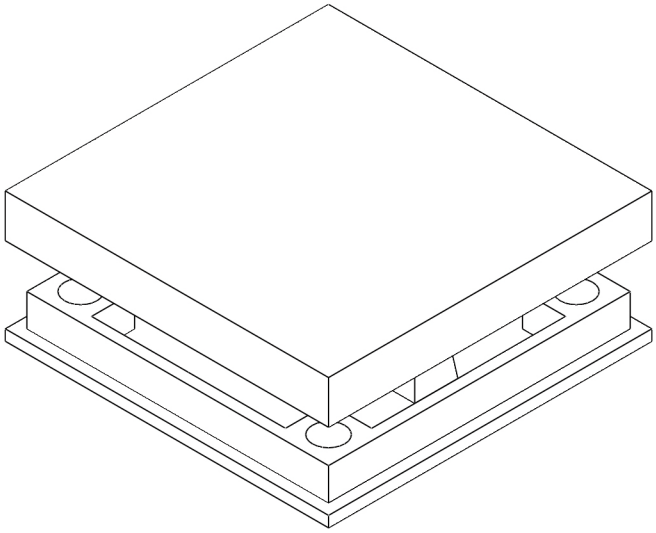
PIËZO-TEGEL

ONTWERP EN TOEPASSING VAN EEN PIËZO-ELEKTRISCHE ENERGIE-OOGSTENDE TEGEL



BACHELORVERSLAG
A.D.H.V. BACHELOR EINDONDERZOEK
IN OPDRACHT VAN TAUW BV DEVENTER
INDUSTRIEEL ONTWERPEN
UNIVERSITEIT TWENTE.

AUTEUR: CHRIS TEN DAM (S0139378)
EXAMENDATUM: 14-09-2011

0.0.0 - INHOUDSOPGAVE

0.0.0 - Inhoudsopgave 1
1.0.0 - Voorwoord 3
1.1.0 - Inleiding 3
1.2.0 - Samenvatting 3
2.0.0 - Opdrachtomschrijving 4
2.1.0 - Actoranalyse 4
2.1.1 - Overheid 4
2.1.2 - Ingenieursbureau Tauw BV 4
2.2.0 - Projectkader 5
2.3.0 - Doelstelling 5
2.4.0 - Vraagstelling 5
2.5.0 - Begripsbepaling 6
3.0.0 - Vooronderzoek 7
3.1.0 - Piëzo-elektriciteitsprincipe 7
3.1.1 - Werking 7
3.1.2 - Toepassing 8
3.2.0 - Toepassingsmogelijkheden 8
3.2.1 - Energie oogsten 8
3.2.2 - Piëzo-elektrisch energie oogsten 8
3.2.3 - Methoden van toepassing 9
3.2.4 - Mogelijkheden in de publieke ruimte 9
3.3.0 - Piëzo-elektrisch energie-oogstend systeem 10
3.3.1 - Energie van loopbewegingen oogsten 10
3.3.2 - Toepassing van piëzo 11
3.4.0 - Energieopbrengst piëzo 12
3.4.1 - Energieopbrengst energie-oogster 12
3.4.2 - Marktonderzoek 12
3.4.3 - Conclusies 13
3.5.0 - Eigenschappen energie-oogster 13
3.5.1 - Energie 13
3.5.2 - Materiaal 13
3.5.3 - Ontwikkeling en productie 13
3.5.4 - Duurzaamheid 14
4.0.0 - Toepassingsonderzoek 15
4.1.0 - Piëzo in de publieke ruimte 15
4.1.1 - Locaties 15
4.1.2 - Objecten 15

4.1.3 - Conclusies 16
4.2.0 - Toepassing van energie 16
4.2.1 - Mogelijkheden 16
4.2.2 - Doeleinden 17
4.2.3 - Applicaties 17
4.2.4 - Marktanalyse 18
4.2.5 - Conclusies 18
5.0.0 - Ontwerpen 19
5.1.0 - Tegel constructie 19
5.1.1 - Eerste opzet 19
5.1.2 - Constructieschets 20
5.2.0 - Elektrische verbinding 20
5.2.1 - Elektriciteit in de tegel 20
Bijlage A - Opdrachtomschrijving 31
A.1.0 - Voorstel 31
A.1.1 - Eerste voorstel 31
A.2.0 - Uitwerking 31
A.2.1 - Fasen 32
A.3.0 - Opdrachtvoorstellen 33
A.3.1 - Reactie opdrachtgever 33
A.4.0 - Opdrachtomschrijving 33
A.5.0 - Strategie & Materiaal 34
A.6.0 - Planning 35
Bijlage B - Technische beschrijving piëzo 36
B.1.0 - Fysisch model 36
B.2.0 - Piëzo-elektrische stroomopwekking 37
Bijlage C - Marktanalyse 39
C.1.0 - Piëzo-tegels 39
C.2.0 - Alternatieve energie-oogstende tegels 39
Bijlage D - Brainstorm 40
Bijlage E - Ideegeneratie 43
Bijlage F - Tegel constructieschetsen 48
Bijlage Z - Referenties 50

1.0.0 - VOORWOORD

Dit is het verslag van het door Chris ten Dam in de periode van april t/m juni 2011 voor de studie Industrieel Ontwerpen aan de Universiteit Twente uitgevoerde Bachelor-onderzoek voor Tauw BV.

In dit eerste hoofdstuk wordt een korte inleiding op het geheel gepresenteerd en is een samenvatting van het onderzoek te lezen.

1.1.0 - INLEIDING

In opdracht van Tauw BV Deventer, afdeling Civiel, is een onderzoek uitgevoerd naar het ontwerp en mogelijke toepassing van een piëzo-elektrische energie-oogstende tegel. Dit is in het kader van het Bachelor eindonderzoek voor de studie Industrieel Ontwerpen aan de Universiteit Twente uitgevoerd door Chris ten Dam, onder begeleiding van Sybren Jansma en Simon Bos (Tauw BV) en Wouter Schotborgh (Universiteit Twente).

In dit verslag wordt allereerst de opdrachtomschrijving toegelicht, waarna een vooronderzoek naar de werking en toepassing van piëzo-elektriciteit volgt. Met de hier opgedane voorkennis is er gezocht naar de mogelijkheden van toepassing van piëzo-elektriciteit. Diverse mogelijkheden zijn verder uitgewerkt om tot ontwerpsuggesties voor een energie-oogstend systeem en gekoppelde toepassingen te komen.

1.2.0 - SAMENVATTING

In de eerste fase van het onderzoek is gekeken naar de basale werking van piëzo-elektriciteit, het verschijnsel van bepaalde materialen om onder vervorming een verhoogd voltage af te geven. Er kan energie worden gewonnen wanneer piëzo-elementen veelvuldig worden vervormd, zoals wanneer het piëzo-materiaal in trilling wordt gebracht. Dit kan in potentie bij in natuur en technologie aanwezige trillingen, zodat men spreekt van 'energie oogsten', het afvangen van restenergie uit de omgeving die anders verloren gaat. Het opwekken van elektriciteit kan op drie manieren plaatsvinden, die gebruik maken van het indrukken of buigen van het piëzo-elektrisch element.

Voor toepassing van een piëzo-elektrisch energie-oogstend systeem in de publieke ruimte zijn voetgangers een interessante bron van trillingen. Bij iedere voetstap gaat een aanzienlijke hoeveelheid energie verloren in de ondergrond, die potentieel afgevangen kan worden en voor een nuttig doel kan worden gebruikt. Er is gekeken naar interessante locaties waar veel voetgangers zijn en welke objecten geschikt zijn om als energie-oogster te dienen. Vele locaties zijn interessant voor toepassing van plaatselijk opgewekte elektriciteit. Het universeel geschikte object om de energie van voetstappen mee op te vangen is een verhardingselement, zoals een stoeptegel of traptrede. In de praktijk blijkt dat met bestaande energie-oogstende voetgangerstegels slechts een klein deel van de beschikbare energie uit een voetstap kan worden afgevangen. Hierdoor zijn de mogelijke toepassingen beperkt door de kleine hoeveelheid beschikbare elektrische energie die wordt gewonnen. De energie kan direct worden toegepast of worden gebufferd, zodat er op piekmomenten veel energie beschikbaar is. Toepassingen kunnen gebruik maken van energiezuinige toepassingen zoals LED-verlichting en kleine mechanische toepassingen.

De voorgestelde energie-oogstende tegel maakt gebruik van het principe van buiging van piëzo-elektrisch materiaal dat middels een impuls, opgewekt door een verend systeem, in trilling wordt gebracht wanneer deze wordt belast en wordt ontlast. De ontworpen conceptuele tegel zal als een gesloten systeem elektrische energie opwekken en met een waterdichte aansluiting in contact komen met de toepassing of het buffersysteem (zoals een accu) die energie behoeft. Ook kunnen meerdere tegels aan elkaar gekoppeld worden met koppelstukken die de elektriciteit van meerdere tegels opvangen en doorsturen naar de toepassing of buffer. De gevonden toepassingen maken veelal gebruik van meerdere tegels om zo meer energie af te vangen. De toepassingen zijn gecategoriseerd naar hun doeleinden: navigatie en informatieverstrekking; mechanisch-functionele toepassingen; speelse en kunstzinnige toepassingen; toepassingen ter bevordering van verkeersveiligheid. De meeste gevonden toepassingen zijn gericht op voetgangers, maar hierop zijn ook uitzonderingen. Een selectie hiervan is uitgebreid gevisualiseerd.

2.0.0 - OPDRACHTOMSCHRIJVING

In de opdrachtomschrijving staat naast een beschrijving van de opdracht zelf, onder andere informatie over de opdrachtgever, Tauw BV te Deventer (paragraaf 2.1.2). Deze opdrachtomschrijving is opgesteld a.d.h.v. een plan van aanpak, met actoranalyse, projectkader, doelstelling en onderzoeksvragen. De verdere onderdelen van het plan van aanpak zijn te vinden in Bijlage A.

2.1.0 - ACTORANALYSE

De actoranalyse geef beschrijvingen van de actoren, ofwel personen of groeperingen die direct of indirect betrokken zijn en/of zekere belangen hebben bij dit onderzoek. Hieruit komen onder meer belangen van deze actoren naar voren, zodat een projectkader opgesteld kan worden.

2.1.1 - Overheid

Het Ministerie van Infrastructuur en Milieu van de Overheid verstrekt via Kennisplein Mooi Nederland subsidies voor plannen en projecten “die laten zien hoe onze schaarse ruimte slim, mooi en met karakter kan worden ingericht”[1]. Dit landelijke project verschaft via o.a. een website informatie over innovatieve projecten die “als doel hebben zuinig ruimtegebruik te stimuleren, verrommeling tegen te gaan en de ruimtelijke kwaliteit te versterken. De Mooi Nederland voorbeeldprojecten kunnen zowel in landelijk als stedelijk gebied liggen”[1]. Jaarlijks wordt door Kennisplein Mooi Nederland een prijs uitgereikt voor het ‘voorbeeldproject’ dat de meeste publieke stemmen krijgt. In 2010 was dat het project genaamd ‘Trillingen: Bruisende bron van energie’, een onderzoek op initiatief van Ingenieursbureau Tauw BV in samenwerking met de Universiteit Twente en met medewerking van provincie Overijssel. De Master-student Industrieel Ontwerpen Sybren Jansma is hierop afgestudeerd en heeft onderzoek gedaan naar “duurzame energie gewonnen uit trillingen met behulp van piëzo-elektrisch materiaal”. “Overal in de omgeving komen trillingen voor, van natuurlijk tot trillingen veroorzaakt door mens of machine. Deze nieuwe manier van duurzame energiewinning wordt in een pilotproject toegepast waaruit (naast energie) kennis en ervaring wordt opgedaan”[1]. In dit project wordt getracht energie te winnen uit een wegdek. Als dit project in de praktijk wordt getest en gunstige resultaten oplevert kan het in het belang van de overheid zijn om projecten rondom deze innovatieve energiewinning verder te stimuleren en ondersteunen.

2.1.2 - Ingenieursbureau Tauw BV

Ingenieurs- en adviesbureau Tauw BV is onderdeel van het overkoepelende Tauw Group en heeft diens hoofdkantoor gevestigd in Deventer. De gehele Tauw Group heeft 1166 medewerkers verspreid over 27 vestigingen in 6 Europese landen. In Nederland zijn 6 vestigingen en in totaal 864 medewerkers[2]. Tauw is opgedeeld in zes vakgebieden: Ruimte, Milieu, Bodem, Civiel, Water en Waterbouw. Het bedrijf investeert ook in product- en kennisontwikkeling[3]. Het bureau voert in deze vakgebieden projecten uit en geeft advies aan opdrachtgevers uit het bedrijfsleven en de overheid.

Het vakgebied Civiel van Tauw in Deventer heeft ca. 60 medewerkers. Deze afdeling, vertegenwoordigd in de vestiging in Deventer en in de persoon Simon Bos heeft Sybren Jansma in 2010 ondersteund in zijn Industrial Design Engineering (IDE) afstudeeronderzoek getiteld “De haalbaarheid en ontwerp van een piëzo-elektrische energie-oogster voor civiele toepassingen”. In dit onderzoek richtte Jansma zich op energiewinning uit wind middels piëzo-technologie. Daarna is een voorstel gedaan voor toepassing van piëzo-elementen onder het wegdek. Van dit project wordt in 2011 een pilot gedraaid op een bestaande provinciale weg in de provincie Overijssel. Tauw profileert zich als ingenieursbureau dat streeft naar duurzaamheid: “In een deskundige en doordachte beïnvloeding van onze ruimte zit het wezenskenmerk van ons unieke advies- en ingenieursbureau. Tauw verbindt ruimtelijke ontwikkeling onlosmakelijk met de zorg voor een goed leefklimaat en streeft daarom in al zijn adviezen naar duurzaamheid”[4]. Het afstudeeronderzoek van Sybren Jansma past goed in dit profiel. In dat kader probeert het bedrijf meer onderzoeken uit te voeren naar de toepassing van piëzo-elementen in de publieke ruimte, om zo de trillingsenergie die anders verloren gaat in de bodem, op te vangen en nuttig toe te passen. Deze onderzoeken kunnen resulteren in meer projecten die kunnen worden uitgevoerd door Tauw BV.

2.2.0 - PROJECTKADER

Ingenieursbureau Tauw BV heeft kennis op gebied van de toepassing van piëzo-elementen in objecten om zo trillingen af te vangen en om te zetten in energie. De divisie Civiel van het bedrijf heeft in samenwerking met IDE-student Sybren Jansma onderzoek gedaan naar de toepassing van piëzo-elementen in een wegdek en heeft hiervoor een subsidieprijs van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu ontvangen. Om meer expertise te vergaren over het toepassen van piëzo-elementen in de publieke ruimte heeft Tauw BV enkele nieuwe projectideeën opgesteld. Een van deze ideeën beslaat de toepassing van piëzo-elementen in stoeptegels of vergelijkbare objecten, om zo de trillingen van wandelende mensen om te zetten in nuttige elektrische energie. In een drukke publieke ruimte worden veel trillingen opgewekt door de lopende mensen. Een object of systeem van objecten met geïntegreerde piëzo-elementen kan in een dergelijke ruimte deze trillingen omzetten in elektrische energie. Door hieraan een toepassing voor de opgewekte energie te verbinden kan het object of systeem de mensen die er gebruik van maken bewust maken van deze innovatieve en duurzame methode van energieopwekking en anderen stimuleren gebruik te maken van het object.

2.3.0 - DOELSTELLING

Het doel van de opdracht is om in samenwerking met Ingenieursbureau Tauw BV te onderzoeken hoe een object dat in de publieke ruimte middels piëzo-technologie energie opwekt, mensen kan stimuleren gebruik te maken van het object en daarnaast informatie over de innovatieve wijze van energieopwekking van het object kan verschaffen.
Hiervoor zal een rapport uit worden gebracht met onderzoeksresultaten en ontwerpsuggesties, om zo de opdrachtgever te voorzien van ideeën om piëzo-technologie toe te passen in de publieke ruimte. Zodoende wordt de expertise van de opdrachtgever op dit kennisgebied uitgebreid, genereert de opdrachtgever mogelijk naamsbekendheid en kan het in de toekomst meer projecten gerelateerd aan dit kennisgebied uitvoeren.

Hiervoor wordt eerst onderzocht welke objecten en ruimten geschikt zijn om in potentie veel energie op te vangen door integratie van piëzo-elementen. Met hulp en kennis van de opdrachtgever zal worden onderzocht hoe een piëzo-systeem in het gevonden object of systeem kan worden geïntegreerd en hoe de opgewekte elektrische energie kan worden getransporteerd, opgeslagen en nuttig worden gebruikt. Vervolgens moet worden onderzocht welke aspecten van het verdere ontwerp van het object kunnen bijdragen aan de stimulans voor gebruikers om er gebruik van te maken en hoe deze aspecten kunnen worden toegepast in het ontwerp.

Het is daarnaast gewenst te onderzoeken hoe de gebruikers bewust kunnen worden gemaakt van de mogelijkheid om op innovatieve wijze energie op te wekken. Daarvoor moet worden onderzocht welke aspecten bijdragen aan deze bewustwording en hoe deze aspecten kunnen worden toegepast in het ontwerp. Met de gevonden aspecten kunnen ontwerpsuggesties voor het object in diens omgeving worden gedaan. Van de onderzoeksresultaten zal een verslag worden opgesteld, waarbij de ontwerpsuggesties en toepassingsmogelijkheden visueel weergegeven en tekstueel onderbouwd worden. Dit alles zal worden uitgevoerd door een Bachelorstudent Industrieel Ontwerpen en vindt plaats in een tijdsbestek van drie maanden.

2.4.0 - VRAAGSTELLING

De vragen die a.d.h.v. dit onderzoek moeten kunnen worden beantwoord, zijn als volgt

1. Hoe kan piëzo-technologie worden toegepast om energie op te wekken?
    a. Hoe werkt piëzo-elektriciteit op toepassingsniveau?
    b. Op welke wijze(n) wordt piëzo-technologie momenteel toegepast?
    c. Wat is een geschikte methodiek om piëzo-technologie toe te passen in een object dat met simpele mechanische input elektrische energie moet opwekken?
2. Hoe kan piëzo-elektrische energieopwekking worden toegepast in een object in de publieke ruimte?

   a. Welke objecten in de publieke ruimte zijn veelvuldig onderhevig aan simpele mechanische input?
   b. Welke van de objecten gevonden in vraag 2a zijn geschikt voor toepassing van piëzo-elementen om daarmee elektrische energie op te wekken?
   c. Hoeveel elektrische energie kunnen de gevonden objecten in vraag 2b naar verwachting opwekken?
   d. Welk object levert in vraag 2c naar verwachting de meeste elektrische energie op wanneer hier piëzo-technologie in wordt geïntegreerd?
   e. Hoe kan piëzo-technologie worden toegepast in het object dat volgt uit vraag 2d?
3. Hoe kan de opgewekte energie in het gekozen object van vraag 2 worden benut?
   a. Welke elektrische toepassingen zijn mogelijk met de door het object opgewekte elektrische energie gevonden in vraag 2?
   b. Welke elektrische toepassing uit vraag 3a is het meest geschikt voor integratie in de publieke ruimte, rekening houdend met o.a. interactiemogelijkheden, opvallendheid, locatie/plaatsing en richtlijnen en wetgevingen omtrent de publieke ruimte?
   c. Welke functionaliteiten zijn gewenst voor de elektrische toepassing gevonden in vraag 3b?
4. Hoe kan de elektrische toepassing gevonden in vraag 3 conceptueel worden vormgegeven?
   a. Hoe zien geschikte omgevingen voor de in vraag 3 gevonden toepassing eruit?
   b. Hoe kan de in vraag 3 gevonden toepassing worden geïntegreerd in de omgeving gevonden in vraag 4a?
   c. Hoe kan de in vraag 3 gevonden toepassing uitnodigen en/of stimuleren tot gebruik?
   d. Hoe kan de in vraag 3 gevonden toepassing gebruikers informeren over de methode waarop de energie, zoals gevonden in vraag 2, wordt opgewekt?
   e. Hoe kan de in vraag 3 gevonden toepassing worden vormgegeven zodanig dat deze voldoet aan de eisen en richtlijnen volgend uit de vragen 4b, 4c en 4d?

2.5.0 - BEGRIPSBEPALING

Begrippen die enige toelichting behoeven zijn als volgt

- Piëzo-technologie:
  - De toepassing van het piëzo-elektrisch effect, waarbij een kristalstructuur van een materiaal mechanisch wordt vervormd en daardoor een verandering in voltage teweeg brengt, of andersom onder invloed van voltage mechanisch zal vervormen[5].
- Piëzo-elektriciteit:
  - Het opwekken van elektrische energie d.m.v. (mechanische) druk- of trekkracht[5].
- Piëzo-element:
  - Een samengesteld element dat onder mechanische vervorming elektriciteit opwekt, ofwel een component om middels piëzo-technologie elektriciteit mee op te wekken.
- Simpele mechanische input:
  - Een relatief kleine (mechanische) drukkracht uitgeoefend op een object, in de orde van grootte van wat een mens met lichaamsgewicht teweeg kan brengen (zonder hiervan last te ondervinden).
- Publieke ruimte:
  - Een open ruimte behorend tot een gemeente of provincie, waar met regelmaat mensen aanwezig zijn, zich verplaatsen en/of gebruik maken van nabije gelegenheden. De ruimte is voorzien van verhardingselementen.
    Voorbeelden van publieke ruimte: een plein, stoep, winkelstraat of recreatieruimte.
- Verhardingselement:
  - Een element in een verharde ondergrond, zoals een tegel, steen of gelijksoortig bouwblok waar overheen mensen lopen.
- Elektrische toepassing:
  - Een vorm van output werkend op elektriciteit die in een fysieke toepassing is geïntegreerd, zodanig dat gebruikers het goed kunnen waarnemen.

3.0.0 - VOORONDERZOEK

In dit hoofdstuk wordt het onderzoek beschreven dat vooraf ging aan het uitvoeren van het kernonderzoek. Dit zogenaamde vooronderzoek gaat over het verkrijgen van voorkennis over piëzo-elektriciteit en de toepassingsmogelijkheden die daarbij komen. Deze voorkennis is nodig om gegrond keuzes te kunnen maken in de rest van het onderzoek en in het uiteindelijke ontwerp. Het afstudeeronderzoek dat Sybren Jansma voor Tauw heeft uitgevoerd dient als basis voor dit onderzoek. In zijn verslag heeft Sybren een vrij uitgebreid vooronderzoek gedaan naar de werking van piëzo-elektriciteit en met name naar mogelijke toepassingen die - in overleg met Tauw - geschikt leken. Voor dit hoofdstuk zijn delen uit zijn vooronderzoek naar piëzo-elektriciteit gebruikt.

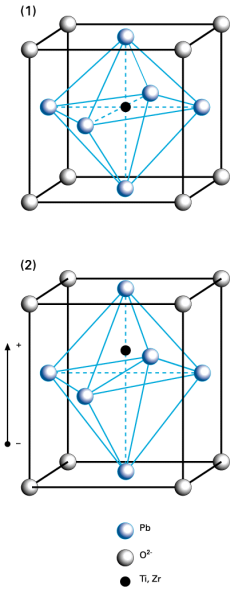
Dit vooronderzoek behelst de onderzoeksvragen 1a t/m c.

