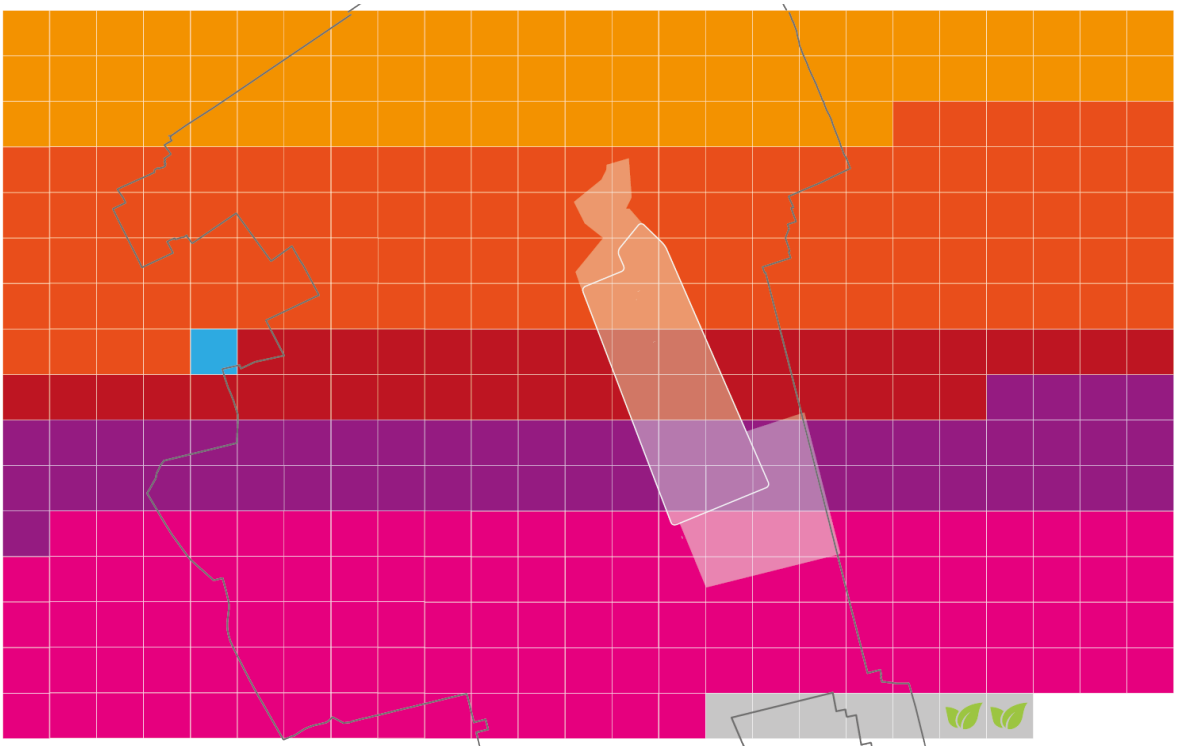
CO_2-roadmap TU Delft



CO_2-roadmap TU Delft

Finale versie 2.9_190725

Auteurs
Ir. Tess Blom
Prof.dr.ir. Andy van den Dobbelsteen

TU Delft, Faculteit Bouwkunde, Afdeling Architectural Engineering + Technology
Leerstoel Climate Design & Sustainability

Met speciale bijdragen van
Dr. Riccardo Pulselli – INDACO2 / Università di Siena
Prof. Greg Keeffe – Queens University Belfast

In opdracht van
Campus & Real Estate TU Delft
Ir. Maria Hänsch

Inhoudsopgave

DEEL A: ACHTERGROND 7

1 Introductie 8

1.1 Achtergrond 8

1.2 Ambities van de TU Delft 8

1.3 Methodiek 13

1.4 Leeswijzer 14

DEEL B: NULMETING 15

2 Analyse van het energiegebruik 16

2.1 Het huidige energiesysteem 16

2.2 Huidige energievraag 22

3 Analyse van het huidige gebouwenbestand 25

3.1 Energiegebruik 25

3.2 Technische staat van de gebouwen 32

4 Huidige CO_2-voetafdruk van TU Delft 35

4.1 Energie 35

4.2 Water 36

4.3 Vervoer: woon-werkverkeer 36

4.4 Vluchten (zakelijk) 38

4.5 Voedsel 38

4.6 Afval 39

4.7 CO_2-opname 40

4.8 CO_2-voetafdruk van de campus 41

5 Andere factoren die de klimaatneutraliteit beïnvloeden 45

DEEL C: OPLOSSINGEN 47

6 Een duurzaam toekomstbeeld van de TU-campus 48

6.1 Een sterkere verbinding met stad en regio 48

6.2 Afstoten en nieuwbouwen of renoveren 48

6.3 De Mekelweg als wetenschappelijke winkelstraat 48

6.4 Ecosysteem en living lab – City of the Future 49

6.5 Naar 100% duurzaam transport 49

6.6 De slimme, duurzame energiecampus 50

6.7 De duurzame campus, dat zijn wij zelf – onze *Terms of Engagement* 51

7 Energiepotenties 52

7.1 Potenties duurzame elektriciteit 52

7.2 Potenties thermische energie 55
8 Voorgestelde energiestrategieën 63
8.1 Energieaanpak algemeen 63
8.2 Generieke energiemaatregelen voor gebouwen 64
8.3 Specifieke maatregelen voor gebouwen 67
8.4 Energiesysteem campus 79
8.5 Water 87
8.6 Mobiliteit 87
8.7 Voedsel 91
8.8 Afval 92
8.9 Import windenergie 93
8.10 CO_2-compensatie / Bosaanplant 95
8.11 CO_2-neutraliteit 96
9 Conclusies en aanbevelingen 99
9.1 Conclusies 99
9.2 Aanbevelingen aan CRE 101
9.3 Aanbevelingen aan het CvB 105
10 Referentielijst 110
BIJLAGEN 113
B1 Verklaring gebouwnummers 114
B2 Energiegebruik gebouwen 116
B3 Scopes 117
B4 CO_2-voetafdruk 2017 119
B5 Een andere kijk op de campus - analyse 120
B5.1 Verbindingen 120
10.1 Identiteit 120
B5.2 De centrale as 121
B5.3 Infrastructuur 122
B6 Een andere kijk op de campus – een toekomstbeeld 123
B6.1 Een sterkere verbinding met stad en regio 123
B6.2 De Mekelweg als wetenschappelijke winkelstraat 124
B6.3 Ecosysteem en living lab – City of the Future 125
B6.4 Naar 100% duurzaam transport 127
B6.5 De slimme, duurzame energiecampus 128
B6.6 De duurzame campus, dat zijn wij zelf – onze *Terms of Engagement* 129

DEEL A: ACHTERGROND

1 Introductie

1.1 Achtergrond

Met dit rapport en het onderliggende onderzoek in opdracht van de dienst Campus & Real Estate van (CRE) van de TU Delft willen wij bijdragen aan een duurzame ontwikkeling van de campus van de TU Delft. Als ambitieuze doelstelling is uitgesproken dat deze CO_2-neutraal moet zijn in 2030 (paragraaf 1.2.3). In ons onderzoek zijn wij uitgegaan van een integrale aanpak van de campus, het domein van CRE overschrijdende, omdat de CO_2-uitstoot[1] niet ophoudt met het beheer van de gebouwen. Wij beseffen dat wij daarmee deels ook buiten de invloedssfeer van CRE treden, maar zien dit rapport dan ook als advies aan zowel CRE als het College van Bestuur van de TU Delft.
Middels dit onderzoek willen wij inzicht verschaffen in het huidige energiegebruik en de CO_2-uitstoot op de TU-campus, evenals de mogelijkheden verkennen voor reductie van de emissies, teneinde focus in doelstellingen en acties te kunnen bewerkstelligen, impact te maken en te komen tot een basis voor een klimaatactieagenda voor de TU Delft, CRE in het bijzonder.

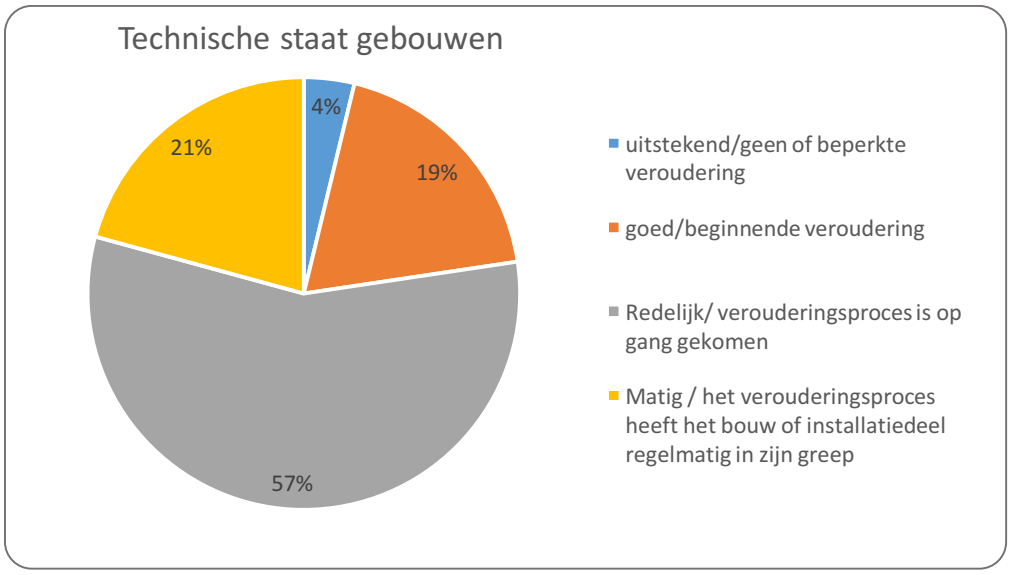
1.2 Ambities van de TU Delft

1.2.1 Visie TU Delft: campus- en vastgoedstrategie CRE

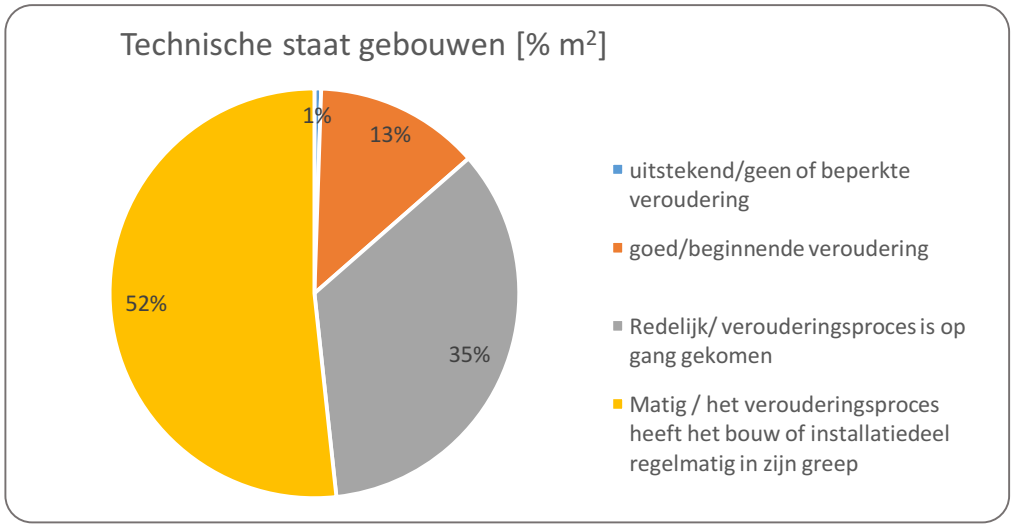
De TU Delft ziet de volgende problemen in het huidige gebruik van de campus [Campus and Real Estate 2018]:

- Inefficiënt gebruik van het oppervlak: de huidige gebouwvoorraad komt niet overeen met de gewenste voorraad. Momenteel is er een te groot aanbod van kantoren en daaraan gerelateerde ruimten, terwijl er een gebrek is aan grote collegezalen en laboratoria.
- De focus ligt op het Mekelpark, de gebouwen georiënteerd richting het park. De achterkant van de gebouwen is verwaarloosd, zoals in de Leeghwaterstraat en Schoemakerstraat.
- De technische staat van de huidige gebouwvoorraad is gemiddeld genomen redelijk tot matig (zie Figuur 1.1 en 1.2).

[1] Waar wij spreken over CO_2, bedoelen we CO_2-equivalenten, dus inclusief het klimaateffect van waterstof, methaan en lachgas.



Figuur 1.1 - Technische staat van de TU-gebouwvoorraad
[Excel TU Benchmark Campusgegevens 2019, via Kees Kerkhoven]. Zie tevens paragraaf 3.2.



Figuur 1.2 – Technische staat van de gebouwvoorraad op basis van het aantal m^2
[Excel TU Benchmark Campusgegevens 2019, via Kees Kerkhoven]. Zie tevens paragraaf 3.2.

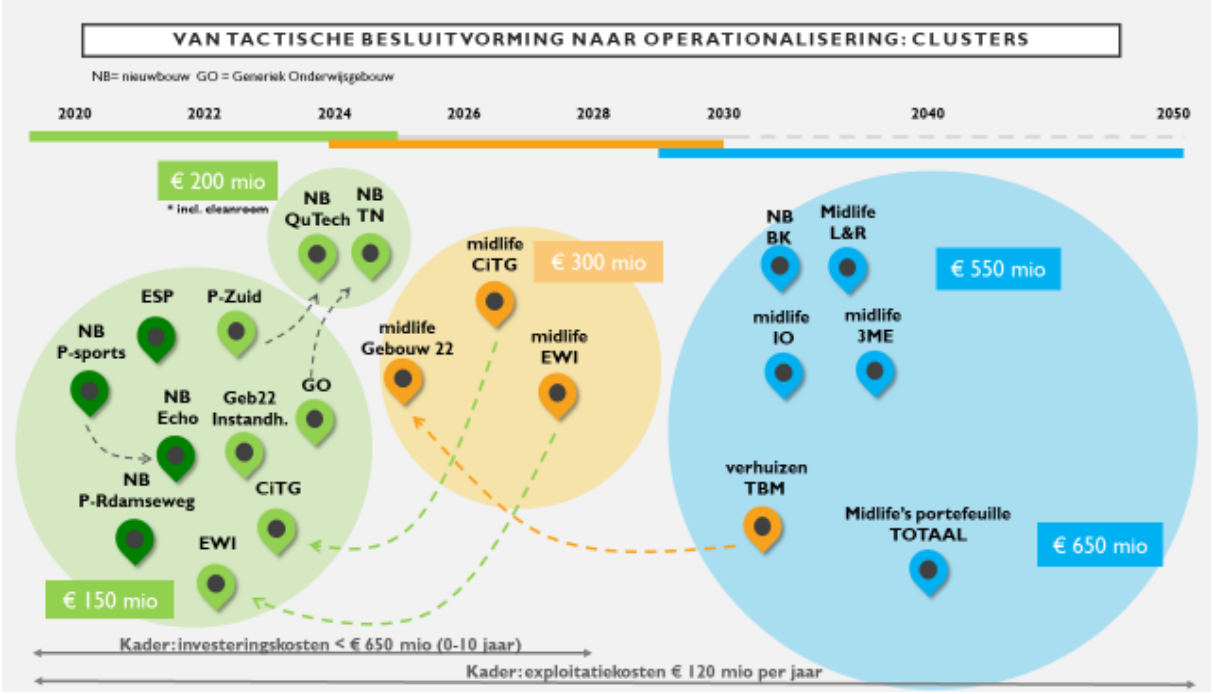
Campusstrategie
Voortkomend uit de gesignaleerde problemen heeft de TU Delft een campusvisie opgesteld, die focust op vier speerpunten: onderwijs, onderzoek, valorisatie en levendige campus. Valorisatie betreft hierbij het gebruiken en toepassen van kennis in de realiteit, met de campus als *living lab* of proeftuin [Campus and Real Estate 2018].

Vastgoedstrategie
Een ander onderdeel van de campusstrategie van de TU Delft is het verkleinen van de voetafdruk. Dit slaat op het verminderen van aantal vierkante meters (m^2) gebouwoppervlak dat in gebruik is door de TU Delft, door:

- slopen, verkopen (afstoot) en verhuren van gebouwen;
- vastgoed dat monofunctioneel wordt, één functie krijgt: onderwijs, laboratoria, etc.;

- generieke onderwijsgebouwen (GO): vervangende nieuwbouw van onderwijsgebouwen wordt niet meer faculteitsgebonden; voorbeelden zijn Pulse en het toekomstige Echogebouw.

Hiermee wil de TU Delft een hogere bezetting van de gebouwen creëren, wat resulteert in relatief lage onderhoudskosten. De vastgoedstrategie hiervoor is nog in ontwikkeling. Figuur 1.3 toont de meest recente vastgoedstrategie van CRE. In deze figuur is voor verschillende gebouwen op de campus aangegeven of zij dan wel behouden worden door middel van een renovatie of dat zij vervangen worden door nieuwbouw. Gebouwen met de aanduiding *'midlife'* krijgen een grondige renovatie naar lagetemperatuurverwarming, waarbij enkel de constructie houden blijft. Indeling, installaties en gevel zullen dan worden vernieuwd. Er zijn daarnaast verschillende nieuwbouw-projecten gepland, zowel voor specifieke functies zoals voor parkeergebouwen, Qutech en GO-gebouwen.
In de strategie zijn drie volgordelijke tracés aangegeven: waarbij tracé 1 (groen) geplande ingrepen voor de nabije toekomst bevatten; deze ingrepen zijn al in ontwikkeling en staan daarmee vast. De maatregelen in tracés 2 en 3 staan niet vast – hierop wordt nu gestuurd – maar dit zou in de toekomst nog bijgesteld kunnen worden wanneer dit beter overeenkomt met de toekomstige ontwikkelingen.
Keuzes in de huidige vastgoedstrategie zijn gebaseerd op gebruik per m^2 en de kwaliteit van het gebouw (uitgedrukt in euro's/m^2). Duurzaamheid(potenties) en energieprestatie van het gebouw worden op dit moment in de besluitvorming meegenomen in de vorm van kosten voor renovatie tot BENG+[2].



Figuur 1.3: Cluster volgordelijkheid [Vastgoedstrategie CRE, ontvangen via Maria Hänsch, 16-05-2019]

[2] BENG staat voor Bijna EnergieNeutraal Gebouw. Met BENG+ wordt (zo goed als) energieneutraal bedoeld.

1.2.2 Duurzaamheidsambities

Op het gebied van duurzaamheid heeft de TU Delft momenteel vier speerpunten opgesteld:

- CO_2-neutrale campus
- Circulaire campus
- Gezonde campus[3]
- Biodiversiteit en Ecologie

Met een CO_2-enutrale campus wordt hierbij als definitie aangehouden[4]: '*De CO_2-neutrale campus TU Delft interpreteren we als klimaatneutrale campus. Dat wil zeggen dat geen CO_2 of andere broeikasgassen meer worden uitgestoten als gevolg van de directe activiteiten en faciliteiten (scope 1 en 2). Uitbreiding van CO_2 naar alle broeikasgassen omdat CO_2 maar een klein deel van het totaal is. De energie voor elektriciteit en warmte is afkomstig uit duurzame hernieuwbare bronnen. Dat geldt ook voor de energie die benodigd is t.b.v. onderzoek (primaire proces)*' [Campus and Real Estate 2019].

Campus and Real Estate (CRE) definieert 'Circulaire campus' als volgt[5]:
'De circulaire campus betekent een campus die afgaat van de lineaire economie om materialenkringlopen te sluiten. Voor zover er nieuwe materialen of producten nodig zijn, worden alleen op duurzame wijze producten gecontracteerd. Hierna wordt de levensduur van de beschikbare grondstoffen maximaal benut zonder schadelijke emissies naar het milieu. Bij zowel bouwprojecten als bij inkopen is het een eis dat constructies aanpasbaar en demontabel zijn. Bovendien, biedt een circulaire campus een leefbare werk- en leeromgeving waarbij gezondheid en welzijn centraal staan en circulaire initiatieven worden gestimuleerd' [Campus and Real Estate 2019].
Daarmee ligt de nadruk op het materiaalgebruik, maar circulair heeft eigenlijk als begrip betrekking op alle stromen: energie, water, materialen, voedsel en hun afvalstromen. Wij zijn er in dit rapport van uitgegaan dat dit ook de intentie is van CRE, en dat circulariteit ook in dat opzicht betrekking heeft op het sluiten van alle kringlopen.
Een onderdeel van de circulaire campus is dat het grondstoffen gebruik en op de campus niet mag resulteren in schadelijke emissies naar het milieu, deze doelstelling heeft een directe link met de energietransitieroutekaart van de campus.

1.2.3 KPI's CO_2-neutrale campus

Er wordt gestreefd naar een CO_2-neutrale en circulaire campus in 2030. Daarmee moeten de totale broeikasgasemissies (BKG-emissies) naar 0. Deze KPI's zijn gericht op de campus en dienstverlening (faciliteiten, gebouwen, campusterrein en infrastructuur); het onderzoek en bedrijven vallen buiten de scope [Campus and Real Estate 2019].

