the knee angles from the left and right knee sensor via Bluetooth Low Energy (BLE) and displays them in a graph. Using the bleak library, a connection is established between both sensors, after which the measured angles are continuously received and stored.

Matplotlib plots the angle measurements live over a four-second time window. Checkboxes allow the user to toggle the left or right line on or off, and a button allows the graph to be paused or started.

In addition, a threshold (target) value can be set in the upper text box. When the right (injured) knee exceeds this set angle, a block below the graph is colored blue. The number of blocks (which are the number of bends), can be entered in the lower text box.

This graph was added to the streamlit environment during the test.

```
import asyncio
import threading
import time
from collections import deque
```

```
import numpy as np
import matplotlib
matplotlib.use("TkAgg")
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
from matplotlib.widgets import Button, TextBox, CheckButtons
from matplotlib.animation import FuncAnimation
from bleak import BleakScanner, BleakClient
```

```
# BLE instellingen
SERVICE_UUID = "19b10000-e8f2-537e-4f6c-d104768a1214"
HOEK_UUID = "19b10001-e8f2-537e-4f6c-d104768a1214"
```

```
DEVICE_NAMES = {
    "KnieSensor_L": "L",
    "KnieSensor_R": "R"
}
```

```
SCAN_TIMEOUT = 5.0
MAX_RETRIES = 10
```

```
# Plot instellingen
WINDOW_SECONDS = 4.0
MAX_POINTS = 200
Y_MARGIN = 3.0
```

```
# Buffers
data = {
    "L": deque(),
    "R": deque()
}
```

```
data_lock = threading.Lock()
start_time = time.time()
plot_running = True
```

```
# Blokjes / drempel
threshold_angle = None
num_blocks = 0
current_block = 0
block_patches = []
```

```
BLOCK_WAIT_TIME = 2.5
last_trigger_time = -float("inf")
```

```
# BLE callback
def notification_handler(side):
    def handler(_, value: bytearray):
        hoek = int.from_bytes(value, byteorder="little") / 10.0
        t = time.time() - start_time
```

```
with data_lock:
    data[side].append((t, hoek))
    if len(data[side]) > 1000:
        data[side].popleft()
```

```
return handler
```

```
# BLE helpers
async def find_device(name):
    for _ in range(MAX_RETRIES):
        devices = await BleakScanner.discover(timeout=SCAN_TIMEOUT)
        for d in devices:
            if d.name == name:
                return d
        await asyncio.sleep(1)
```

```
raise RuntimeError(f"{name} niet gevonden")
```

```
async def connect_device(device, side):
    client = BleakClient(device)
    await client.connect()
    await client.start_notify(HOEK_UUID, notification_handler(side))
    return client
```

```
async def ble_loop():
    for name, side in DEVICE_NAMES.items():
        device = await find_device(name)
        await connect_device(device, side)
```

```
while True:
    await asyncio.sleep(0.1)
```

```
# UI callbacks
def toggle_plot(event):
    global plot_running
    plot_running = not plot_running
    btn.label.set_text("Start" if not plot_running else "Stop")
```

```
def save_settings(event=None):
    global threshold_angle, num_blocks, current_block, last_trigger_time
```

```
try:
    threshold_angle = float(text_threshold.text)
    num_blocks = int(text_blocks.text)
except ValueError:
    return
```

```
current_block = 0
last_trigger_time = -float("inf")
```

```
for p in block_patches:
    p.remove()
block_patches.clear()
```

```
for i in range(num_blocks):
    rect = plt.Rectangle(
        (i * 0.225, 0.25),
        0.225,
        0.5,
        color="gray"
    )
    ax_blocks.add_patch(rect)
    block_patches.append(rect)
```

```
ax_blocks.set_xlim(0, num_blocks * 0.225)
ax_blocks.set_ylim(0, 1)
ax_blocks.axis("off")
```

```
def check_threshold(value):
    global current_block, last_trigger_time
```

```
now = time.time()
```

```
if threshold_angle is None or current_block >= num_blocks:
    return
```

```

    if value >= threshold_angle and (now - last_trigger_time) >= BLOCK_WAIT_
    TIME:
        block_patches[current_block].set_color("dodgerblue")
        current_block += 1
        last_trigger_time = now

# Plot setup
fig = plt.figure(figsize=(12, 6))

ax = fig.add_axes([0.08, 0.25, 0.65, 0.7])
ax_blocks = fig.add_axes([0.08, 0.15, 0.65, 0.08])

fig.patch.set_facecolor("black")
ax.set_facecolor("black")

line_L, = ax.plot([], [], color="#87d2f8", linewidth=4, label="Links")
line_R, = ax.plot([], [], color="#2870B9", linewidth=4, label="Rechts")

threshold_line, = ax.plot([], [], color="white", linestyle="--", linewidth=2)

ax.set_xlabel("Tijd (s)", color="white")
ax.set_ylabel("Hoek (°)", color="white")
ax.tick_params(colors="white")

for spine in ax.spines.values():
    spine.set_color("white")

ax.grid(True, color="gray", alpha=0.3)

# Checkboxes
ax_check = fig.add_axes([0.76, 0.65, 0.22, 0.15])
check = CheckButtons(
    ax_check,
    ["Links", "Rechts"],
    [True, True]
)

def toggle_visibility(label):
    if label == "Links":
        line_L.set_visible(not line_L.get_visible())