3.1.0 - PIËZO-ELEKTRICITEITSPRINCIPE

De korte definitie van piëzo-elektriciteit is 'het opwekken van elektrische energie d.m.v. mechanische drukkracht' (zie paragraaf 3.5.0). Het woord piëzo komt uit het Grieks en betekent 'druk'. Het effect is in 1880 ontdekt door de gebroeders Pierre en Jacques Curie, maar pas voor het eerst toegepast in een kristal oscillator, ontwikkeld door Walter Guyton Cady in 1921. Deze oscillator is gemaakt van kwarts, een kristallen mineraal dat van nature zwak piëzo-elektrisch gedrag vertoont. Later zouden materialen en technieken worden ontwikkeld die veel krachtiger piëzo-elektrische eigenschappen vertonen dan de natuurlijke materialen[5].

3.1.1 - Werking

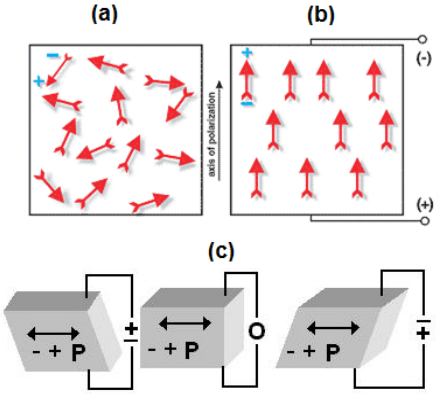
Sommige materialen laten onder mechanische vervorming tijdelijk een spanningsverschil zien als gevolg van veranderende elektrische lading. Dit fenomeen is gevolg van het principe van dipoolmomenten in moleculen.



FIGUUR 1: DIPOLEN

Een dipoolmoment is een positie in een molecuul of kristalstructuur waar het zwaartepunt van de elektrische lading zich bevindt, als gevolg van de onderlinge posities van atomen en hun elektrische spanningsvelden. In sterk symmetrische moleculen liggen deze elektrische zwaartepunten in het midden doordat positieve en negatieve velden elkaar opheffen en zijn daardoor elektrisch neutraal. Dit geldt ook voor kristalmoleculen, die per definitie sterk symmetrisch zijn[6]. Wanneer bepaalde kristallen mechanisch worden vervormd (door duw- of trekkrachten) veranderen de afstanden tussen atomen en daarmee de elektrische velden. Hierdoor verandert ook de positie van het dipoolmoment, waardoor een spanningsverschil ontstaat en het molecuul of de kristalstructuur elektrisch geladen wordt[7]. (Dit is te zien in Figuur 1 hiernaast, afkomstig van physikinstrumente.com[8]) Bepaalde materialen kunnen gepolariseerd worden, waarbij dipoolmomenten in de gehele kristalstructuur in ongeveer dezelfde richting gaan wijzen, waardoor een sterk piëzo-elektrisch effect ontstaat in het materiaal[9].

Op de schaal van een kristalrooster van moleculen zal daardoor een polarisatie, ofwel een elektrische lading ontstaan. Hierdoor zal er stroom door het materiaal lopen, ook bekend als het directe piëzo-elektrisch effect. Analoog aan dit fenomeen is het ook mogelijk bepaalde materialen onder elektrische spanning te laten verbuigen, het zogenaamde omgekeerd piëzo-elektrisch effect[5]. **Fout! erwijzingsbron niet gevonden.**, afkomstig van de website van Tel Aviv University, geeft dit schematisch weer[10].



FIGUUR 2: PIËZO-ELEKTRISCH EFFECT

3.1.2 - Toepassing

Een piëzo-elektrisch element is een uit meerdere materialen samengesteld onderdeel dat piëzo-elektrisch gedrag vertoont. Een dergelijk element kan op drie manieren worden gebruikt:

- Als sensor: door gebruik te maken van het directe piëzo-elektrisch effect vangt het element mechanische krachten op en wekt elektriciteit op
    - Wordt o.a. gebruikt in elektrische muziekinstrumenten, elektrische aanstekers
- Als actuator: door gebruik te maken van het omgekeerd piëzo-elektrisch effect vervormt het element wanneer er elektrische spanning op wordt gezet
    - Wordt o.a. gebruikt voor zeer precieze positionering, bijv. in inkjetprinters
- Als transducer: heeft de eigenschappen van zowel actuator als sensor
    - Wordt o.a. gebruikt in sonar om ultrasone geluiden te produceren of op te vangen

3.2.0 - TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN

Sybren heeft in zijn afstudeeronderzoek toepassingsrichtingen voor piëzo-elektrische energieopwekking onderzocht. Dit gebeurde in samenspraak met Tauw en de richtingen zijn dan ook gerelateerd aan de vakgebieden van Tauw. Energie uit de natuur - zoals wind- en waterstromen; technologie – zoals machines en verkeer – en mensen zijn door Sybren geanalyseerd en hieruit zijn voor- en nadelen van toepassing van piëzo-technologie naar voren gekomen.

Een van de door hem onderzochte energiebronnen is in het domein van de mensen, namelijk het loopgedrag van mensen. Door een stap te zetten gaat energie verloren door vervorming van schoenen en de ondergrond, waarbij een zachte ondergrond dit duidelijk toonbaar maakt. Een verharde ondergrond - zoals deze vrijwel overal te vinden is in bebouwd gebied - zal niet vervormen door de hoge stijfheid, maar zal kort trillen. Vanwege de relatief grote massa van een mens is de energiedichtheid van het zetten van een stap hoog en kan hier potentieel dus veel energie worden afgevangen. Echter genereert een enkele stap niet genoeg stroom en zal de ondergrond niet hard en lang genoeg blijven vibreren om als stabiele wisselstroom-energiebron te functioneren.

3.2.1 - Energie oogsten

Energie oogsten (vertaling van energy harvesting) is een proces waarbij energie wordt afgevangen van externe bronnen (zoals kinetische, zonne- en windenergie) en wordt opgeslagen voor gebruik in kleine, draadloze apparaten. Dit wordt bijvoorbeeld toegepast voor draagbare elektronica (zoals kinetisch oplaadbare horloges en fietscomputers) en draadloze sensornetwerken. Energie-oogsters wekken kleine hoeveelheden elektrische energie op voor elektronica die dergelijke kleine hoeveelheden energie nodig hebben. Het voordeel hiervan is dat er geen conventionele stroomnetwerken en brandstoffen nodig zijn en de anderzijds verloren omgevingsenergie wordt benut. Een energie oogstend systeem is lokaal toepasbaar en kan dus zeer mobiel zijn, wat de aandacht heeft getrokken van militaire en commerciële sectoren[11]. De vraag naar toepassing van lokale energie is al lange tijd aanwezig zoals eeuwenoude water- en windmolens aantonen. De sterke ontwikkeling van zonnepanelen op allerlei formaten en voor verschillende doeleinden illustreert de toenemende vraag naar onafhankelijkheid van elektriciteitsnetwerken en leveranciers en het streven naar verminderde uitputting van natuurlijke bronnen voor het opwekken van elektrische energie.

3.2.2 - Piëzo-elektrisch energie oogsten

De eigenschappen van piëzo-technologie wijzen erop dat het geschikt kan zijn voor energie oogsten: het vangt omgevingstrillingen op, wekt hiermee kleine hoeveelheden elektrisch energie op en is eenvoudig lokaal te gebruiken vanwege de relatief lage complexiteit en kosten van productie en installatie van een piëzo-elektrisch element. Voor het toepassen van piëzo-technologie als energie oogster zijn er vuistregels:

- De piëzo-elektriciteit wordt opgewekt door trillingen, plaatsing nabij een bron van trillingen is dus essentieel voor de werking
- Piëzo-elektrisch materiaal moet in verbinding staan met het object (medium) dat de trillingen doorgeeft
    - Daarbij heeft het een dempend effect doordat (een deel van) de mechanische energie van de trillingen wordt afgevangen en dit omzet in elektrische energie
    - Omdat piëzo-elementen afhankelijk zijn van trillingen moet de dempingsfactor niet te hoog zijn, dan zouden er immers geen trillingen mogelijk zijn en kan er dus geen energie worden afgevangen door het piëzo-element[12]

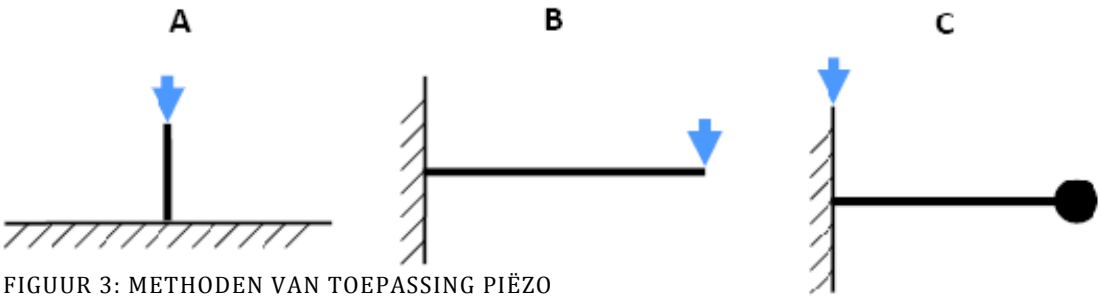
Piëzo-opgewekte energie is voornamelijk afhankelijk van twee parameters:

- De mate van vervorming (van het piëzo-elektrisch materiaal)
- De frequentie van trilling

Een sterke vervorming, als gevolg van bijvoorbeeld hoge krachten en/of acceleraties, zorgt voor een hoger spanningsverschil dan bij een kleine vervorming. Een grote frequentie zorgt ervoor dat er vaker energie wordt opgewekt en er dus een stabiele energiebron kan ontstaan. Er ontstaat een wisselstroom als gevolg van een trilling. Doordat de elektrische spanning opgewekt door een piëzo-elektrisch element snel uitdooft, is het zonder buffer niet geschikt voor (continue) gelijkstroom.

3.2.3 - Methoden van toepassing

Er zijn drie basismethoden om met piëzo-elementen trillingen op te vangen, aangeduid als methoden A, B en C. Deze definities en afbeeldingen (Figuur 3) komen uit het verslag van Sybren Jansma:



FIGUUR 3: METHODEN VAN TOEPASSING PIËZO

- A: Directe compressie/extensie van een element wanneer deze wordt belast met een periodieke externe kracht, zoals een trilling
- B: Het buigen van een cantilever gemonteerde balk, belast met een periodieke externe kracht op het uiteinde van de balk
- C: Het buigen van een cantilever gemonteerde balk - gemodelleerd met een massa op het uiteinde - belast met een impuls als gevolg van een kracht aan de inklemming van de balk

3.2.4 - Mogelijkheden in de publieke ruimte

Voor dit onderzoek moet worden gezocht naar een toepassing van piëzo-technologie in de publieke ruimte. Hier gaat het om directe, fysieke interacties tussen mens en omgeving, zonder tussenkomst van een voertuig zoals fiets of auto. De interactie van voetgangers met omgeving vindt grotendeels plaats via voeten en handen: door te lopen op oppervlakken of door objecten met handen te gebruiken. Onder dit laatste worden de bewegingen duwen, trekken en roteren verstaan, met een of enkele vingers, de gehele hand, arm en bovenlichaam. Zo worden knoppen met vingers ingedrukt, worden deurklinken geroteerd en getrokken of geduwd met de gehele hand en worden zware objecten verplaatst door er met het bovenlichaam tegenaan te duwen. Interactie met andere lichaamsdelen is ook mogelijk, zoals zitten of

liggen op objecten of oppervlakken. Verreweg de meeste interactie in de publieke ruimte vindt plaats met de voeten van lopende mensen, aangezien stoepen, pleinen, wegen en paden de meeste oppervlakte in de publieke ruimte innemen en lopen hier de primaire (voertuigloze) manier van verplaatsen is.

De hoeveelheid energie die kan worden gewonnen uit duw- trek- en roteerbewegingen met de handen kan mogelijk goed toegepast worden, maar hiervan wordt voor dit onderzoek van afgezien vanwege enkele redenen. Zo is de interactie met handen veelal beperkt tot enkele plekken in de publieke ruimte, zoals deuren en andere mechanische objecten of elektronische installaties; de meeste mensen zullen bijvoorbeeld niet zinloos tegen objecten als muren en gebouwen duwen of trekken. Daarnaast is het zo dat de objecten die ontworpen zijn voor interactie met handen, zoals (draai)deuren, toegankelijk moeten zijn voor de mensen en dus niet onnodig moeilijk handelbaar zijn; een deur of draaideur waaruit menselijke energie gewonnen moet worden zal extra weerstand opwekken en de gebruiker dus tot significant tot last zijn, wat niet wenselijk is.

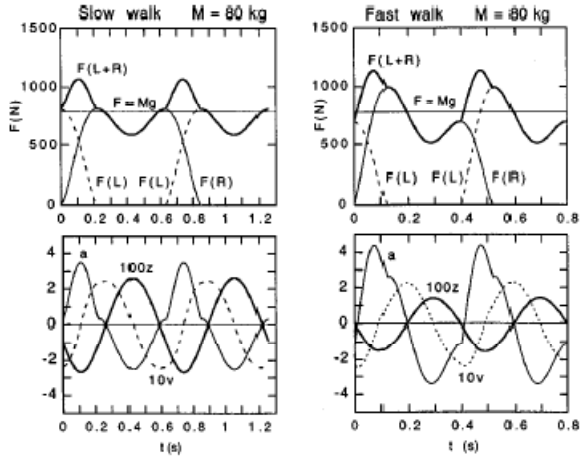
Geconcludeerd kan worden dat voor dit onderzoek moet worden gezocht naar methoden om verloren energie van loopbewegingen van mensen af te vangen.

3.3.0 - PIËZO-ELEKTRISCH ENERGIE-OOGSTEND SYSTEEM

Piëzo-elektriciteit biedt nu en in de toekomst goede mogelijkheden om op eenvoudige wijze verloren energie op te vangen in de publieke ruimte. Omdat piëzo-technologie wordt beschouwd als een opkomende en dus sterk ontwikkelende technologie is het waarschijnlijk dat de mogelijkheden van toepassing op termijn zullen toenemen en de het daadwerkelijk meer wordt toegepast.

3.3.1 - Energie van loopbewegingen oogsten

Bij het lopen gaat energie verloren door vervorming van schoenen en de grond. Door (zonder het lopen te verstoren) de energie hieruit af te vangen, kan deze worden omgezet in elektrische energie met piëzo-technologie. Uit het onderzoek van Sybren Jansma komt naar voren dat een enkele stap niet genoeg stroom genereert voor een stabiele energiebron. Dit volgt uit enkele onderzoeken naar de gegenereerde kracht van een menselijke stap of sprong, uitgevoerd aan de University of Sydney[13][14]. Hieronder staat een grafiek met de resultaten (Figuur 4).



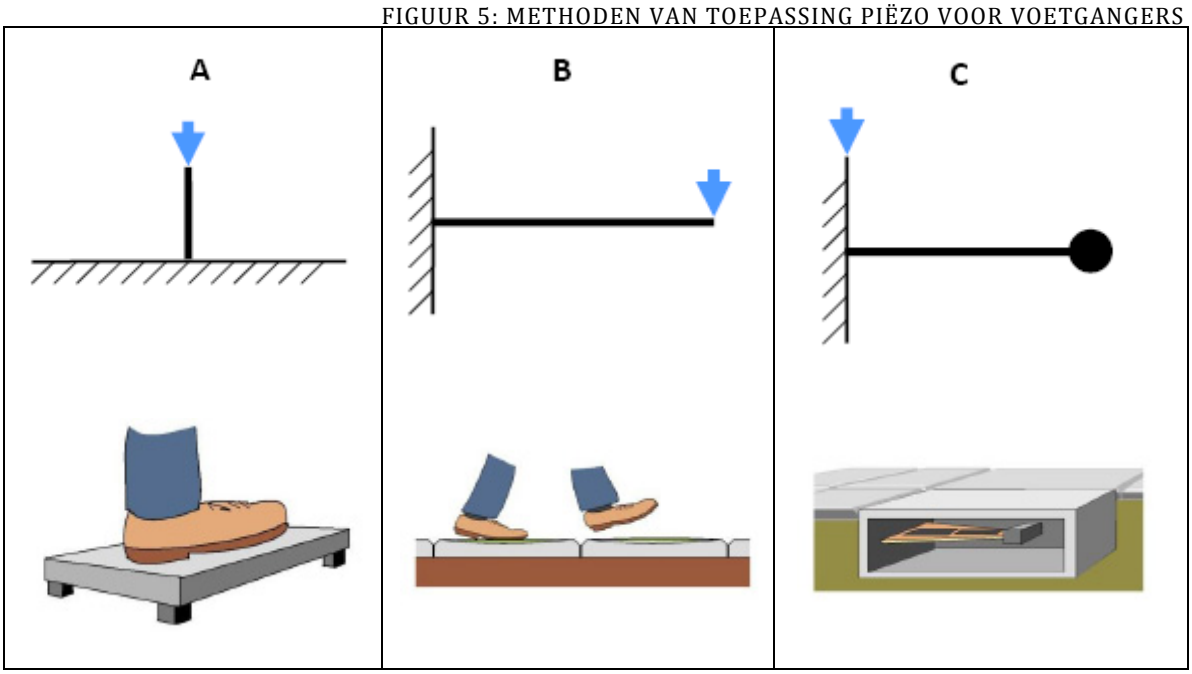
FIGUUR 4: KRACHT VAN MENSELIJKE VOETSTAP

Uit deze onderzoeken blijkt een aantal nuttige gegevens. De kracht van een voetstap is ongeveer *800 N*, hetgeen te verwachten valt aangezien geldt $F = M * g$, ofwel $F = 80\ [kg] * 9.81\ [m/s^2] \approx 800\ [N]$. Ook zijn verticale acceleratie, snelheid en verplaatsing (resp. *a, v* en *z*) weergegeven, waardoor de energie op verschillende manieren kan worden berekend. De maximale waarden van *a, v* en Δz zijn resp. $4\ m/s^2$; *0.2 m/s*; en *0.04 m*.
De potentiële energie is als gevolg van hoogteverschil is:
$E_p = M * g * \Delta h = 80\ [kg] * 9.81\ [m/s^2] * 0.04\ [m] \approx 32\ [J]$

Deze energie komt vrij op het moment dat de voet neerkomt en de snelheid nul is. Deze energie zal voor een deel in de onderliggende tegel komen als een potentieel bruikbare trilling en verder als elastische energie in de schoen en het been van de voetganger opgeslagen worden, naast restenergie die als warmte verloren gaat. Het aandeel nuttige trillingsenergie dat in de ondergrond terecht komt wordt niet duidelijk uit het onderzoek van de University of Sydney, maar het lijkt waarschijnlijk dat dit het grootste deel uitmaakt.

Analoog aan de drie eerder beschreven methoden van toepassing (par. 3.2.3) zijn er drie methoden om de energie van looptrillingen op te vangen. De afbeeldingen (Figuur 5) die deze methoden weergeven komen uit het verslag van Sybren Jansma.

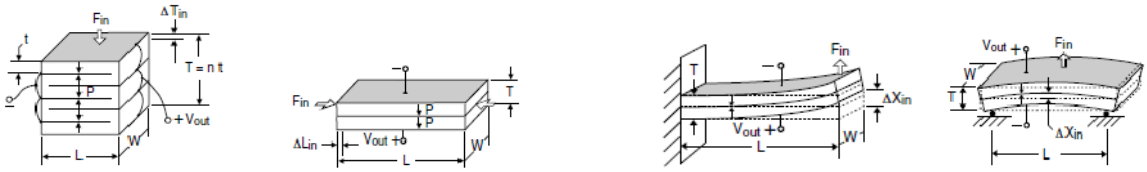
FIGUUR 5: METHODEN VAN TOEPASSING PIËZO VOOR VOETGANGERS



Om energie die vrijkomt bij iedere stap die een mens zet effectief op te kunnen vangen, moet een piëzo energie-oogster zo zijn ontworpen dat het zo lang mogelijk blijft vibreren na de impuls van de persoon die op het object stapt (opties B en C). Anderzijds moet het systeem zo worden ontworpen dat het is afgestemd op de locatie en stroom van mensen op het moment van gebruik/werking. Dat wil zeggen dat de impulsen van voetstappen periodiek regelmatig moeten plaatsvinden om een continue opwekking van energie te handhaven. Door een buffer te gebruiken kan de opgewekte energie worden opgeslagen en hoeft deze niet direct te worden gebruikt in een toepassing. Dit neemt de beperking van het direct moeten benutten van de opgewekte energie, weg.

3.3.2 - Toepassing van piëzo

Voor methode A is een zogenaamde ‘piezo stack’ (een stapel dunne piëzo-plaatjes) het meest geschikt, omdat deze efficiënt veel vermogen oplevert, bestand is tegen grote krachten en niet afhankelijk is van resonantie. Een piezo stack kan dan simpelweg onder het verhardingselement worden gemonteerd en zal bij compressie door de vele gestapelde lagen een relatief grote stroomsterkte en een gereduceerd voltage leveren. Voor direct aangesloten toepassingen is een verhoogde stroomsterkte veelal gunstig[15]. De uiterst linker afbeelding in Figuur 6, afkomstig van een catalogus van piezo.com[22] geeft een ‘piezo stack’ weer.



FIGUUR 6: PIËZO GENERATORS

Voor methoden B en C is een 'bending generator' (de rechter twee afbeeldingen) geschikt, veelal bestaande uit twee lagen met een verstevigende metalen tussenlaag. Deze genereert een voltage bij buiging en heeft veel bewegingsvrijheid in uitwijking wanneer deze in trilling wordt gebracht. Een dergelijke generator zal in een relatief complexe constructie moeten worden ingebouwd, waarbij de constructie ervoor moet zorgen dat de kracht van een voetstap een resonante trilling veroorzaakt in het piëzo-element. Meer informatie over de verschillende typen piëzo-elementen is te vinden in Bijlage B.

3.4.0 - ENERGIEOPBRENGST PIËZO

Een piëzo-elektrisch element levert weinig vermogen op: in de catalogus van Piezo Systems[22] staan de waarden voor V_{OC} en I_{CC} en daarnaast het nominale output-vermogen in mW. Vermogens van verschillende typen piëzo-generators lopen van enkele tienden mW tot enkele W, gemeten onder optimale omstandigheden. Voor de eerder genoemde typen piëzo-elektrische opwekkingen A, B en C (par. 3.2.6) variëren de gebruikelijk typen piëzo-elementen, afhankelijk van de gewenste vervorming van het piëzo-element (par. 3.2.7).