Er wordt hierbij onderscheid gemaakt tussen de emissies vallend onder scope 1, 2 en 3. Scope 1 zijn de directe emissies vanuit de activiteiten en faciliteiten van de TU Delft; hier heeft het de TU directe controle over. Scope 2 zijn de (indirecte) emissies die vrijkomen bij de productie van door de TU Delft ingekochte en geconsumeerde energie. En tenslotte vallen onder scope 3 de emissies die ontstaan door bronnen die eigendom zijn van of worden aangestuurd door een ander bedrijf, maar die ten dienste zijn van de TU Delft [Bhatia et al. 2011]. Een nadere toelichting van de scopes is te vinden in Bijlage 3.

[3] Campus die bijdraagt aan gezondheid en welzijn.
[4] Letterlijk overgenomen met paar taalcorrecties van termen: 'CO_2-neutrale' en 'klimaatneutrale'.
[5] Ook weer met een paar taalkundige aanpassingen.

Tabel 1.1: Hoofdlijnen KPI's TU Delft [Campus and Real Estate 2019]

	KPI	Target
Scope 1 & 2	Totale BKG-emissies	0 in 2030, lineair dalend
Scope 3	Totale BKG-emissies	0 in 2030, lineair dalend vanaf 2020 (voorlopig)

Voor de TU Delft betreft dit de volgende emissies:
Scope 1:

- Emissies door productie van elektriciteit en warmte(net) met de *WKK-installaties*
- Emissies door de productie van warmte voor het netwerk met *gasketels*
- Emissies door de productie van warmte met *individuele gasketels* in de gebouwen

Scope 2:

- Emissies vrijkomend bij de productie van de door de TU ingekochte elektriciteit (*windenergie*)

Scope 3:

- Emissies door het zuiveringsproces van het op de TU gebruikte *drinkwater*
- Emissies van vervoersmiddelen voor het *woon-werkverkeer* van medewerkers en studenten
- Emissies door *zakenreizen* (vooral vluchten)
- Emissies van de productie van *voedsel* dat genuttigd wordt tijdens werktijd/studiedag
- Emissies vrijkomend bij het verwerken van het door de TU geproduceerd *afval*

De CO_2-voetafdruk is voor deze studie waar mogelijk bepaald voor het jaar 2018, en anders voor 2017. Hierin zijn geen emissies inbegrepen die afkomstig zijn van de *embodied energy* (energie-inhoud) van materialen voor onderhoud en nieuwbouw van de gebouwen op de campus.

Deeltargets
Om de hoofddoelen te behalen zijn door CRE deeltargets en KPI's opgesteld betreffende energiegebruik en productie (zie Tabel 1.2 en 1.3).

Tabel 1.2: Targets bestaande bouw [Campus and Real Estate 2019]

	KPI	Target	Referentie
Efficiënt gebruik van warmte	Finale warmtevraag per m^2	50 kWh/m^2 in 2030, lineair dalend vanaf 2018	100 kWh/m^2 in 2018, in 2030 halvering t.o.v. 2018
Efficiënt gebruik van elektriciteit	Finale elektriciteitsvraag per m^2	50 kWh/m^2 in 2030, lineair dalend vanaf 2018	100 kWh/m^2 in 2018
Productie van warmte	Deel van het finale warmtegebruik dat netto zelf duurzaam wordt opgewekt	In 2030 100%	0% in 2018
Productie van elektriciteit	Deel van het finale elektriciteitsgebruik dat netto zelf duurzaam wordt opgewekt	In 2030 50%, lineair toenemend vanaf 2018, de overige 50% moet duurzaam hernieuwbaar worden ingekocht	1-2% in 2018

* Al deze doelen enkel van toepassing op het energieverbruik van de TU-gebouwen (niet op de levering aan derden)

Tabel 1.3: Targets nieuwbouw [Campus and Real Estate 2019]

	KPI	Target
Efficiënt gebruik van warmte	Actuele finale warmte vraag per m^2	15 kWh/m^2
Efficiënt gebruik van elektriciteit (gebouwgebonden energieverbruik en gebruikersenergie)	Actuele finale elektriciteitsvraag per m^2	30 kWh/m^2
Productie van elektriciteit	Productie van duurzame elektriciteit op/aan of direct bij gebouw	50 kWh/m^2 tot 2020, lineair stijgend naar 70 kWh/m^2 in 2030
Indirecte CO_2-footprint	Totale CO_2-uitstoot in de bouwketen	0,3 ton CO_2/ m^2 tot 2020, lineair dalend tot 0 in 2030 (voorlopig)
Demontabel bouwen		100% vanaf 2020 (voorlopig)
Nieuwbouw/renovatie Midlife	BREEAM	Excellent of hoger

Toelichting:

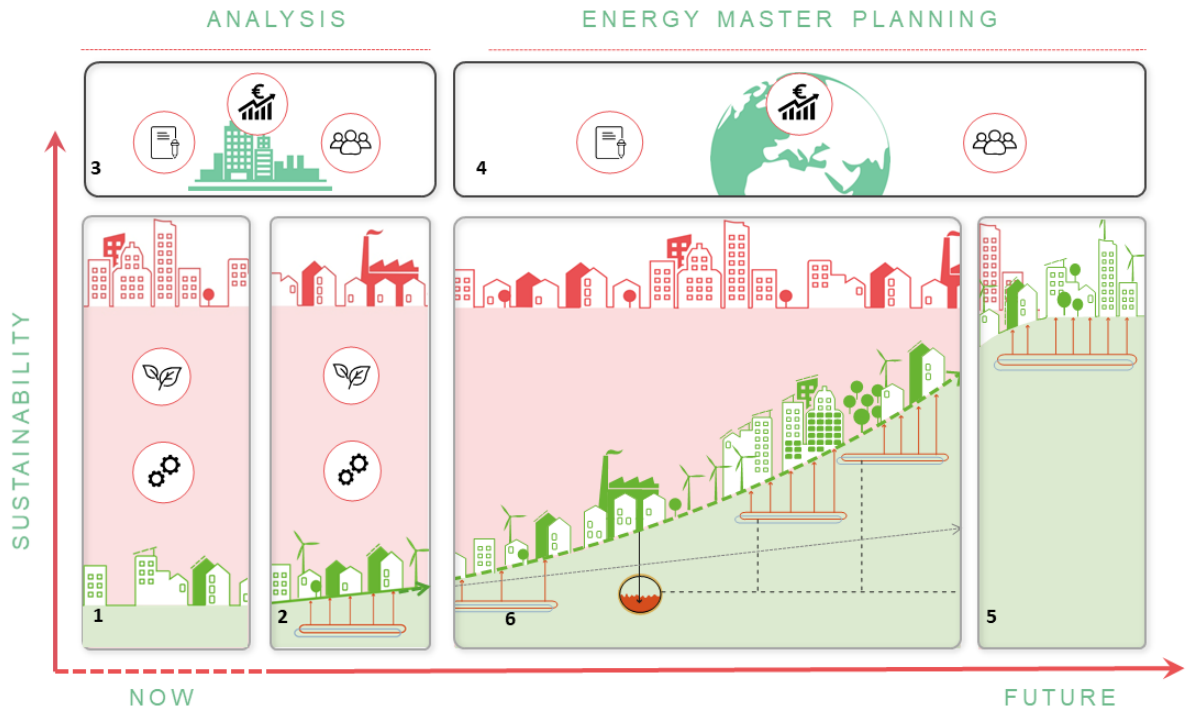
- De targets komen voor 2020 overeen met BENG maar zijn ambitieuzer voor 2030.
- Er zijn aparte targets voor nieuwbouw omdat hier grote stappen te maken zijn. De verbeterde nieuwbouw draagt ook bij aan het realiseren van de generieke deeltargets.
- Gebruik van elektriciteit is actueel verbruik en inclusief plugloads en speciale onderzoeksapparatuur. Hierin kan nog per gebouw een verschillende doelstelling gekozen worden.

1.3 Methodiek

In deze studie is voor een belangrijk deel gebruik gemaakt van de methodiek ontwikkeld in het EU-project City-zen [Dobbelsteen et al. 2018]. Deze methodiek geeft structuur aan het ontwikkelen van plannen richting een duurzame gebouwde omgeving en resulteert in een energieroutekaart voor een bepaald gebied. Deze routekaart is gebaseerd op een energieanalyse (vraag en potenties) en de vooraf opgestelde doelen.
Deze routekaart, ook wel *roadmap* genoemd, bestaat uit verschillende energie-interventies en maatregelen, op verschillende technische en strategische schaalniveaus en tijden.

In Figuur 1.4 worden de verschillende stappen van de City-zenmethodiek schematisch weergegeven [Broersma et al. 2018]:

1. Energieanalyse: de nulmeting (de huidige situatie, energievraag, energiesysteem etc.)
2. Huidige plannen en ontwikkelingen (geplande ontwikkelingen)
3. Maatschappelijke en stakeholderanalyse
4. Scenario's voor de nabije toekomst (externe variabelen die de toekomstige staat en ontwikkeling van steden beïnvloedt)
5. Duurzame visie
6. Routekaart met energiestrategieën en acties



Figuur 1.4: Grafische weergave van de City-zen methodologie: hoe komt een stad van de huidige, onduurzame situatie (1) en al geplande ontwikkelingen (2) via stakeholderanalyse (3) en scenariostudies (4) naar een gewenste duurzame toekomstige situatie (5). De routekaart daartussen (6) is het allesbepalende element. [Broersma et al. 2018]

1.4 Leeswijzer

In dit rapport komen achtereenvolgens de volgende delen en hoofdstukken aan bod:

Deel B: Nulmeting

2. Analyse van het energiegebruik
3. Analyse van het huidige gebouwenbestand
4. Huidige CO_2-voetafdruk van de TU Delft
5. Andere factoren die de klimaatneutraliteit beïnvloeden

Deel C: Oplossingen

6. Een duurzaam toekomstbeeld van de TU-campus
7. Energiepotenties
8. Voorgestelde energiestrategieën
9. Conclusies en aanbevelingen

DEEL B: NULMETING

2 Analyse van het energiegebruik

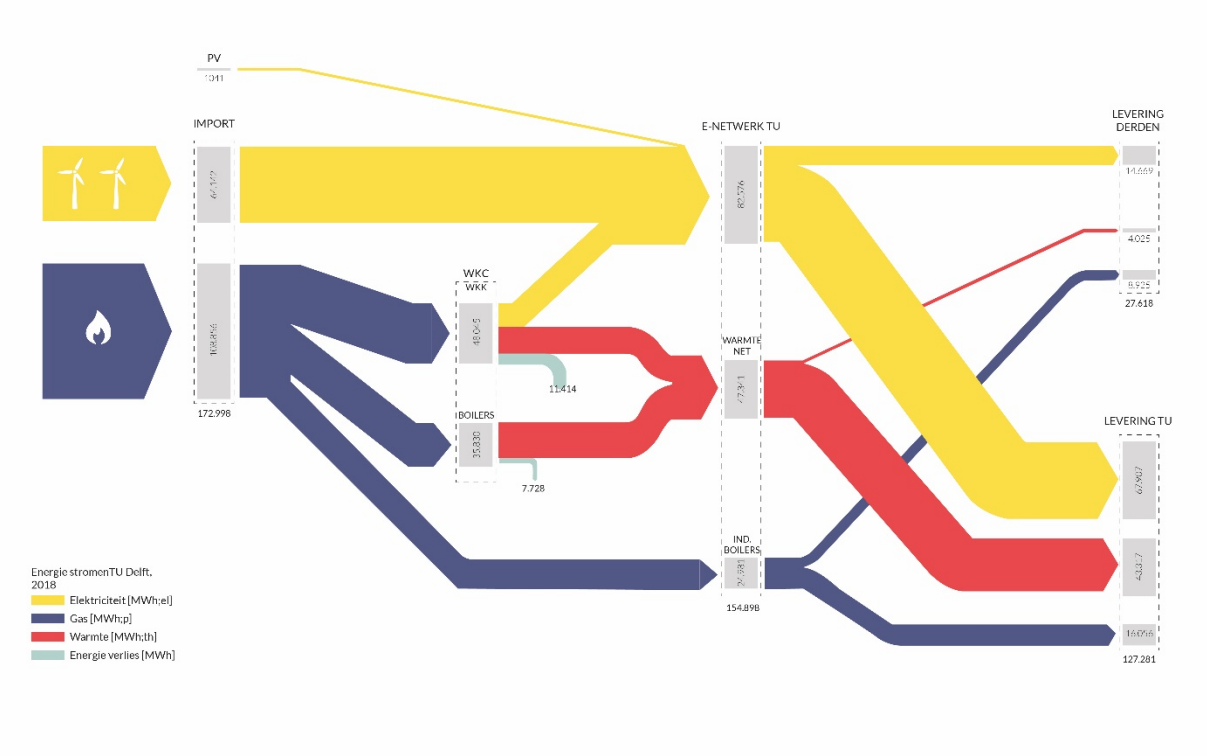
2.1 Het huidige energiesysteem

2.1.1 Energiesysteem

Het energiesysteem van de campus van de TU Delft kan grofweg worden onderverdeeld in twee delen (Figuur 2.1): het warmtenetwerk boven de Kruithuisweg (de buurten TU-Noord en TU-Centrum in de Wippolder) en de wijk Technopolis (TU-Zuid) onder de Kruithuisweg, waar de gebouwen individueel worden verwarmd door middel van onder andere WKO-systemen. De gebouwen behorende bij de Faculteit Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek vormen hierop de uitzondering en zijn ook verbonden met het warmtenet.

Figuur 2.1: Warmtenet met de 4 takken. Gebaseerd op tekening: TR-NN-TR-9856-P01

Figuur 2.2 is een schematische weergave van de stromen in het huidige energiesysteem van de TU-campus. Het systeem is op te delen in drie onderdelen: elektriciteit, warmtenetwerk en individuele gasketels in enkele gebouwen. Voor alle drie de onderdelen geldt dat naast het gebruik door de TU-gebouwen ook een deel van de energie aan derden wordt geleverd.



Figuur 2.2: Sankey-diagram van het energieverbruik op de TU Delft campus [gebaseerd op: Excel Energiegebruik TU Delft campus 2018, via Gilbert de Nijs – CRE energie]

Onder de levering aan derden vallen:

- Warmtenet: TNO Nano (104), TNO I&T (97) en TNO scheidingstechnologie (46 & 92)
- Gas (verwarmen): Eneco (levert aan Haagse Hogeschool), DUWO Stieltjesweg, VSL, Prometheus, StuD (19), Hogeschool Inholland (zeer laag verbruik)
- Gas (proces): TNO Nano (104)
- Elektriciteit: voorgaande gebouwen en zendmast van KPN en T-Mobile

Gebouw 97, 46, 92 (TNO), StuD (19) en de Hogeschool InHolland zijn tevens eigendom van de TU.

2.1.2 Elektriciteitsnetwerk

Een deel van de elektriciteit wordt geproduceerd door middel van warmtekrachtkoppeling (WWK), in de warmtekrachtcentrale (WKC). Daarnaast wordt op de daken van de eigen gebouwen 1014 MWh (1%) geproduceerd door middel van PV-panelen (tabel 2.1).

De TU Delft importeert windenergie voor de resterende elektriciteitsvraag; in 2018 was dit 78% van de totale vraag. Sinds 2017, tot 2020, heeft de TU Delft een contract met Eneco, waarmee windenergie wordt ingekocht van zes windturbines in het Luchterduinen windpark [Eneco].

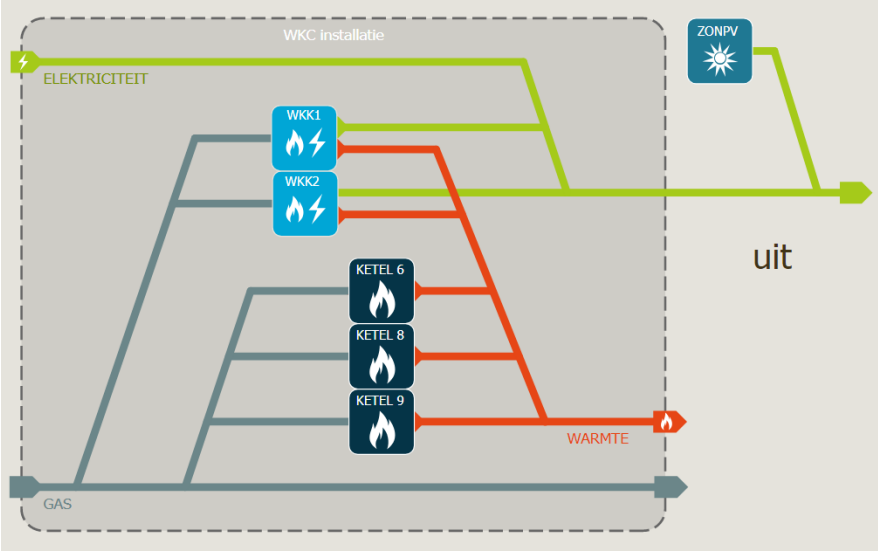
Tabel 2.1: PV-panelen op de TU Delft Campus [Solar edge, iviewer TU Delft, google maps]

Nr.	Gebouw	Aantal PV	Vermogen [kWp]	Opwekking [MWh]
23	Civiel	320	85	80,2
26	Van der burghweg 1	86	23	21,4
31	TBM	182	55	48,2
32	IO	458	121	116,0
33	Pulse	490		-
36 shed	EWI	530	134	124,5
36 HD	EWI	436	68	64,3
37	Sport	384	102	-
38	Cultuur	160	42	38,3
58	TNW (zuid)		135	128,9
60	Logistiek & milieu	92	24	22,3
61	Vliegtuighal (Eng)	492	130	116,5
62	LR	358	95	82,9
64	Hoge snelheden lab.	320	87	76,4
TOTAAL			**1,1 MWp**	

2.1.3 Warmtenetwerk

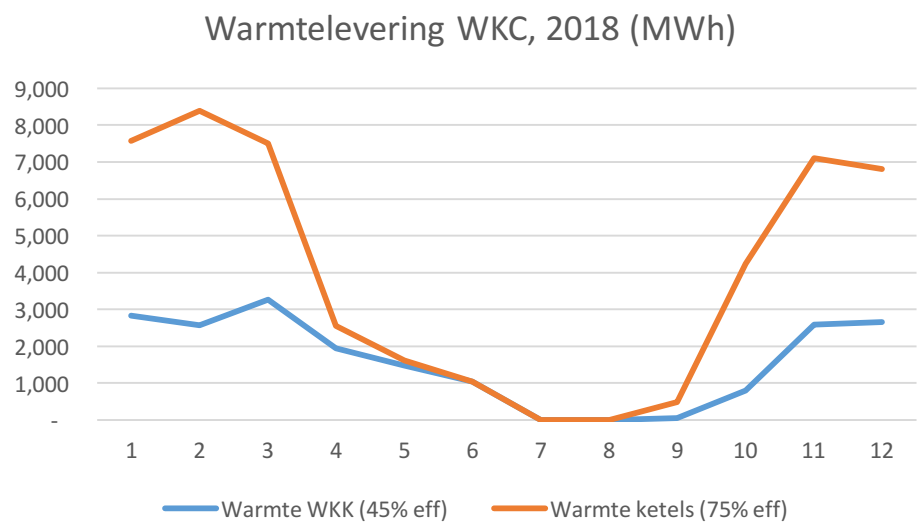
In de warmtekrachtcentrale (WKC), gebouw 43, wordt middels aardgas warmte voor het warmtenet geproduceerd. Hiervoor worden de volgende installaties gebruikt [Stoelinga et al 2016]:

- 3 gasketels: 15, 30 en 35 MWh_{th}, rendement 75%
- 2 warmtekrachtkoppeling (WKK-)ketels: beide 1,95 MWh_{el} en 2 MWh_{th}, rendement 40% elektrisch en 45% thermisch



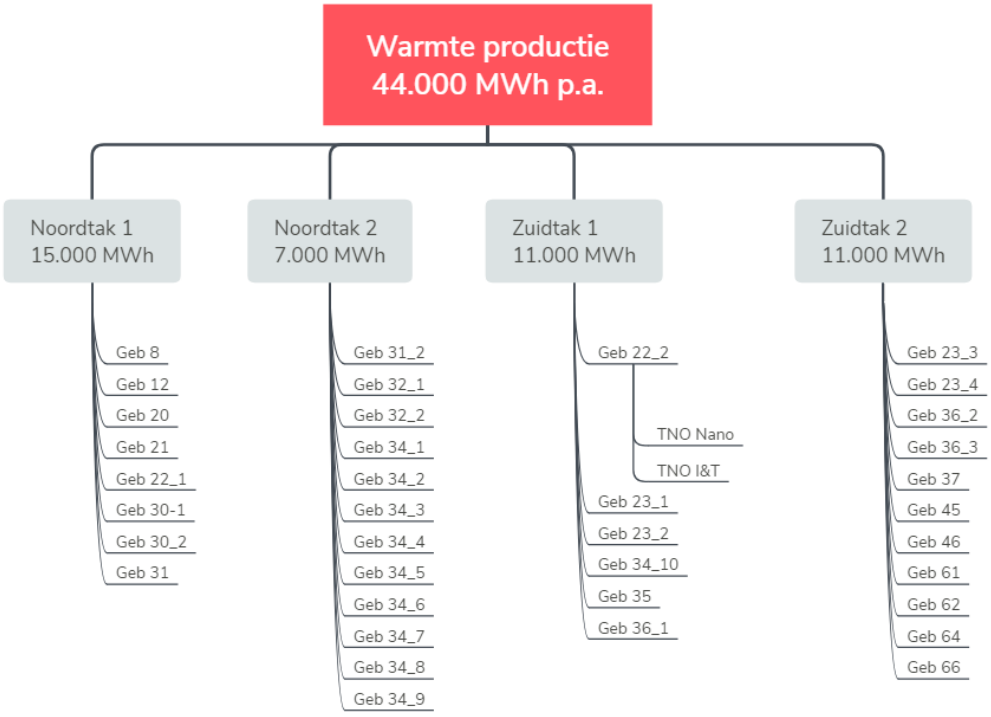
Figuur 2.3: Versimpeld installatie schema van de WKC [www.ipin-tudelft.erbis.nl]

De WKK-installaties zijn enkel actief wanneer de retourtemperatuur van het warmtenet lager is dan 85°C. Op dit moment is dat niet altijd het geval: de huidige aanvoertemperatuur van het warmtenet varieert tussen de 100°C en 130°C. In 2018 werd 41% van de warmte in het warmtenet geproduceerd door de WKK-units. Om de CO_2-emissies te verlagen wil de TU Delft het aandeel warmte geleverd door WKK verhogen. Daarvoor moet de temperatuur van de retourleiding van het warmtenet verlaagd worden tot onder 85°C.