```

```

    elif label == "Rechts":
        line_R.set_visible(not line_R.get_visible())

check.on_clicked(toggle_visibility)

# UI rechts
ax_tb1 = fig.add_axes([0.76, 0.55, 0.18, 0.04])
ax_tb2 = fig.add_axes([0.76, 0.50, 0.18, 0.04])

text_threshold = TextBox(ax_tb1, "Hoek")
text_blocks = TextBox(ax_tb2, "Aantal")

ax_save = fig.add_axes([0.76, 0.45, 0.18, 0.04])
btn_save = Button(ax_save, "Opslaan")
btn_save.on_clicked(save_settings)

ax_button = fig.add_axes([0.76, 0.38, 0.18, 0.05])
btn = Button(ax_button, "Stop")
btn.on_clicked(toggle_plot)

# Update functie
def update(frame):
    if not plot_running:
        return

    now = time.time() - start_time
    ax.set_xlim(max(0, now - WINDOW_SECONDS), now)

    y_values = []

    with data_lock:
        for side, line in [("L", line_L), ("R", line_R)]:
            recent = list(data[side])[-MAX_POINTS:]
            if recent:
                t, y = np.array(recent).T
                line.set_data(t, y)
                y_values.extend(y)

    if side == "R":
        check_threshold(y[-1])

```

```

if threshold_angle is not None:
    threshold_line.set_data(
        [now - WINDOW_SECONDS, now],
        [threshold_angle, threshold_angle]
    )

if y_values:
    ax.set_ylim(
        min(y_values) - Y_MARGIN,
        max(y_values) + Y_MARGIN
    )

# Start BLE + plot
threading.Thread(
    target=lambda: asyncio.run(ble_loop()),
    daemon=True
).start()

ani = FuncAnimation(
    fig,
    update,
    interval=10,
    blit=False,
    cache_frame_data=False
)

plt.show()

```

Consent forms

Patient

Deelnemersinformatie

U bent uitgenodigd om deel te nemen aan een onderzoekstudie met de titel: "Ontwikkeling en Validatie van een Textiele Reksensor Knieband voor Continu Kniebuigmonitoring". Deze studie wordt uitgevoerd door Nienke Ickenroth, student aan de TU Delft.

Het doel van dit onderzoek is het testen van een textiele knie-sensor band die ontworpen is om continu de kniebuiging te meten, om zo het comfort, de bruikbaarheid en het begrip van de gebruikers van het apparaat te evalueren. De gegevens zullen worden gebruikt om het ontwerp van de knie-sensor band te verbeteren in het kader van de masterthesis van de onderzoeker. U zal worden gevraagd de knie-sensor band te dragen, uw normale oefeningen uit te voeren en vragen te beantwoorden over uw ervaring, comfort en begrip van het apparaat.