3.4.1 - Energieopbrengst energie-oogster

De energieopbrengst van een piëzo-elektrische energie-oogster hangt af van vele factoren. Er zijn van het piëzo-element afhankelijke variabelen die de potentiële hoeveelheid elektrische energie bepalen. Hierover zijn bevindingen te vinden in Bijlage B. Daarnaast zijn er nog variabelen in de constructie van de energie-oogster en het gebruik ervan. Het valt buiten het kader van dit onderzoek om de verdere variabelen uitgebreid te behandelen. In plaats daarvan is het van belang tot een gegronde schatting te komen van de hoeveelheid elektrische energie die opgewekt kan worden door een energie-oogster.

Om tot een redelijk betrouwbare schatting te komen van de hoeveelheid elektrische energie die een piëzo-element kan opwekken, is een voorstel voor een simpel rekenmodel opgesteld. De variabelen voor dit rekenmodel zijn als volgt:

- E : Mechanische energie [J] als gevolg van de kracht [N] van impuls van voetganger, afhankelijk van lichaamsgewicht
- D : Factor voor de hoogte van de stap. Deze is 1 wanneer de voetganger geen hoogteverschil doormaakt, wordt lager bij trap beklimmen en hoger bij trap afdalen
- η_c : Rendement van de constructie van de energie-oogster. Ideaal is deze 1
- η_{pz} : Rendement van energie-omzetting van het piëzo-element, het kwadraat van de elektromechanische koppel-coëfficiënt k [16][22].
- G : Het aantal voetgangers per uur die op de energie-oogster stappen

Door deze variabelen met elkaar te vermenigvuldigen kan de theoretische totale hoeveelheid opgewekte elektrische energie per uur uitgerekend. Logischerwijs is de energie per stap uit te rekenen door de factor G weg te laten uit de vermenigvuldiging.

3.4.2 - Marktonderzoek

Bestaande vergelijkbare energie-oogsters kunnen een inzicht geven in de hoeveelheid energie die een energie-oogstende piëzo-tegel kan opwekken. Voor zover bekend biedt wereldwijd een klein aantal bedrijven energie-oogstende tegels met piëzo-technologie aan.

Twee bedrijven op de markt, Pavegen uit het Verenigd Koninkrijk en POWERleap uit de Verenigde Staten, hebben tegels die naar schatting rond 5 mW *(= 5 mJ/s)* per stap aan bruikbare energie opwekken[24][25][26]. Een tegel ontwikkeld door studenten aan de Stevens Institute of Technology levert ca. 0.4 mJ per stap aan bruikbare energie op[27]. Uitgebreidere beschrijvingen en berekeningen zijn te vinden in Bijlage C.

3.4.3 - Conclusies

Het is moeilijk om aan precieze informatie en data te komen die tot reële en bruikbare waarden leiden voor de variabelen in het voorgestelde rekenmodel (par. 3.3.4). Wel is duidelijk dat de efficiëntie van het omzetten van (mechanische) loopenergie naar piëzo-energie in tegel-achtige toepassingen vooralsnog vrij laag is. De energie-output van vergelijkbare bestaande piëzo-energie-oogsters, zoals die van de in paragraaf 3.3.5 genoemde bedrijven, is vrij laag – in de orde van enkele mW per voetstap of seconde. Dit is aanzienlijk lager dan de verder ontwikkelde veersystemen zoals toegepast in de energie-opwekkende dansvloertegels, die een factor 1000 efficiënter lijken te zijn in het opwekken van energie.

Wel valt het op dat een gebied met vele tegels in een druk voetgangersgebied, zoals door PowerLEAP getest, wel aanzienlijke hoeveelheden energie (*1000 Wh*, zie Bijlage C) kan opwekken, waarmee interessante toepassingen van elektriciteit kunnen worden voorzien. Dit kunnen energie-intensieve toepassingen zijn die laagfrequent (enkele keren per uur voor enkele minuten) gebruikt worden, of energiezuinige (*<20 W*) toepassingen die constant gebruikt worden, zolang er genoeg tegels in gebruik zijn.

3.5.0 - EIGENSCHAPPEN ENERGIE-OOGSTER

Hier worden in het kort de belangrijkste eigenschappen en functionaliteiten van de energie-oogster genoemd. Deze kunnen worden beschouwd als richtlijnen voor het pakket van eisen en wensen van de energie-oogster en geven ook een indicatie van de kosten van het ontwikkelen, produceren en gebruiken ervan.

3.5.1 - Energie

De belangrijkste functie van een energie-oogster is het opwekken of afvangen van energie. Een energie-oogster levert relatief weinig energie en moet daarom niet worden beschouwd als een reguliere energie-opwekker. Afhankelijk van de vraag van de toepassing moet de output van de oogster continu of periodiek en in piekhoeveelheden of gebufferd zijn.

3.5.2 - Materiaal

Naast de keuze voor het piëzo-elektrisch materiaal zijn er materiaalkeuzes voor andere aspecten, zoals de constructie rondom het piëzo-elektrisch materiaal en de methode van energie-opslag (buffer). Ook moet er rekening worden gehouden met het elektronische systeem in de tegel en in een eventuele verbinding tussen de tegels, waardoor de materiaalkosten eveneens worden beïnvloed.

3.5.3 - Ontwikkeling en productie

Voor vele onderdelen van een energie-oogster kunnen standaard onderdelen worden gebruikt, zoals printplaatjes en buffers zoals accu's of condensatoren, wat de technische ontwikkel- en productiekosten reduceert, aangezien deze onderdelen niet meer apart ontwikkeld hoeven te worden. Dit is ook grotendeels afhankelijk van de aanwezige kennis van de werking van het systeem en de onderdelen.

Indien de trillingen niet direct kunnen worden opgevangen met het piëzo-elektrisch materiaal, kan het nodig zijn dat er een mechanisch systeem omheen ontwikkeld moet worden. Het ontwikkelen van een dergelijk mechanisch systeem kan veel tijd kosten als een optimaal resultaat moet worden bereikt. Dit mechanisch systeem moet ook belast zijn tegen negatieve externe invloeden zoals te hoge krachten, slijtage, weer en vandalisme.

De schaalbaarheid van het systeem is van invloed als het energie oogstend systeem als gestandaardiseerd ontwerp moet functioneren, dat in meerdere omstandigheden en op meerdere ordegroottes correct

werkt. De ontwikkel- en productietijd en -kosten van later aangelegde vergelijkbare systemen kunnen dan aanzienlijk worden verminderd.

3.5.4 - Duurzaamheid

Er moet ook rekening worden gehouden met duurzaamheid, hetgeen kan worden beschouwd als het minimaliseren van factoren die een negatieve invloed hebben op het milieu. De factoren die hier worden bedoeld beslaan keuze van materiaal, onderhoudsgevoeligheid, levensduur en overlast.

De keuze van materialen is voor de publieke ruimte altijd van belang, omdat er geen biologisch schadelijke materialen mogen worden gebruikt en het ook zeer ongewenst is om (nodeloos) te kostbare materialen te gebruiken. De factoren onderhoudsgevoeligheid en levensduur slaan op de bouwkwaliteit en resistentie tegen externe factoren als slijtage, weersomstandigheden en vandalisme. Als deze resistentie hoog is en het systeem weinig onderhoud of vervanging van onderdelen behoeft, zal de onderhoudsgevoeligheid laag zijn en de levensduur waarschijnlijk lang, beide gunstige factoren.

De laatste factor is overlast en slaat op de impact die het systeem kan hebben op de sociale omgeving – overlast die gebruikers of andere mensen ervaren moet geminimaliseerd worden. Dit houdt in dat het systeem geen ongewenst lawaai mag veroorzaken of visuele overlast bezorgen. Wanneer deze factoren geminimaliseerd zijn kan acceptatie door mensen vergroten en kan vandalisme mogelijk ook gereduceerd worden. Gewenst is dat het systeem als toevoeging aan de omgeving wordt gezien en wordt gewaardeerd.

4.0.0 - TOEPASSINGSONDERZOEK

In dit hoofdstuk wordt gekeken naar de mogelijkheden van toepassing van piëzo-technologie in de door voetgangers benutte publieke ruimte. Hiervoor is geïnventariseerd en gebrainstormd waaruit de interactie van voetgangers met de publieke ruimte bestaat en wat de mogelijkheden van toepassingen van door piëzo-technologie opgewekte energie zoal zijn. Hieruit volgen criteria die het kader vormen voor de te ontwerpen toepassing horend bij een piëzo-elektrische energie-oogster in de publieke ruimte.

Dit toepassingsonderzoek behelst de onderzoeksvragen 2a t/m e en 3a t/m c.

4.1.0 - PIËZO IN DE PUBLIEKE RUIMTE

Uit het vooronderzoek van hoofdstuk 3 volgt een aantal criteria voor het verdere toepassingsonderzoek. Het onderzoeken van toepassing van piëzo-technologie in een energie-oogster in de publieke ruimte is verder gespecificeerd, met als belangrijkste criteria:

- De energie-oogster wordt gevoed door kinetische (trillings)energie als gevolg van menselijke voetstappen
- De energie-oogster bevindt zich in de publieke ruimte
- Er moet rekening worden gehouden met de eigenschappen zoals beschreven in hoofdstuk 3.5.0

4.1.1 - Locaties

Middels brainstormsessies is getracht een overzicht te creëren van de invulling van publieke ruimte. Eerst is daarvoor een overzicht gemaakt van publieke ruimte in de breedste zin van het woord is, namelijk de verdeling van alle ruimte in een land, op te delen in de categorieën natuur, landbouw, infrastructuur en bebouwing. De categorieën natuur en landbouw zijn voor dit onderzoek niet relevant, uitgezonderd delen van de natuur waar mensen voor recreatie komen. Met infrastructuur wordt hier het transport op de grootste schaal bedoeld: spoorwegen, snelwegen, waterwegen en luchtwegen. Aangezien deze categorie niet is ontworpen voor voetgangers, wordt deze grotendeels genegeerd. De nadruk is derhalve komen te liggen op de categorie 'bebouwing', waaronder alle bouwwerken worden verstaan, met name woongebieden. In de categorie bebouwing kan onderscheid worden gemaakt tussen 'stad' – (intensief) woongebied – en recreatie. De categorieën 'industrie' en 'kantoren' worden genegeerd omdat deze niet als echt openbaar beschouwd kunnen worden.

In de categorie 'stad' kan veel specifieker onderscheid gemaakt worden tussen de doeleinden van stukken ruimte in stedelijk gebied. Zo zijn er o.a. straten (en andere kleinschalige infrastructuur), publieke voorzieningen, openbaar vervoer, winkelcentra en horeca te onderscheiden waarbinnen relevante locaties voor energie-oogsters zijn te vinden. Bij deze verdere specificatie wordt rekening gehouden met locaties waar onder normale omstandigheden voetgangers te vinden zijn. Hierbij komen mogelijk interessante locaties naar voren, die in Bijlage D groen en vetgedrukt zijn weergegeven.

4.1.2 - Objecten

Om uit te vinden welke objecten zoal worden betreden door voetgangers, volstond een simpele brainstorm waarna snel kon worden geconcludeerd dat er weinig variatie is in deze categorisatie. Wordt er gedacht aan objecten die door voetgangers worden betreden wanneer zij zich op looptempo door bebouwd gebied verplaatsen, dan blijkt het nauwelijks gevarieerd en kan het geheel worden samengevat tot 'verhardingselement'. Zo zijn stoeptegel, klinker en traptrede allen andere uitingen van een afgevlakt stuk hard materiaal, ofwel verhardingselement. De bebouwde publieke ruimte in stedelijk gebied is vrijwel volledig opgebouwd uit tegels, klinkers, traptreden en andere verharde ondergrond (zoals beton en asfalt). Daarnaast zijn delen van de ondergrond geheld en bestaan er nog bruggen, veelal ook voorzien van traptreden en tegels of andere verharding.

Wanneer de actieve voetganger – de voetganger die loopt met als doel te recreëren – wordt beschouwd, kan er onderscheid gemaakt tussen de spelende en sportende voetganger. De spelende voetgangers zijn

veelal kinderen en betreden en beklimmen speeltoestellen en –kunstwerken met elementen als hellingen, trappen en ladders waarmee hun voeten contact maken. Sportende voetgangers bevinden zich in de publieke ruimte op gewone verhardingselementen, wanneer zij bijvoorbeeld hardlopen. Er zijn ook atletiekbanen en speciale trimbanen te vinden met publiek toegankelijke toestellen en obstakels voor lichamelijke oefeningen. Activiteiten als 'dansen' en 'springen' zijn in de publieke ruimte niet gebruikelijk en kunnen hier genegeerd worden. De brainstormresultaten staan in Bijlage D.

4.1.3 - Conclusies

De grote variatie in het ontwerpen van een toepassing van een energie-oogstend systeem op basis van piëzo-technologie, zit in de keuze van de locatie en de toepassing van de energie. De analyse van objecten leert dat vrijwel alle objecten die voetgangers massaal en op dagelijkse basis betreden, samen te vatten zijn als verhardingselementen, ofwel variaties op tegels. Uitgezonderd zijn publieke speel- en sporttoestellen, die door relatief kleine groepen voetgangers worden gebruikt en dus minder interessant zijn als efficiënte en algemeen bruikbare energie-oogsters. Verhardingselementen zoals tegels zijn dus de beste keuze om te gebruiken als energie-oogsters.

De analyse van locaties leert dat verschillende gebiedjes in bebouwd gebied met verschillende doeleinden, interessante locaties voor een energie-oogstend systeem met toepassing kunnen zijn. Door de toepassing van energie af te stemmen op de locatie zijn er veel mogelijkheden te ontdekken om energie-oogsters en toepassingen in voetgangersgebieden te integreren.

4.2.0 - TOEPASSING VAN ENERGIE

Naast de keuze van het piëzo-elektrisch systeem waarmee energie wordt geoogst, moet er worden geïnventariseerd wat de mogelijkheden voor toepassing van de opgewekte energie zijn. Hiervoor is vanuit verschillende standpunten bekeken welke toepassingen geschikt kunnen zijn om te koppelen aan een energie-oogstend systeem in een voetgangersgebied.

4.2.1 - Mogelijkheden

De mogelijkheden voor toepassingen van energie zijn gekoppeld aan de effectiviteit van de energie-oogster. Omdat de toepassing energie nodig zal hebben om te functioneren, is deze afhankelijk van de hoeveelheid energie die de oogster opwekt. Deze hoeveelheid is laag, in de orde van milliwatts, onder gunstige omstandigheden. De opgewekte energie is afhankelijk van gebruiksintensiteit van de oogster, wat weer afhankelijk is van de locatie van het systeem. Het is daarom logisch om de toepassing te ontwerpen met de eigenschappen en locatie van de energie-oogster als leidraad.

Vanwege de relatief lage energieopbrengst zijn alleen toepassingen met weinig energievraag mogelijk. Het type output van de applicatie moet dus een lage energiebehoefte hebben en efficiënt met energie omgaan.

Wanneer de energie-output 'licht' is, is er veel mogelijk door de sterke ontwikkelingen van de zeer energiezuinige LED-verlichting. De energievraag is afhankelijk van de lichtintensiteit (gekoppeld aan de hoeveelheid LED'jes), kwaliteit van de LED'jes en de gebruiksduur, waarbij hogere waarden gelijk staan aan een hogere energievraag.

De output 'geluid' is afhankelijk van frequentiebereik, geluidskwaliteit en volume, waarbij hogere waarden hiervan veelal gelijk staan aan een hogere energievraag. Vele eenvoudige, bestaande applicaties met geluid zijn energiezuinig genoeg om deze vorm van energie ook te overwegen voor een toepassing gekoppeld aan de energie-oogster.

Een derde type output-energie is mechanisch, waarvan vele toepassingen te veel energie vragen. Deze vorm van output is afhankelijk van vele factoren waaronder de massa van het te bewegen onderdeel, de weerstand ervan, efficiëntie van het systeem en de tijdsduur waarop energie aangeleverd moet worden. Eenvoudige en lichte mechanische systemen die eenvoudige en kort durende bewegingen maken kunnen eventueel worden gevoed door de energie van de energie-oogster.

Naast het leveren van (vrijwel) alle energie voor toepassingen, kan de het object met piëzo-technologie ook kleine hoeveelheden gevraagde energie leveren en voornamelijk als mechanische sensor functioneren door signalen in de vorm van voltages door te geven wanneer het object mechanisch belast wordt.

Meer over de mogelijke vormen van output staan in Bijlage D.

4.2.2 - Doeleinden

De doeleinden van de toepassingen bepalen de vereiste en gewenste functies. Door te kijken naar de typen locaties en de mogelijke output te beschouwen, kunnen mogelijke doeleinden van de toepassingen worden gevonden. De doeleinden zoals getoond in Bijlage D komen voort uit locatie-categorieën van de eerdere brainstormsessie, zoals toegelicht in hoofdstuk 4.1.1.

In de categorie 'verkeer' kunnen laagenergetische toepassingen met name veiligheid bevorderen, zowel van voetgangers als (tijdelijk) lopende bestuurders van voertuigen. Met output als licht en geluid kunnen signalen en andersoortige informatie worden afgegeven.

Het verschaffen van informatie kan ook buiten het verkeer (grootschalige infrastructuur) om, in kleinschalige infrastructuur zoals binnen stadscentra. Informatie over locatie en navigatie kunnen voor voetgangers in steden en natuur nuttige doeleinden zijn die met licht en mechanische energie kunnen worden gerealiseerd.

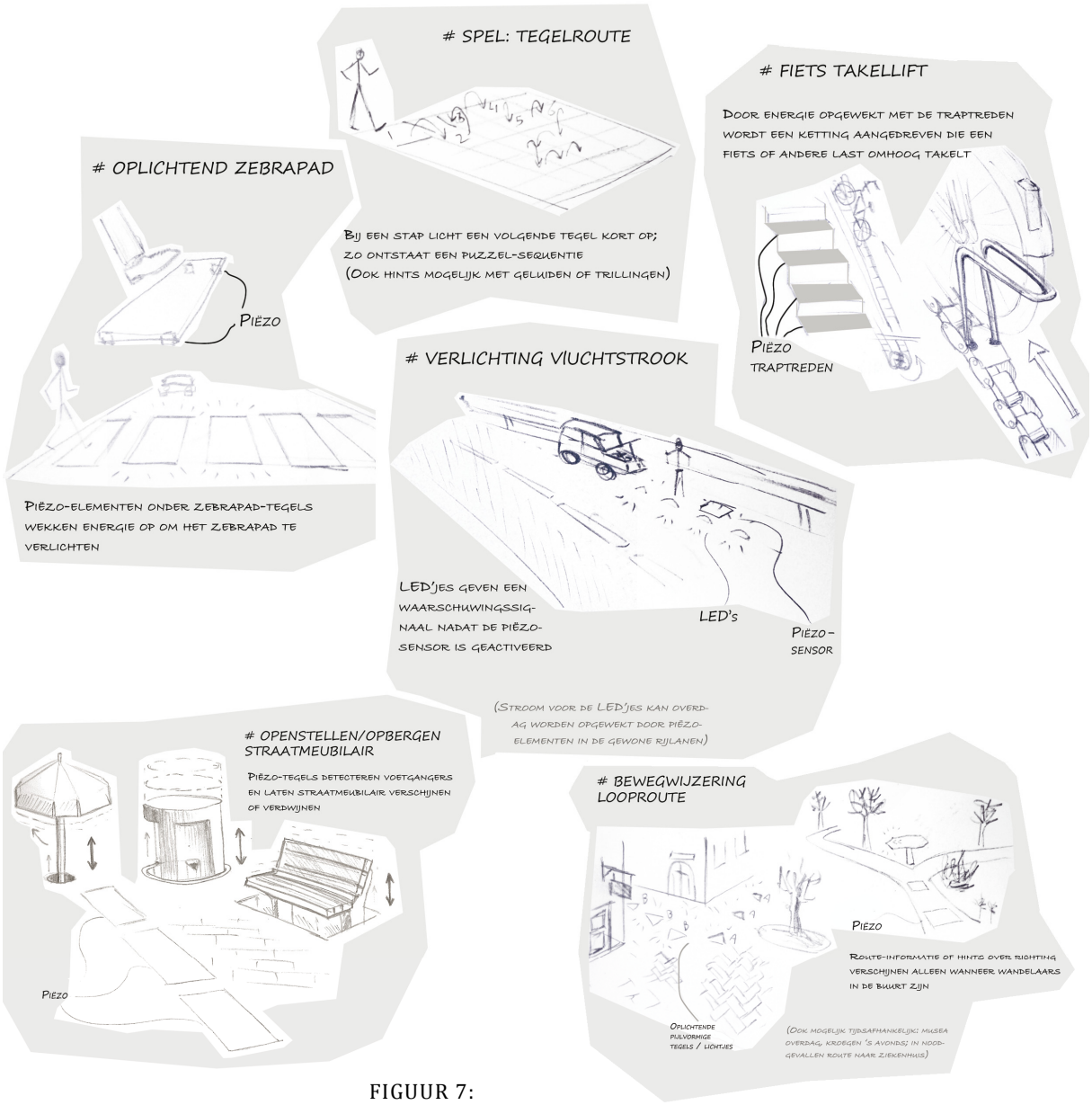
In de categorie 'recreatie' kunnen doeleinden voor actieve voetgangers, vergelijkbaar met de objecten in hoofdstuk 4.1.2 worden behandeld. Ook kan worden gedacht aan sociale recreatie en communicatie in de publieke ruimte en zijn er informele, speelse en esthetische doeleinden te bedenken.

4.2.3 - Applicaties

In Bijlage E zijn resultaten te vinden van verschillende ideeëngeneraties op basis van de verzamelde data in brainstorms. Deze ideeën voor toepassingen zijn gekoppeld aan specifieke locaties en ontvangen vrijwel allemaal energie via oogsters geïntegreerd in standaard verhardingselementen. In sommige gevallen functioneren deze meer als sensoren dan als verschaffers van (alle) benodigde energie voor de toepassing. De applicaties weergegeven in Bijlage E zijn onder te verdelen in 4 categorieën:

- Verkeer: zichtbaarheid – veiligheid
  - Zebrapad verlichting
  - Fietspad verlichting
  - Vluchtstrook verlichting
  - Looproute verlichting
  - Waarschuwing gevaarlijke bocht (auto)
- Navigatie/informatie
  - Toeristische looproute navigatie
  - Informatie boven stoeplanen
  - Navigatie op trein/busstation
  - Navigatie op parkeerterrein
- Energieopwekking: mechanisch-functionele applicatie
  - Energievoorziening kaartjesautomaat
  - Fiets takellift (langs trap)
  - (Hek)slot
  - Openstellen/verbergen straatmeubilair
- Kunst/bewustwording/speelse interactie
  - Fontein
  - Tegelroute-spel
  - Interactieve straatkunst/scherm
  - Speelse informatie boven stoeplanen
  - Dynamische (mechanische) kunst
  - Afvalscheiding (speels)

In Figuur 7 een klein aantal van deze applicaties, die duidelijker zijn weergegeven in Bijlage E.



FIGUUR 7:
SUGGESTIES VOOR APPLICATIE PIËZO

4.2.4 - Marktanalyse

Momenteel zijn er nog niet veel toepassingen van piëzo-elektrische energie-oogsters te vinden, omdat de energie-oogsters zelf nog nauwelijks in productie zijn. Alleen het bedrijf Pavegen heeft enkele suggesties gegeven voor de toepassing van energie, zoals het weergeven van informatie op een interface of het verlichten van een zebrapad, waarbij de energie grotendeels of geheel wordt verschaft door de energie-oogstende tegels van het bedrijf[23]. Beide ideeën zijn voor dit onderzoek ook naar voren gekomen.