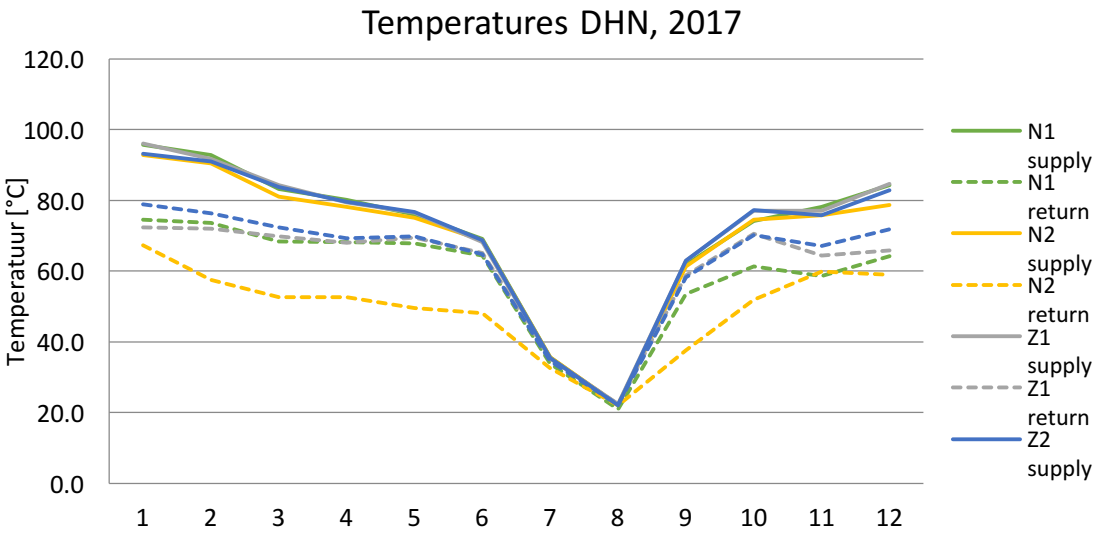


Figuur 2.4: Warmtelevering door de warmtekrachtcentrale, in rood de levering door de WKK en in blauw door de drie ketels [bron: Excel Energiegebruik TU Delft campus 2018, via Gilbert de Nijs – CRE energie]

Daarnaast onderzoekt de TU Delft de mogelijkheden van het aansluiten van een geothermiebron op het netwerk; daarvoor zou de temperatuur nog verder omlaag gebracht moeten worden: naar 80°C aanvoer en 55°C retour. Om dit te bereiken is in 2011 het IPIN-project gestart.
Als onderdeel van het IPIN-project is het netwerk opgesplitst in vier takken. Dit maakt dynamische warmteregeling (DWNR) mogelijk; de vier takken zijn daardoor individueel regelbaar en kunnen op verschillende temperaturen worden verwarmd (op basis van vraag en weersvoorspelling) door optimalisatie van de warmtevraag met het aanbod [Stoelinga et al. 2016; Stoelinga et al. 2017].



uur 2.5: Vier takken van het warmtenetwerk
[bron: Campus and Real Estate (n.d.),Warmtedistributie (Powerpointpresentatie)]



Figuur 2.6: Aanvoer- en retourtemperaturen van de vier takken in het warmtenet [bron: Excel Uurwaarden 2017_warmtetakken]

Figuur 2.6 laat de aanvoer en retourtemperatuur van de vier takken over het jaar 2017 zien. Geconcludeerd kan worden dat warmtapwater niet door het warmtenet wordt geleverd, maar dat deze wordt geproduceerd door individuele systemen. Doordat een groot gedeelte van het warmtenet in een afgesloten betonnen tunnel ligt zijn de warmteverliezen minimaal (opwarming tunnel).

2.1.4 WKO-systemen

In Figuur 2.7 zijn de huidige WKO-systemen op de campus in kaart gebracht. In totaal zijn er 13 WKO-doubletten actief op de campus, en een doublet is in directe planning. De 13 doubletten zijn aangesloten op 13 gebouwen, waarbij sommige doubletten een semicollectieve systeemopzet hebben en enkele gebouwen meerdere doubletten hebben.

UB (1), 3ME (1) en EWI (2): deze vier doubletten zijn al meer dan 20 jaar actief en zijn niet gecombineerd met een warmtepomp, maar met warmtewisselaar. De kosten van de realisatie van een warmtepomp ten opzichte van de opbrengst in combinatie met hogetemperatuurverwarming zullen zeer hoog zijn. In de UB is het bovendien ruimtelijk lastig om deze aanpassingen te realiseren vanwege het gebrek aan een fatsoenlijke installatieruimte: alles zit tussen de vloeren weggewerkt. Bij EWI wordt de WKO met name gebruikt voor het koelen van de *cleanrooms*.

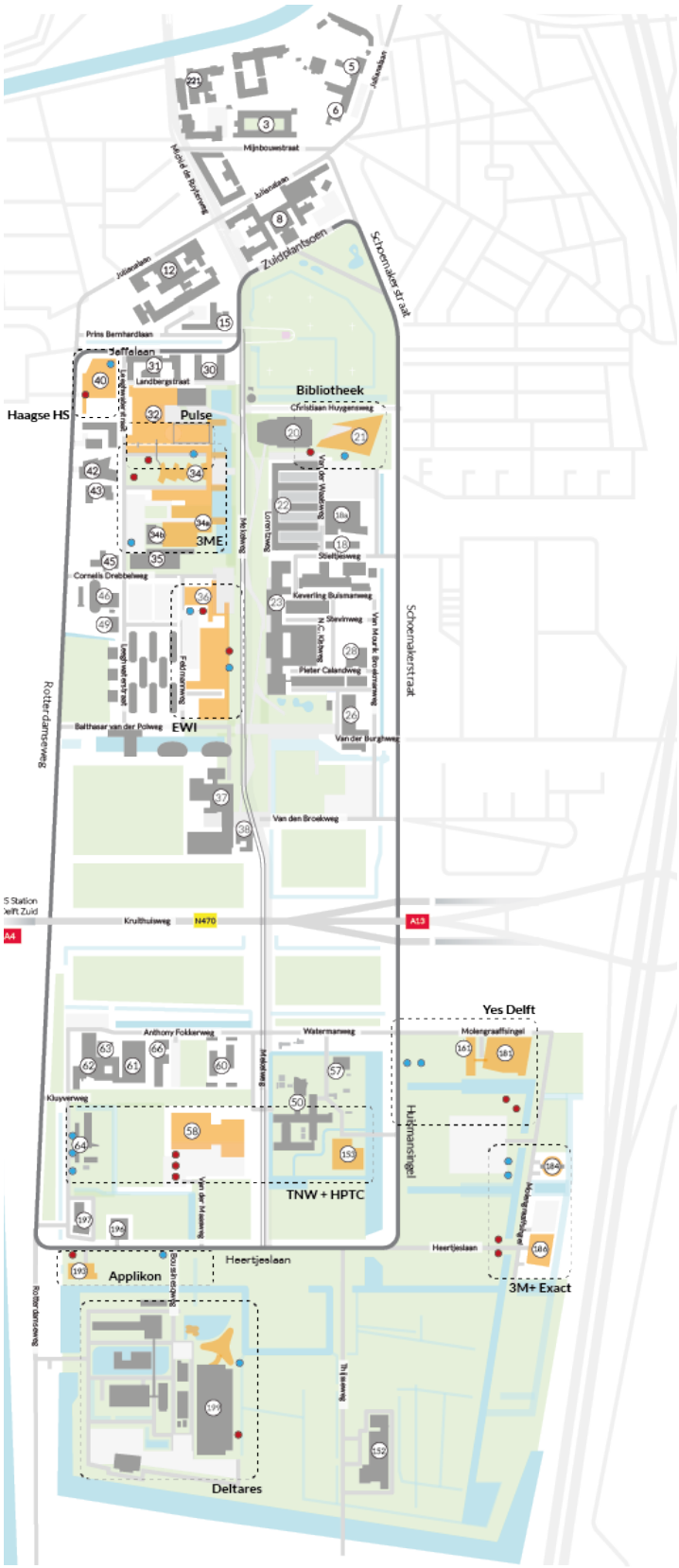
Yes!Delft & Yes!Delft Labs (2), 3M & Exact (2) en Applikon (1): deze commerciële derden zitten aangesloten op bronnen van de TU; levering geschiedt via Suenso BV (exploitatie van WKO-systemen van de TU naar externen). Het doublet bij Applikon is ontworpen voor het gehele plot, die bij realisatie van het doublet nog niet volledig was ontwikkeld; momenteel is ABB ook gerealiseerd en aangesloten op de bron.

TN-zuid – HPTC (3): semicollectief systeem van drie doubletten. Het HPTC (Holland Protonen Therapie Centrum) heeft een protonensplitser die continu koeling vraagt; deze restwarmte is gebruikt voor het verwarmen van TNW. Tijdens koelperiodes regenereren *dry-coolers* een groot deel van de warmte voor de winter, die wordt opgeslagen in de WKO.

Tenslotte is het Pulse-gebouw (1) aangesloten op een doublet en is het Echo-gebouw in ontwikkeling (1). Beide doubletten zullen worden gecombineerd met een warmtepomp.

In 2017 werd er in totaal 24.600 GJ aan warmte geleverd en 31.300 GJ aan koude (doublet Pulse nog niet meegerekend).

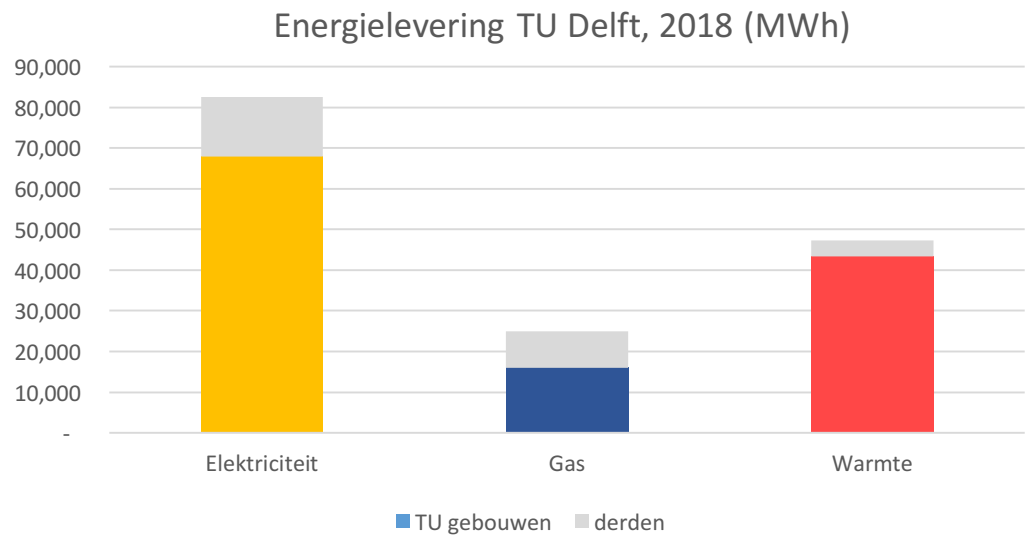
[bron: persoonlijk contact met Anne Medema (CRE Energie); 23-11-2018, 17-10-2019, 13-02-2019]



Figuur 2.7: WKO-systemen op de campus [gebaseerd op: TR-NN-TR-9553-P01]

2.2 Huidige energievraag

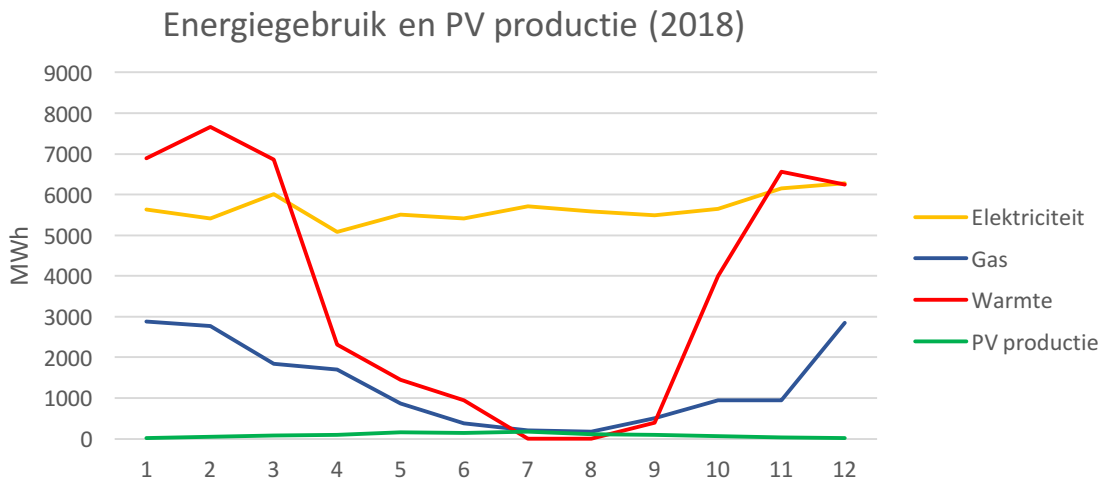
In 2018 bedroeg de energievraag door de gebouwen op de TU Delft campus in totaal 154.898 MWh. In Figuur 2.8 is zichtbaar hoe de energievraag van de gebouwen verloopt door het jaar heen. Terwijl de warmte en gasvraag afhankelijk is van het (stook)seizoen, is de elektriciteitsvraag constanter.



Figuur 2.8: Verdeling van het gebruik van elektriciteit, aardgas en warmte uit de Warmtekrachtcentrale van de TU Delft [bron: Excel Energiegebruik TU Delft campus 2018, via Gilbert de Nijs, CRE energie]

Tabel 2.2: Energievraag campus, 2018
[bron: Excel Energiegebruik TU Delft campus 2018, via Gilbert de Nijs, CRE energie]

	Energielevering TU Delft [MWh]			
	Elektriciteit	*Gas*	*Warmte*	*Totaal*
TU-gebouwen	67.907	16.056	43.317	127.281
Derden	14.669	8.925	4.024	27.618
TOTAAL	**82.576**	**24.981**	**47.341**	**154.898**



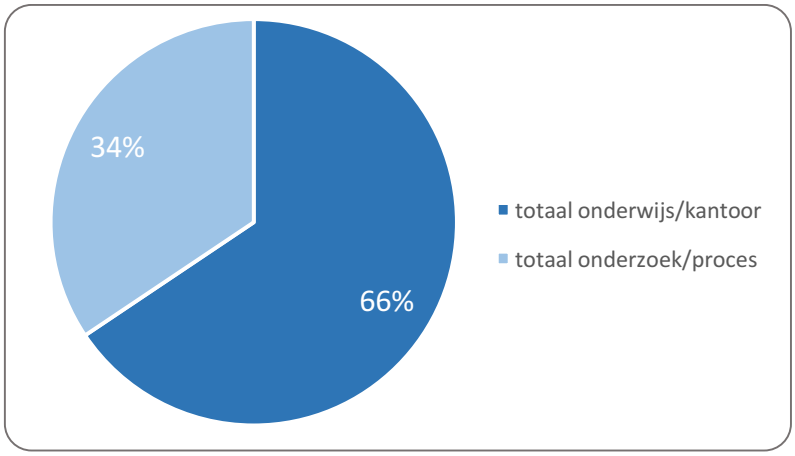
Figuur 2.9: Energievraag en opwekking door middel van PV van de TU-gebouwen over 2018 [emonitor.tudelft.nl]

2.2.1 Uitsplitsing energievraag

Om het energiegebruik van de campus te kunnen analyseren en om besparingspotenties te kunnen indiceren, zal bepaald moeten worden hoe het energiegebruik is onderverdeeld tussen de verschillende functies en hoe de elektriciteitsvraag is opgebouwd. Met de huidige verbruiksgegevens is het niet mogelijk deze onderverdeling te bepalen. Daarom is er door Gilbert de Nijs een verhouding bepaald tussen het elektriciteitsverbruik per m^2 bruto vloeroppervlak van onderwijs- en kantoor-functies en onderzoek- en procesgebonden functies. De verhouding tussen het gemiddelde elektriciteitsgebruik van de onderwijs/kantoor- en onderzoek/procesfuncties bedraagt per m^2 40% [de Nijs, 2018].

De verdeling van de energievraag van zowel het warmtenet en de gasvraag is gebaseerd op de warmtevraag per oppervlakte-eenheid [de Nijs 2018], die gelijk is voor beide functies, met uitzondering van de situatie waarin een gebouw wordt verwarmd door het warmtenet, maar waar tegelijk ook gasverbruik optreedt voor onderzoek. In dit geval wordt het gasverbruik volledig toegekend aan de onderzoek- en procesgebonden functies.

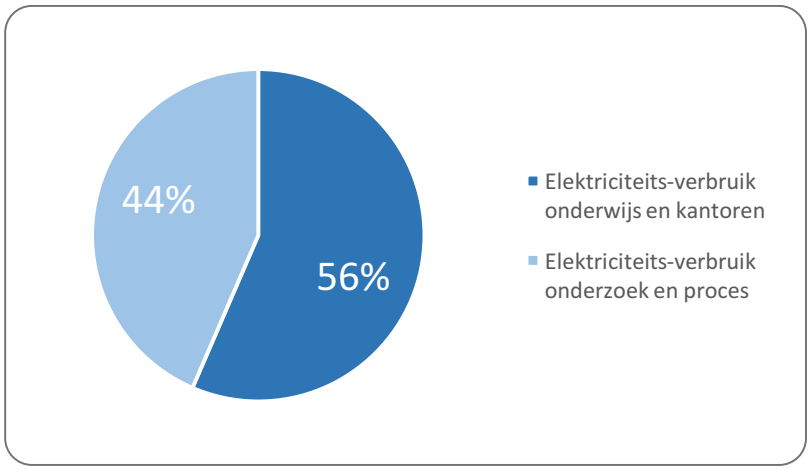
Daarmee is uiteindelijk 34 procent van het totale energiegebruik van de gemonitorde gebouwen in 2018 afkomstig van de onderzoek- en procesgebonden functies. In BVO ligt de verhouding op 78 procent kantoor/onderwijsfunctie en 22% onderzoek/procesfuncties. Voor nu geven deze aannames een goede eerste indicatie van de verdeling van het energiegebruik; in de toekomst is een separate meting aan te raden om deze cijfers beter te kunnen specificeren.