Er bestaat altijd een klein risico op een datalek. Voor zover mogelijk blijven uw antwoorden in deze studie vertrouwelijk. We minimaliseren eventuele risico's door geen persoonlijk identificeerbare informatie te verzamelen, alle gegevens veilig op te slaan op de servers van de TU Delft en alle antwoorden te anonimiseren bij de analyse van de resultaten.

De geanonimiseerde gegevens die tijdens deze studie worden verzameld, zullen openbaar beschikbaar worden gesteld in de TU Delft repository als onderdeel van het eindrapport van het project.

Uw deelname aan deze studie is volledig vrijwillig en u kunt op elk moment stoppen. U bent vrij om vragen over te slaan. Als u uw gegevens na deelname wilt laten verwijderen, kunt u dit binnen een week na de test aanvragen. Daarna zullen de gegevens geanonimiseerd zijn en kunnen ze niet meer worden verwijderd.

Corresponderende onderzoeker: Nienke Ickenroth (masterstudent, TU Delft) – e-mail: N.M.ickenroth@student.tudelft.nl
 Verantwoordelijke onderzoeker: Kaspar Jansen (hoogleraar, TU Delft – e-mail: K.M.B.Jansen@tudelft.nl)

Expliciete toestemmingspunten

KRUIS DE JUISTE VAKJES AAN	Yes	No
A: ALGEMENE OVEREENKOMST – ONDERZOEKSDOELSTELLINGEN, TAKEN VAN DE DEELNEMERS EN VRIJWILLIGE DEELNAME		
1. Ik heb de bovenstaande informatie gelezen en begrepen. Ik heb vragen kunnen stellen over de studie en mijn vragen zijn naar tevredenheid beantwoord.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Ik stem er vrijwillig mee in om deel te nemen aan dit onderzoek en begrijp dat ik kan weigeren vragen te beantwoorden en dat ik me op elk moment uit het onderzoek kan terugtrekken, zonder daarvoor een reden te hoeven opgeven.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Ik begrijp dat deelname aan het onderzoek het volgende inhoudt:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<ul style="list-style-type: none"> Het dragen van de textiele kniesensorband gedurende de test. Het uitvoeren van oefeningen die ik normaal gesproken uitvoer binnen de praktijk. De sensorgegevens tijdens de oefeningen automatisch digitaal worden geregistreerd. Het beantwoorden van vragen over mijn ervaring, comfort, mening en begrip van het apparaat en de interface. Tijdens de test aantekeningen worden gemaakt. Het gesprek wellicht zal worden opgenomen De audio-opname wordt omgezet in tekst, waarna de opname wordt vernietigd. 		
4. Ik begrijp dat het onderzoek op 20 februari 2026 zal eindigen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
B: MOGELIJKE RISICO'S VAN DEELNAME (INCLUSIEF GEGEVENS BESCHERMING)		
5. Ik begrijp dat deelname aan het onderzoek de volgende risico's met zich meebrengt: deelname aan het onderzoek kan gepaard gaan met licht lichamelijk ongemak door het dragen van de kniesensorband of het uitvoeren van de kniebewegingen. Ik begrijp dat deze risico's worden beperkt door ervoor te zorgen dat de band is gemaakt van comfortabele textielmaterialen en op elk moment kan worden verwijderd. Deelnemers kunnen het onderzoek onmiddellijk stopzetten als ze enig ongemak voelen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Ik begrijp dat deelname aan het onderzoek ook het verzamelen van specifieke persoonlijk identificeerbare informatie (PII) inhoudt, mijn leeftijd en geslacht, en daarmee samenhangende persoonlijk identificeerbare onderzoeksgegevens (PIRD), zoals mijn ervaringen en meningen over de knieband, met het risico dat mijn identiteit bekend wordt. Ik begrijp dat deze risico's minimaal zijn, omdat alle informatie geanonimiseerd wordt, veilig wordt opgeslagen en alleen in niet-identificeerbare vorm wordt gerapporteerd.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. Ik begrijp dat de volgende stappen zullen worden genomen om het risico op een datalek te minimaliseren en mijn identiteit te beschermen in het geval van een dergelijk lek. Alle gegevens van de tests worden geanonimiseerd en veilig opgeslagen op servers van de TU Delft, waartoe alleen het onderzoeksteam toegang heeft. Alle antwoorden worden in geaggregeerde vorm geanalyseerd om de identiteit van de deelnemers verder te beschermen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. Ik begrijp dat de (identificeerbare) persoonsgegevens die ik verstrek, na afloop van de test worden vernietigd en dat er geen vervolgspraken worden gepland.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
C: ONDERZOEKSPUBLICATIE, VERSPREIDING EN TOEPASSING		
10. Ik begrijp dat de geanonimiseerde informatie die ik verstrek na afloop van het onderzoek zal worden gebruikt voor rapporten, publicaties en presentaties met betrekking tot het afstudeerproject van de onderzoeker. Dit kan geanonimiseerde citaten bevatten om ervaringen en inzichten te illustreren, maar er zal geen identificeerbare informatie zoals namen of directe	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