4.2.5 - Conclusies

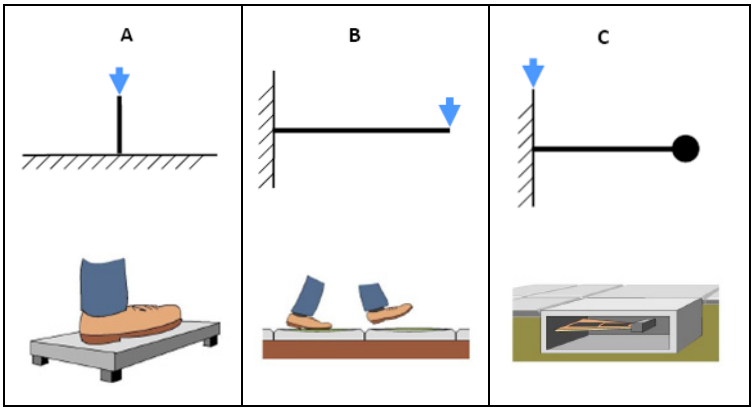
In overleg met de begeleiders is besloten dat iedere categorie van toepassingen interessante aspecten bevat en er geen harde selectie voor één verder uit te werken toepassing hoeft te worden gemaakt. In plaats daarvan zal een aantal ideeën die volgens de auteur extra aandacht behoeven, duidelijk gevisualiseerd. Hierbij moet tenminste een toepassing uit iedere categorie worden uitgewerkt. Met deze resultaten kan de opdrachtgever duidelijk en effectief communiceren wat de mogelijkheden van piëzo-elektrische energie-oogstende tegels zijn wanneer deze in de publieke ruimte worden toegepast.

5.0.0 - ONTWERPEN

Met de resultaten van het toepassingsonderzoek (hoofdstuk 4) kon de ontwerpfase beginnen. Hier ligt de nadruk niet op het ontwerpen en uitwerken van een of enkele toepassing, maar op het ontwerpen van een universeel bruikbare piëzo-elektrische energie-oogstende tegel voor voetgangers.

5.1.0 - TEGEL CONSTRUCTIE

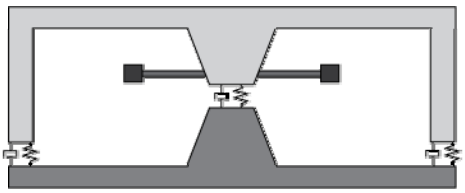
In paragraaf 3.3.1 staan de drie mogelijke varianten voor een conceptuele energie-oogstende piëzo-elektrische voetgangerstegel gepresenteerd. Na overleg met begeleiders en piëzo-experts is er gespecificeerd naar conceptuele constructie van een tegel. Hieronder nogmaals Figuur 5.



FIGUUR 5: METHODEN VAN TOEPASSING PIËZO VOOR VOETGANGERS

5.1.1 - Oriëntatie

Zo bleek allereerst dat alternatief A momenteel niet aantrekkelijk is vanwege het type piëzo-element (piezo stack) dat mogelijk in de constructie zou komen. Deze elementen functioneren het best bij constante trillingen, hebben erg kleine uitwijkingen (in de orde van µm[22]), zijn zeer kwetsbaar bij non-laterale belasting en bovendien zeer prijzig. Deze factoren zijn nadelig wanneer ze worden toegepast onder een tegel die onregelmatig en voor korte duur wordt belast. Alternatief C werd onderzocht en leek vele voordelen te herbergen, met name vanwege de gesloten constructie en de mogelijkheid om de onregelmatige korte belastingen om te zetten in trillingen die zo meer energie kunnen afvangen. Enkele schetsen illustreren de ideeën voor een dergelijke constructie, te vinden in Bijlage F. In onderstaande afbeelding zijn gefixeerde onderkant en dynamische bovenkant te onderscheiden. De staafjes met bolletjes op de uiteinden stellen de enigszins flexibele piëzo-plaatjes (bending generators) voor met puntmassa's op de uiteinden. Te zien is dat de verende delen links, rechts en in het midden ook dempend werken.

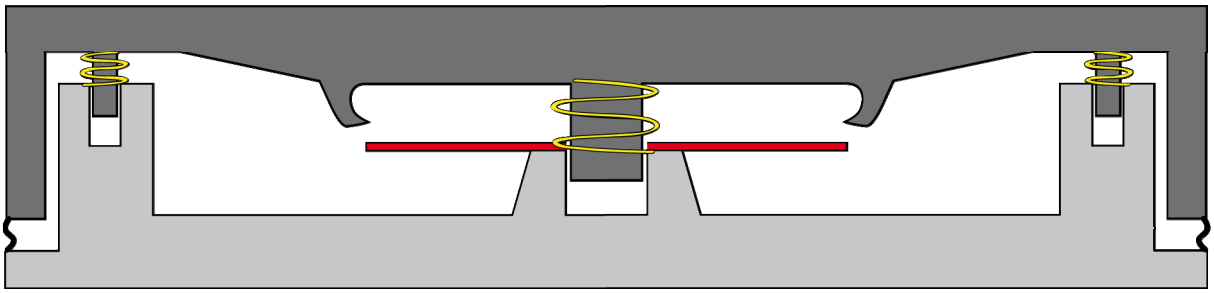


FIGUUR 8: CONCEPT C - VERTRAAGDE TRILLENDE MASSA'S

Uiteindelijk bleek ook concept C niet optimaal, aangezien het vereist dat het beweeglijke bovendeel waarin zich de piëzo-elementen en massa's bevinden, op veren en dempers gemonteerd moet worden om de interne constructie in trilling te kunnen laten brengen. Onderzoeker van piëzo-technologie aan de Universiteit Twente, Pieter de Jong, raadde dit af aangezien de uitwijking vanuit een voetstap al zeer laag zou zijn en de puntmassa's dus moeilijk in trilling zouden kunnen worden gebracht. Daarbij komt nog dat zelfs in een bijna optimale constructie er demping tussen boven- en onderkant zou optreden en dit voor een groot deel de beweging van de piëzo-elementen zou wegnemen. Het alternatief B leek het meest geschikt, waarbij als voorbeeld het studentenproject omtrent een piëzo-tegel van Stevens Institute of

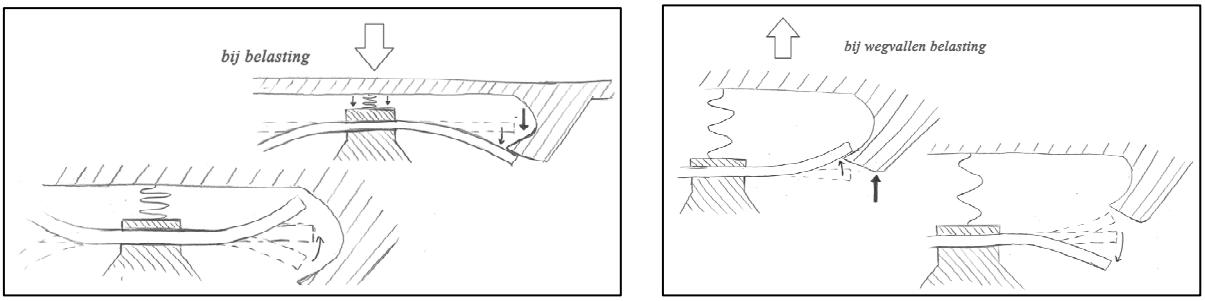
Technology[27] kon worden genomen. Hierin worden bending generators niet door vertraagde puntmassa's in trilling gebracht, maar zijn deze in de statische en stijve onderkant gemonteerd en zorgt een vast balkje in het dynamische bovendeel voor een impuls van de piëzo bij indrukking en ontspanning.

5.1.2 - Constructieschets



FIGUUR 9: CONSTRUCTIESCHETS TEGEL

Bovenstaande doorsnede (Figuur 9) en onderstaande werkingsschets (Figuur 10) geven dit principe weer. Wanneer de bovenkant wordt belast zullen de 'haken' aan weerszijden van de piëzo-plaatjes deze buigen en oprekken, totdat de plaatjes los schieten en trillen. Ditzelfde gebeurt omgekeerd wanneer de bovenkant weer ontspant en terug omhoog veert. Doordat de piëzo-plaatjes in de stijve onderkant verankerd zijn, zal er in principe minimale demping optreden in de overbrenging van de impuls naar de piëzo-elementen. Door magneten te plaatsen in de constructie kan de trilling mogelijk iets vergroten en kan het piëzo-plaatje van de 'haken' worden weggeduwd om te voorkomen dat het plaatje er tegenaan zal trillen.



FIGUUR 10: WERKING TEGEL

Om de bewegingsvrijheid te beperken tot de verticale richting moet er een glijdend of rollend component in de verbinding tussen boven- en onderkant worden geplaatst. Dit geldt voor iedere zijkant of hoekpunt van de tegel, zodat de bewegingsvrijheid aan vier kanten wordt geleid in uitsluitend verticale richting. Het verend/dempend element kan worden voorgesteld als een veer (weergegeven als zigzaggende lijn in Figuur 9) die aan de buitenzijde van de tegel door een rubber strip beschermd wordt tegen vocht en verdere toegang tot de binnenzijde van de constructie. De rubber strip is in Figuur 9 weergegeven als een dubbel gebogen zwarte lijn, links- en rechtsonderin.

5.2.0 - ELEKTRISCHE VERBINDING

Om een elektrische toepassing te voeden met elektrische energie opgewekt door de energie-oogstende piëzo-elektrische tegel, moet er een systeem worden ontworpen om de elektriciteit per tegel te geleiden naar de toepassing of een buffersysteem zoals een condensator of accu.

5.2.1 - Elektriciteit in de tegel

Voor de binnenkant van de tegel is een eenvoudige schets gemaakt waarin de schakeling schematisch wordt weergegeven. De exacte elektrische schakeling binnen de constructie van de tegel is niet gedefinieerd en het valt buiten het kader van dit onderzoek om dit verder uit te werken. Het belangrijkste

aspect is de verbinding van de interne piëzo-schakeling met een uitgang naar de buitenkant van de tegel, zodat de tegel eenvoudig extern in verbinding kan komen met de applicatie of buffer.

5.2.2 - Elektriciteitsoverdracht

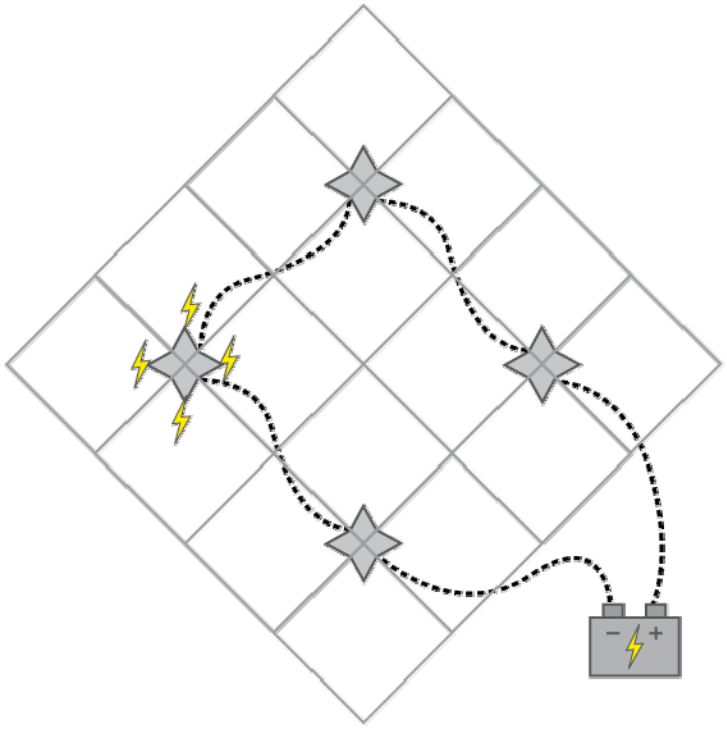
Om de elektrische energie van een of meerdere tegels te verzamelen en te transporteren kan dezelfde verbinding worden gebruikt. Een belangrijk aspect van het verbindingspunt in de tegel is dat kortsluiting (door vocht) moet worden voorkomen. Om een waterdichte open elektrische verbinding te verkrijgen kan gebruik worden gemaakt van inductieve koppeling[17]. Elektromagnetische inductie is een verschijnsel waarbij twee (geïsoleerde) magneten (spoelen) via magnetische velden elektrische energie overdragen, zoals het wordt toegepast in een elektrische tandenborstel[18][19]. Hoewel inductie in deze context als voordeel heeft dat het risico op kortsluiting nihil is doordat de geleiders volledig geïsoleerd zijn, zijn de nadelen dat de warmteproductie hoger en het rendement aanzienlijk lager zijn dan bij normale elektrische geleiding. Voor de lage elektriciteitsproductie van de energie-oogster heeft deze techniek als nadeel dat een deel van de toch al kleine hoeveelheid energie verloren gaat. Voordeel is dat de warmteproductie in dit geval dan waarschijnlijk geen probleem zal zijn, omdat het om kleine, periodieke hoeveelheden elektriciteit gaat.

Er kan ook gebruik gemaakt worden van een gebruikelijke directe elektrische geleiding, waarbij de waterkoker in ogenschouw kan worden genomen, aangezien deze ook een redelijk veilige elektrische verbinding bevat die vrij goed bestand is tegen vocht uit de gebruiksomgeving. Isolatiemateriaal als rubber kan ervoor zorgen dat het verbindingspunt praktisch waterdicht wordt gemaakt. Dit draagt bij aan het streven om potentieel onderhoud aan het systeem te minimaliseren.

5.2.3 - Elektrisch netwerk

Voor een effectieve methode om energie te oogsten is het zaak om de elektriciteit van meerdere tegels te verzamelen en transporteren naar de toepassing of buffer. Daarvoor kan een systeem worden voorgesteld met elektrische verzamelpunten (‘hubs’) grenzend aan de hoeken van vier tegels in het raster. Deze vangen elektrische energie op via een directe elektrische verbinding met de vier grenzende tegels. De hubs zijn onderling verbonden in een elektrisch netwerk waarin ook de buffer of toepassing is opgenomen.

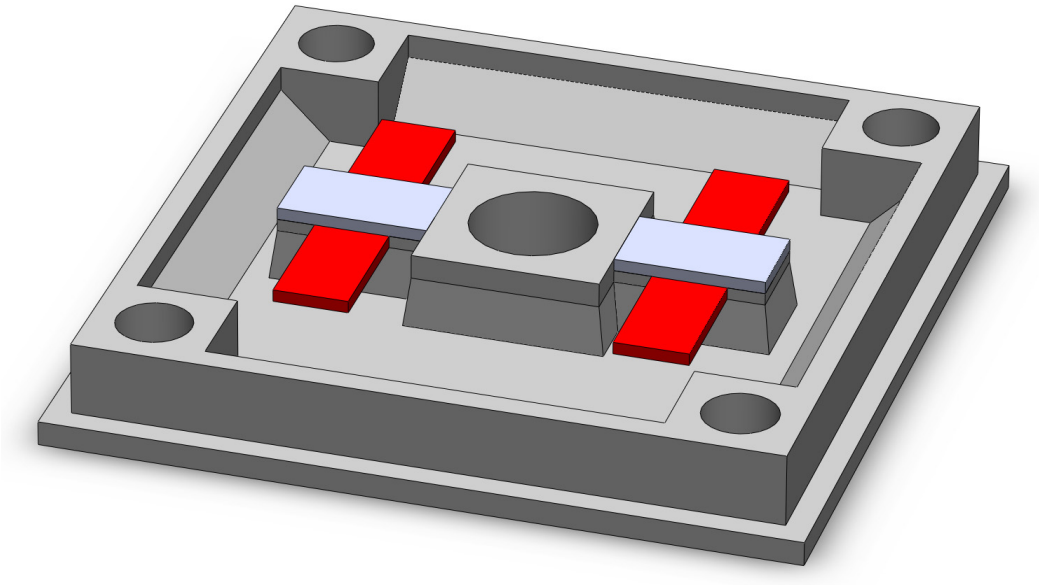
Nevenstaande afbeelding (Figuur 11: Elektrisch netwerk met hubs geeft schematisch een raster van 4*4 tegels weer, waarin hubs met vier omliggende tegels verbonden zijn en onderling met stroomkabels. Het elektrische netwerk bevindt zich onder de tegels.



FIGUUR 11: ELEKTRISCH NETWERK MET HUBS

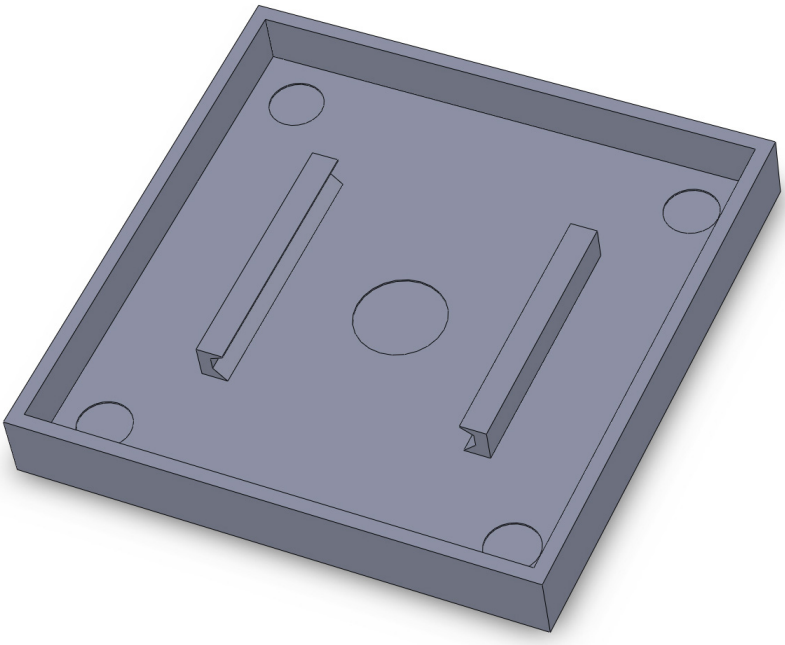
5.3.0 - TEGELONTWERP

Aan de hand van de conclusies van hoofdstukken 5.1 en 5.2 is er in CAD-software SolidWorks een eenvoudig model opgezet van de tegel. Deze bestaat uit een onderkant met inkepingen voor elektrische verbinding in de bodem en een platform in het midden waarop de piëzo-strips zijn verankerd. Het platform is omgeven door een 'muur' waar overheen de bovenkant glijdt. In de hoeken van de holle ruimte bevinden zich cilindrische schachten die als geleiding en vering dienen voor cilinders die in de bovenkant zitten. De piëzo-strips zijn in onderstaande Figuur 12: Onderkant tegel in het rood weergegeven.



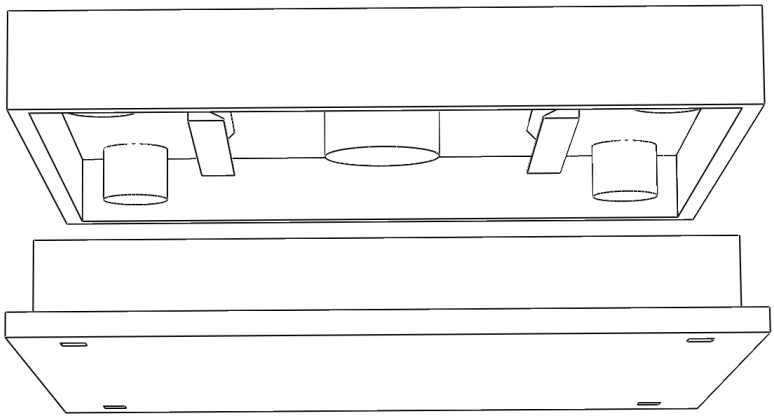
FIGUUR 12: ONDERKANT TEGEL

De bovenkant (het verende deel) is in essentie een kap of 'deksel' die verankerde haken bevat die de piëzo-stripjes in trilling kunnen brengen. Daarnaast is er een verende verbinding tussen boven- en onderkant, die in het model is weergegeven als een vijftal cilinders (4 in de hoeken, 1 centraal) die verankerd in de bovenkant zijn. Deze worden geleid in de vijf schachten in de onderkant. De cilinders zijn omgeven door springveren (niet zichtbaar in het CAD-model). In nevenstaande Figuur 13: Bovenkant tegel is de bovenkant van de tegel weergegeven. Hierin zijn inkepingen voor de positionering van de cilinders weergegeven.



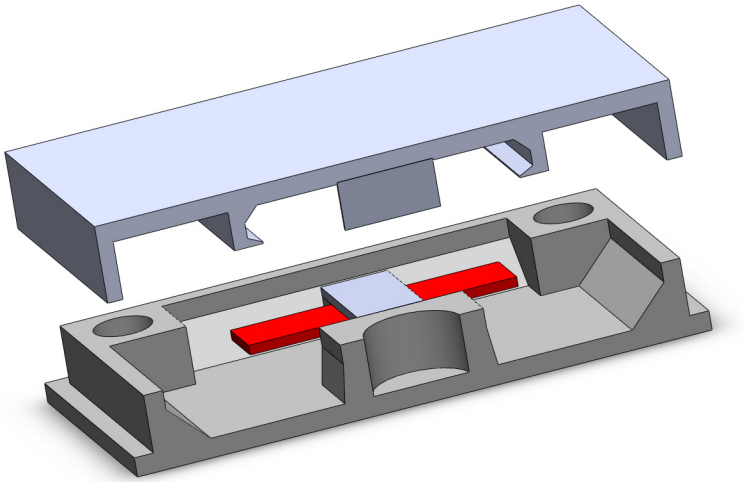
FIGUUR 13: BOVENKANT TEGEL

In onderstaande Figuur 14: bovenkant met cilinders is een zij-aanzicht schuin omhoog gericht om een beeld te geven van de bovenkant met zichtbare cilinders. Ook zijn in de vier hoekpunten van de onderkant van het onderste tegeldeel kleine inkepingen te zien. Deze illustreren de verbinding met het elektriciteitsnetwerk tussen de tegels.



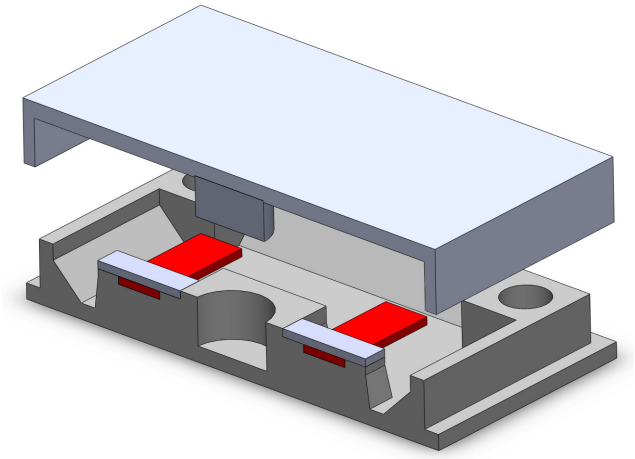
FIGUUR 14: BOVENKANT MET CILINDERS

Hiernaast is in Figuur 15: centrale Dwarsdoorsnede een dwarsdoorsnede van het 3D-model te zien, waarbij de centrale cilindrische schacht (en cilinder) en de haken zichtbaar zijn. Ook is te zien dat de verbinding tussen onderplaat en zijkanten van het onderste deel verstevigd is met een schuine afronding (zgn. 'chamfer').