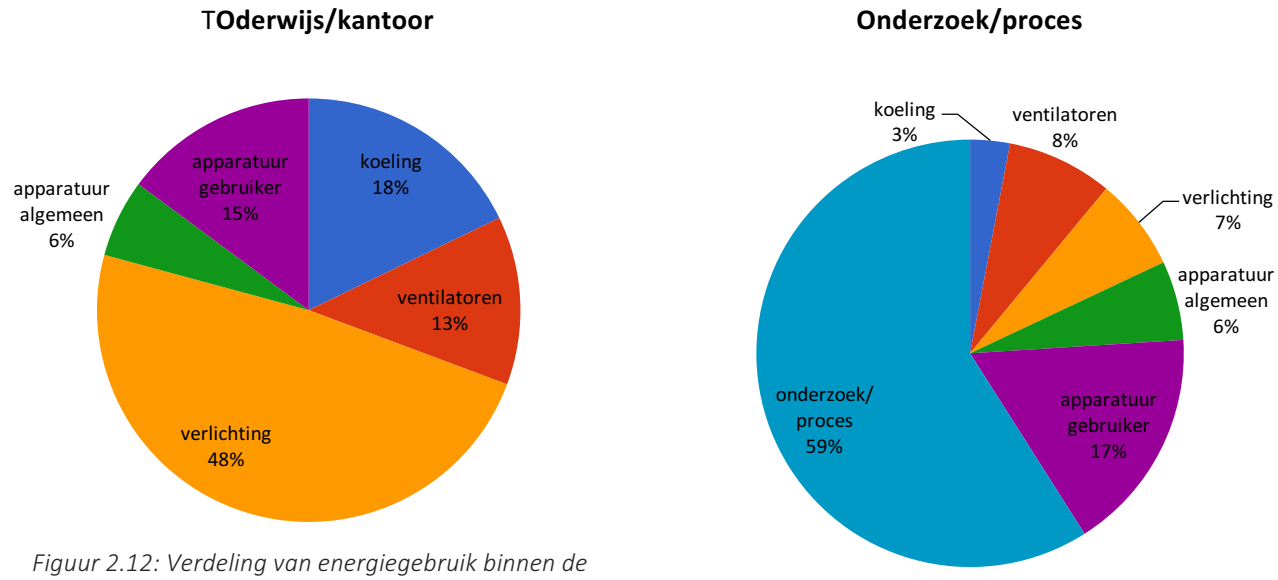
Figuur 2.10: Verhouding energievraag tussen onderwijs/kantoorfuncties en onderzoek/procesfuncties

2.2.2 Uitsplitsing elektriciteitsvraag

Voor beide functiegroepen is het elektriciteitsgebruik verder uitgesplitst naar elektriciteitsgebruik voor koeling, ventilatie, verlichting, algemene apparatuur en apparatuur gerelateerd aan de gebruiker. Net als met bovenstaande verdelingen van het energiegebruik is dit een eerste indicatie van de verdeling. Deze referentieverdeling zal in de toekomst nader onderzocht moeten worden.



Figuur 2.11: Verdeling van energiegebruik over onderwijs- en kantoorwerk, versus onderzoek en procesfaciliteiten op de campus [de Nijs, 2018]



Figuur 2.12: Verdeling van energiegebruik binnen de hoofdcategorieën [de Nijs, 2018].

Combineren van de referentieverdelingen met de elektriciteitsvraag voor 2017 levert de volgende totale verdeling op, zie Tabel 2.3. Naar verwachting zal in de toekomst het aandeel van koeling steeds meer toenemen, door extremere buitentemperaturen en verbeterde isolatie van de gebouwen.

Tabel 2.3: Uitsplitsing elektriciteitsgebruik (%)
[bron: Excel Energiegebruik TU Delft campus 2018, via Gilbert de Nijs, CRE energie; de Nijs, 2018]

	%
Verlichting	30%
Koeling	11%
Ventilatie	11%
Apparatuur algemeen	6%
Apparatuur gebruiker	16%
Onderzoek/proces	26%
TOTAAL	**100%**

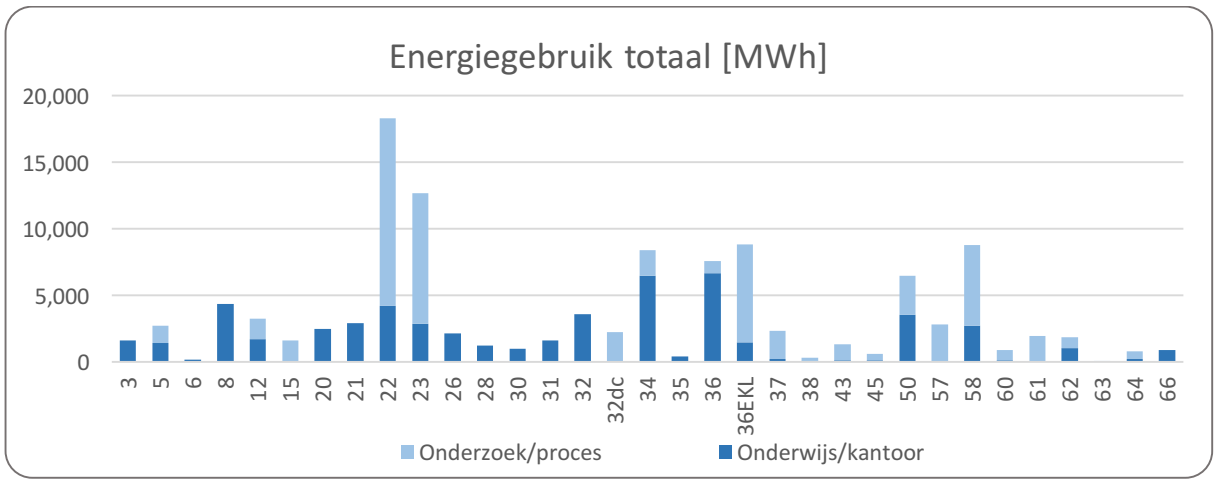
3 Analyse van het huidige gebouwenbestand

3.1 Energiegebruik

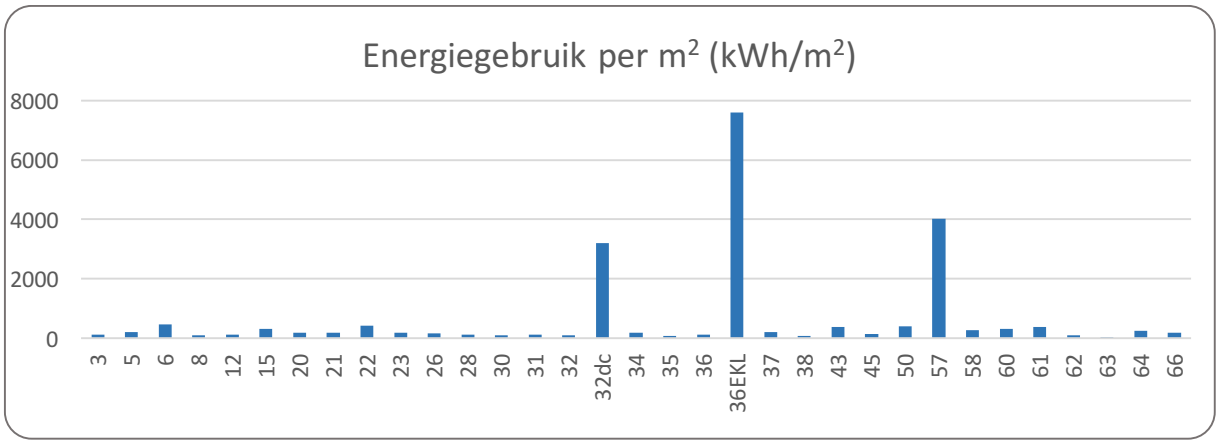
3.1.1 Energievraag algemeen

Het energiegebruik van in totaal 33 gebouwen van de Technische Universiteit Delft wordt iedere maand gemeten, verdeeld in gasverbruik, warmtetoevoer en elektriciteitsgebruik. In totaal beslaat dit 73 procent van het totale energiegebruik (TU en levering aan derden). Dit betekent dat de resterende 27% bestaat uit het energiegebruik voor de overige gebouwen, levering aan derden en het campusgebied (zoals straatverlichting).
In totaal is 113.397 MWh gemonitord, het totale gebruik van TU-gebouwen bedraagt 127.281 MWh; daaruit kan worden geconcludeerd dat het energiegebruik van de niet-gemonitorde TU-gebouwen en de campus erg klein is (slechts 11%).

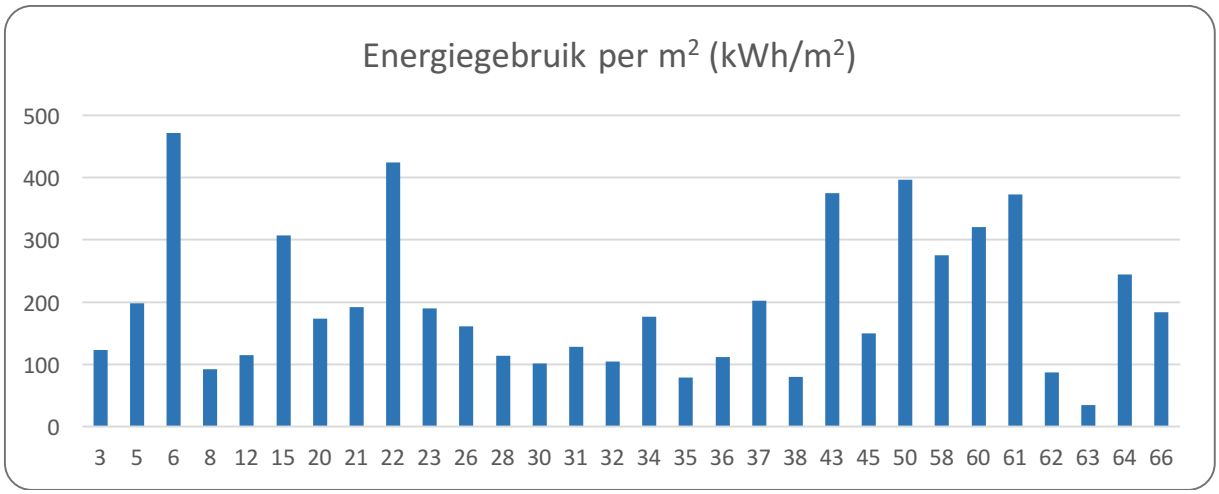
In de onderstaande figuren worden de totale energiegebruiken van de gemonitorde gebouwen (zie Bijlage 1) over 2018 met elkaar vergeleken. Figuur 3.2 maakt de extreem hoge gebruiken per vierkante meter BVO van de twee datacenters en het Else Kooi Laboratorium zichtbaar. In Figuur 3.3 zijn deze gebruiken buiten beschouwing gelaten om een uitspraak te kunnen doen over de gebruiken van de andere gebouwen. In Bijlage 2 zijn de gebruiksdata per gebouw weergegeven in een grafiek.



Figuur 3.1: Het totale energiegebruik van de gemonitorde gebouwen in 2018 [emonitor.tudelft.nl]



Figuur 3.2: Het totale energiegebruik per vierkante meter van de gemonitorde gebouwen in 2018 [emonitor.tudelft.nl]

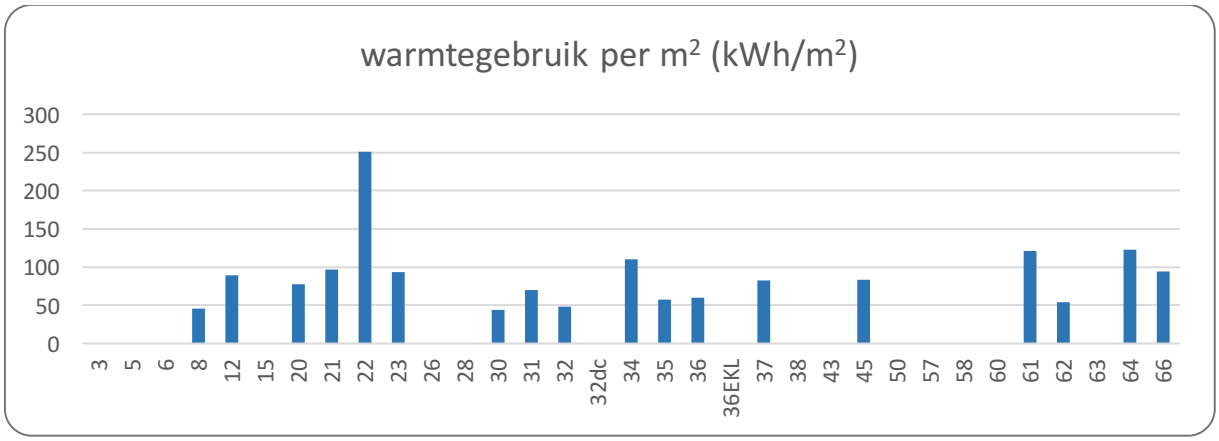


Figuur 3.3: Het totale energiegebruik per vierkante meter van de gemonitorde gebouwen, in 2018, exclusief de datacentrums en het Else Kooi Laboratorium [emonitor.tudelft.nl]

Volgens de KPI's (hoofdstuk 1) moet in 2030 het energiegebruik van de bestaande bouw gereduceerd worden tot een warmtevraag van 50 kWh/m^2 en een elektriciteitsvraag van 50 kWh/m^2. Daarmee zal het totale energiegebruik van de gebouwen in 2030 moeten worden gereduceerd tot 100 kWh/m^2. Gemiddeld genomen betekent dit dat de energievraag moet worden gehalveerd, met enkele uitschieters naar beide kanten.
Kijkend naar het totale energiegebruik zou ook moeten worden meegenomen hoe het gebouw wordt gebruikt: een groot gebouw kan zijn hoge energiegebruik weliswaar deels compenseren door zijn grote volume, maar daarvoor zou wel het volledige oppervlak efficiënt gebruikt moeten worden.

3.1.2 Energievraag warmtenetwerk

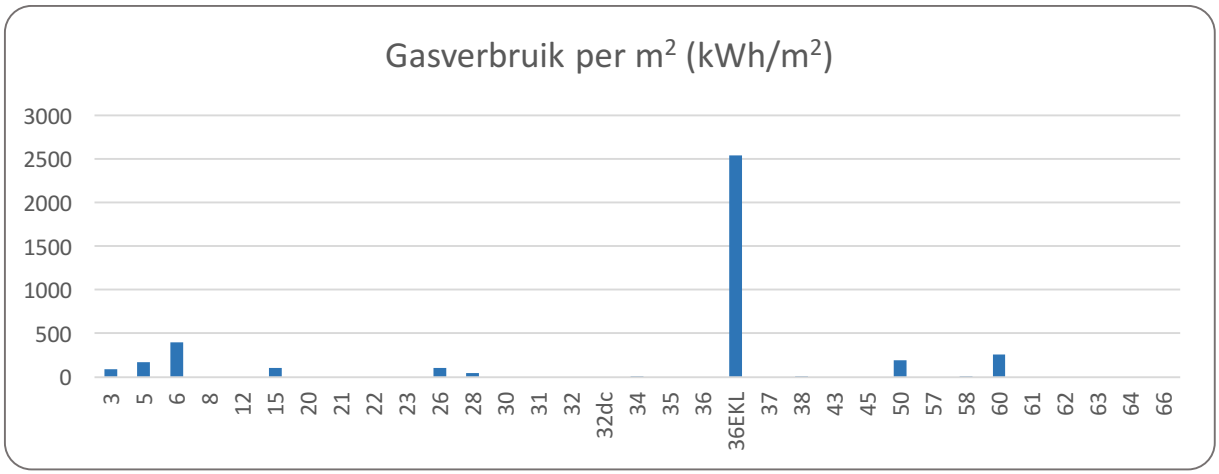
Met uitzondering van de TNO-gebouwen is de volledige levering van het warmtenet aan de aangesloten TU-gebouwen gemonitord (figuur 3.4). Slechts enkele gebouwen voldoen momenteel aan de KPI-eis voor warmte. Een extreme piek is zichtbaar bij gebouw 22, het oude Technische Natuurkunde op de centrale TU-campus.



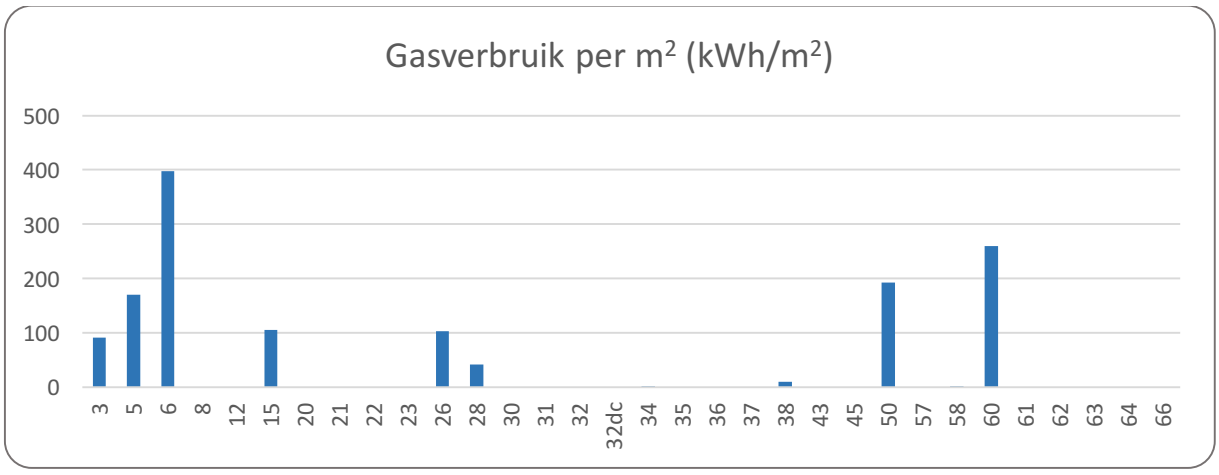
Figuur 3.4: Warmtelevering per vierkante meter van de gemonitorde gebouwen, in 2018 [emonitor.tudelft.nl]

3.1.3 Gasverbruik

Figuren 3.5 en 3.6 geven een overzicht van het individueel gasgebruik door de gebouwen. De hoge gasvraag van de gebouwen 6 (Botanische Tuin) en 36EKL (Else Kooi Laboratorium) zijn te wijten aan hun kas respectievelijk onderzoeksfuncties.



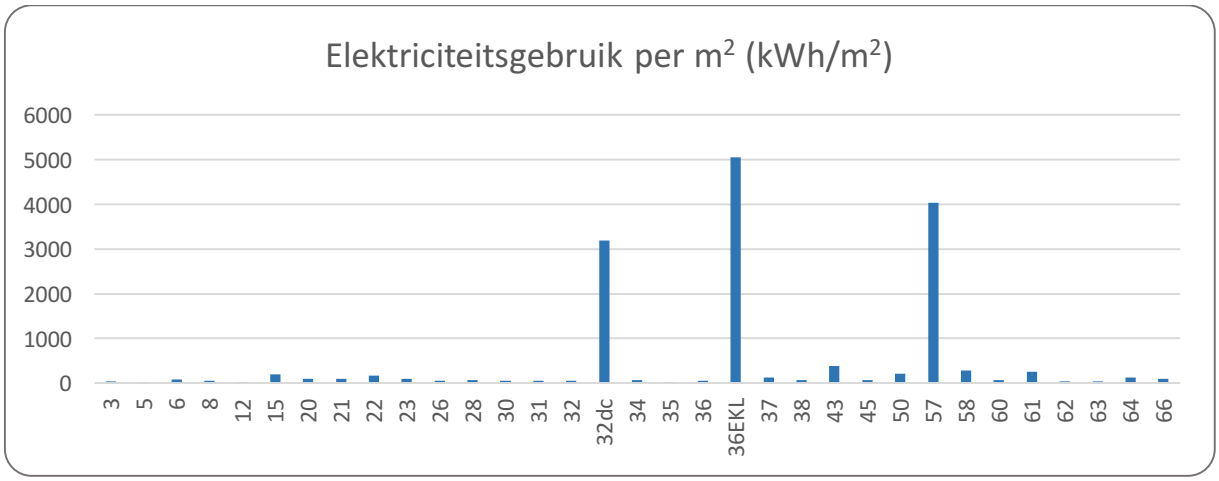
Figuur 3.5: Gasverbruik per vierkante meter in 2018 [emonitor.tudelft.nl]



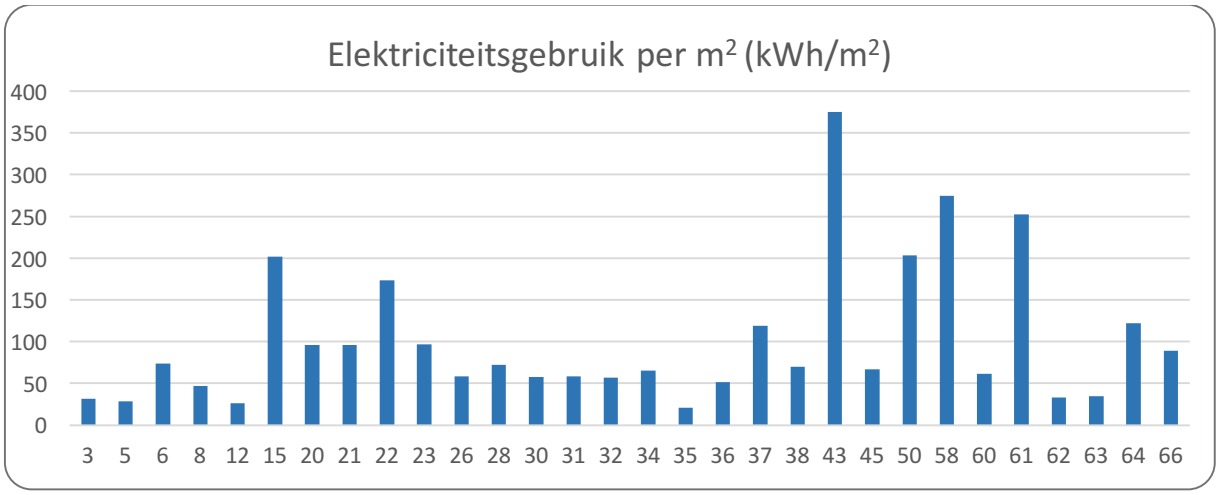
Figuur 3.6: Gasverbruik per vierkante meter in 2018, exclusief de botanische tuin en het Else Kooi Lab [emonitor.tudelft.nl]

3.1.4 Elektriciteitsvraag

Een grote reductie is noodzakelijk om de elektriciteitsvraag tot 50 kWh/m^2 te brengen. De grote piekvragen zijn de oorzaak van onderzoek/procesfuncties; hierdoor zal reductie in deze functies lastig te realiseren zijn.