KRUIS DE JUISTE VAKJES AAN	Yes	No
contactgegevens worden gepubliceerd. De informatie zal worden gebruikt om de ontwikkeling van een textiele kniesensorband te ondersteunen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11. Ik ga ermee akkoord dat mijn antwoorden, meningen of andere input anoniem kunnen worden geciteerd in onderzoeksresultaten.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
D: (LANGETERMIJN) OPSLAG, TOEGANG EN HERGEBRUIK VAN GEGEVENS		
12. Ik geef toestemming om geanonimiseerde of pseudo-geanonimiseerde gegevens, zoals leeftijd, geslacht en geanonimiseerde interviewcitaten, die ik verstrek, te archiveren via het definitieve onderzoeksrapport, zodat deze kunnen worden gebruikt voor toekomstig onderzoek en onderwijs. Er worden geen directe persoonlijke identificatiegegevens, zoals naam of contactgegevens, opgenomen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13. Ik begrijp dat deze opslagplaats vrij toegankelijk is.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Handtekeningen

Naam van deelnemer	Handtekening	Datum
Ik heb als onderzoeker de informatiebrochure nauwkeurig voorgelezen aan de potentiële deelnemer en heb naar beste vermogen ervoor gezorgd dat de deelnemer begrijpt waarvoor hij/zij vrijwillig toestemming geeft.		
Nienke Ickenroth		7/01/2026
	Handtekening	Datum

Physical therapist

Participant Information/Opening Statement

U bent uitgenodigd om deel te nemen aan een onderzoekstudie met de titel: "Ontwikkeling en Validatie van een Textiele Reksensor Knieband voor Continu Kniebuigmonitoring". Deze studie wordt uitgevoerd door Nienke Ickenroth, student aan de TU Delft.

Het doel van dit onderzoek is het testen van een textiele knie-sensor band die ontworpen is om continu de kniebuiging te meten, om zo het comfort, de bruikbaarheid en het begrip van de gebruikers van het apparaat te evalueren. De gegevens zullen worden gebruikt om het ontwerp van de knie-sensor band te verbeteren in het kader van de masterthesis van de onderzoeker. U zal worden gevraagd vragen te beantwoorden over uw mening, ervaring en begrip van het apparaat.

Er bestaat altijd een klein risico op een datalek. Voor zover mogelijk blijven uw antwoorden in deze studie vertrouwelijk. We minimaliseren eventuele risico's door geen persoonlijk identificeerbare informatie te verzamelen, alle gegevens veilig op te slaan op de servers van de TU Delft en alle antwoorden te anonimiseren bij de analyse van de resultaten.