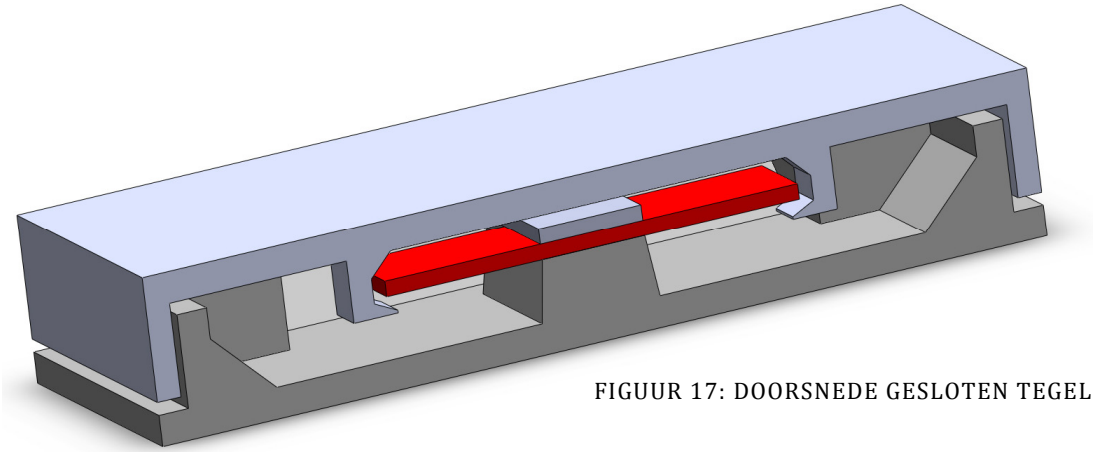
FIGUUR 15: CENTRALE DWARSDOORSNEDE

Figuur 16: dwarsdoorsnedegeeft de dwarsdoorsnede in andere richting aan, zodat te zien is dat de (rode) piëzo-strips ingeklemd zijn. De omvang van de centrale verhoging waarop de piëzo-strips zich bevinden is ook goed zichtbaar.



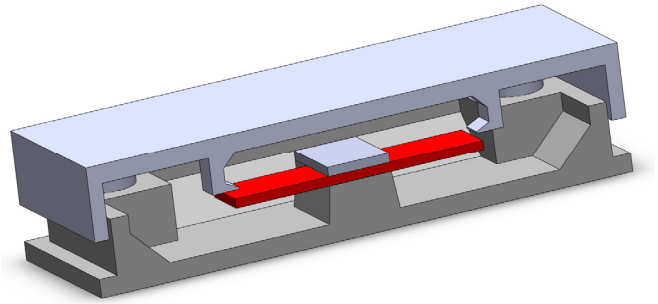
FIGUUR 16: DWARSDOORSNEDE IN ANDERE RICHTING

In Figuur 17: doorsnede gesloten tegel is te zien hoe de klemmen zich onder de piëzo-strips bevinden wanneer beide delen van de tegel op elkaar vallen. De piëzo-strip heeft enige bewegingsruimte om te trillen wanneer de tegel 'gesloten' is.



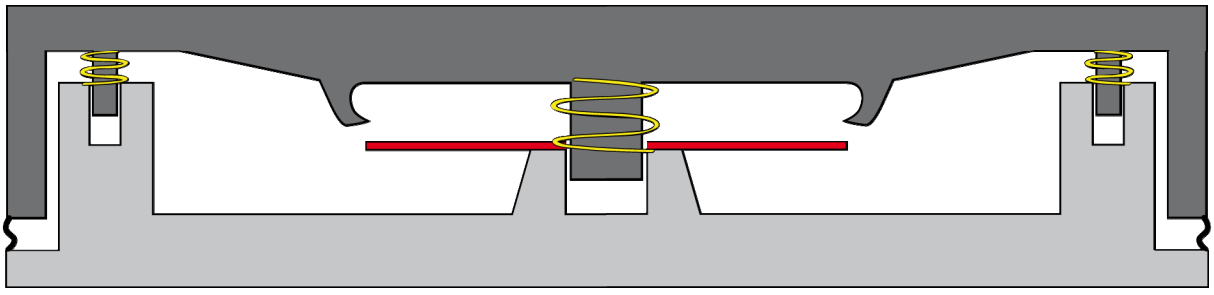
FIGUUR 17: DOORSNEDE GESLOTEN TEGEL

Nevenstaande Figuur 18: Doorsnede open tegel geeft dezelfde doorsnede als Figuur 17, met als verschil dat de tegel zich hier in 'open' of ontspannen toestand bevindt. Zonder belasting bevinden de haken zich boven de piëzo-strips.



FIGUUR 18: DOORSNEDE OPEN TEGEL

Onderaan deze pagina is tenslotte Figuur 19 te zien. Dit is een schematische afbeelding van de tegel om nog enkele details te verduidelijken die in het CAD-model ontbreken. Aan beide zijkanten is onderin een flexibele laag rubber te zien die de spleet tussen boven- en onderkant afdicht. Links- en rechtsboven bevinden zich de cilinders met veren in hun schachten. Hetzelfde systeem voor vering en minimalisering van horizontale uitwijking is in het midden van de tegel te vinden.



FIGUUR 19: SCHEMATISCHE DOORSNEDE

5.4.0 - KEUZE VAN APPLICATIES

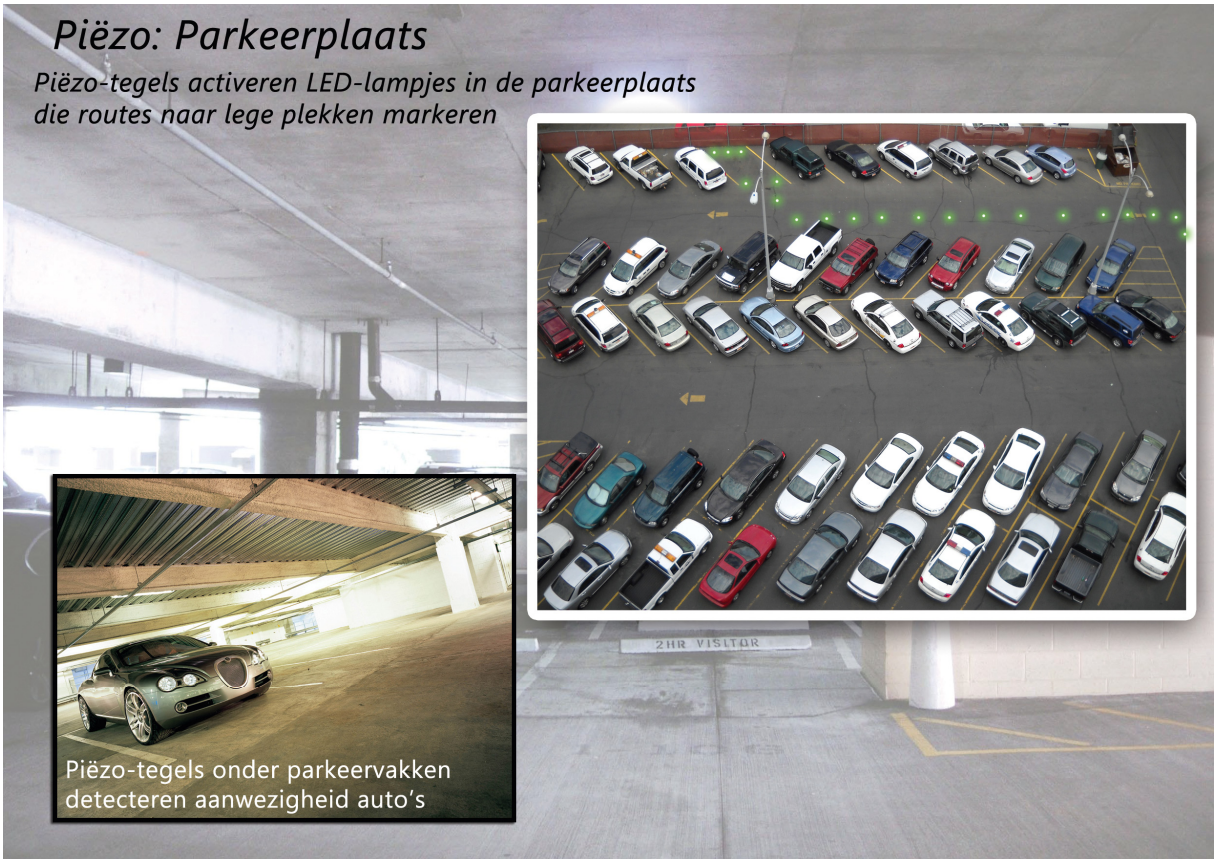
Zoals in paragraaf 4.2.5 bleek, is uiteindelijk een aantal concepten voor elektrische toepassingen gekoppeld aan een of meerdere piëzo-tegels, verder uitgewerkt tot heldere visuele interpretaties van deze concepten. Hierbij is uit iedere categorie tenminste één toepassing gekozen en is het totaal op zes toepassingen gekomen. Per applicatie verschilt het uiterlijk van de tegel en afhankelijk van de functie (applicatie) heeft dit invloed op de opvallendheid van de tegel. Het uiterlijk beïnvloedt per applicatie dus op een andere wijze hoe de gebruiker wordt aangezet om de tegel te gebruiken.

5.4.1 - Stadsnavigatie

Het concept stadsnavigatie behelst de toepassing van piëzo-tegels in een toeristische stadsomgeving waarbij de gebruiker op een specifieke gemarkeerde tegel moet stappen om een visuele indicatie te krijgen waar hij/zij heen moet om een route te volgen waar de tegel bij hoort. Hierbij kan worden gedacht aan een route die de gebruiker langs interessante bouwwerken, kunstwerken en musea voert, in een zgn. 'cultuurroute' of een route die langs cafés, discotheken en ander avondvermaak voert. De markering op de tegel geeft indicatie aan welke route deze is gekoppeld, door gebruik van pictogrammen, symbolen en/of kleuren. Door vele tegels langs een dergelijke route neer te leggen en deze direct aan LED-lampjes te koppelen ontstaat een interactie waarbij de gebruiker actief moet stappen om interessante toeristische informatie te verkrijgen. Dit concept is in onderstaande afbeelding gevisualiseerd.

5.4.2 - Parkeerplaats navigatie

Het concept parkeerplaats navigatie is niet gericht op voetgangers, maar op gebruiksgemak van een parkeerplaats of parkeergarage. Piëzo-tegels in het wegdek wekken energie op om LED'jes in het wegdek mee te verlichten die navigeren naar een vrije parkeerplek. Detectie van bezetting van een parkeerplek kan door een piëzo-tegel onder iedere parkeerplek als druksensor te gebruiken. De tegels zijn subtiel in de ondergrond verwerkt en hoeven in principe niet op te vallen voor deze functie.



5.4.3 - Fietslift

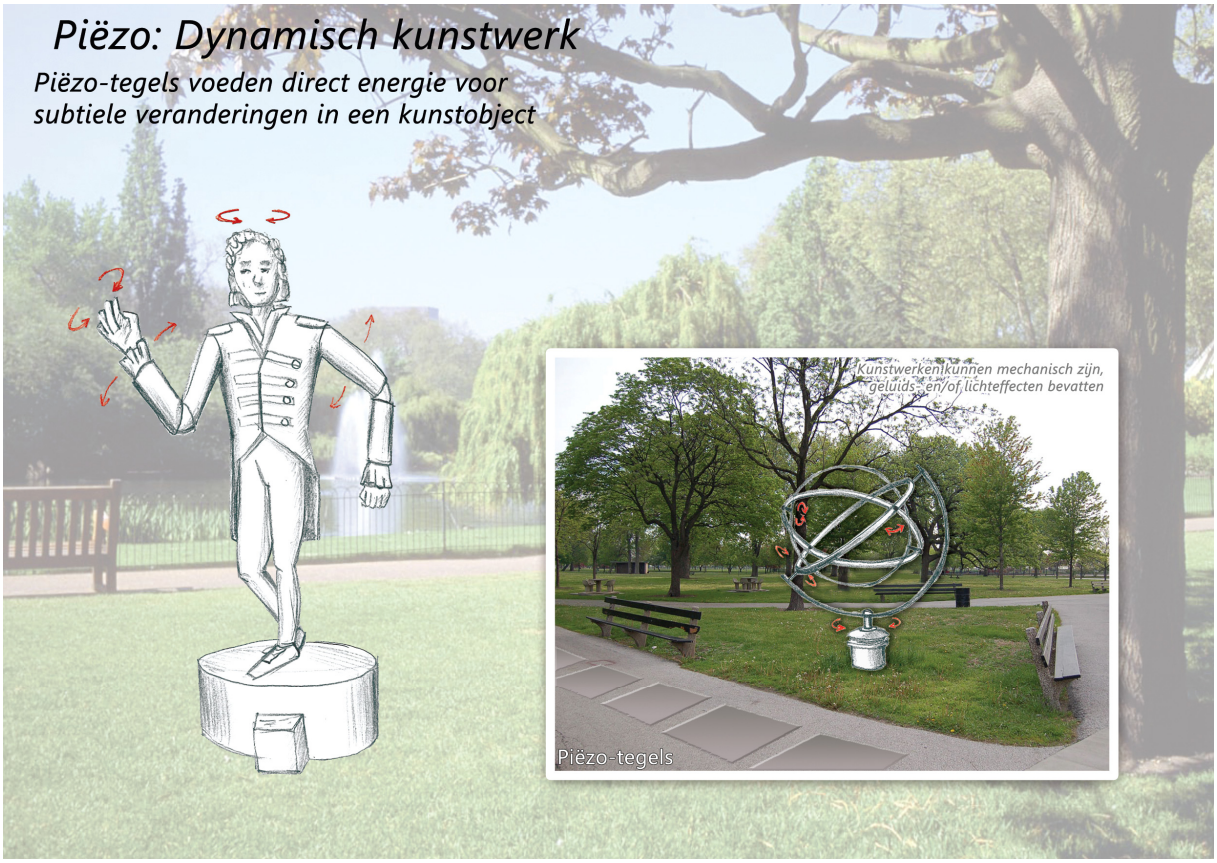
Het concept van een fietslift hoort in de categorie ‘mechanisch-functionele applicaties’ en maakt gebruik van de voetstappen van voetgangers in een treinstation of vergelijkbare omgeving. Door traptreden te vervangen door piëzo-tegels en deze tezamen energie te laten bufferen, kan in potentie voldoende energie worden opgewekt om een takelketting in werking te stellen die, op verzoek van de gebruiker, een fiets door een geul omhoog kan trekken. Door de traptegels te voorzien van afbeeldingen van voetstappen of korte teksten, kan de gebruiker bewust worden gemaakt van de energie die wordt opgewekt door de treden te bewandelen.

5.4.4 - Tegelroute

Het concept van de tegelroute valt in de categorie ‘speelse interactie’ en heeft geen uitgesproken ‘nuttige’ functie naast het speelse element dat dit concept behelst. Om een lange verplichte wandeling door een omgeving als een tunnel, die door mensen als onprettig kan worden ervaren, minder vervelend te maken kan dit concept een prettige afleiding bieden. In de vloer van de tunnel zitten (semi-) transparante piëzo-tegels die verlicht worden wanneer een andere tegel wordt belast. Dat houdt in dat wanneer een voetganger op een tegel stapt, een volgende tegel verderop in de tunnel kort oplicht en deze bij wijze van ‘spel’ als volgende moet worden betreden, waarna weer een volgende oplicht. Dit gaat zo door tot het eind van de tunnel waar eventueel een score kan worden gepresenteerd van het aantal goed belopen tegels en een korte uitleg van de piëzo-technologie die dit mogelijk maakt.

5.4.5 - Dynamische kunst

Dit is het tweede concept uit de categorie ‘speelse interactie’ dat simpelweg bestaat uit kunstwerken die met piëzo-elektriciteit worden gevoed om zo visueel of auditief te veranderen. Hierbij kan worden gedacht aan een mechanisch kunstwerk of een kunstig object dat gebruik maakt van LED-verlichting. Een dergelijk kunstwerk kan in een publieke ruimte zoals een plein of park worden geplaatst en wordt omringd door piëzo-tegels die middels markering duidelijk maken dat ze in verbinding met het kunstwerk staan. Door de energie die wordt opgewekt direct of in kleine hoeveelheden gebufferd naar het kunstwerk te sturen, wordt een subtiele verandering in het aanzien van het kunstwerk teweeggebracht. Hierbij kunnen verschillende piëzo-tegels verschillende uitwerkingen hebben op de bewegingen of de verlichting die het dynamische kunstwerk als mogelijkheden biedt, waardoor een speelse interactie kan ontstaan en het kunstwerk er iedere dag iets anders uit kan zien. Hierbij is enige bewustwording en voorlichting van piëzo-technologie d.m.v. eenvoudig gepresenteerde informatie een interessante aanvulling.



5.4.6 - Vluchtstrook signalering

Dit concept behoort in de categorie 'verkeersveiligheid en zichtbaarheid' en bestaat uit een systeem van grote piëzo-tegels die in een vluchtstrook van een snelweg zijn geïntegreerd. Deze werken als eenvoudige druksensoren en detecteren dus wanneer de vluchtstrook wordt gebruikt. In geval van een stilstaande auto zullen daardoor LED'jes rondom de belaste piëzo-tegel oplichten bij wijze van signalering dat er een voertuig staat. Dit kan met name in donkere omstandigheden veel extra veiligheid bieden wanneer de auto bijvoorbeeld geen werkende waarschuwingslichten heeft en bestuurders zich buiten de auto begeven. Ook kan worden gedetecteerd wanneer een voertuig met hoge snelheid over de vluchtstrook rijdt door de tegels met elkaar te koppelen, waardoor een waarschuwingssignaal vooruit kan worden gestuurd wanneer er bijvoorbeeld hulpdiensten op hoge snelheid via de vluchtstrook willen passeren. De energie voor de LED'jes kan slechts voor een klein deel door de piëzo-tegels in de vluchtstrook worden gevoed, aangezien deze waarschijnlijk zeer weinig en onregelmatig worden geactiveerd. Voor de energievoorziening kunnen dan bijvoorbeeld piëzo-tegels geïntegreerd in de gewone lanen van de snelweg dienst doen.

BIJLAGE A - OPDRACHTOMSCHRIJVING

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe deze opdracht tot stand is gekomen en hoe de opdrachtomschrijving is opgesteld.

A.1.0 - VOORSTEL

Naar aanleiding van een Industrial Design Engineering (IDE) afstudeeronderzoek uitgevoerd door Sybren Jansma en begeleid door André de Boer, is contact opgenomen met het bedrijf Tauw gevestigd in Deventer. In dit onderzoek werd gekeken naar de toepassing van piëzo-elementen onder een wegdek, om zo trillingen van het verkeer op te vangen en om te zetten in elektrische energie. Dit idee sprak aan en bij navragen bleek dat het bedrijf meer soortgelijke ideeën voor onderzoeken had. De keuze voor een technisch georiënteerd onderzoek bij een groot bedrijf, dat vermoedelijk nog relatief onbekend is met de kwaliteiten van Industrieel Ontwerpers zoals opgeleid aan de Universiteit Twente, heeft met een aantal aspecten te maken. De uitvoerder zelf interesseert zich in het streven naar duurzaamheid door innovatie, waarvan het onderzoek van Sybren Jansma een goed voorbeeld is. Ook is het aspect van technische oriëntatie van belang voor het maken van keuzes voor de invulling van de hieropvolgende Masteropleiding IDE. Daarnaast kunnen de resultaten uit dit Bachelor-onderzoek interessante gevolgen hebben en geeft dit het bedrijf Tauw de gelegenheid verder kennis te maken met de kwaliteiten van Industrieel Ontwerpers als het om aspecten als 'technisch georiënteerd problemen oplossen' en toegepast innoveren gaat.

A.1.1 - Eerste voorstel

Onderstaand voorstel is geïnitieerd door opdrachtgever Tauw

*"Ontwerp een tegel die de **loopbeweging** van mensen omzet in **elektrische energie**. Hierbij is het belangrijk dat de tegel **uitnodigt tot gebruik** en bewustwording creëert bij de gebruiker. **Bewustwording** moet worden geschept op het vlak van het **winnen van duurzame energie** uit trillingen."*

Belangrijkste elementen zijn hierin vetgedrukt. Aspecten die in de opdracht moeten worden meegenomen zijn dus:

- het omzetten van loopbeweging van mensen in elektrische energie;
- het product nodigt uit tot gebruik;
- het een bewustwording creëert op gebied van het winnen van duurzame energie

A.2.0 - UITWERKING

Omdat voorgesteld is dat het om een tegel gaat, wordt hiermee een object verstaan dat zich in de openbare ruimte bevindt en waar mensen (onbewust) gebruik van maken.

Het product zal dus een variatie op een object zijn waar mensen in het dagelijks leven gebruik van maken, waarbij ze geen hinder ondervinden wanneer het object de toegevoegde functionaliteit van het opwekken van elektrische energie bevat.

Bij voorkeur nodigt het product zelfs uit om gebruikt te worden en draagt het daarbij een boodschap uit over het opwekken van energie op alternatieve en duurzame wijze.

A.2.1 - Fasen

Het ontwikkelen van een dergelijk product bestaat uit meerdere fasen:

Fase	Beschrijving
1.	Onderzoek **principes** om een loopbeweging om te zetten in **elektrische energie**, onder voorwaarde dat de gebruikers dit onbewust kunnen doen en er geen hinder van ondervinden
	a. *Hieruit volgt een selectie van de/het meest geschikte principe(s)*
2.	Onderzoek hoe een dergelijk principe om energie op te wekken kan worden **geïntegreerd in een object**
	a. *Hieruit volgt een methodiek van algemene toepassing van het principe*
	b. *Hieruit volgt een selectie van eigenschappen van geschikte objecten*
3.	Onderzoek welke **objecten in de openbare ruimte** voldoen aan de voorwaarden dat deze regelmatig gebruikt worden en mensen geen hinder ondervinden van het gebruik
	a. *Hieruit volgt een selectie van geschikte objecten in de openbare ruimte*
4.	Onderzoek hoe het gevonden energie opwekkende **principe** kan worden **geïntegreerd** in het gevonden **object uit de openbare ruimte**
	a. *Hieruit volgt een methodiek van toepassing van het principe in geschikte objecten*
	b. *Dit vormt een systeem*
5.	Onderzoek hoe opgewekte **energie** kan worden getransporteerd en **opgeslagen**
	a. *Hieruit volgt een methodiek om energie opgewekt door het systeem, op te slaan*
6.	Onderzoek mogelijke **doelen** voor de **opgeslagen energie**, onder voorwaarde dat het een **bewustwording** creëert over het winnen van duurzame energie
	a. *Hieruit volgen suggesties voor geschikte toepassingen van de opgeslagen energie*
7.	Onderzoek hoe dit systeem kan **uitnodigen tot gebruik**
	a. *Hieruit volgen suggesties voor het toevoegen van deze eigenschap aan het systeem*
8.	Onderzoek in **welke situaties** dit systeem kan worden **toegepast**
	a. *Hieruit volgen suggesties voor geschikte situaties van toepassing van het systeem*

Dit komt vrij goed overeen met het uitvoeren van een project zoals geleerd in de Bacheloropleiding Industrieel Ontwerpen.