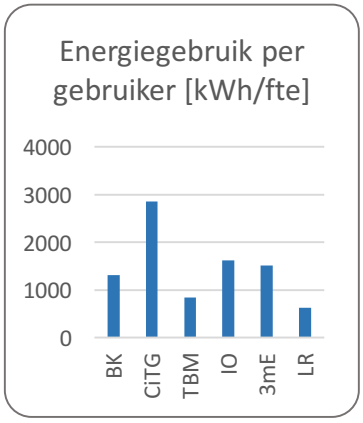
Figuur 3.7: Elektriciteitsgebruik per vierkante meter, in 2018 [emonitor.tudelft.nl]



Figuur 3.8: Elektriciteitsgebruik per vierkante meter, in 2018, exclusief gebruik datacenters en het Else Kooi Laboratorium [emonitor.tudelft.nl]

3.1.5 Energiegebruik per fte

In figuur 3.9 is voor enkele faculteitsgebouwen het energiegebruik per fte (een student is een fte) aangegeven. De faculteiten EWI en TNW zijn niet weergegeven doordat deze faculteiten gebruik maken van meerdere gebouwen. Met name Civiele Techniek heeft een hoog energiegebruik per fte. De studenten en werknemers per faculteit zijn enkel bekend voor 2017; daarom is aangehouden dat de verdeling (%) gelijk is gebleven in 2018.



Figuur 3.9 – energiegebruik per gebruiker voor enkele faculteiten.

3.1.6 Belangrijkste waarnemingen

De volgende panden hebben een hoog energiegebruik vanwege hun proces/onderzoeksfunctie:

- **Botanische tuin (6)**: hoog gasverbruik voor verwarmen kassen.
- **Technische natuurkunde (22)**: hoog gebruik te verklaring door de aanwezige laboratoria in het gebouw, zoals het in 2018 gevestigde QuTech, dat een hoog elektriciteitsgebruik vraagt. In de toekomst gaat Q-tech mogelijk apart van de TU Delft opereren; het is van belang het aandeel van Q-tech in het totale gebruik van TN te specifiëren. Het warmtegebruik van TN ligt tevens zeer hoog, dit is in mindere mate te verklaren door de aanwezige laboratoria en is vooral de oorzaak van de slecht isolerende schil.
- **Else Kooi Laboratorium (36 EKL)**: hoog gas- en elektriciteitsgebruik voor uitvoering van onderzoek in het laboratorium. Het laboratorium is verouderd en installaties werken inefficiënt, zijn toe aan vervanging.
- **Datacenters (32dc & 57)**: hoog elektriciteitsgebruik voor koelinstallaties.
- **Reactor Instituut Delft, RID (50):** hoog gas- en elektriciteitsgebruik voor processen in reactor.
- **TNW-zuid (58)**: zie paragraaf 3.1.7.

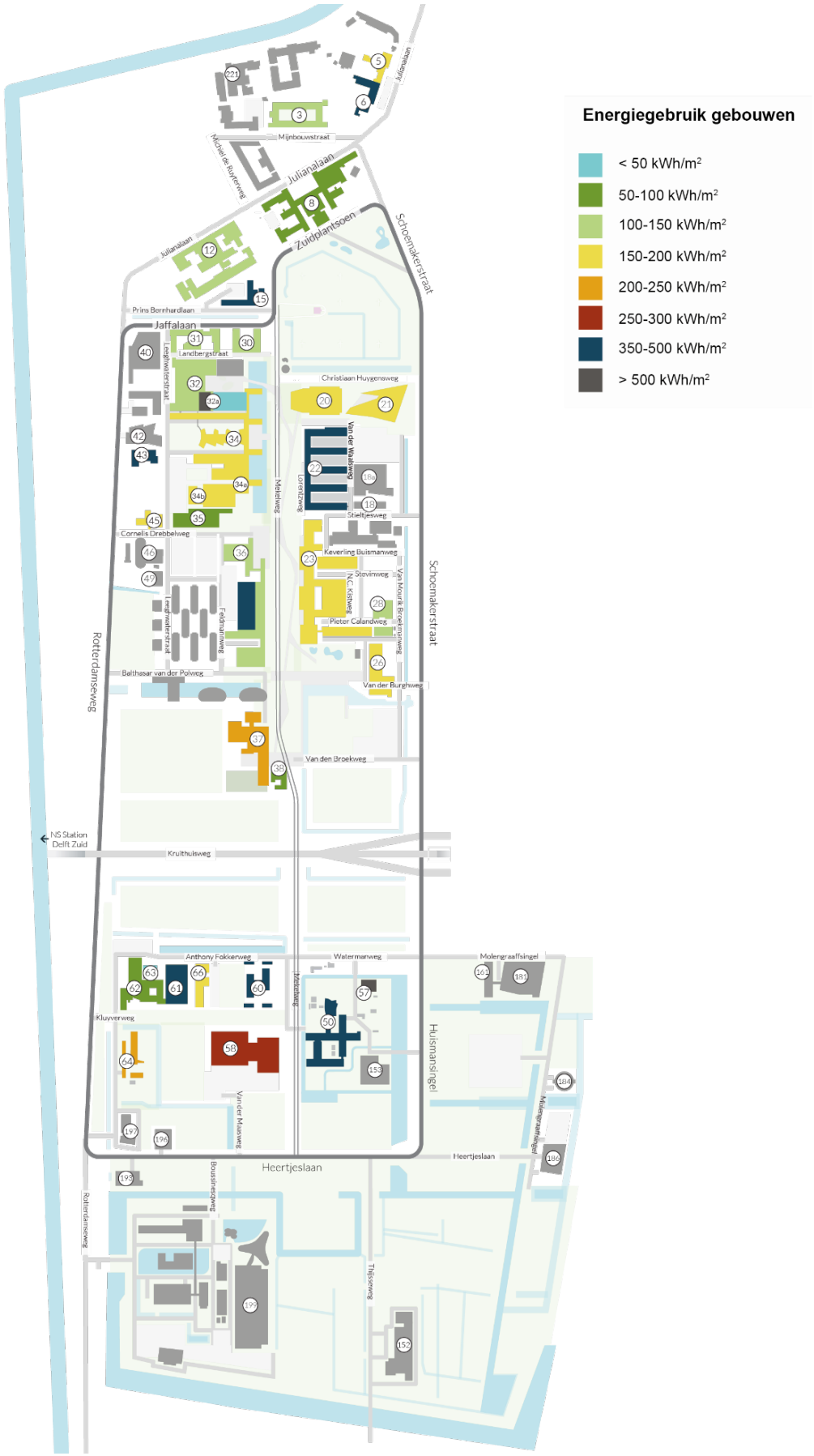
Onderwijs- en kantoorgebouwen

- **Kramer Laboratorium (15)**, enkel in gebruik door Hyperloop-dreamteam: hoog gebruik door individuele gasketel.
- **Technische Natuurkunde (22)**: hoogste totale energiegebruik, grote toename t.o.v. 2017: warmtegebruik verdubbeld, ook toename elektriciteitsvraag. Grootste verschil 2017-2018 is vestiging QuTech, echter vraagt QuTech met name een grote hoeveelheid elektriciteit. Om KPI te behalen is een totale energiereductie van 76% nodig (80% reductie warmtevraag).
- **Civiele Techniek (23)**: zeer hoog totaalgebruik, deels gecompenseerd door het grote oppervlak. Het verbruik in verhouding tot het aantal gebruikers (studenten en werknemers) ligt zeer hoog, duid op een inefficiënt ruimtegebruik, zie figuur 3.9.
- **EWI (36)**: hoog energiegebruik gecompenseerd door het grote oppervlak.

Gebouwen die (bijna) aan de KPI-eis voldoen

- **Bouwkunde (8)**: totaal 92 kWh/m^2, dankzij renovatie in 2014, waarbij het warmtegebruik ten opzichte van voor renovatie met 50 procent is gedaald.
- **Wiskunde en Informatica (28)**: 114 kWh/m^2; bespaard zou moeten worden op elektriciteitsgebruik (72 kWh/m^2).
- **CRE, Jaffalaan (30)**: 102 kWh/m^2. In 2004-2006 gerenoveerd waarbij ook de gevel is aangepakt.
- **Technische Bestuurskunde, TBM (31)**: 128 kWh/m^2, reductie warmtegebruik nodig.
- **Industrieel Ontwerpen, IO (32)**: 105 kWh/m^2, lichte reductie elektriciteitsgebruik nodig.
- **Onderwijsgebouw Drebbelweg (35)**: laagste energiegebruik van de campus (79 kWh/m^2), met name door het beperkte elektriciteitsgebruik van 21 kWh/m^2. Dit lage elektriciteitsgebruik is waarschijnlijk te verklaren door het minimale gebruik van kunstlicht, er is veel daglichttoetreding in het gebouw. Tevens wordt er gebruik gemaakt van LED-verlichting.
- **Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek (62)**: 87 kWh/m^2, met name door het lage elektriciteitsgebruik. Halverwege 2014 is het elektriciteitsgebruik van L&R gereduceerd van 10 MWh per maand naar 5 MWh per maand (tot op heden). Een mogelijke verklaring is de pilot waarbij een gebouwbeheersysteem is gerealiseerd in het gebouw (vanaf 2014).

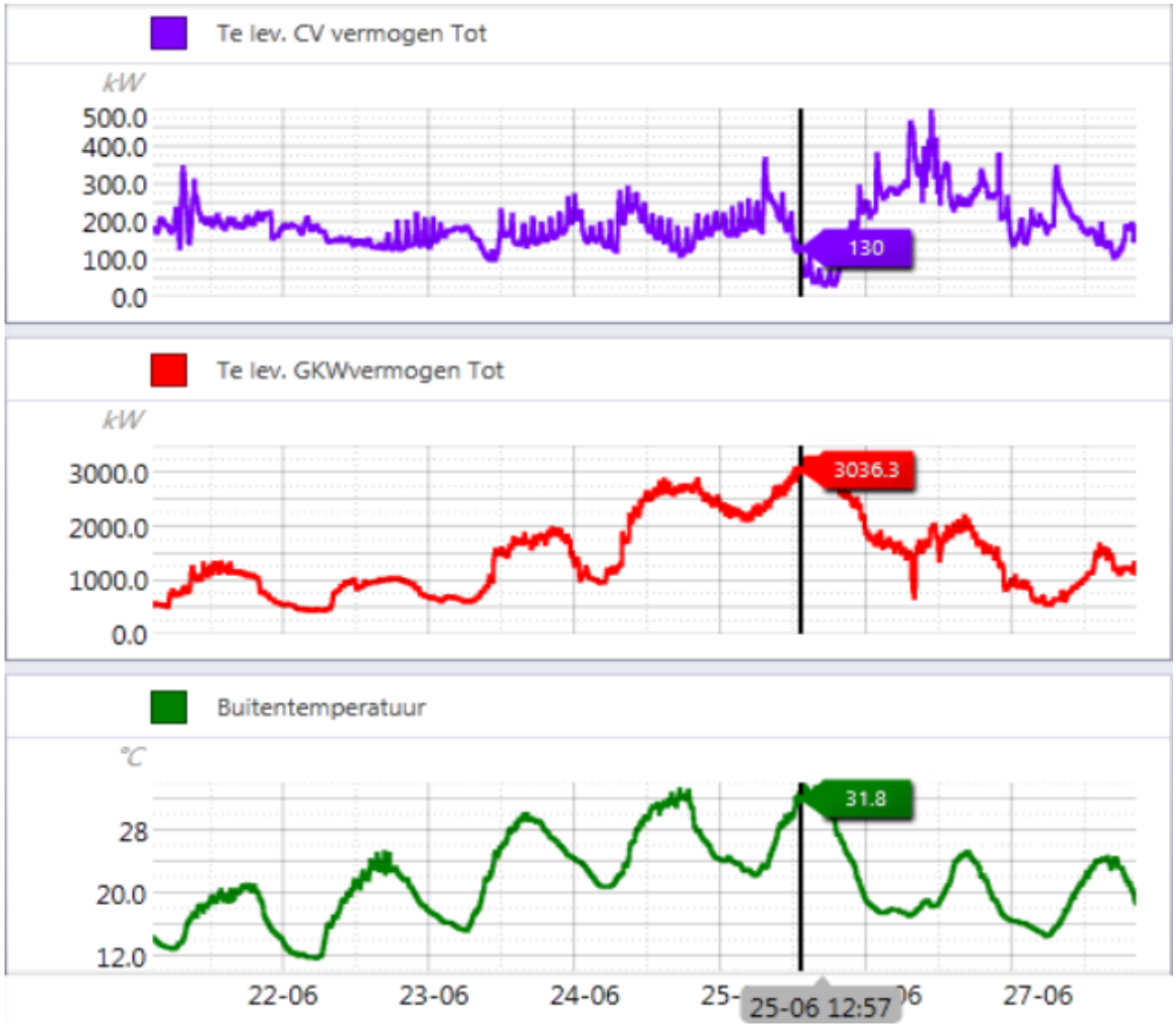
Figuur 3.11 geeft in kleurcodering de huidige energieprestatie per vierkante meter van alle TU-gebouwen. Daarbij is te zien dat de gebouwen in TU-Noord, met uitzondering van de Botanische Tuin en de gebouwen daaromheen, het relatief goed doen, hoewel Gele Scheikunde (12) nog nauwelijks gebruikt wordt en dus het energiegebruik per vierkante meter niets zegt.
De gebouwen in TU-Centrum presenteren gemiddeld matig, met grote verschillen. Alle grote faculteitsgebouwen, Aula en Bibliotheek zouden hier moeten worden aangepakt.
In TU-Zuid voldoet alleen L&R aan de gestelde eisen; alle andere gebouwen vragen om een gerichte aanpak van hun energievraag en energiesysteem. Met name TNW-zuid, als relatieve nieuwbouw, vertoont een onverwacht hoog energiegebruik. Daarom wordt daar in 3.1.7 verder op ingegaan.



Figuur 3.11 - Energiegebruik panden TU Delft campus [gebaseerd op emonitor.tudelft.nl]

3.1.7 TNW-zuid (gebouw 58)

Het relatief nieuwe TNW-Zuid heeft een hoger energiegebruik dan zou worden verwacht van een nieuwbouwproject. Het warmte- en koudegebruik ligt ruim tweemaal boven de ontwerpwaarde. Gedeeltelijk kan dit worden verklaard door de energie die wordt gevraagd door de vele laboratoria in het gebouw: 70 procent van het BVO heeft een onderzoeksfunctie. De meetopstellingen in deze laboratoria vragen een constante ruimtetemperatuur. In het ontwerp is gekozen voor een systeem dat de ruimte constant (lichtelijk) verwarmt; door middel van koeling wordt vervolgens temperatuurstabiliteit bereikt. Dit systeem is van grote invloed op het energiegebruik, aangezien de twee systemen (koelen en verwarmen) elkaar voortdurend tegenwerken. In Figuur 3.10 is dit te zien voor een dag waarop een buitentemperatuur van 31,8°C wordt bereikt, terwijl nog steeds warmte wordt geleverd in het gebouw [Anne Medema, CRE Energie].



Figuur 3.10 – Geleverde vermogens in TNW-zuid bij een buitentemperatuur van 31,8°C [bron: Anne Medema, CRE Energie, ontvangen op 08-07-2019].

Daarnaast bestaat het energiegebruik van het *all-electric* gebouw gedeeltelijk uit elektriciteit voor de WKO-bronnen. In totaal is 58 kWh/m^2 van het totale energieverbruik toe te rekenen aan de WKO-bron. Deze WKO-bronnen verwarmen en koelen zowel TNW-Zuid als HPTC, echter wordt het elektriciteitsgebruik nu volledig aan TNW-Zuid toegerekend. In totaal wordt 32 procent van de energie uit de WKO geleverd aan HPTC [bron: Anne Medema, CRE energie].

Tabel 3.1 – Energiegebruik en levering WKO doubletten TNW-Zuid, binnen 5% correct [bron: Anne Medema, CRE energie, 04-04-2019] .

	Warmte (MWh)	Koude (MWh)
TNW-zuid	2.997	4.335
HPTC	613	2.793

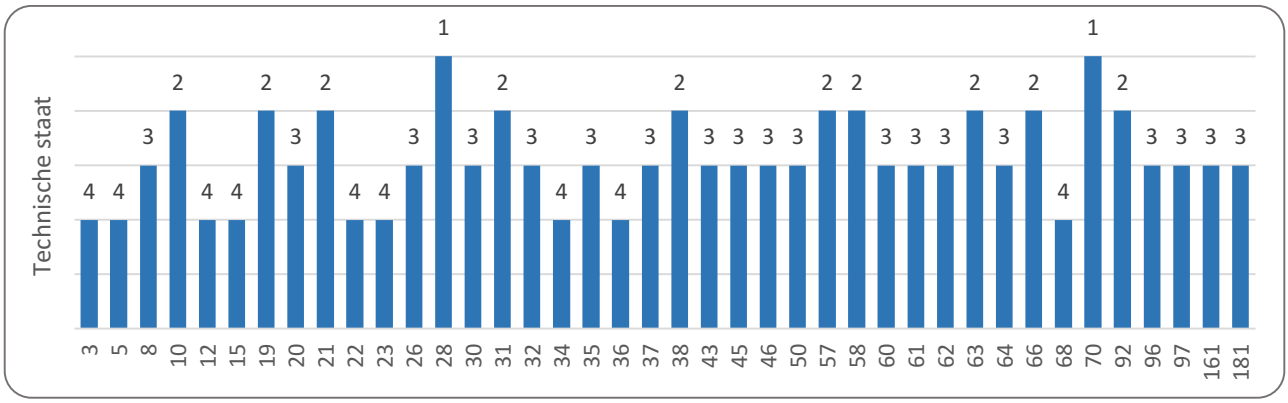
Stroomverbruik		
Totaal (MWh)	1.732	gemeten op elektra-installatie in TNW-zuid
kWh/m^2	58	BVO 30.000 m^2

Door de koppeling van TNW-Zuid en HPTC wordt TNW-Zuid gedeeltelijk verwarmd door restwarmte die geproduceerd wordt door de cyclotron (deeltjesversneller) in HPTC. De koude en warme zijde van de WKO's worden volledig gebruikt. Er wordt meer koude gevraagd; wat niet door het warmtepompsysteem kan worden geleverd, wordt door de dry-coolers aangevuld. De combinatie resulteert in een zeer efficiënt draaiend WKO-systeem, doordat de grote koelvraag van HPTC en de warmtevraag van TNW-zuid resulteert in een hoge COP (*co-efficient of performance*). De COP van de warmtepomp is nu 4,6. Er worden dus 4,6 delen nuttige warmte en 3,6 delen nuttige koude gemaakt met de toevoeging van 1 deel elektriciteit. Dit betekent een rendement van 820%.
Tegelijk draaien de droge koelers op het dak op volle kracht om ook koude te laden naar de bronnen met een temperatuur van 6,5^{o}C; dat gebeurt met een continuvermogen van bijna 1 MW. Het rendement daarvan is, inclusief het stroomverbruik voor het in de zomer weer terugpompen van dit koude water, zo'n 2.000%. Dat gebeurt met een temperatuurverschil van warme naar koude bron van 10^{o}C, dat is relatief hoog, waardoor er ook relatief weinig grondwater voor verpompt hoeft te worden. [bron: Anne Medema, CRE Energie].

Dit hoge rendement van het systeem van WKO's, warmtepompen, restwarmtegebruik en aanvullende dry-coolers laat onverlet dat, zelfs rekenende met 32% aftrek voor de energielevering aan het HPTC, het energiegebruik van TNW-zuid te hoog ligt. De keuze van het klimaatsysteem ligt daaraan ten grondslag. Tegelijk verwarmen en koelen vraagt om een hoog vermogen van het warmtepompsysteem; dat kan weliswaar efficiënt draaien, er is nochtans te veel elektriciteit voor nodig.

3.2 Technische staat van de gebouwen

Op basis van NEN 2767-1 is de huidige technische conditie bepaald van de gebouwen op de TU-campus. In paragraaf 1.2 is een het totale overzicht van de gebouwen op de campus gegeven; hierbij zijn ook de technische gebouwen zoals trafostations meegenomen. In Figuur 3.12 is de technische staat per gebouw af te lezen [bron: Excel TU Benchmark Campusgegevens 2019, Kees Kerkhoven]. Uit



Figuur 3.12 – Technische staat gebouwen [Excel TU Benchmark Campusgegevens 2019, via Kees Kerkhoven].