De geanonimiseerde gegevens die tijdens deze studie worden verzameld, zullen openbaar beschikbaar worden gesteld in de TU Delft repository als onderdeel van het eindrapport van het project.

Uw deelname aan deze studie is volledig vrijwillig en u kunt op elk moment stoppen. U bent vrij om vragen over te slaan. Als u uw gegevens na deelname wilt laten verwijderen, kunt u dit binnen een week na de test aanvragen. Daarna zullen de gegevens geanonimiseerd zijn en kunnen ze niet meer worden verwijderd.

Corresponderende onderzoeker: Nienke Ickenroth (masterstudent, TU Delft) – e-mail: N.M.ickenroth@student.tudelft.nl
 Verantwoordelijke onderzoeker: Kaspar Jansen (hoogleraar, TU Delft – e-mail: K.M.B.Jansen@tudelft.nl)

Expliciete toestemmingspunten


KRUIS DE JUISTE VAKJES AAN	Yes	No
A: ALGEMENE OVEREENKOMST – ONDERZOEKSDOELSTELLINGEN, TAKEN VAN DE DEELNEMERS EN VRIJWILLIGE DEELNAME		
1. Ik heb de bovenstaande informatie gelezen en begrepen, of deze is mij voorgelezen. Ik heb vragen kunnen stellen over de studie en mijn vragen zijn naar tevredenheid beantwoord.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Ik stem er vrijwillig mee in om deel te nemen aan dit onderzoek en begrijp dat ik kan weigeren vragen te beantwoorden en dat ik me op elk moment uit het onderzoek kan terugtrekken, zonder daarvoor een reden te hoeven opgeven.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Ik begrijp dat deelname aan het onderzoek het volgende inhoudt: <ul style="list-style-type: none"> Het beantwoorden van vragen op gebied van mijn mening, ervaring en begrip van het apparaat Het gesprek wellicht zal worden opgenomen De audio-opname wordt omgezet in tekst, waarna de opname wordt vernietigd. 	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Ik begrijp dat het onderzoek op 20 februari 2026 zal eindigen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
B: MOGELIJKE RISICO'S VAN DEELNAME (INCLUSIEF GEGEVENSBESCHERMING)		
5. Ik begrijp dat deelname aan het onderzoek de volgende risico's met zich meebrengt: ik kan licht mentaal of emotioneel ongemak ervaren bij het bespreken van mijn professionele ervaringen met betrekking tot knierevalidatie, en ik kan aarzelen om sommige vragen eerlijk te beantwoorden. Ik begrijp dat deze risico's worden beperkt doordat ik elke vraag mag overslaan of het interview op elk moment zonder gevolgen mag stoppen, doordat het interview respectvol en zonder oordeel wordt afgenomen en doordat alle antwoorden worden geanonimiseerd om de privacy te beschermen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Ik begrijp dat deelname aan het onderzoek ook het verzamelen van specifieke persoonlijk identificeerbare informatie (PII) inhoudt, zoals contactgegevens, mijn leeftijd, geslacht of professionele functie, en daarmee samenhangende persoonlijk identificeerbare onderzoeksgegevens (PIRD), zoals mijn ervaringen en meningen over knierevalidatie, met het potentiële risico dat mijn identiteit wordt onthuld. Ik begrijp dat deze risico's minimaal zijn, omdat alle informatie geanonimiseerd wordt, veilig wordt opgeslagen en alleen in niet-identificeerbare vorm wordt gerapporteerd.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. Ik begrijp dat de volgende stappen zullen worden genomen om het risico op een datalek te minimaliseren en mijn identiteit te beschermen in het geval van een dergelijk lek. Alle gegevens van de tests worden geanonimiseerd en veilig opgeslagen op servers van de TU Delft, waartoe alleen het onderzoeksteam toegang heeft. Alle antwoorden worden in geaggregeerde vorm geanalyseerd om de identiteit van de deelnemers verder te beschermen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. Ik begrijp dat de (identificeerbare) persoonsgegevens die ik verstrek, na afloop van de test worden vernietigd en dat er geen vervolgspraken worden gepland.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
C: ONDERZOEKSPUBLICATIE, VERSPREIDING EN TOEPASSING		
10. Ik begrijp dat de geanonimiseerde informatie die ik verstrek na afloop van het onderzoek zal worden gebruikt voor rapporten, publicaties en presentaties met betrekking tot mijn afstudeerproject. Dit kan geanonimiseerde citaten bevatten om ervaringen en inzichten te illustreren, maar er zal geen identificeerbare informatie zoals namen of directe contactgegevens worden gepubliceerd. De informatie zal worden gebruikt om de ontwikkeling van een textiele kniesensorband te ondersteunen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>