- Fasen 1, 2 en 3 representeren hierbij een vooronderzoek;
- Fasen 4 en 5 beslaan het ontwerpen van een systeem;
- Fasen 6, 7 en 8 beslaan het uitwerken/ontwerpen van toepassingen van het systeem;

Naar persoonlijke schatting zijn fasen 1, 2 en 3 (vooronderzoek) vrij snel te doorlopen en leveren deze relatief snel resultaat op. Fasen 4 en 5 (systeemontwerp) kunnen vrij diep uitgewerkt worden en kunnen daarom een variabel tijdsbestek beslaan. Fasen 6, 7 en 8 (uitgewerkt ontwerp) kunnen ook vrij diep uitgewerkt worden en derhalve een variabel tijdsbestek beslaan.

A.3.0 - OPDRACHTVOORSTELLEN

Naar aanleiding van bovenstaande gegevens zijn er enkele voorstellen voor een Bachelor-opdracht opgesteld. Deze zijn als volgt:

- *Optie 1: Ontwerp een energieopwekkend systeem in 'publieke' objecten*
  Fasen 1 t/m 5 worden hierbij doorlopen, waarbij verschillende principes voor het opwekken van elektrische energie worden bekeken en hierin keuzes worden gemaakt die leiden tot een technisch systeem, bestaande uit de integratie van het principe in een object uit de openbare ruimte. Hierbij kan een algemene integratiemethode worden gevonden, zodat het niet is toegespitst op een specifiek object, maar het als ontwerpmodel kan worden gebruikt om het principe in meerdere soorten objecten te integreren.

- *Optie 2: Ontwerp een piëzo-geïntegreerd object dat energie opwekt*
  Fasen 2 t/m 5 en fase 8 worden hierbij doorlopen, waarbij de keuze voor het elektrisch opwekkend principe is vastgesteld als piëzo. Met de aanwezige expertise van Tauw kunnen hiermee de fasen 4 en 5 vermoedelijk sneller worden doorlopen dan bij optie 1. Het eindresultaat is een ontwerpvoorstel voor een object in de publieke ruimte dat met piëzo-elementen energie opwekt, opslaat en nuttig gebruikt. Fasen 6 en 7 zijn hierbij optioneel.

- *Optie 3: Ontwerp een tegel of gelijksoortig object dat middels piëzo-technologie energie opwekt en een bewustwording voor duurzame opwekking van energie creëert.*
  Fasen 4 t/m 8 worden hierbij doorlopen, waarbij het object uit de publieke ruimte is vastgesteld als een tegel of gelijksoortig object in de publieke ruimte waar mensen overheen lopen. Hierin worden piëzo-elementen geïntegreerd om energie op te vangen. De focus ligt in deze optie op het ontwerpen van de toepassing van de opgewekte energie, waarbij 'gebruikers' bewust worden gemaakt van deze duurzame manier om energie op te wekken en de gebruikers worden uitgenodigd om gebruik te maken van de energieopwekkende tegels.

A.3.1 - Reactie opdrachtgever

De opdrachtgever heeft op deze voorstellen gereageerd. Daaruit bleek dat optie 3 de voorkeur heeft, met een aantal kanttekeningen:

- Fase 5 hoeft hierin niet uitgebreid doorlopen te worden. De kennis over het opslaan en transporteren van de opgewekte energie is bij de opdrachtgever aanwezig en zal dan ook door haar verschaft worden
- Er is een wisselwerking tussen het *opwekken* en zinvol *toepassen* van de energie. Daarom is het gewenst om te kijken naar verschillende objecten of locaties waar energie kan worden opgewekt en toegepast, overeenkomstig met fase 3.
- De opdrachtgever biedt hulp met de integratie van de techniek in het ontwerp, overeenkomstig met fase 4.
- De gecreëerde 'bewustwording' zoals omschreven bij fase 6 is niet per definitie gevolg van de opgewekte energie. Hier kunnen meerdere aspecten van het ontwerp aan bijdragen.

Uit deze bevindingen volgt het definitieve opdrachtvoorstel, waarna het plan van aanpak opgesteld wordt.

A.4.0 - OPDRACHTOMSCHRIJVING

Op basis van opdrachtvoorstel 3 en de reacties van de opdrachtgever is de volgende opdrachtomschrijving tot stand gekomen.

> *Ontwerp een object in de publieke ruimte dat middels piëzo-technologie energie opwekt en een bewustwording voor duurzame opwekking van energie creëert.*

In een drukke publieke ruimte worden veel trillingen opgewekt door de lopende mensen. Een object of systeem van objecten kan in een dergelijke ruimte deze trillingen omzetten in elektrische energie d.m.v. piëzo-elementen.

Hiervoor wordt eerst onderzocht welke objecten en ruimten geschikt zijn om in potentie veel energie op te vangen door integratie van piëzo-elementen. Met hulp en kennis van de opdrachtgever zal worden onderzocht hoe piëzo-elementen in het gevonden object of systeem kunnen worden geïntegreerd en hoe de opgewekte elektrische energie kan worden getransporteerd, opgeslagen en nuttig worden gebruikt. Vervolgens moet worden onderzocht welke aspecten van het verdere ontwerp van het object kunnen bijdragen aan de stimulans voor gebruikers om er gebruik van te maken en ze bewust te maken van de mogelijkheden om op duurzame wijze energie op te wekken en hoe deze aspecten kunnen worden toegepast in het ontwerp. Met de gevonden aspecten kunnen ontwerpsuggesties voor het object in diens omgeving worden gedaan. Van de onderzoeksresultaten zal een rapport worden opgesteld, waarbij de ontwerpsuggesties en toepassingsmogelijkheden visueel weergegeven en tekstueel onderbouwd worden.

Met deze opdrachtomschrijving kon het plan van aanpak worden opgesteld. Dit is terug te vinden als de opdrachtomschrijving (hoofdstuk 2). De strategie om de opdracht uit te voeren is hieronder weergegeven, evenals de bijbehorende planning zoals deze initieel is opgezet.

A.5.0 - STRATEGIE & MATERIAAL

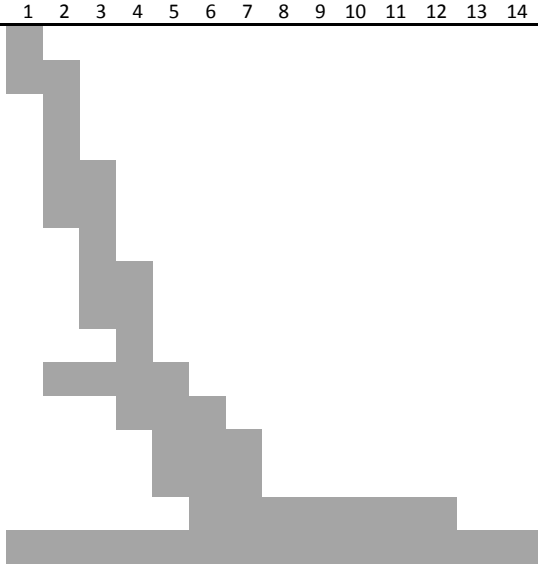
De onderstaande tabel geeft weer welke strategieën gevolgd dienen te worden om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden en de doelstelling te behalen.

Vraag	Strategie	Materiaal	Bron	Ontsluiting
1a	Bureauonderzoek	Documenten	Onderzoeken Tauw, internet	Afstudeerverslag Sybren Jansma
1b	Bureauonderzoek	Documenten	Onderzoeken Tauw, internet	Afstudeerverslag Sybren Jansma
1c	Bureauonderzoek	Documenten	Onderzoeken Tauw, internet	Afstudeerverslag Sybren Jansma
2a	Bureauonderzoek	Documenten	Onderzoeken Tauw	
	Observatie	Observatiefoto's	Stad of afbeeldingen (internet)	Stad bezoeken, fototoestel
2b	Case study	Overleg		
2c	Case study	Berekeningen	Gegevens Tauw	Overleg met calculator
2d	Case study	Overleg		
2e	Case study	Overleg		
3a	Bureauonderzoek	Documenten	Internet	
	Case study	Overleg		
3b	Case study	Overleg		
3c	PvE opstellen	Overleg, analyse		
4a	Observatie	Observatiefoto's	Stad of afbeeldingen (internet)	Stad bezoeken, fototoestel
4b	Case study	Overleg		
4c	PvE aanpassen	Onderzoeksresultaten		
4d	PvE aanpassen	Onderzoeksresultaten		
4e	Ontwerpen	Eerdere resultaten		

A.6.0 - PLANNING

Hieronder staat de planning zoals deze is opgesteld (lichtgrijs). Wijzigingen in de planning die gedurende het onderzoek plaatsvonden zijn donkergrijs aangegeven. Hieruit blijkt het verschil tussen de verwachte planning en daadwerkelijke uitvoering in de gestelde tijd.

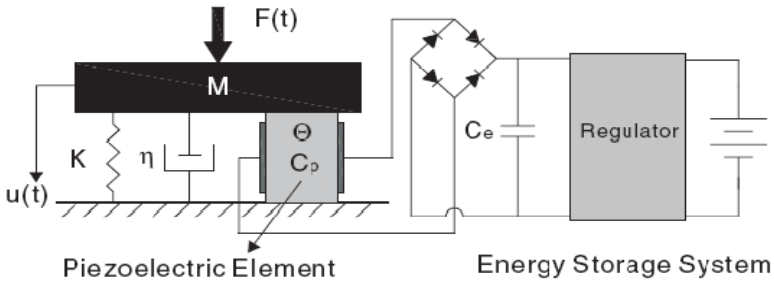
Vraag	Actie	Bron:
-	Plan van Aanpak schrijven	Oefeningen ITO
1 a -c	Onderzoek piëzotechniek	Onderzoek Sybren, Tauw
2a	Mech. Belaste objecten	Observatie, internet
2b	Geschikte piëzo-objecten	Overleg, onderzoek
2c	Calculatie potentiële energie	Overleg, onderzoek
2d	Keuze 2c maken	Overleg, onderzoek
2e	Integreren in object	Overleg, onderzoek
3a	Mogelijke elektr. toepassingen	Overleg, onderzoek
3b	Keuze 3a maken	Resultaten 3a
3c	PvE elektr. toepassing opstellen	Overleg, onderzoek
4a	Geschikte omgeving toepassing	Overleg, onderzoek
4b	Integratie toepassing in omgev.	Overleg, onderzoek
4c	PvE aanvullen/aanpassen	Overleg, onderzoek
4d	PvE aanvullen/aanpassen	Overleg, onderzoek
4e	Elektr. toepassing ontwerpen	Opgesteld PvE
-	Verslaglegging	



BIJLAGE B - TECHNISCHE BESCHRIJVING PIËZO

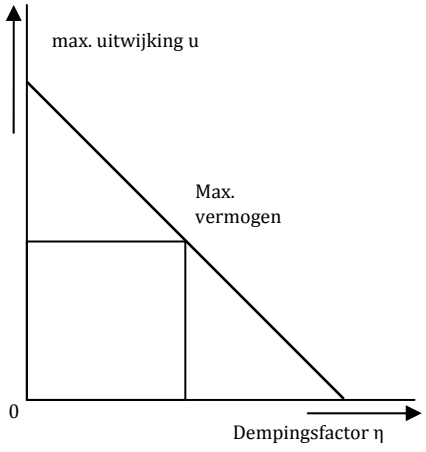
Een piëzo-elektrische energie-oogster wordt gemodelleerd als een massa-demper-veersysteem waaraan het piëzo-elektrisch element gekoppeld is. Dit element wekt een voltage op en dit wordt als elektrische energie opgeslagen in een energie-opslag systeem dat gekoppeld is aan het element[20].

B.1.0 - FYSISCH MODEL



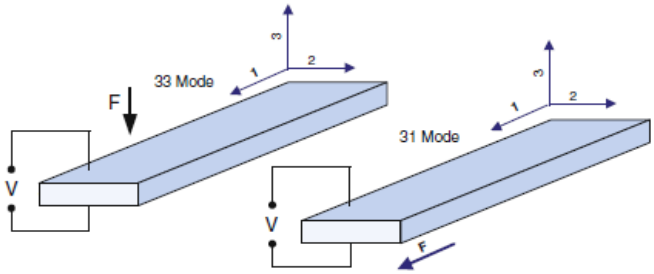
Hier wordt een massa *M* belast met een tijdsafhankelijke kracht-functie *F(t)*. Het piëzo-elektrisch element heeft een bepaalde veerconstante *K* en dempingsconstante η en daarnaast de effectieve piëzo-elektrische coëfficiënt Θ (gebruikelijker is *d*) en piëzo-elektrische capaciteit C_p.

De kracht *F(t)* is in dit geval de voetstap die ervoor zorgt dat de massa *M*, ofwel het object zoals een tegel, een uitwijking *u(t)* vanaf diens standaardpositie maakt. Massa *M* wordt ondersteund door het piëzo-elektrisch element dat functioneert als een demper-veersysteem en in contact is met de vaste wereld. Doordat het element wordt ingedrukt (vervormd), ontstaat een elektrische spanning en wordt er dus energie uit het systeem gedempt. Daarbij geldt dat het piëzo-element een optimale stijfheid moet hebben om zoveel mogelijk energie af te vangen zonder dat de hele kracht *F(t)* wordt gedempt en de trilling *u(t)* verdwijnt. Optimaal is de dempingsfactor van het element op 0.5 te krijgen, om zo de meest gunstige verhouding van input/output te krijgen, waarbij de input de uitwijking *u(t)* is en de output de hoeveelheid opgewekte elektrische energie, ofwel het vermogen *P*, door het piëzo-element. Dit kan worden gevisualiseerd door de volgende grafiek, waarbij de dempingsfactor η wordt uitgezet tegen de maximale uitwijking *u*. Het maximale vermogen zal op de helft van de maximale dempingsfactor-waarde liggen.



De factoren van het piëzo-elektrisch element worden samengevat als *d* en C_p, welke beide zijn opgebouwd uit andere variabelen. Variabele *d* is de piëzo-vervormingsconstante, een materiaalfactor die in product met piëzo-voltageconsante *g* weergeeft hoe energetisch het piëzo-elektrisch materiaal is en hoe hoog dus de potentie is om elektriciteit op te wekken. Beide variabelen worden uitgedrukt in de mode waarin zij worden gebruikt. Hiermee wordt de richting van belasting bedoeld; veelal directe compressie/extensie parallel aan de polarisatie binnen het piëzo-elektrisch materiaal of transversaal aan de stroomrichting. In

de onderstaande afbeelding worden deze dimensies schematisch weergegeven. De afbeelding komt uit het boek 'Energy Harvesting Technologies' van Priya en Inman[21].

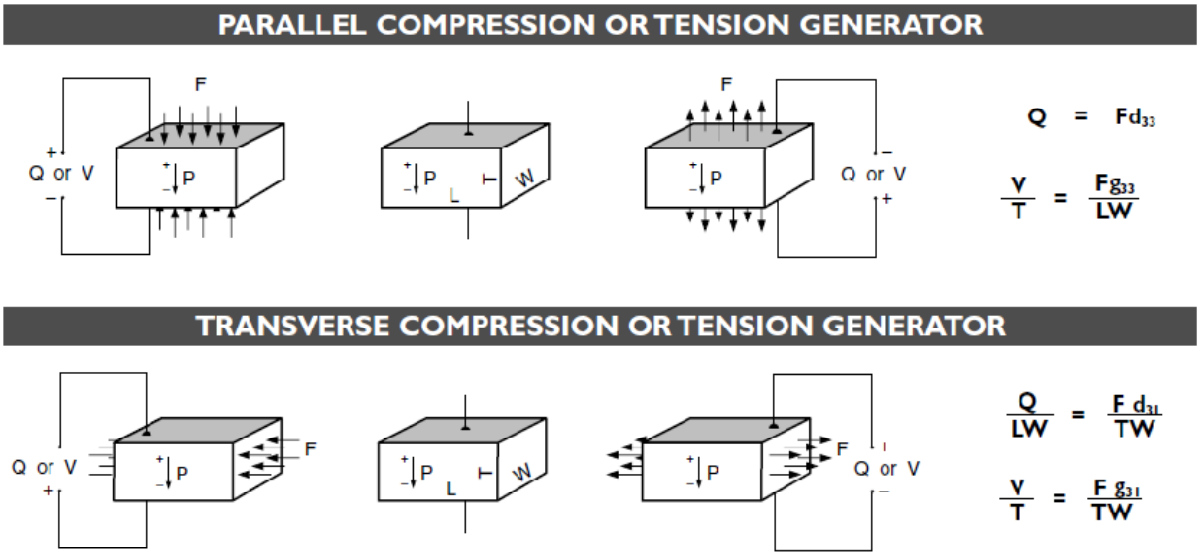


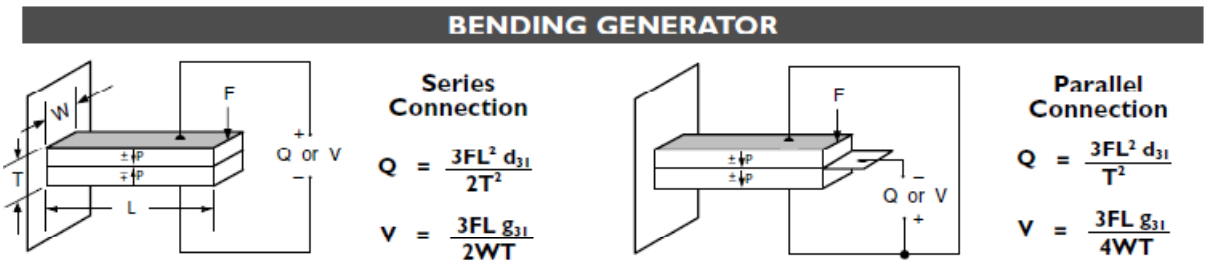
B.2.0 - PIËZO-ELEKTRISCHE STROOMOPWEKKING

De modes van gebruik van piëzo-elektrische elementen zijn van invloed op de hoeveelheid opgewekte stroom. Zoals in onderstaande afbeelding is te zien is de elektrische potentiaal uit te drukken in lading Q (Coulomb) of in voltage V. Afhankelijk van de mode 33 of 31, uitgedrukt als bijvoorbeeld d_{31} en g_{33} zijn de potentialen van verschillende variabelen afhankelijk. De getallen van de mode geven respectievelijk de polarisatierichting en mechanische belastingsrichting aan. Naast de gebruikelijke parallelle en transversale belastingen (gebruikt voor oogstmethode A) zijn er ook nog afschuifkrachten en buiging (gebruikt voor oogstmethoden B en C) mogelijk om het piëzo-elektrisch effect op te wekken. Deze methoden van belasting zijn afhankelijk van verschillende variabelen waarmee lading Q en/of voltage V kunnen worden bepaald. De variabelen L, T en W staan voor resp. de lengte, hoogte en breedte (t.o.v. de polarisatierichting P) van het blokje piëzo-elektrisch materiaal.

In onderstaande afbeelding zijn drie typen van piëzo-energieopwekking te zien. De eerste optie, parallelle compressie, is geschikt voor opwekkingsmethode A (par. 3.2.6); de tweede optie, transverse extensie, is geschikt voor opwekkingsmethode B; voor methoden B en voornamelijk C is de derde optie, de zgn. buigingsgenerator het meest geschikt. Methoden B en in met name C zijn sterk afhankelijk van langdurige trilling, waarbij de gebruikte piëzo-elementen op bepaalde resonante frequenties het best functioneren. Voor methode A is het niet nodig een speciale constructie met cruciale eigenfrequenties te ontwerpen, omdat deze niet afhankelijk is van resonantie, maar juist sterk van de hoeveelheid mechanische belasting.

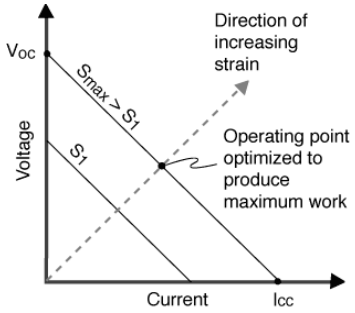
Onderstaande afbeeldingen zijn afkomstig uit een catalogus van het bedrijf Piezo Systems[22].





Om de efficiëntie van omzetting van elektrische naar mechanische energie of vice versa uit te drukken, bestaat de 'elektromechanische koppel coëfficiënt' *k* die het (conversie)rendement van een piëzo-element eenvoudig samenvat. De ratio van omzetting is het kwadraat van deze coëfficiënt *k*.

Piëzo-elektrische generators worden gekarakteriseerd d.m.v. hun gesloten circuit stroomsterkte (lading), I_{CC} en hun open circuit voltage, V_{OC} waarbij de waarden vergroten naargelang de vervorming groter wordt. De waarde van I_{CC} wordt bepaald bij maximale (optimale) waarden van vervorming en resonantie-frequentie (indien van toepassing), wanneer het voltage bij benadering 0 is. Gelijksoortig wordt de waarde van V_{OC} bepaald wanneer de stroomsterkte in het open circuit bij benadering 0 is. De optimale waarden van I_{CC} en V_{OC} zijn afhankelijk van de spanning die de toepassing nodig heeft, waarbij geldt dat het gevraagde voltage moet worden bereikt bij de helft van de maximale I_{CC} waarde[22]. In onderstaande afbeelding afkomstig van de website piezo.com[22] is dit weergegeven. Hier staat *S* voor 'strain' ofwel de mate van vervorming van het piëzo-elektrisch materiaal.



BIJLAGE C - MARKTANALYSE

Om tot een gegronde schatting van de energieopbrengst van een energie-oogster met piëzo-technologie te komen, zijn eenvoudige berekeningen uitgevoerd aan de hand van gegevens over bedrijven die reeds in de markt zijn met energie-oogstende piëzo-tegels.

C.1.0 - PIËZO-TEGELS

Het bedrijf Pavegen[23] is gevestigd in het Verenigd Koninkrijk en biedt rubberen tegels met piëzo-technologie aan die 5 mm indrukken wanneer iemand erop stapt. 5% van de opgewekte energie wordt gebruikt om een lamp in de tegel te verlichten, om zo de gebruikers ervan bewust te maken dat ze energie opwekken. De overige 95% kan worden gebruikt in de directe omgeving voor bijvoorbeeld verlichting en elektronica. Volgens de een artikel op de website go-green.ae[24] over het product, levert iedere tegel *per uur 2.1 W* aan energie wanneer deze iedere *4-10 seconden* wordt betreden. Deze informatie wordt door de producent zelf niet vrijgegeven, maar ervan uitgaande dat deze getallen kloppen, betekent het dat er bij een stap per 4 seconden een vermogen van *2.1 / 900 = 2.3 mW* per stap wordt opgewekt. Bij een stap per 10 seconden is dat *2.1 / 360 = 5.8 mW* per stap.