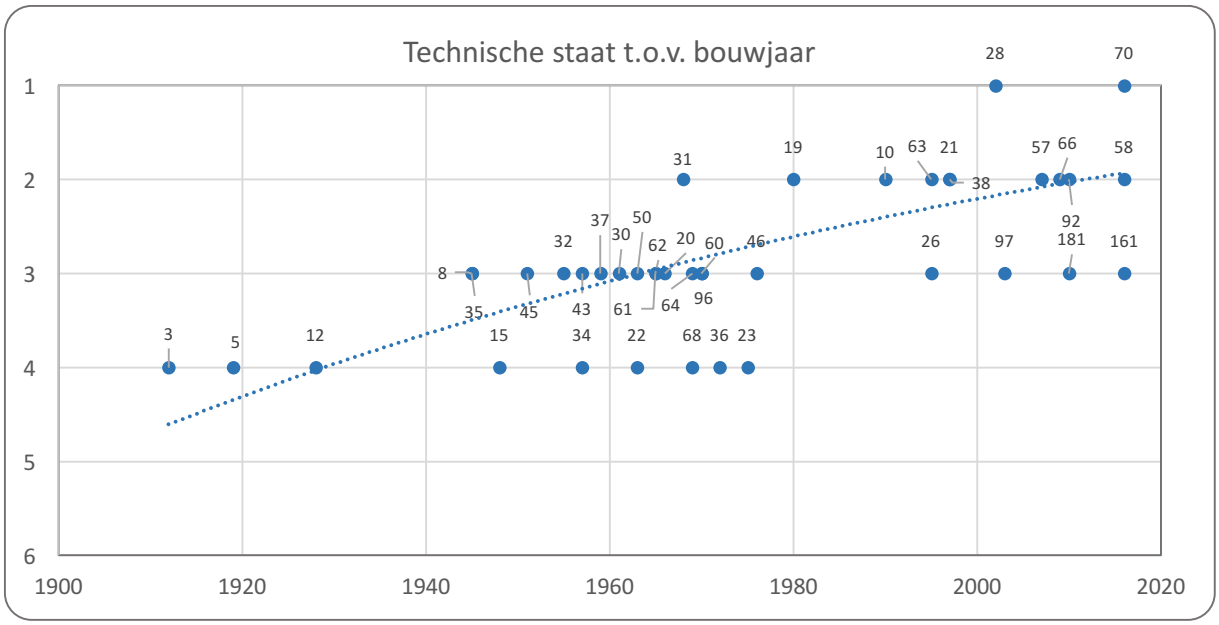
***1: Uitstekend/geen of zeer beperkte veroudering**: Ten aanzien van het totale gebrekenbeeld geldt dat bouw- en installatiedelen in een uitstekende en vakkundig uitgevoerde staat verkeren. Daarmee komen gebreken als gevolg van veroudering niet voor en functioneren de installaties storingsvrij, waardoor bedrijfszekerheid is gewaarborgd. Gebreken in de vorm van lichte mechanische beschadigingen of van esthetische aard kunnen incidenteel worden aangetroffen. Verder vinden goed uitgevoerde reparaties plaats.*

***2: Goed/beginnende veroudering**: De bouw- of installatiedelen kunnen ten aanzien van het totale gebrekenbeeld worden beoordeeld als goed; dit duidt op een goed ontwerp, goede detaillering, alsmede een gedegen uitvoering en montage. Daarmee komen gebreken aan bouw- en installatiedelen slechts incidenteel voor. Installaties functioneren, op een enkele uitzondering na, storingsvrij waardoor de bedrijfszekerheid is gewaarborgd.*

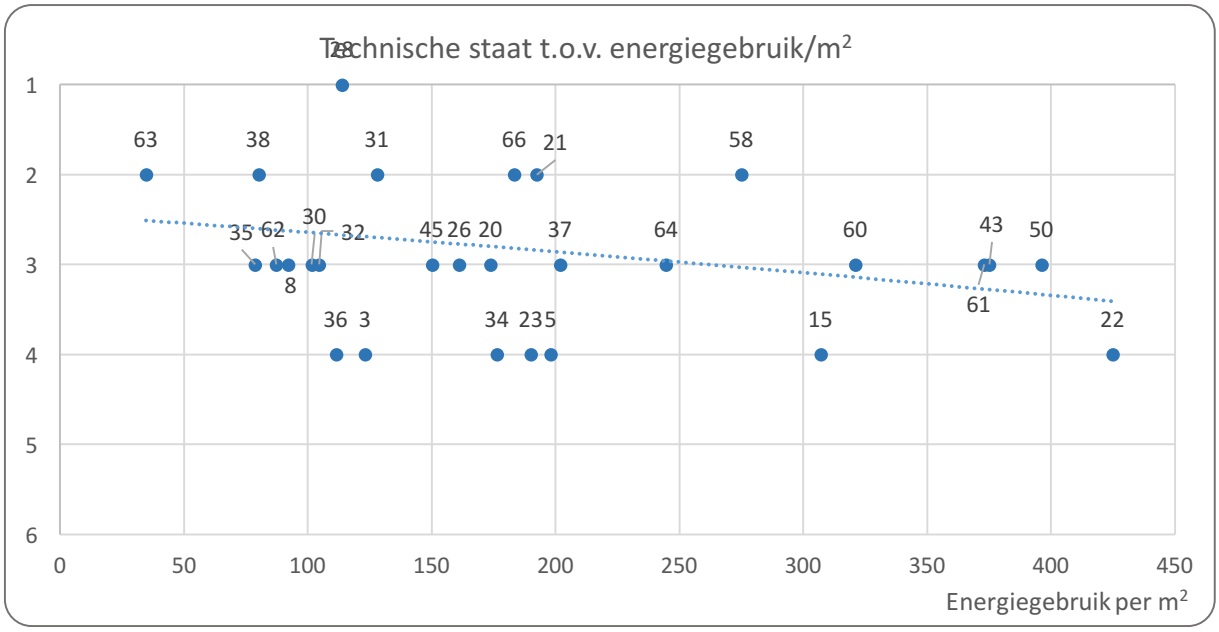
***3: Redelijk/verouderingsproces is plaatselijk op gang gekomen**: De technische staat van deze gebouwen staat als redelijk gekwalificeerd. De kwaliteit van de toegepaste materialen en/of gebreken in ontwerp, detaillering en uitvoering speelt hierin een rol van betekenis. Bouw- en installatiedelen vertonen plaatselijk gebreken, met enkele problemen met vocht en tocht als gevolg; tevens kunnen gebreken in de vorm van verwering, etc. plaatselijk of regelmatig voorkomen. Het functioneren van de installaties kan een enkele keer worden verstoord. De gebreken hebben geen invloed op het functioneren van het bouw- of installatiedeel. Het bedrijfsproces wordt niet geschaad. Regelmatig kunnen goed uitgevoerde en duurzame reparaties worden vastgesteld, maar ook kunnen plaatselijk reparaties met minder geschikte middelen zijn uitgevoerd.*

***4: Matig/het verouderingsproces heeft het bouw of installatiedeel regelmatig in zijn greep**: Bouw- en installatiedelen vertonen regelmatig gebreken aan afwerklagen, materialen, onderdelen en constructies. Dit kan mede worden veroorzaakt door fouten in materiaalkeuze, ontwerp en/of uitvoering. Plaatselijk kunnen storingen in het functioneren van het bouw- of installatiedeel optreden. Overlast en onbruikbaarheid van bouw- en installatiedelen (bijvoorbeeld als gevolg van lekkages) kunnen zich enkele keren per jaar voordoen. Het aantal storingen bij de installaties neemt toe. De bedrijfszekerheid van installaties is matig gewaarborgd, waardoor er bedrijfsonderbrekingen kunnen voorkomen.*

Figuur 3.13 en 3.14 blijkt dat de technische staat een directe link heeft met het bouwjaar. Er is ook een link te vinden met het energiegebruik (per vierkante meter). Alhoewel deze minder duidelijk is: enkele gebouwen in goede technische staat hebben een hoger gebruik dan gebouwen in een redelijk of matige conditie.



Figuur 3.13 – Technische staat ten opzichte van het bouwjaar van de TU-gebouwen.



Figuur 3.14 - Technische staat ten opzichte van het energiegebruik per vierkante meter.

4 Huidige CO_2-voetafdruk van TU Delft

Ter bepaling van de CO_2-voetafdruk van de TU Delft worden gerekend met kooldioxide-equivalenten (CO_2-eq). Met deze eenheid wordt aangegeven wat de bijdrage is van de emissies aan de opwarming van de aarde, de 'Global Warming Potential' (GWP). In deze eenheid worden de emissies van drie broeikasgassen meegenomen: kooldioxide (CO_2), methaan (CH_4) en stikstofoxide (N_2O), ook wel lachgas genoemd. Dit wordt gedaan door ze te vermenigvuldigen met de respectievelijke 100-jaars Global Warming Potential:

GWP_{100} potentie: CO_2: GWP_{100} = 1; CH_4: GWP_{100} = 34; N_2O: GWP_{100} = 298 [IPCC, 2013]

In hoofdstuk 1 is aangeven hoe de CO_2-voetafdruk van de TU Delft campus is verdeeld over de drie scopes. Daar wordt in § 4.8.3 op teruggekomen.

Dit hoofdstuk is tot stand gekomen met speciale inbreng van Dr. Riccardo Pulselli, internationaal milieu- en CO_2-beoordelingsexpert.

4.1 Energie

Voor het bepalen van de CO_2-emissies op de TU Delft campus door energiegebruik in de gebouwde omgeving wordt de CO_2 voor warmteproductie en elektriciteit in kaart gebracht.

4.1.1 Elektriciteit

Als eerste stap is de campusspecifieke emissiefactor (EF) van de elektriciteitsmix bepaald.
De elektriciteit op de TU Delft campus is afkomstig van geïmporteerde windenergie, PV-panelen op de daken van de campusgebouwen en als output van de WKK-installaties (aardgas).

De emissiefactoren van geïmporteerde elektriciteit zijn gebaseerd op LCA-waarden (Life Cycle Analysis). Daarmee wordt de impact van infrastructuur, onderhoud en ontmanteling van het netwerk en de productie meegenomen in de emissiefactor [Pulselli et al., 2019]. Daardoor resulteert ook het gebruik van zonne-energie en windenergie in CO_2-emissies.
Rendementsverliezen zijn ook opgenomen in de EF. De WKK-installatie gebruikt aardgas voor de productie van elektriciteit; de hierbij vrijkomende warmte wordt opgevangen en gebruikt als warmtebron. Daarmee wordt de geproduceerde warmte als bijproduct gezien (meegenomen in EF) en daardoor worden de CO_2-emissies van de WKK volledig aan elektriciteit toegekend. De emissiefactor van de TU Delft bedraagt hiermee 0,101 kg CO_2-eq per kWh (zie Tabel 4.1].

Tabel 4.1: Emissiefactor (EF) in tCO_2-eq per kWh en de CO_2-emissies van de elektriciteitsmix van de TU Delft in 2018 [bron EF: Pulselli et al., 2019]

Elektriciteitsmix	EF	MWh	tCO_2-eq
Windenergie (scope 2)	0,010	64.142	641
PV campus (scope 3)	0,032	1.041	33
Aardgas (scope 1)	0,443	17.392	7.705
TOTAAL	**0,101**	**82.575**	**8.379**

4.1.2 Warmte

Er zijn twee aparte systemen bekend op de TU-campus: het warmtenet en de gebouwen die individueel worden verwarmd. Emissies door de warmteproductie vallen beide onder scope 1.
Voor het warmtenetwerk is de emissiefactor (EF) van de warmtemix bepaald, bestaande uit warmte van de WKK (bijproduct, emissies toegerekend aan elektriciteit) en aardgas.

Tabel 4.2: Emissiefactor (EF) in ton CO_2-eq per kWh en de CO_2-emissies van de warmtemix van het warmtenetwerk van TU Delft in 2018 [bron EF: Pulselli, et al., 2019]

Mix warmtenetwerk	EF	MWh	tCO_2-eq
WKK	0,000	19.239	0
Aardgas (ketels)	0,252	28.102	7.073
TOTAAL	**0,149**	**47.341**	**7.073**

Tabel 4.3: Emissiefactor (EF) in ton CO_2-eq per kWh en de CO_2-emissies door individuele ketels op aardgas [bron EF: Pulselli, et al., 2019]

Individuele ketels	EF	MWh	tCO_2-eq
Aardgas (ketels)	0,252	4.981	6.288

4.2 Water

Net als bij elektriciteit is de emissiefactor van tapwater gebaseerd op LCA-waarden. De energie-input voor rioolwaterzuivering en waterdistributie is daarmee opgenomen in de emissiefactor [Pulselli et al., 2019].
Door de gebouwfuncties (kantoor, onderwijs, onderzoek) wordt er op de campus maar een beperkte hoeveelheid water gebruikt; daardoor is de CO_2-impact van het watergebruik zeer beperkt.

Tabel 4.4: CO_2-uitstoot ten gevolge van watergebruik op de TU Delft campus in 2018 op basis van de emissiefactor (EF) in ton CO_2-eq per m^3 [bron EF: Pulselli, et al., 2019]

Water	EF	m^3	tCO_2-eq
Tapwater	0,585	167.116	98

4.3 Vervoer: woon-werkverkeer

4.3.1 Werknemers

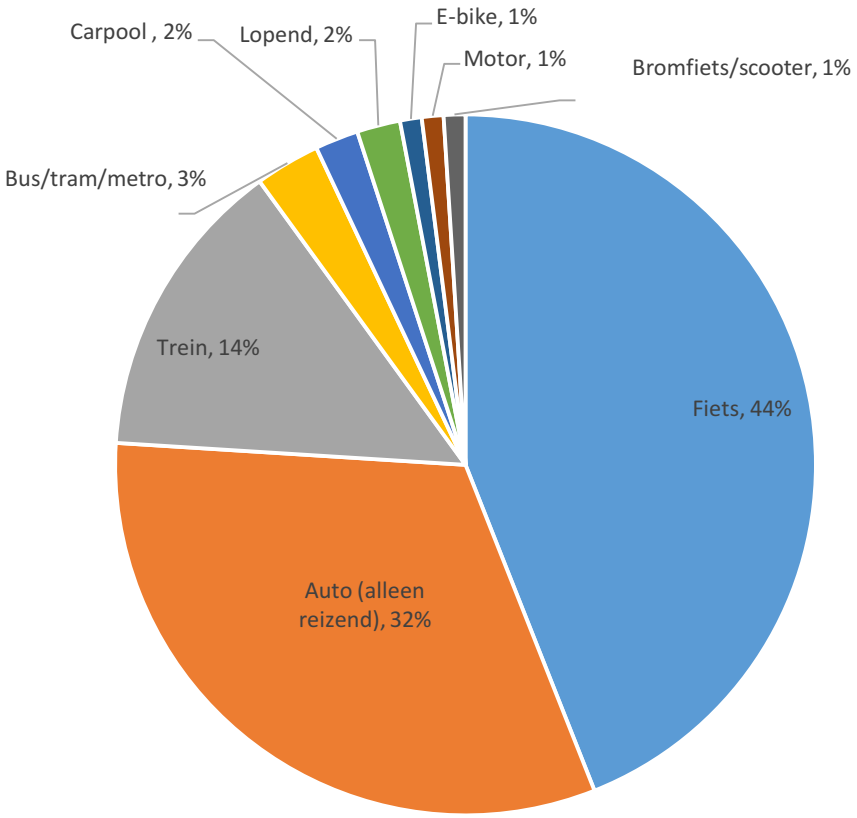
In 2018 bedroeg het totaalaantal fte voor medewerkers 5.421 [TU Delft, 2018]; per fte wordt er 10 keer per week, 44 weken per jaar gereisd naar de universiteit.

- Wonend in Delft: 2.168 fte (40%)
- Gemiddelde afstand per fte: 15,6 km (hemelsbreed)

[bron: Excel 'HCM CRE onderzoek woonplaats medewerker'. Via Svenja Kerkhof, 28-01-2019]

Aanwezige gegevens zijn de modaliteitskeuzes in percentages van het aantal werknemers (Figuur 4.1) en de woonplaatsen van de werknemers. Hierdoor is aangenomen dat alle werknemers wonende in Delft en tot 6 km afstand (hemelsbreed) zich te voet of op de fiets verplaatsen; dit komt

percentueel bijna overeen. Voor de afstanden groter dan 6 km is een gemiddelde afstand tot de TU genomen; deze wordt gebruikt als gemiddelde reisafstand voor de overige vervoersmiddelen.



Figuur 4.1: Modaliteitskeuze TU-personeel [van de Klugt et al. 2018].

In Nederland wordt met name gereden in een dieselauto, daarnaast enkele benzine- en LPG-voertuigen. In Tabel 4.5 is de emissiefactor voor het autoverkeer in Nederland bepaald. Deze emissiefactor is tevens aangehouden voor het autoverkeer naar de TU Delft.

Tabel 4.5: Bepaling van de emissiefactor voor autogebruik

Autogebruik NL	EF	% (2016)	EF
Diesel	0,169	81%	
Benzine	0,172	17%	
LPG	0,133	2%	
			0,168

Tabel 4.6: Emissies door het woon-werkverkeer van werknemers in 2018

Woon-werk (werknemers)	EF	km	tCO_2-eq
Autogebruik	0,168	20.029.771	3.374
Openbaar vervoer	0,021	187.779	4
TOTAAL	**-**	**20.217.550**	**3.378**

4.3.2 Studenten

Behalve de woonplaatsen van de studenten zijn er geen gegevens bekend over het gekozen vervoersmiddel van de studenten. In 2017 woonde 54% van de studenten in Delft; waarschijnlijk verplaatst deze groep zich met name met de fiets. 84% woont in Zuid-Holland (incl. Delft); naar inschatting komen de studenten vooral met het openbaar vervoer naar Delft. Dezelfde percentages zijn aangehouden voor 2018.

- Wonend in Delft: 13.340 (54%)
- Gemiddelde afstand: 16 km (hemelsbreed)
- Gemiddelde afstand buiten Delft: 34,5 km (hemelsbreed)

[bron: Excel Adressen BSc- & MSc-studenten, via Ted Barendse TU Delft, 29-01-2019].

Op basis van diverse parkeeronderzoeken is aangenomen dat 2,3% van de studenten met de auto naar de TU reist [bron: Cathelijn Dijk-Koekkoek]. In deze studie is aangenomen dat deze studenten niet in Delft wonen (gemiddelde afstand: 34,5 km).

Tabel 4.7: Emissies door het woon-werkverkeer van studenten in 2017

Woon-werk (studenten)	EF	km	tCO_2-eq
Autogebruik	0,168	9.408.879	1.585

4.4 Vluchten (zakelijk)

Het personeel van de TU Delft boekt de zakelijke vluchten via BCD Travel, dat het boeken van zogenaamde reissegmenten bijhoudt. Een overzicht uit de rapportage van 2018 [BCD Travel, 2018]:

- Aantal geboekte segmenten 11.829 #
- Gemiddelde afstand per segment 2.818 km
- Totaalaantal gevlogen km 33.332.774 km
- Gemiddeld aantal km per fte 6.149 km

Middels emissies per persoonkilometer kan de totale CO_2-emissie worden bepaald.

Tabel 4.8: Emissies van vluchten, op basis van het gevlogen aantal km [BCD Travel 2018]

Vluchten	EF	km	tCO_2-eq
Lokale vluchten	0,297	-	-
Continentale vluchten	0,200	-	-
Intercontinentale vluchten	0,147	-	-
TOTAAL	**0,200**	**33.332.774**	**6.667**

4.5 Voedsel

Een gemiddeld Nederlands dieet resulteert in 1575 kg CO_2-eq per jaar [bron: Andy van den Dobbelsteen, analyse CO_2-emissies in Nederland]. In deze studie is aangenomen dat op een werkdag gemiddeld 50% van het dieet tijdens het werk wordt genuttigd. De CO_2-emissies bevatten al het eten dat tijdens werkduur genuttigd wordt, dus ook de maaltijden en snacks die van huis worden meegebracht. Er zijn geen specifieke data beschikbaar van de TU-situatie.

Tabel 4.9: CO_2-emissie door inname voedsel op universiteit

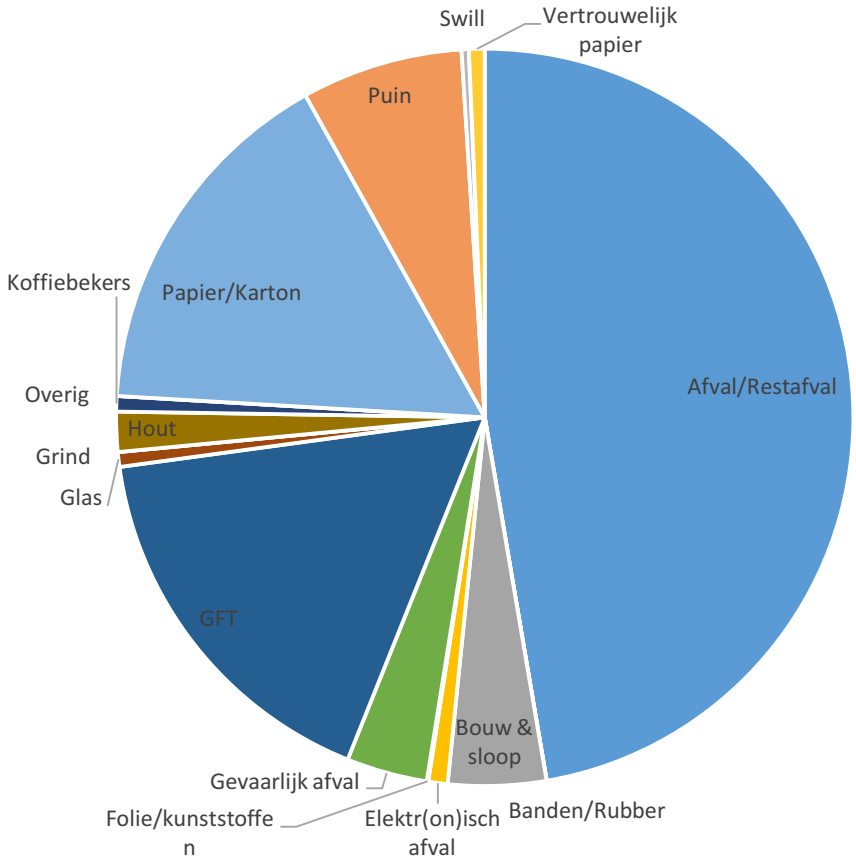
Voedsel	EF	Dagen op TU *fte	tCO_2-eq
Werknemers	2,157	1.208.883	2.608
Studenten	2,157	5.187.630	11.192
TOTAAL	**2,157**	**6.396.513***	**13.800**

** 5421 fte werknemers, 223 dagen – 1 week ziekteverzuim, 223 dagen per jaar per fte*
24.703 studenten, 42 weken per jaar, 210 dagen per jaar per student

In de toekomst zouden specifieke data van de cateraar moeten worden toegevoegd, zodat inzichtelijk wordt welk deel van de CO_2-emissies direct beïnvloed kan worden door verandering in het aanbod, en welk deel van de CO_2-emissies beïnvloed moet worden door het bewust maken van de werknemers en studenten van de invloed van het dieet op CO_2-emissies.