KRUIS DE JUISTE VAKJES AAN	Yes	No
11. Ik ga ermee akkoord dat mijn antwoorden, meningen of andere input anoniem kunnen worden geciteerd in onderzoeksresultaten.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
D: (LANGETERMIJN) OPSLAG, TOEGANG EN HERGEBRUIK VAN GEGEVENS		
12. Ik geef toestemming om geanonimiseerde of pseudo-geanonimiseerde gegevens, zoals leeftijd, geslacht, professionele functie en geanonimiseerde interviewcitaten, die ik verstrek, te archiveren via het definitieve onderzoeksrapport, zodat deze kunnen worden gebruikt voor toekomstig onderzoek en onderwijs. Er worden geen directe persoonlijke identificatiegegevens, zoals naam of contactgegevens, opgenomen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13. Ik begrijp dat deze opslagplaats vrij toegankelijk is.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Handtekeningen

Naam van deelnemer Handtekening Datum

Ik heb als onderzoeker de informatiebrochure nauwkeurig voorgelezen aan de potentiële deelnemer en heb naar beste vermogen ervoor gezorgd dat de deelnemer begrijpt waarvoor hij/zij vrijwillig toestemming geeft.

Nienke Ickenroth  7/01/2026
Handtekening Datum



G. Material costs overview

Material costs of one kneesensor sleeve

	Name part	Details	Material	Quantity/ Dimensions	Price	Total price	From
1	Fabric	Sleeve PT 794210-000 (black)	78% polyester 22% Elastane	0,32x0,40m	€15,95 per 1,5x0,5m	€2,72	Fabrics & Haberdashery Shop A. Boeken, Amsterdam https://aboeken.nl/
2		Protection/design layer PT 794210-000 (black)	78% polyester 22% Elastane	0,24x0,22m	€15,95 per 1,5x0,5m	€1,12	
3	Yarn	Silver yarn dtex 604	Polyamide / Nylon, Silver	± 2,5m	€0,10 per m	€0,25	https://ap.lc/RUctS
4	Shieldit super	SHIELDIT™ SUPER	Polyester, nickel, copper	3x1,25cm*2	€9,95 per 0,10m ²	€0,09	https://ap.lc/vZttp
5	Microcontroller	Seeed Studio XIAO nRF52840 with BLE	PCB	1	€14,50	€14,50	https://ap.lc/AhzhJ
6	Battery	PKCELL Li-Po Battery 3.7V 500mAh - JST-PH - LP503035		1	€4,75	€4,75	https://ap.lc/WURLe
7	LED	LilyPad LED module white 3-5V 40mA		1 (12,7x5,2x 5,2mm)	€0,40	€0,40	https://ap.lc/VSJdo

8	Push Button	Breadboard Tactile Pushbutton Switch Momentary 2pin 6*6*5mm		1 6x6x5mm	€0,15	€0,15	https://ap.lc/xlwND
9	Imitation leather	Imitation leather		6x8x0.87mm	€6,95 per 50x70cm	€0,10	https://ap.lc/Lkftp
10	Anti slip elastic	2cm wide elastic with 0.75cm wide anti-slip layer	Polyamide, elastane, silicone	36+32cm	€2,50 per meter	€1,70	Fabrics & Haberdashery Shop A. Boeken, Amsterdam https://aboeken.nl/
Total						€25,78	