Een vergelijkbare producent van piëzo-technologische energie-oogsters is het Amerikaanse bedrijf POWERleap[25]. De website van de Buckminster Fuller Challenge laat informatie van POWERleap zien in de inschrijvingsdatabase[26]. Hier wordt door de eigenaars van het bedrijf geclaimd dat een gebied van *50 m²* waarover *5000* voetgangers per uur lopen, in staat is om *1 kWh* aan energie op te leveren. Dat staat gelijk aan *1000 / 5000 = 0.2 W* per persoon. Omdat dit over een gebied van *50 m²* gaat, is een schatting nodig om tot de energiewinst per tegel te komen. Aangenomen is dat de tegels per stuk ongeveer *0.5 * 0.5 m* zijn, wat betekent dat er ongeveer 50 tegels in het gebied liggen. Per tegel zal in een uur dus *1000 / 50 = 20 Wh* aan energie worden opgewekt. Dat is gelijk aan *20 / 3600 = 5.5 mW/s.* Per voetstap zal een tegel gemiddeld *20 / 5000 = 4 mW* aan energie opleveren.

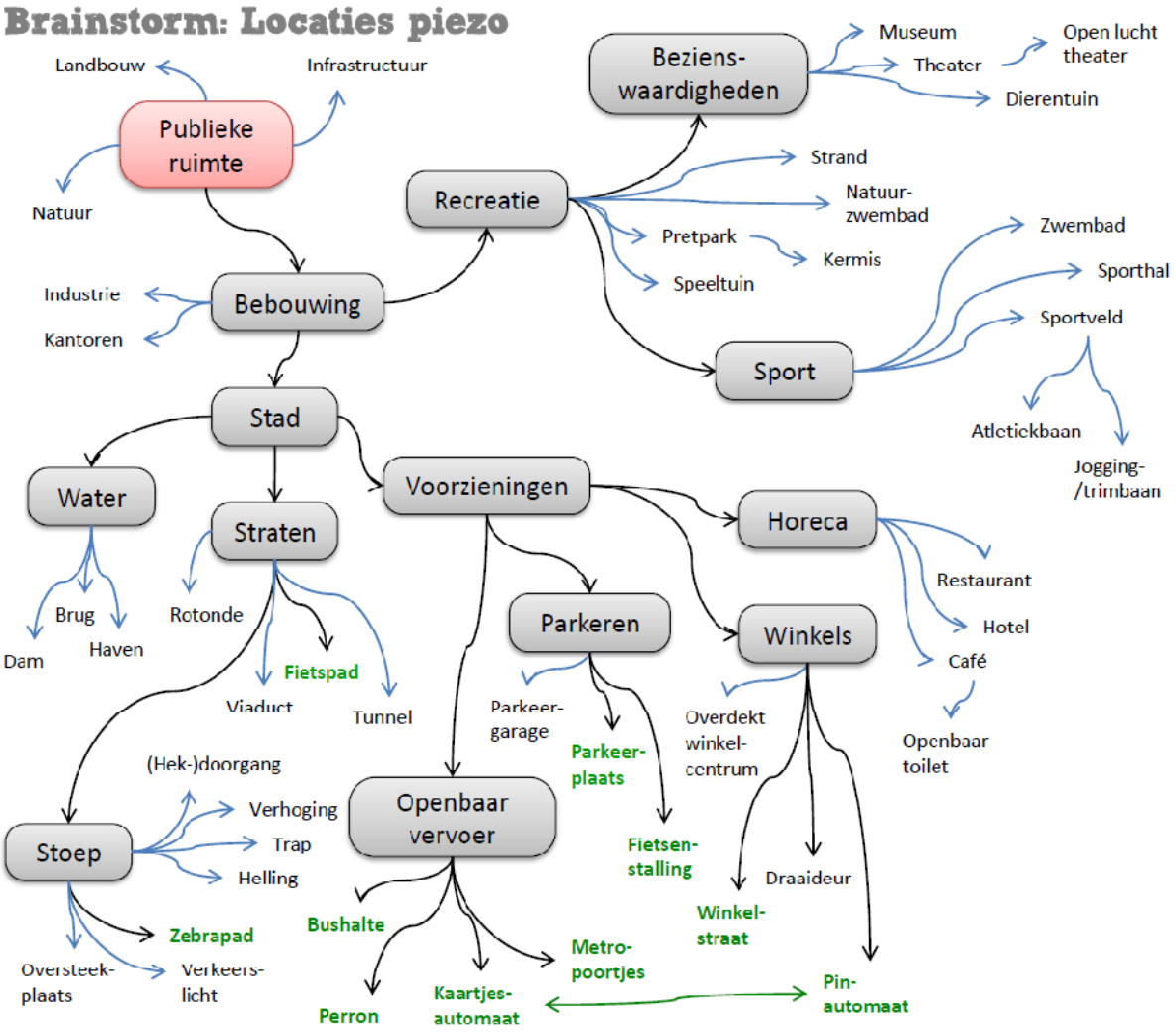
Een toepassingsonderzoek uitgevoerd door studenten Mechanical Engineering en Electrical Engineering aan de Stevens Institute of Technology, laat zien dat een tegel die voorzien is van piëzo-technologie voldoende energie kan opwekken om elektrische signalen te versturen[27]. Hiervoor is een tegel voorzien van 4 strips van het piëzo-elektrische materiaal PZT welke door een impuls tegen een statisch balkje worden opgespannen en weer ontspannen, waardoor een korte trilling ontstaat wanneer de tegel inzakt en wanneer deze weer opveert. De piëzo-strips wijken maximaal 38.1 mm (1.5 inch) uit en zijn voorzien van magneten op de uiteindes om de uitwijking iets te vergroten. Het opgewekte voltage wordt in een condensator opgeslagen, welke na *20* voetstappen ontlaadt met *8.3 mJ* aan bruikbare energie. Dit staat gelijk aan *0.42 mJ* per stap.

C.2.0 - ALTERNATIEVE ENERGIE-OOGSTENDE TEGELS

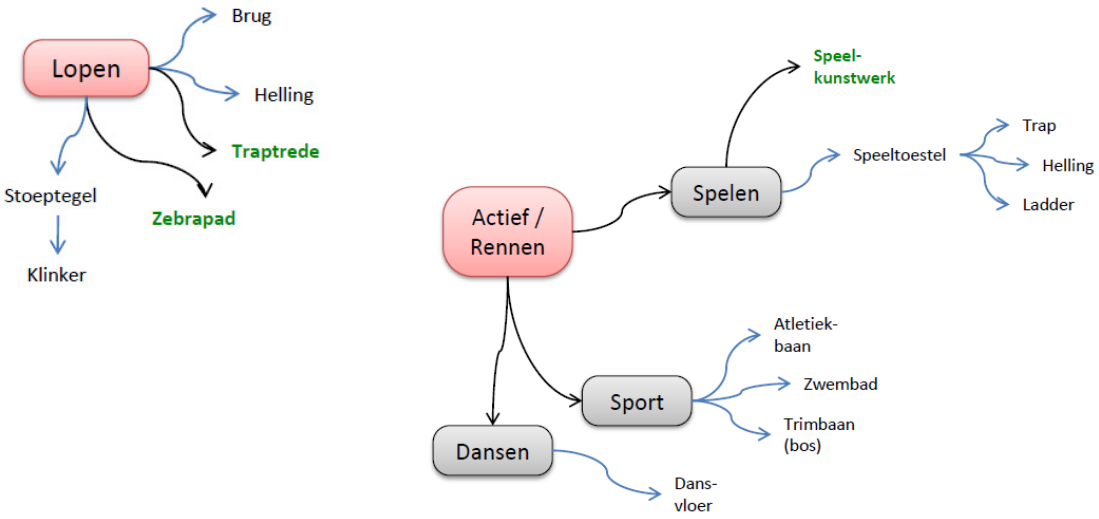
In Nederland is een initiatief uitgewerkt waarbij tegels van een dansvloer in een club energie opwekken uit de dansende mensen[28]. Dit is gerealiseerd en ontstaan vanuit een onderzoek aan de TU Eindhoven naar mogelijkheden voor energie-oogstende systemen. In het verslag van Paulides, Jansen e.a. komen voor dit onderzoek interessante punten naar voren[29]. Hierin wordt gesteld dat maarliefst *67 W* aan energie verloren gaat tijdens het lopen en dat een piëzo-element met een efficiëntie van 12.5% geïntegreerd in een schoenzool hiervan in potentie zo'n *8.4 W* kan afvangen[30]. Uit een paper uit 2004 blijkt echter dat dergelijke waarden nog niet bereikt zijn en piëzo-energie-oogsters in de praktijk slechts enkele mW tot maximaal enkele Watts aan energie afvangen[31], hetgeen Paulides en Jansen motiveerde alternatieven te zoeken voor piëzo-elektrische energiewinning. Daarvoor is uiteindelijk een veersysteem ontwikkeld dat zo'n *10 mm* uitwijkt en met een vrij hoge efficiëntie gemiddeld *2-8 W* per persoon kan opwekken voor langere periodes (>10 s) en in kortere periodes (10 s) zelfs rond de *20 W* van intensief dansende mensen kan afvangen.

BIJLAGE D - BRAINSTORM

Hier staan de brainstormresultaten in vier categorieën: locaties voor de energie-oogster, objecten geschikt voor energie-oogsters, output van de gekoppelde toepassing en tenslotte de doeleinden voor de gekoppelde toepassing.

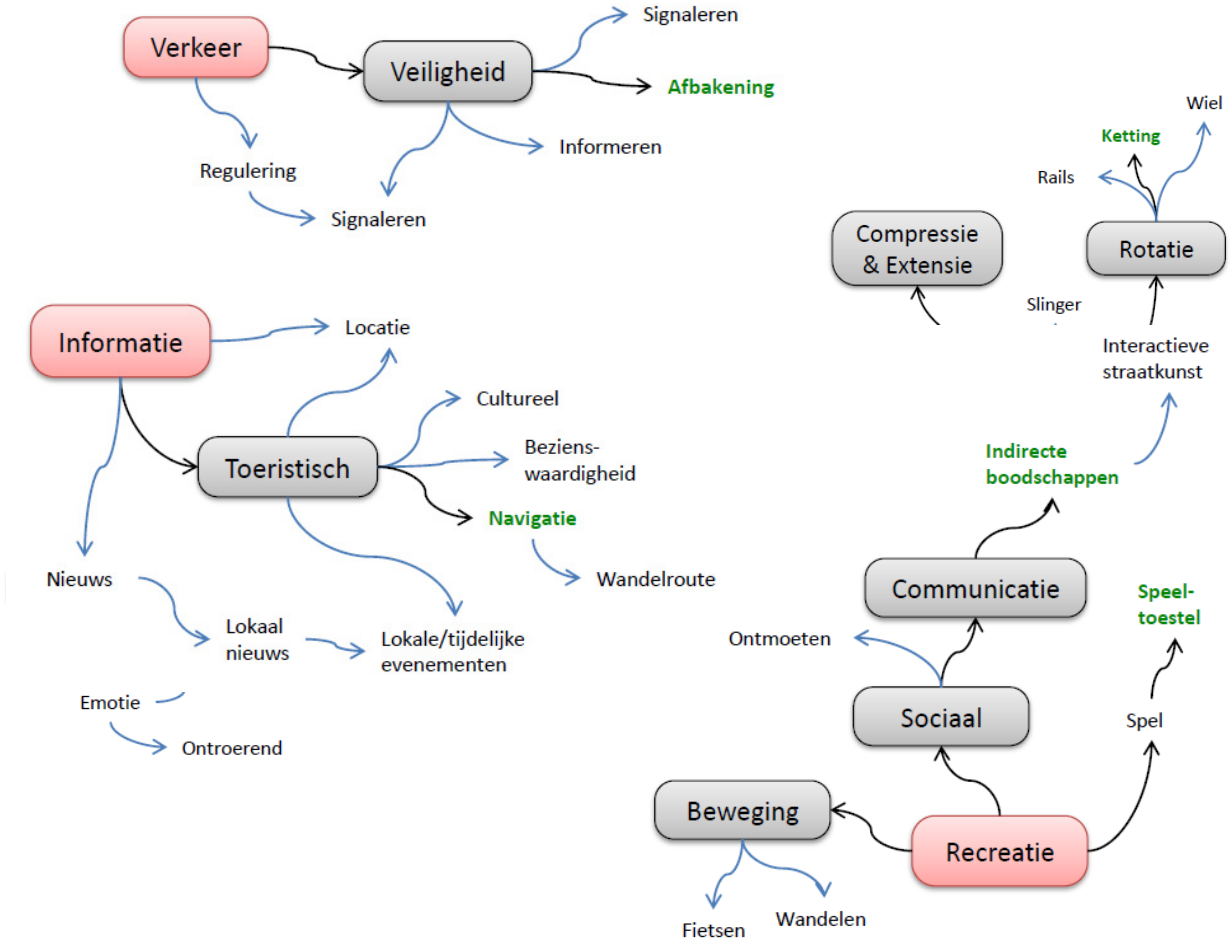


Brainstorm Objecten/Toepassingen piezo



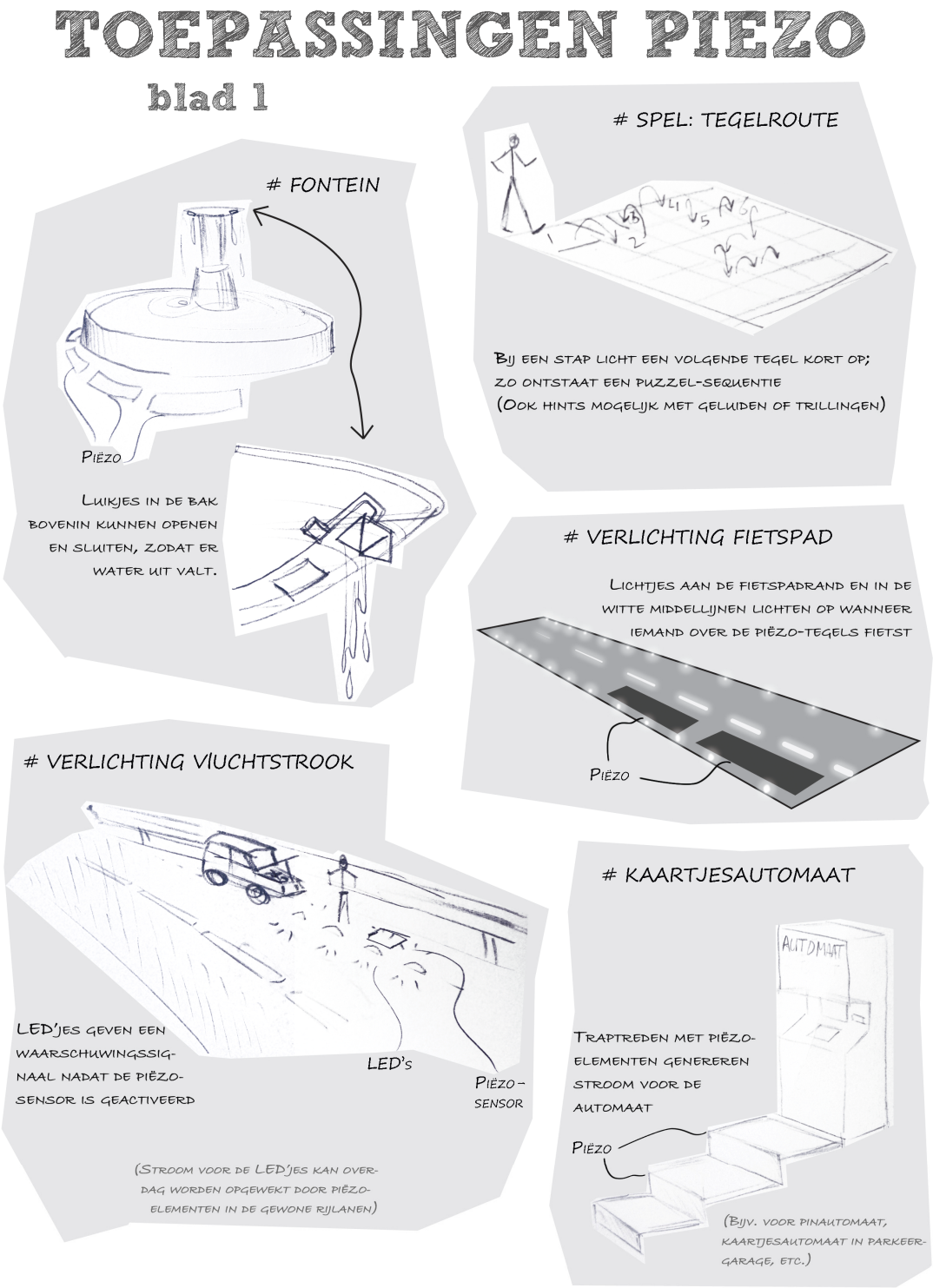
Brainstorm: Output van toepassingen

Brainstorm: Doeleinden toepassingen



BIJLAGE E - IDEEGENERATIE

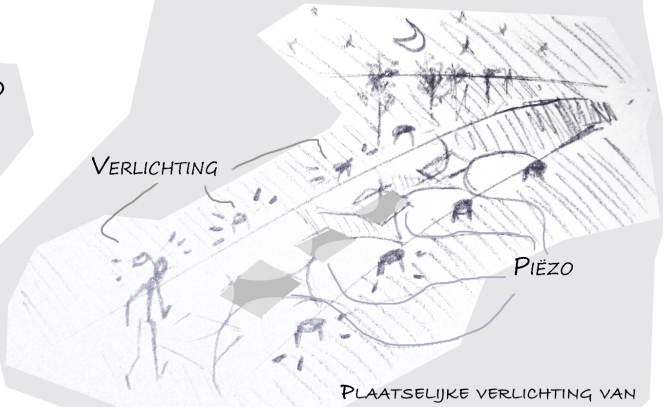
Hier worden de gegenereerde ideeën voor toepassingen gekoppeld aan de energie-oogster weergegeven. De categorisatie van deze ideeën is te vinden in hoofdstuk 4.2.3.



TOEPASSINGEN PIEZO

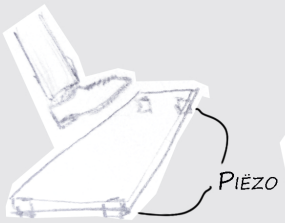
blad 2

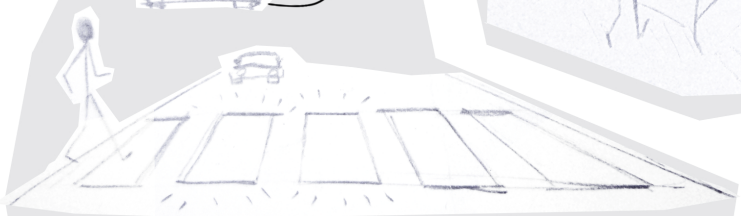
LOKALE VERLICHTING (HARD)LOOPROUTE



Plaatselijke verlichting van het pad nabij de loper

OPLICHTEND ZEBRAPAD

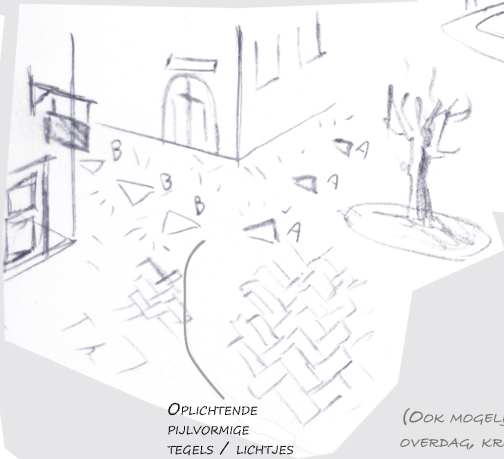




Piëzo-elementen onder zebrapad-tegels wekken energie op om het zebrapad te verlichten

BEWEGWIJZERING LOOPROUTE

Route-informatie of hints over richting verschijnen alleen wanneer wandelaars in de buurt zijn



Oplichtende pijlvormige tegels / lichtjes

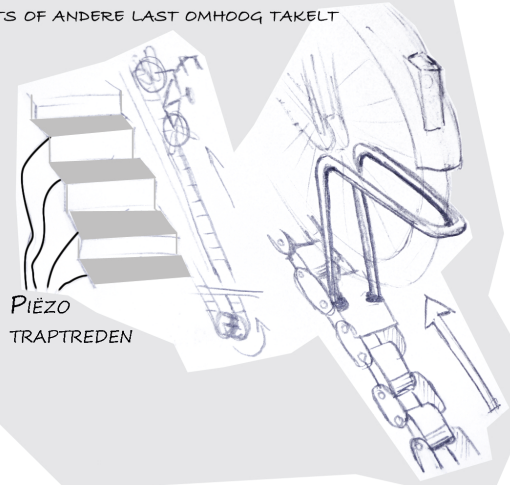
(Ook mogelijk tijdsafhankelijk: musea overdag, kroegen 's avonds; in noodgevallen route naar ziekenhuis)

TOEPASSINGEN PIEZO

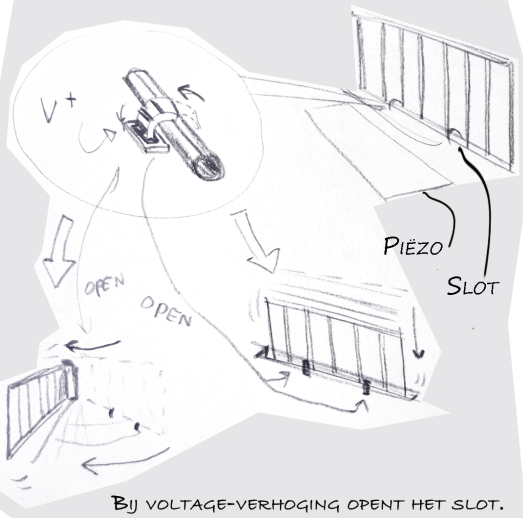
blad 3

FIETS TAKELLIFT

Door energie opgewekt met de traptreden wordt een ketting aangedreven die een fiets of andere last omhoog takelt