4.6 Afval

In totaal werd er in 2018 2.788.757 kg afval geproduceerd op de TU-campus [Renewi, 2019]. Dit komt neer op 514 kg per fte medewerker en 92,6 kg per persoon (fte medewerkers en studenten).
Bijna de helft van al het afval is momenteel restafval (47%). Gescheiden inzamelen van onder andere GFT-afval vindt momenteel nauwelijks plaats. Het huidige aandeel GFT bestaat bijna volledig uit groenafval (snoeiafval, onderhoud groenvoorziening). *Swill* (biomassa van catering) wordt enkel apart ingezameld bij het Sportcentrum en de Aula.



Figuur 4.2: Verdeling afvalstoffen TU Delft campus [Renewi, 2019]

Tabel 4.10: Afvalstromen op de campus [Renewi, 2019]

Afvalstroom	TNO gecertificeerd	Gewicht	Grondstof	Groene energie	Grijze energie	Afval
Afval/Restafval	ja	1.319.391	65.970	474.981	488.175	290.266
Banden/Rubber	nee	89				89*
Bouw & sloop	ja	119.790	59.895	39.531	19.166	1.198
Elektr(on)isch afval	ja	23.515	17.871	5.173	470	0
Folie/kunststoffen	ja	1.814	1.778	0	18	18
Gevaarlijk afval	nee	98.953	0	0	0	98.953*
GFT	ja	468.100	421.290	23.405	23.405	0
Glas	ja	18.029	17.668	180	180	0
Hout	ja	48.860	3.909	44.951	0	0
Koffiebekers	nee	18.848	18.848*	0	0	0
Papier/Karton	ja	445.875	352.241	35.670	35.670	22.294
Puin	ja	197.400	195.426	0	0	1.974
Swill	ja	8.863	8.331	266	266	0
Vertrouwelijk papier	ja	19.230	16.153	3.077	0	0
TOTAAL		**2.788.757**	**1.179.380**	**627.234**	**567.350**	**414.792**

** Voor de niet TNO gecertificeerde bronnen is de onderverdeling gebaseerd op:*
- *Banden/rubber: aanname/slechtste scenario*
- *Gevaarlijk afval: aanname afval (landfill)*
- *Koffiebekers: http://www.nederlandmvo.nl/duurzaamheid/van-koffiebeker-naar-toiletpapier-en-handdoekpapier*

Aan de hand van bovenstaande rapportage kunnen voor de afvalstromen – onderverdeeld in grondstof (gerecycled), groene energie, grijze energie en afval – de CO_2-emissies worden bepaald.

Tabel 4.11: Emissies door afval [bron EF: Pulselli et al., 2019]

Afval	EF	kg	tCO_2-eq
% Afval *(waste-to-landfill)*	1,160	414.792	481
% Grijze energie *(waste-to-energy)*	0,652	567.350	370
% Groene energie *(organic-reuse)*	0,091	627.234	57
% Gerecycled	0,000	1.179.380	0
TOTAAL	**-**	**2.788.757**	**908**

4.7 CO_2-opname

Dit betreft de huidige opname van CO_2 door groen op de campus. In totaal heeft de campus 548.653 m^2 aan planten en gras; daarnaast staan er 2568 bomen verspreid over het gebied [BTL 2016]. Op basis van dit aanwezige groen kan de CO_2-opname (compensatie van eigen uitstoot) worden berekend aan de hand van Tabel 4.12.

Tabel 4.12: Opname CO_2 door groen [EF: Pulselli et al. 2019]

Opname	Ecologische voetafdruk	m^2	tCO_2-eq
Bomen	- 1,350	25.680	- 35
Gras en kruiden	- 0,330	499.192	- 165
Planten	- 0,330	49.461	- 16
TOTAAL		**574.333**	**- 216**

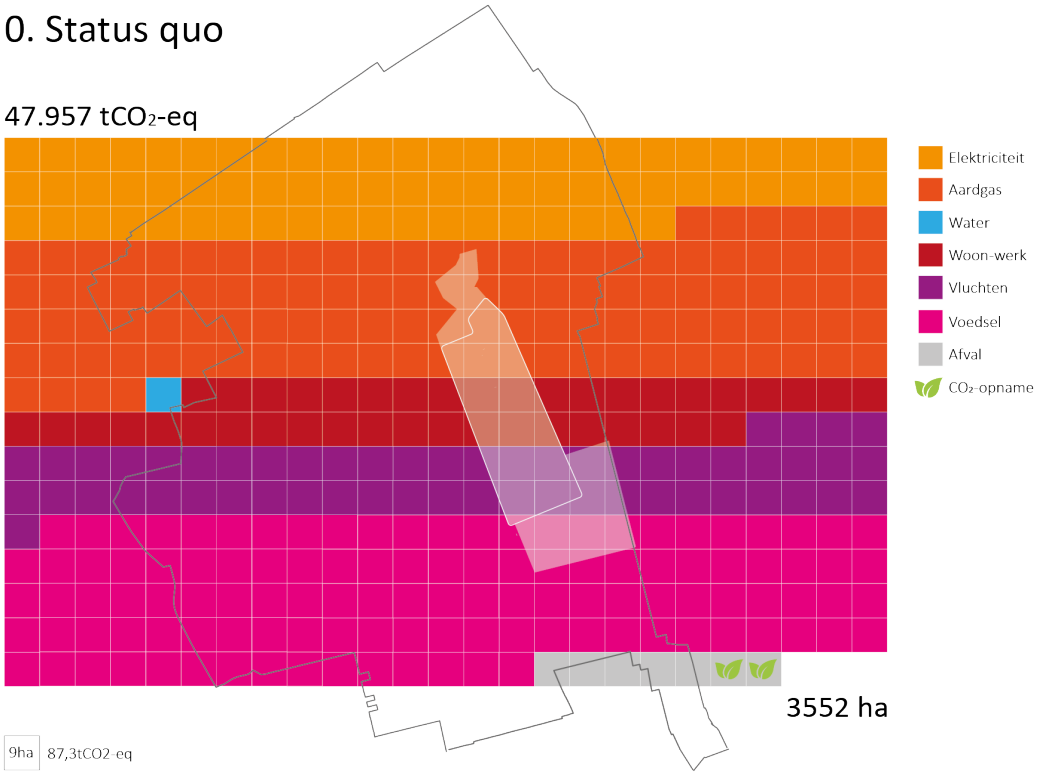
4.8 CO_2-voetafdruk van de campus

4.8.1 Totale voetafdruk van de TU Delft

In totaal bedraagt de CO_2-voetafdruk van de TU Delft 49.098 ton CO_2-eq (Tabel 4.14). Een bosareaal van 3637 hectare is nodig om de CO_2-emissies te compenseren (Figuur 4.3).

Tabel 4.13: Berekening van de CO_2-voetafdruk van de TU Delft in 2018

CO_2-voetafdruk (Status Quo)				**TU Delft campus**		
Bronnen	EF	EF eenheid	Eenheid	Data	t CO_2-eq	%
Elektriciteit			**MWh_e**	**82.575**	**8.379**	**17,5%**
Verlichting	0,101	kg CO_2-eq/kWh	MWh_e	24.773	2.514	5,2%
Koeling	0,101	kg CO_2-eq/kWh	MWh_e	9.083	922	1,9%
Overig	0,101	kg CO_2-eq/kWh	MWh_e	48.719	4.944	10,4%
Aardgas			**MWh_{th}**	**72.322**	**13.361**	**27,9%**
Individuele ketels	0,252	kg CO_2-eq/kWh	MWh_{th}	24.981	6.288	13,1%
Warmtenetwerk	0,149	kg CO_2-eq/kWh	MWh_{th}	47.341	7.073	14,7%
Water			**m^3**	**167.116**	**98**	**0,2%**
m^3 per jaar	0,585	t CO_2-eq/m^3	m^3	167.116	98	0,2%
Mobiliteit			**km**	**29.626.429**	**4.963**	**10,3%**
Autogebruik	0,168	t CO_2-eq/km	km	20.029.771	3.374	7,0%
OV (werknemers)	0,021	t CO_2-eq/km	km	187.779	4	0,0%
Autogebruik (studenten)	0,168	t CO_2-eq/km	km	9.408.879	1.585	3,3%
Vluchten			**km**	**33.332.774**	**6.667**	**13,9%**
Vluchten	0,200	t CO_2-eq/km	km	33.332.774	6.667	13,9%
Voedsel			**dagen*fte**	**6.396.513**	**13.797**	**28,8%**
Gemiddeld dieet, op TU	0,00216	t CO_2-eq/p/dag	dagen*fte	6.396.513	13.797	28,8%
Afval			**kg**	**2.788.756**	**908**	**1,9%**
% gestort afval	1,160	t CO_2-eq/kg	kg	414.792	481	1,0%
% afvalenergie	0,652	t CO_2-eq/kg	kg	567.350	370	0,8%
% organisch/hergebruik	0,091	t CO_2-eq/kg	kg	627.234	57	0,1%
% gerecycled	0,000	t CO_2-eq/kg	kg	1.179.380	0	0,0%
CO_2-opname			**m^2**	**574.333**	**-216**	**-0,4%**
Bomen	- 1,350	kg CO_2-eq/m^2	m^2	25.680	-35	
Gras	-0,330	kg CO_2-eq/m^2	m^2	499.192	-165	
Planten	-0,330	kg CO_2-eq/m^2	m^2	49.461	-16	
TOTAAL					**47.957**	**100%**



Figuur 4.3: Grafische weergave van het benodigde oppervlak aan bosareaal (3.552 ha) om de uitstoot van CO_2-equivalenten te compenseren, grafisch weergegeven op dezelfde schaal als de kaart van Delft (gemeentegrens donkergrijs omlijnd) en het terrein van de TU Delft (het witte vlak), en verdeeld over de categorieën elektriciteit en aardgas (voor gebouwen), watergebruik, woon-werkverkeer, zakelijke vluchten, voedsel, afvalbeheer en CO_2-opname door groen op de campus

Kosten

Op dit moment hoeft de TU Delft nog niet te betalen voor zijn CO2-uitstoot, maar het ligt in de lijn der verwachting dat dit vanuit het internationale en nationale klimaatbeleid in de nabije toekomst zal veranderen. Ter indicatie: als de TU Delft over zijn uitstoot belasting zou moeten betalen tegen de toen geldende handelsprijs per ton, ongeveer 25 euro, zou ze hiervoor jaarlijks 1,2 miljoen euro in de begroting moeten opnemen. Zou dit gebeuren tegen de door de VN geadviseerde prijs, 130 euro per ton, dan gaat het om 6,2 miljoen. Jaarlijks. Onze inschatting is dat van dit bedrag veel investeringen gedaan kunnen worden die de CO_2-uitstoot en energierekening verlagen.

4.8.2 CO_2-voetafdruk per persoon

Met 5.421 fte aan medewerkers en 24.703 studenten (waarbij we rekenen met 1 fte per student) bedraagt de voetafdruk per fte voor 2018: 1.630 kg CO_2-eq.
In 2017 bedroeg het aantal medewerkers 5.189 fte en waren er 23.461 studenten, 4,5% toename in personeel en 5,3% in studenten. Daarom zou een totale groei in CO_2-uitstoot op zich te billijken zijn geweest, maar in vergelijking met 2017 is de totale CO_2-uitstoot van de TU-campus iets gedaald; de voetafdruk is per fte met 9% afgenomen (berekening 2017: zie Bijlage 4).

Tabel 4.14: CO_2-voetafdruk per persoon 2018 t.o.v. 2017

Bronnen	2018		2017	
	kg CO_2-eq / fte	%	kg CO_2-eq / fte	%
Elektriciteit	278	17,5%	326	18,6%
Aardgas	444	27,9%	487	927,%
Water	3	0,2%	4	0,2%
Woon-werkverkeer	165	10,3%	213	12,2%
Vluchten	221	13,9%	243	13,9%
Voedsel	458	28,8%	458	26,2%
Afval	30	1,9%	24	1,4%
CO_2-opname	-7	-0,5%	-8	-0,4%
TOTAAL	**1592**	**100%**	**1747**	**100%**

Elektriciteitsgebruik

Terwijl het elektriciteitsgebruik in 2018 met 108 procent is toegenomen is de CO_2-emissie gedaald van 9.330 ton CO_2-eq naar 8.379 ton CO_2-eq. Dit is te verklaren door afname van het aandeel energie dat is opgewekt door de WKK-installatie, daarmee is het aandeel windenergie toegenomen en daalt de EF voor de elektriciteitsmix van de TU Delft van 0,122 in 2017 naar 0,101 in 2018. Samen met de groei in personeel en studenten verklaart dit de grote daling in de CO_2-uitstoot per fte.

Tabel 4.15 – Vergelijking energiegebruik 2018 t.o.v. 2017

	Energielevering TU Delft [MWh]			
	Elektriciteit	*Gas*	*Warmte*	*Totaal*
TU-gebouwen	108%	96%	96%	102%
Derden	104%	115%	143%	112%
TOTAAL	**108%**	**102%**	**99%**	**104%**

De toename van het elektriciteitsgebruik kan, naast het introduceren van nieuwe laboratoria zoals QuTech, ook deels worden verklaard door de benodigde extra koeling en een flinke toename in het aantal koeldagen [KWA 2017; KWA 2018].

Tabel 4.16 – Gewogen aantal graaddagen en aantal koeldagen 2017 en 2018 [KWA 2017; KWA 2018].

	2017	*2018*	*2018 t.o.v. 2017*
Gewogen graaddagen	*2586,9*	*2604*	*101%*
Koeldagen	*85,7*	*178,8*	*209%*

Mobiliteit & vluchten

Alhoewel gerekend is met dezelfde *modal split* is de CO_2-uitstoot per fte gedaald in 2018. Dit is te verklaren doordat het aantal studenten sneller toeneemt dan het aantal werknemers; de studenten hebben een relatief lage uitstoot in woon-werkverkeer.
In 2018 is er in totaal 1,4 miljoen kilometer minder gevlogen dan 2017.

Afval

Er is een flinke stijging van de hoeveelheid geproduceerd afval. De afvalproductie op de TU varieert sterk per jaar. In vergelijking tot 2017 is er in 2018 een grote toename in de hoeveelheid papier en karton en restafval.

4.8.3 CO_2-uitstoot verdeeld naar scopes

Tabel 4.17: CO_2-emissies veroorzaakt door bronnen uit scope 1

Scope 1	tCO_2-eq
Warmtekrachtkoppeling, WKC	7.705
Ketels, WKC	7.073
Individuele ketels	6.288
TOTAAL	**21.066**

De emissies van scope 1 (Tabel 4.17) worden veroorzaakt door de productie van elektriciteit en warmte op de campus (WKK en ketels), de TU Delft heeft directe invloed op deze emissies.
Onder scope 2 vallen de emissies die vrijkomen bij de productie van ingekochte elektriciteit, in het geval van de TU Delft windenergie (Tabel 4.18). Deze emissies worden geproduceerd tijdens de levensduur van de windturbines (productie, onderhoud, afbraak).

Tabel 4.18: CO_2-emissies veroorzaakt door bronnen uit scope 2

Scope 2	tCO_2-eq
Ingekochte windenergie	641

De invloed van de TU Delft op laatste categorie (scope 3) is minder direct. Deze emissies ontstaan door bronnen die eigendom zijn van een ander bedrijf (Tabel 4.19). Echter zijn deze wel ten dienste van de TU Delft, en de universiteit bepaalt zelf wat ze inkoopt en dus ook wat ze uitstoot.

Tabel 4.19: CO_2-emissies veroorzaakt door bronnen uit scope 3

Scope 3	tCO_2-eq
PV-panelen (productie en onderhoud)	33
Drinkwatergebruik en afvalwaterzuivering	98
Woon-werkverkeer	4.965
Zakelijke vluchten (enkel medewerkers)	6.667
Voedselconsumptie	13.797
Afvalverwerking	908
TOTAAL	**26.468**

5 Andere factoren die de klimaatneutraliteit beïnvloeden

Dit hoofdstuk is gebaseerd op Bijlage 5, waar een uitgebreider analyse van de TU-campus te vinden is. Hier worden alleen de aspecten belicht die een invloed hebben op de CO_2-voetafdruk van de TU Delft.

- Op energiegebied ligt een verbinding van de TU Delft met de rest van de stad Delft voor de hand, want ze is er onlosmakelijk mee verbonden en bij de ambitie om CO_2-neutraal te worden zullen stad en universiteit elkaar moeten aanvullen.
- De campus van de TU Delft heeft veel ruimte, waardoor grote afstanden moeten worden afgelegd en het ruimtegebruik en het energiesysteem inefficiënter zijn dan ze zouden kunnen zijn. Gebouwen functioneren hierdoor ook als eilandjes, waardoor potenties van bijvoorbeeld programmatische afstemming en energie-uitwisseling lastig kunnen worden benut.
- De gebouwen langs de Mekelas zijn eerder een opeenvolging van losse functies dan een verbonden ecosysteem, en dat is jammer, want een integraal ecosysteem is zoveel efficiënter in zijn gebruik van grondstoffen dan separate elementen. Winkels, paviljoens, werkplaatsen, horeca en terrasjes zouden de energiebalans van de TU-wijk kunnen verbeteren.
- Behalve X aan het eind van de centrale campus zijn er geen functies in het Mekelpark die de levendigheid over een hele dag stimuleren. Energetisch is dit ongunstig, want er is een enorme piek in het energiegebruik overdag, en die zakt ’s avonds enorm in, waardoor alles op piekvermogen moet worden berekend, terwijl er ’s nachts onbenutte capaciteit is.
- Het Mekelpark toont niet waar de TU Delft zich mee bezighoudt, welke innovaties hier zijn bedacht, of wat de huidige stand der wetenschap, Dreamteams of spin-offbedrijven is. In de as zou de TU Delft juist het nieuwe elan van een duurzame, toonaangevende campus kunnen laten zien, met zichtbare elementen van het energiesysteem.
- Er is momenteel een gebrek aan gemeenschappelijke infrastructuur. Behoudens het warmtenet van de TU Delft, centraal aangestuurd vanuit de warmtekrachtcentrale (WKC), is er geen onderlinge verbinding tussen de gebouwen, en voor het beheer van energie-, water-, materiaal-, voedsel- en hun afvalstromen is dat een gemiste kans. Elk gebouw lost het zelf op (of niet) en ook al wordt tegelijk gekoeld en verwarmd, er vindt geen afstemming plaats. Met de enorme dakoppervlakken ligt een gemeenschappelijke regenwateropvang, –opslag en -gebruik voor de hand, maar dat gebeurt nu niet.

In het volgende hoofdstuk, in deel C, zullen we bespreken wat de mogelijke oplossingen zijn voor de hierboven geconstateerde karakteristieken.

DEEL C: OPLOSSINGEN

6 Een duurzaam toekomstbeeld van de TU-campus

Begin april 2019 werd een workshop gehouden met inbreng van Prof. Greg Keeffe, Dr. Riccardo Pulselli, de twee auteurs dezes en aanwezigen van CRE. Een volledige weergave van de uitkomsten is te vinden in Bijlage 6. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de belangrijkste uitkomsten die een positieve invloed kunnen uitoefenen op de CO_2-voetafdruk van de TU Delft.

6.1 Een sterkere verbinding met stad en regio

Een sterke verbinding van de TU Delft met de stad Delft, door concentratie van primaire functies in Campus-Centrum heeft energetische voordelen, omdat daarmee

- het meeste woon-werkverkeer kort blijft;
- verschillende vormen van vraag en aanbod beter kunnen worden afgestemd;
- een stadsnetwerk gemakkelijker kan worden gedeeld;
- functies in TU-Zuid individueel of middels lokale mininetwerken zelfvoorzienend kunnen zijn.