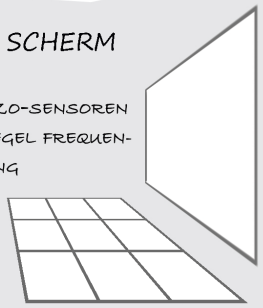
SLOTEN OPENEN



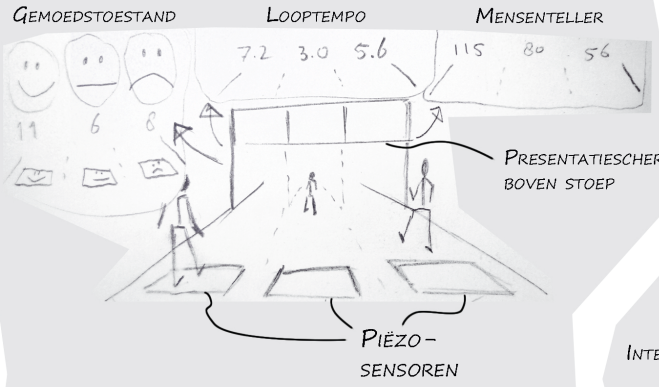
Bij voltage-verhoging opent het slot. Het hek opent op veerkracht of zwaartekracht

INTERACTIEF SCHERM

Tegels zijn piëzo-sensoren en meten per tegel frequentie van belasting



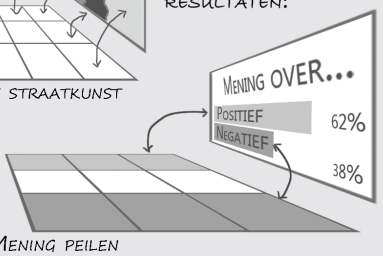
STOEP LANEN



Op een brede stoep kunnen voetgangers in verschillende 'lanen' naast elkaar lopen. Piëzo-sensoren in tegels meten o.a. aantal mensen en hun snelheden

Interactieve straatkunst

Gekoppelde projectie geeft dynamische resultaten:



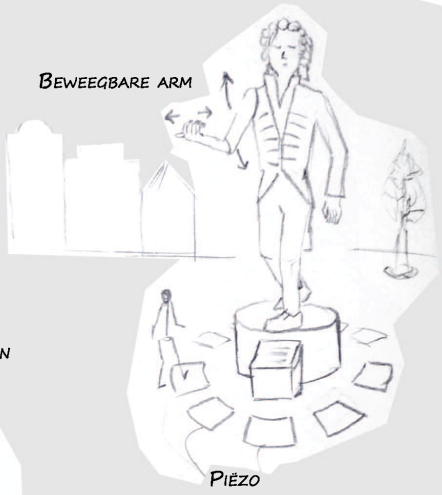
Mening peilen

TOEPASSINGEN PIEZO

blad 4

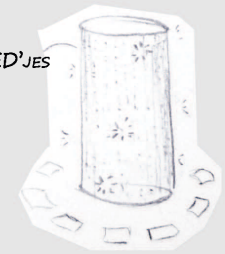
DYNAMISCHE KUNST

Piëzo-tegels genereren energie voor mechanische bewegingen en/of verlichting in dynamische kunstwerken



Lichtpilaar

LED'jes

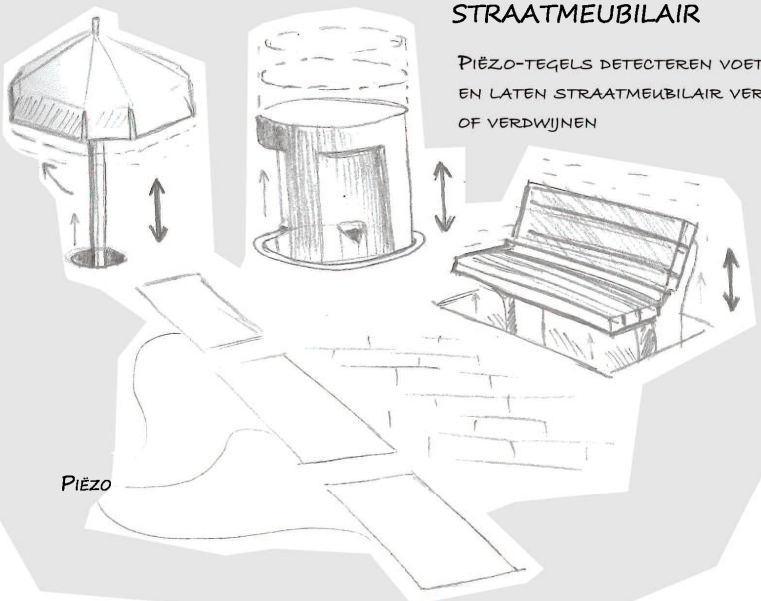


Draaiende ringen

Lage energie-opbrengst per belasting zorgt voor kleine, subtiele bewegingen en veranderingen in het uiterlijk van het kunstwerk.
Het kunstwerk kan er iedere dagdeel anders uitzien

OPENSTELLEN/OPBERGEN STRAATMEUBILAIR

Piëzo-tegels detecteren voetgangers en laten straatmeubilair verschijnen of verdwijnen

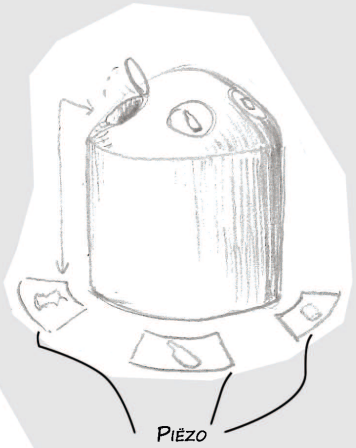


TOEPASSINGEN PIEZO

blad 5

AFVALSCHEIDING

Het goede luikje voor gescheiden afval opent wanneer de gebruiker op de overeenkomende tegel gaat staan

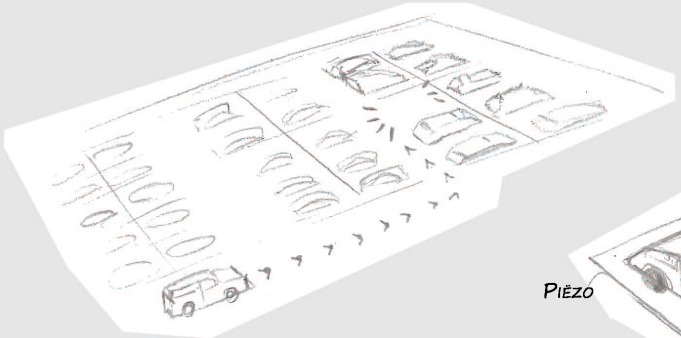


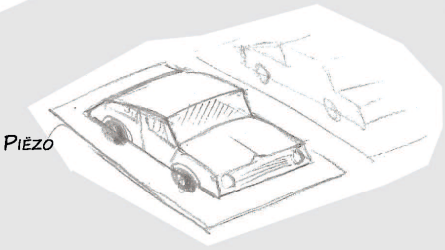
WAARSCHUWING GEVAARLIJKE BOCHT

Bocht-bordjes knipperen opvallend wanneer een auto en gevaarlijke bocht nadert

NAVIGATIE PARKEERPLEKKEN

Piëzo-parkeerplekken detecteren aanwezigheid auto's.
Lampjes navigeren bezoekers naar lege plekken

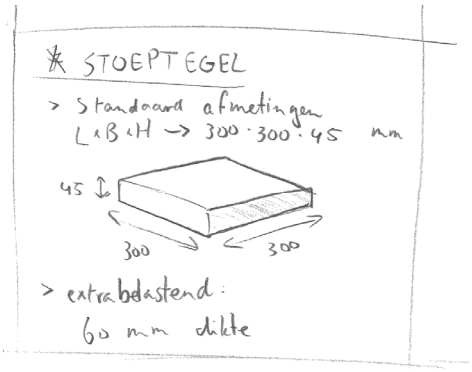




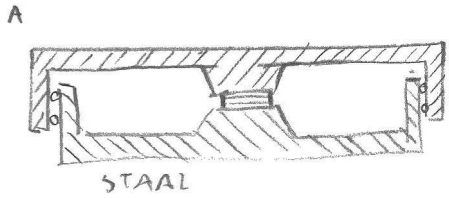
BIJLAGE F - TEGEL CONSTRUCTIESCHETSEN

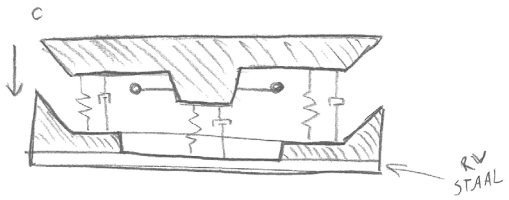
Hieronder staan schetsen die leidden tot de resultaten gepresenteerd in hoofdstukken 5.1 en 5.2 over de constructie van de tegel en het systeem om elektriciteit te verplaatsen naar de toepassing of buffer.

Allereerst is opgezocht wat de standaard afmetingen van een stoeptegel zijn. Die blijken 30 bij 30 cm te meten en zijn 45 mm dik. Extra belastbare tegels zijn daarentegen 60 mm dik. Deze afmetingen vormen een goede basis voor de verhoudingen die de piëzo-tegel optimaal ook zou moeten hebben. De dikte (hoogte) mag eventueel groter zijn dan 60 mm, maar de lengte/breedte moet 300 * 300 mm zijn.

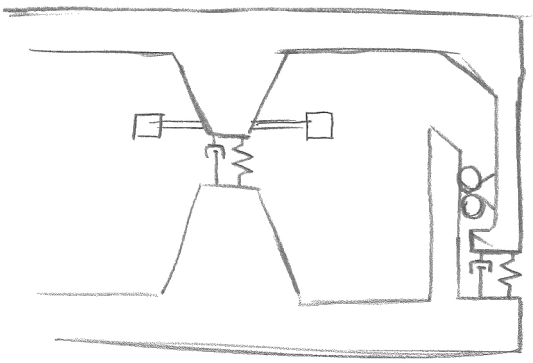


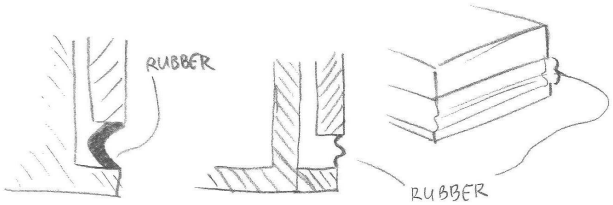
Allereerst is een schets opgezet voor concept A, met directe compressie (hieronder links). Het middelste deel representeert een piëzo-stack. Het bovendeel glijdt hier aan weerszijden (in 3D dus aan vier zijden) over het onderste deel (weergegeven door wieltjes). De gehele tegel zou van staal kunnen zijn. Dit geldt ook voor concept C, met cantilever gemonteerde piëzostrips met puntmassa's op de uiteinden. Deze zijn weergegeven als de horizontale lijnen met cirkels op de uiteinden. Ook zijn drie paar veer-dempers weergegeven, die de verbinding tussen boven- en onderkant uitdrukken.





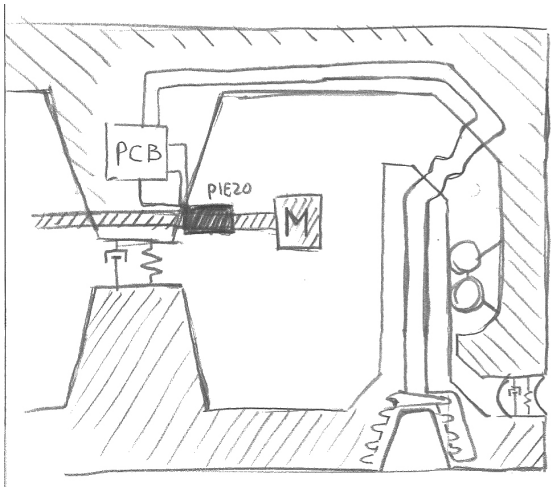
Concept C werd verder uitgewerkt en hier rechts is een snelle schets te zien waarin meer details (met name de verbinding tussen boven- en onderkant) zijn weergegeven. De puntmassa's op de uiteinden van de piëzo-strips zijn hier als vierkantjes weergegeven. Ook in deze opzet glijdt/rolt de bovenkant over de onderkant van de tegel. De gesloten constructie zou waterdicht worden met toevoeging van rubber bij de opening (rechts onderin weergegeven in de afbeelding rechts). Dit rubber zou een verend/dempend effect kunnen hebben, zoals is geschetst in de linker situatie hieronder. Het middelste plaatje geeft een rubberen laagje weer dat enkel waterdicht moet zijn, maar geen verend/ dempend effect moet hebben. Op het rechterplaatje is te zien hoe dit rubber de gehele tegel omringt.

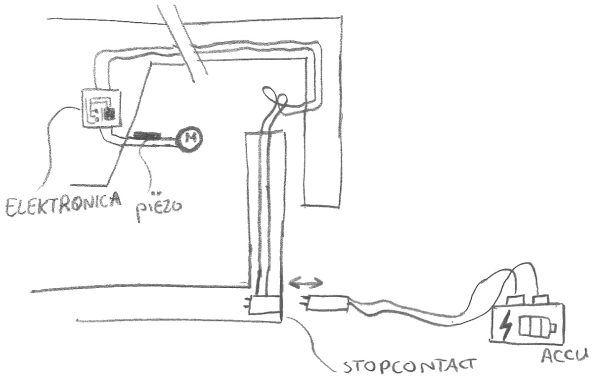




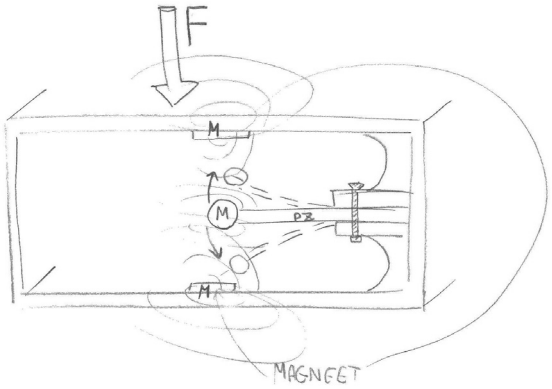
Wordt het element van elektriciteitskoppeling met een onderliggend netwerk in de doorsnede-schets gevoegd en een mogelijke interne elektrische verbinding, dan volgt onderstaande schets. 'PCB' staat hier

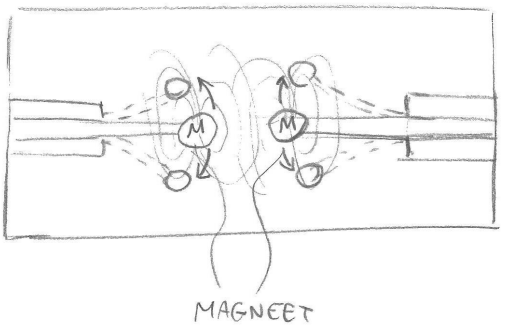
voor de Engelse afkorting voor een printplaat die bij het piëzo-systeem hoort. In deze schets werd ervan uitgegaan dat er een inductieve verbinding (doorsnee van een spoel) zou zijn.



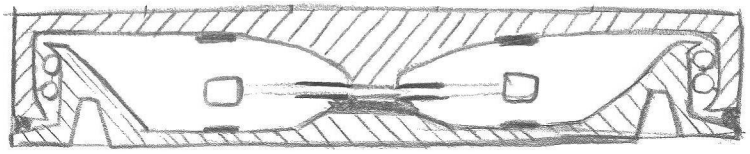


Ook is er nagedacht over het gebruik van magneten in boven- en onderzijde, hiernaast in een verder incorrecte behuizing geschetst. Hierdoor zou de uitwijking mogelijk vergroten (er vanuit gaande dat de puntmassa van metaal is). Hieronder een afbeelding waarin wordt gesuggereerd dat twee magnetische puntmassa's tegenover elkaar enig afstotend effect kunnen vertonen, waardoor de uitwijking zou kunnen vergroten. Dit is niet waarschijnlijk, aangezien de wrijving ook weer toeneemt wanneer de magneten naar elkaar bewegen.





Hieronder tenslotte een constructieschets van een tegel gebruik makend van 'concept C', in de verhouding 300:60 breedte:hoogte. Dit idee werd uiteindelijk afgeschoten omdat blijkt dat de demping tussen boven- en onderkant te groot zou zijn om de piëzo-strips in beweging te krijgen.



Concept B, met een verende bovenkant die stevig verankerde piëzo-strips in de onderkant tot trilling brengt, evenals de elektrische verbinding, zijn toegelicht (met schetsen) in hoofdstuk 5.1.

BIJLAGE Z - REFERENTIES

Z.1.0 - AFBEELDINGEN

Naast de afbeeldingen gebruikt in het verslag, die in de bijbehorende tekst zijn voorzien van referenties, zijn er voor de visuele collages van de toepassingen (hoofdstuk 5.4 en Bijlage G) afbeeldingen en elementen uit afbeeldingen van andere auteurs gebruikt. De bronnen (URL) worden hieronder weergegeven. Deze zijn opgevraagd op 20 en 21 juni 2011.

- Afbeelding 'Stadsnavigatie'
  - Plein Krakau (achtergrond): http://images2.fanpop.com/images/photos/6600000/Main-Market-Square-krakow-6662394-2043-1362.jpg
  - Plein Praag (kleine foto voorgrond): http://mirror-uk-rb1.gallery.hd.org/_exhibits/places-and-sights/_more1999/_more06/Czech-Republic-Prague-Old-Town-Square-tweaked-1-CL.jpg
  - Wijnglas clipart (op tegel): http://thesnackhound.com/wp-content/uploads/2011/05/wineglass.png
  - Bierpul clipart (op tegel): http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/1f/Frosty_beer_mug.svg/394px-Frosty_beer_mug.svg.png
  - Tempel clipart (op tegel): http://www.freefever.com/freeclipart/clipart/temple.gif
- Afbeelding 'Parkeernavigatie'
  - Parkeergarage achtergrond: http://www.powersines.com/var/56/340689-las%20olas%20001.jpg
  - Bovenaanzicht volle parkeerplaats: http://www.slcgov.com/psb/TourPhotos/ParkingLotFull.jpg
  - Geparkeerde Jaguar (kleine foto voorgrond): http://www.seriouswheels.com/pics-jkl/Jaguar-RD-6-Concept-PG-1600x1200.jpg
- Afbeelding 'Fietslift'
  - Stationsperron (achtergrond): http://farm6.static.flickr.com/5053/5585502388_c39f6a8520_o.jpg
  - Trap met geulen (kleine foto voorgrond): http://2.bp.blogspot.com/_J9doq6QD0cI/TCPC7t-2I9I/AAAAAAAAARU/iBakmwJhBuY/s1600/IMG_0389.jpg
  - Schets takelsysteem: eigen werk
- Afbeelding 'Voetgangerstunnel'
  - Cilindrische metrotunnel (achtergrond): http://carebearincrazyland.files.wordpress.com/2008/12/p1020423.jpg
  - Zwart-wit voetgangerstunnel (kleine foto voorgrond): http://2.bp.blogspot.com/_EHbf-gkQ3Hc/TNk1-3uLHGI/AAAAAAAAGDI/iW6E9lm8CPw/s1600/gray-tunnel.jpg
- Afbeelding 'Dynamisch kunstwerk'
  - Park (achtergrond): http://vleuterweide.nl/files/2010/05/park.jpg
  - Park (kleine foto voorgrond): http://www.gameparcks.com/wp-content/uploads/20_6_orig.jpg
  - Schetsen: eigen werk
- Afbeelding 'Vluchtstrooksignalering'
  - Donkere snelweg (achtergrond): http://v13.lscache7.c.bigcache.googleapis.com/static.panoramio.com/photos/original/1219286.jpg
  - Landrover op vluchtstrook (achtergrond): http://www.landrovergeeks.com/userfiles/Land-Rover-car-rear.jpg
  - Snelweg (kleine foto in voorgrond): http://fs.ikinks.nl/images/DSC04798.JPG
  - Ambulance (kleine foto in voorgrond): http://paramedic.web-log.nl/photos/uncategorized/2008/09/19/ambulanceblauw.gif

Z.2.0 - LITERATUURVERWIJZINGEN

Hieronder de lijst met referenties naar literatuur en andere bronnen.

[1] https://kennispleinmooinederland.vrom.nl/projecten/mooi_nederland_prijs_2010 opgevraagd op 4-4-2011
[2] http://www.tauw.nl/over-tauw/tauw-in-cijfers/ opgevraagd op 4-4-2011
[3] http://www.tauw.nl/over-tauw/de-organisatie/ opgevraagd op 4-4-2011
[4] http://www.tauw.nl/over-tauw/ opgevraagd op 4-4-2011
[5] http://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity opgevraagd op 8-4-2011
[6] http://en.wikipedia.org/wiki/Crystal opgevraagd op 14-4-2011
[7] http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_dipole_moment opgevraagd op 14-4-2011
[8] http://www.physikinstrumente.com/tutorial/images/4_15_1b.gif opgevraagd op 14-4-2011
[9] **Moheimani, S. O. R., Fleming, A. J.** (2006). "Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping", Springer.

[10] http://www.tau.ac.il/~phchlab/experiments_new/QCM/pics/theory_fig1-converse_piezo.png opgevraagd op 14-4-2011
[11] http://en.wikipedia.org/wiki/Human_energy_harvesting opgevraagd op 14-4-2011
[12] **Jansma, Sybren** (2011). Graduation thesis: "The feasibility and design of a piezoelectric energy harvester for civil application", University of Twente & Tauw BV
[13] **Cross, R.** (1999). "Standing, walking, running, and jumping on a force plate." Am. J. Phys. 67(4): 304-309
[14] **Linthorne, N.P.** (2001). "Analysis of standing vertical jumps using a force platform." Am. J. Phys. 69(11): 1198-1204
[15] **Song, H.-C. et al.** (2008). " Multilayer piezoelectric scavenger for large current generation" , Springer.
[16] http://en.wikipedia.org/wiki/Inductance opgevraagd op 15-6-2011
[17] http://en.wikipedia.org/wiki/Inductive_coupling opgevraagd op 15-6-2011
[18] http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_induction opgevraagd op 15-6-2011
[19] http://en.wikipedia.org/wiki/Inductive_charging opgevraagd op 15-6-2011
[20] **Ottman G. K., Hofmann H. F., Bhatt A. C. and Lesieutre G. A.** (2002). "Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply." IEEE Trans. Power Electron. 17: 669–76
[21] **Priya, S., Inman, D.J.** (2009). "Energy Harvesting Technologies", Springer.
[22] **Piezo Systems** (2008). www.piezo.com. "Catalog #7C": 57-62
[23] http://www.pavegen.co.uk/ opgevraagd op 25-5-2011
[24] http://www.go-green.ae/greenstory_view.php?storyid=1024 opgevraagd op 25-5-2011
[25] http://powerleap.net/ opgevraagd op 25-5-2011
[26] http://challenge.bfi.org/node/2286 opgevraagd op 25-5-2011
[27] http://www.stevens.edu/ses/me/fileadmin/me/senior_design/2008/Group11/index.html opgevraagd op 25-5-2011
[28] http://www.sustainabledanceclub.nl/ opgevraagd op 25-5-2011
[29] **Paulides, J.J.H., Jansen, J.W. et al.** (2009). "Human-Powered Small-Scale Generation System for a Sustainable Dance Club", Eindhoven University of Technology.
[30] **Starner, T.** (1996) "Human-powered wearable computing", IBM Systems Journal 35 (3-4): 618–628
[31] **Sodano, H., Inman, D. and Park, G.** (2004) "A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials," The Shock and Vibration Digest 36 (3): 197–205