6.2 Afstoten en nieuwbouwen of renoveren

Het renoveren of transformeren van gebouwen in TU-Noord naar onderwijsgebouwen zou studentenverkeer over de campus reduceren en de noodzaak voor nieuwbouw, weliswaar energieneutraal maar vanwege alle nieuwe bouwmaterialen ook een bron van CO_2-uitstoot die over de levensduur moet worden afgeschreven (zie paragraaf 8.2), voorkomen. Het blijkt dat nieuwbouw voor relatief goed functionerende gebouwen drie keer zoveel CO_2-uitstoot betekent dan renovatie.

Uit ons onderzoek blijkt dat de gebouwen 8 (Bouwkunde), 30 (CRE o.a.) en 31 (TBM) onder de energetisch best presterende gebouwen vallen en dus per gebruiker en vierkante meter lage energiekosten hebben, hetgeen afstoten, ook op langere termijn, onlogisch maakt. Renovatie van deze gebouwen in de toekomst kan ze energieneutraal maken onder lagere investeringskosten.

6.3 De Mekelweg als wetenschappelijke winkelstraat

Energetisch is het interessant als andere functies, met een ander energiepatroon, gaan mengen met de bestaande faculteiten, waardoor energie-uitwisseling mogelijk is, en daarmee een betere balans. Andere verbindingen die kunnen worden gelegd, zijn die met water en groen. De TU Delft heeft nu geen link met de Schie, terwijl dat niet een onlogische zou zijn, ook in verband met de mogelijkheid van aquathermie en innovatief vervoer over water. Het Mekelpark is daarnaast een logische verbindingsas met groene vlekken, beginnend met het park tegenover de faculteit Bouwkunde, via de Jaffabegraafplaats, met een sprong naar het groen rondom X en The Green Village en vervolgens de polder van TU-Zuid. In de toekomst zal wellicht meer aanplant van bomen, en toepassing van groen op en aan gebouwen nodig zijn, waarmee de TU-campus een groen-blauwe infrastructuur zou bieden die goed is voor de leefkwaliteit, biodiversiteit en CO_2-boekhouding.

6.4 Ecosysteem en living lab – City of the Future

In hoofdstuk 5 constateerden we dat de TU Delft nu niet echt als een geïntegreerd, gebalanceerd ecosysteem functioneert, en de suggesties bij 6.2 gaven al een richting aan waarmee dat wel zo zou zijn.
De campus van de TU Delft zou de weergave van de stad van de toekomst kunnen zijn als daar meer gedemonstreerd werd waar het met nieuwe technieken en ontwerpen in die toekomst naartoe gaat – de TU Delft als stad die 10 jaar vooruitloopt op andere steden. Consequentie van deze *City of the Future* is dat er een betere mix van functies aangeboden zou moeten worden, en dat is ook wat energetisch verstandig is, weer vanwege het meer in balans brengen van vraag en aanbod door het koppelen van verschillende energiepatronen en andere gebruikstijden.
Voor de bewoners van deze stad (studenten, staf, bezoekers van de TU Delft) betekent dit dat ze onderdeel zijn van deze toekomstgerichte gemeenschap en dat ze mede onderdeel van het experiment zijn. Daarbij zou verdichting in de stedenbouwkundige indeling leiden tot beter loopbare afstanden.

Wat ook past bij de campus als living lab is de duurzame productie van voedsel. Op de TU-campus kan geëxperimenteerd worden met nieuwe geïntegreerde vormen van voedselproductie. Denk aan kassen op daken (met PV-technologie te combineren), maar ook aan gevels. Verschillende groenten en fruit zijn immers gebaat bij hoge groeimogelijkheden, en gebouwen zijn in Nederland nog steeds gebaat bij een extra huid. Het Prêt-à-Logerhuis op The Green Village, prijswinnende inzending van de TU Delft voor de Solar Decathlon Europe 2014, liet zien dat een glazen huid over een gebouw vele voordelen met zich mee kan brengen: warmtebuffering, warmtecollector, elektriciteitsopwekking, gebruiksruimte-uitbreiding, en ook verbouwing van voedsel. Bij een kas tegen een hoger gebouw (denk aan CiTG, het oude TNW en – waarom niet? – EWI) bestaan als die mogelijkheden ook, met extra veel potentie voor effectieve teelt van gewassen (die in de zomer zonwering vormen).

6.5 Naar 100% duurzaam transport

De TU-campus zou een hub voor duurzaam transport kunnen zijn, gericht op verbeterde vervoersvormen op menskracht, vervoer op elektriciteit, waterstof en biobrandstoffen, inclusief nieuwe laad- en tankfaciliteiten daarvoor, Hyperloop en andere innovatieve vormen van transport, duurzame (onder)watervoertuigen, en duurzaam luchtverkeer.
Onderdeel van een duurzame campus zou allereerst het vermijden van autoverkeer moeten zijn. Het concentreren van resterende autostromen op een beperkt aantal gecontroleerde parkeerplekken zou – in combinatie met de loopbaarheid van de campus en het hierna genoemde openbaar vervoer – tot minder autoverkeer en minder hinder of schadelijke uitstoot op de campus zelf leiden. Dat daarbij een groot deel gericht moet zijn op elektrische en waterstofauto's spreekt voor zich.

Het fietsverkeer, dat nu vaak voor overlast en gevaar zorgt, zou – zoals door CRE nu ook wordt uitgewerkt – over meer snelle routes dan alleen de Mekelweg moeten worden gevoerd, waarmee het Mekelpark meer een voetgangersgebied wordt, met als alternatief vervoer vooral de tram.
Het zou de TU Delft niet misstaan als de tram die over de campus rijdt op batterijen rijdt die op de campus zelf worden opgeladen middels duurzame stroom. In dat geval zijn bovenleidingen niet nodig, wat de ruimtelijke kwaliteit en veiligheid ten goede komt. Ook is een onbemande tram een optie. Hierover zou de TU Delft met de HTM (of andere exploitant van de tramlijn) in overleg kunnen treden.

Dat geldt ook voor de optie om de tramlijn, die nu zal eindigen op een dood punt, door te trekken naar Rotterdam-The Hague Airport, dat nu geen directe OV-verbinding heeft met Delft en de TU Delft. De tram of andere vorm van duurzaam transport ontwikkeld aan de TU Delft kan dit oplossen: Hyperloop, onbemande elektrische voertuigen, snel pad voor (elektrische) fietsen.
Natuurlijk past een directe verbinding alleen bij een duurzame vorm van luchtvaart in de toekomst, een onderwerp waar juist aan de TU Delft onderzoek naar gedaan wordt. TU Delft kan eraan bijdragen dat vanaf Rotterdam-The Hague Airport[6] enkel nog duurzaam luchtverkeer vertrekt, elektrisch of op bio- of e-brandstoffen, waarmee de luchthaven ook extra ruimte zou krijgen voor meer vluchten, want op dit moment zit ze aan haar taks.

6.6 De slimme, duurzame energiecampus

Als hoofdonderdeel van deze studie kan vanuit een stedenbouwkundig oogpunt een toekomstvisie op het duurzame energiesysteem van de campus natuurlijk niet ontbreken. In hoofdstuk 7 gaan we hier dieper en technischer op in.

Allereerst zou het uitgangspunt van de duurzame energiecampus een gesloten koolstofsysteem van warmte en elektriciteit moeten zijn. De warmtekrachtcentrale (WKC) die nu uit aardgas warmte en elektriciteit produceert zou moeten overschakelen op geothermie en andere vormen van hernieuwbare energie, waarbij de CO_2 in dat geval moet worden afgevangen om vervolgens nuttig gebruikt te kunnen worden, bijvoorbeeld voor algenproductie, die vervolgens weer de bron kunnen zijn voor biobrandstoffen die in de WKC worden verstookt. Algen hebben licht, een beetje warmte en nutriënten nodig, en alle drie zijn op de TU-campus voorhanden.

Daarnaast zou de TU-campus infrastructuur moeten hebben waarmee warmte en koude uitgewisseld kan worden. Op kleine schaal kan dit met mininetwerken die vooral bij de nieuwbouwprojecten in TU-Zuid en TU-centraal kunnen worden aangelegd, terwijl het oudere deel op de centrale warmtevoorziening van een dan duurzame WKC aangesloten wordt. Slimme uitwisseling, gekoppeld aan seizoensopslag, van warmte en koude, is een must voor een universiteit die zich richt op duurzame, innovatieve energiesystemen. Deze warmte-koudenetten maken het mogelijk dat gebouwen met te veel warmte gelijktijdig gebouwen met een tekort daaraan kunnen voeden, en vice versa. Daarmee wordt de totale energievraag evenals pieken en dalen in vraag en aanbod gereduceerd.
Seizoensverschillen kunnen hiermee niet helemaal overbrugd worden, waarvoor dan seizoensopslag nodig is. Warmte-koudeopslag (WKO) is een bekende *proven technology*, en in de toekomst zullen vanuit het onderzoek aan de TU Delft nog vele andere vormen van energieopslag benut kunnen worden.
Daarmee ontstaat een slim en duurzaam uitwisselings- en opslagsysteem dat aansluit bij de ambities en activiteiten binnen de TU Delft.

[6] Gezien de ligging is TU Delft Airport geen verkeerde benaming, zeker als de universiteit in grote mate bijdraagt aan duurzaam luchtverkeer daarvandaan.

6.7 De duurzame campus, dat zijn wij zelf – onze *Terms of Engagement*

Zoals erover gepraat en geschreven wordt, is de energieneutrale, circulaire, duurzame campus vooral een opgave voor CRE en het CvB. Dat is niet eerlijk en ook niet realistisch, want iedere gebruiker van de campus bepaalt mede de ecologische voetafdruk van de TU Delft, en dus is voor een volledig CO_2-neutrale, circulaire, duurzame TU-campus een volledig CO_2-neutrale, circulaire, duurzame gebruiker van die TU-campus nodig. Het gaat allemaal om ons als mens.

Hier werken en studeren betekent dat je de missie van de TU Delft onderschrijft, inclusief die van duurzaamheid. Niet alleen in wat je studeert, doceert, onderzoekt en ondersteunt, maar ook in gedrag op de campus en daarbuiten.

In dit kader is het niet vreemd om de hele TU-gemeenschap te vragen zogenoemde *Terms of Engagement* te tekenen, een document waarin men belooft zich ethisch te gedragen: inclusief qua cultuur, sekse, geaardheid en levensovertuiging, gericht op het verbeteren van de maatschappij en de wereld, en dus ook duurzaam.
Om duurzaam gedrag te ondersteunen, zou de TU Delft veel beter inzichtelijk en zichtbaar kunnen maken wat (bijvoorbeeld) de CO_2-emissies van haar gebouwen zijn, *real time*, maar ook van haar catering, water- en grondstoffengebruik en afvalbeheer. En ook van de mobiliteit – woon-werkverkeer en zakelijk vervoer – van haar medewerkers. Zien = bewust worden en de keuze hebben zich ernaar te gedragen.
Passend binnen de *open online* ambities kan de TU Delft voor studenten en medewerkers kan de TU Delft een invulbaar en aanpasbaar webpagina aanmaken voor iemands persoonlijke CO_2-prestatie, waarmee op termijn een nauwkeuriger meting van de totale CO_2-uitstoot wordt verkregen. Hierover kan jaarlijks worden gerapporteerd.

Op speelse een eenvoudige wijze kan ook duurzaam gedrag in de hand worden gewerkt door middel van CO_2-competities of -prestatieladders van faculteiten en afdelingen, met prijzen voor (of alleen eervolle vermeldingen van) topprestaties.

Het zal wellicht lastig zijn om studenten en staf die er allang zitten te overtuigen van deze nieuwe duurzame wind door de TU-campus, maar met elke nieuw instromende student, PhD en medewerker kunnen de Terms of Engagement worden ingebed in het gedachtegoed. Te beginnen in de Owee en bij de opening van het academische jaar. Dit diesjaar van de TU Delft is gericht op Climate Action, en dit kan bij elke gelegenheid worden gecommuniceerd.

7 Energiepotenties

7.1 Potenties duurzame elektriciteit

7.1.1 Fotovoltaïsche (PV) energie

Momenteel wordt 1 procent van de elektriciteitsvraag geleverd door PV op de campus. Als onderdeel van het hoofddoel om in 2030 CO_2-neutraal te zijn is als subdoel gesteld dat de helft van de energievraag zal moeten worden geproduceerd op het TU-terrein. PV zal hierin de hoofdrol moeten rol spelen.

PV op daken

Om de productie te vergroten en tevens te zorgen voor een gelijk verdeelaanbod over de dag zal op de daken de focus niet alleen moeten liggen op zuidgeoriënteerde PV, maar zal ook west- en oostgeoriënteerde PV moeten worden toegepast. In figuur 7.1 en 7.2 is een studie gedaan naar de PV-potentie op de daken (m^2).
Veel daken hebben momenteel obstakels, waardoor het dakpotentieel niet maximaal benut kan worden. Wanneer in een gebouw de installaties worden vervangen zal de regel moeten zijn dat installaties zo min mogelijk terug op het dak worden geplaatst, om ruimte te creëren voor extra PV-panelen.
Naast standaard PV-panelen op het dak zal ook meer gedacht moeten worden aan semi-transparante PV (bijvoorbeeld voor de vele dakramen bij IO) of PV-geïntegreerde dakleien, zoals voor Bouwkunde.

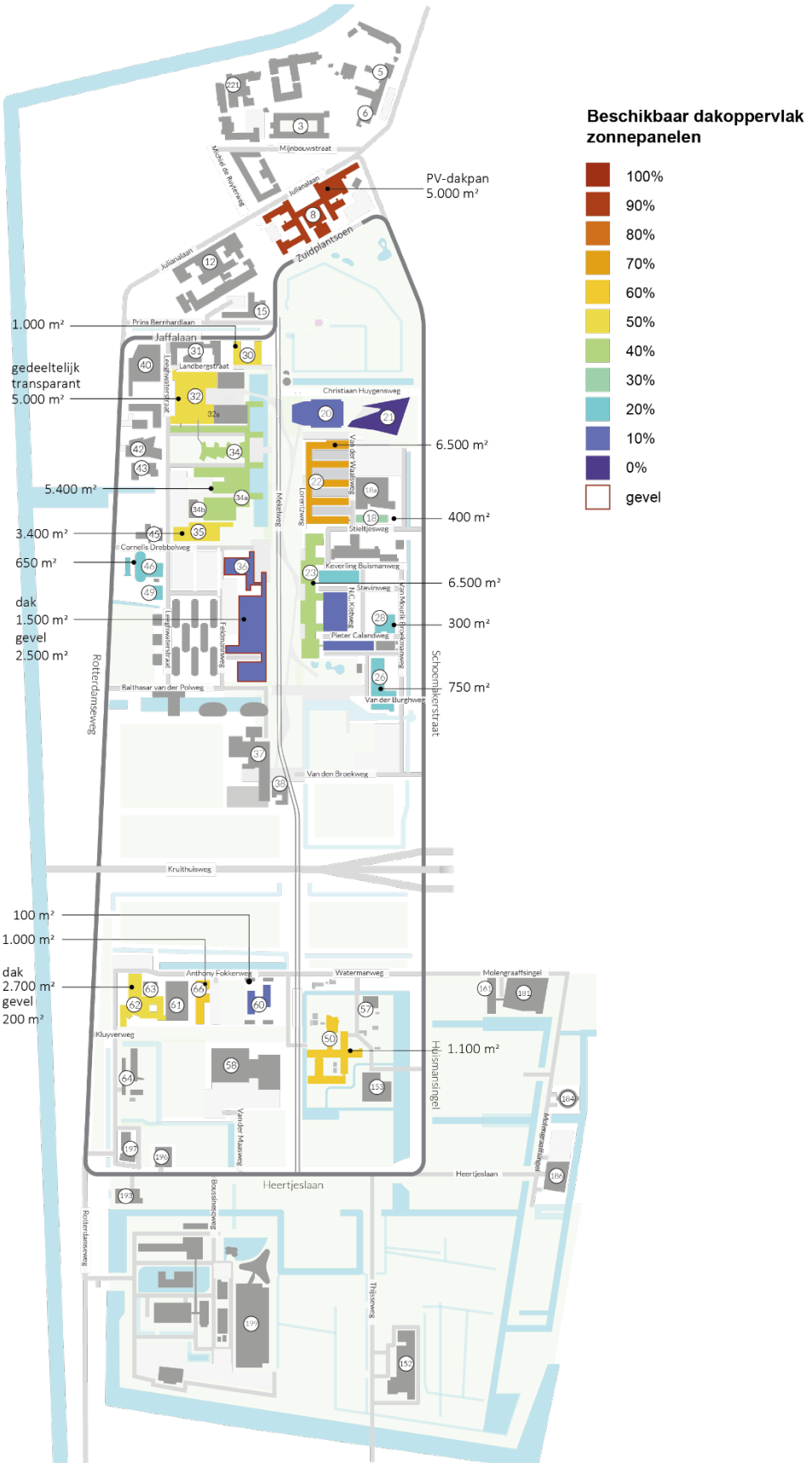
PV op gevels

Daarnaast is het verstandig, om waar mogelijk verticale, geïntegreerde PV toe te passen op oost-, zuid- en westgevels. Daarmee wordt een meer gelijkmatige productie van elektriciteit gerealiseerd over de dag (ochtend, middag en namiddag) en over het jaar (zomer, winter en tussenseizoenen), zodat minder beroep hoeft te worden gedaan op hulpcapaciteit in zonnestroomarme perioden, terwijl ’s zomers en midden op de dak minder overproductie ontstaat. Dit zal opslagcapaciteit beperkt houden.
Met name hoge gebouwen op de TU-campus zijn hiervoor geschikt. Met de daken en gevels van de EWI-toren, EWI ESP-lab en L&R is er een globale inschatting van 44.000 m^2 (exclusief bestaande panelen), goed voor grofweg 3-4 GWh.

Overige PV op de campus

Naast PV op gebouwen kan er PV ook worden geïmplementeerd op het campusterrein. Enkele voorbeelden zijn met PV overdekte parkeergarages en fietspaden, PV-velden op lege kavels in Campus-Zuid, drijvende PV op waterpartijen en akoestische PV-schermen langs de Kruithuisweg. Zolang stukken polder in TU-zuid niet benut zijn, valt het te overwegen daar tijdelijk zonnepaneelvelden van te maken[7], ook al is de businesscase daarvan lastig vanwege de lage inkoopprijs van windenergie. Overigens kunnen zonnepanelen prima gecombineerd worden met een groen functie, als het om lage begroeiing gaat, en met ecologische functies.

[7] Een andere mogelijkheid die al genoemd is, is de aanleg van algenzuivering, waarmee afvalwater en CO_2 van de TU Delft kan worden omgevormd tot biodiesel.

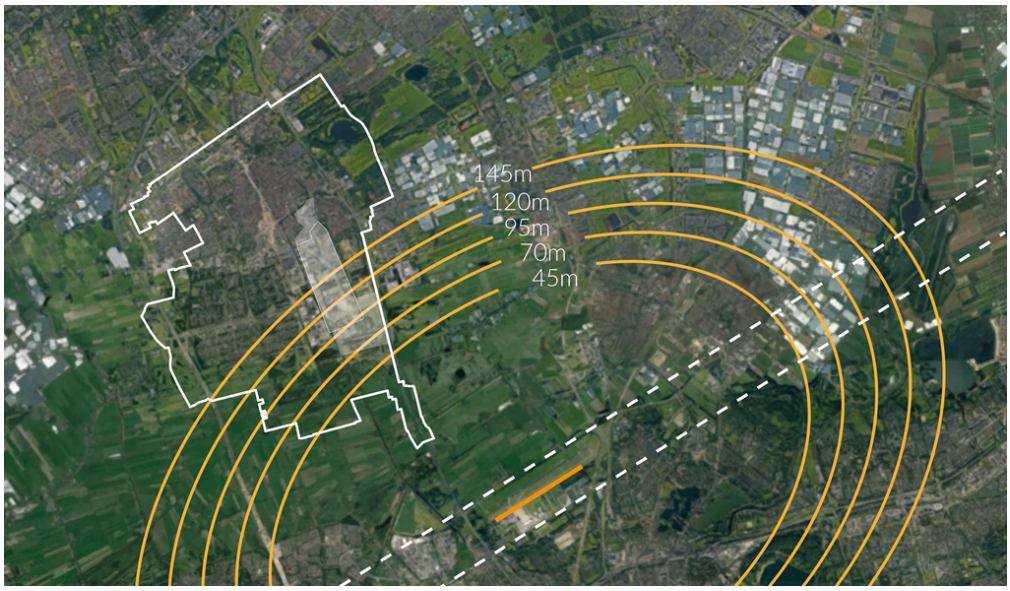


Figuur 7.1 Beschikbaar oppervlak TU-gebouwen (daken en gevels L&R, EWI-toren en EWI ESP lab) ca. 44.000 m², exclusief het bestaande met PV bedekte oppervlak

Figuur 7.2: Zonnepotentie van daken binnen de campus van de TU Delft [https://detailshera.zonatlas.nl/prov_zuid_holland/]

7.1.2 Wind

Vanwege de hoge bebouwingsdichtheid en de omliggende woonwijken is de potentie voor het plaatsen van windturbines op het campusterrein minimaal. Voor het oosten van het Technopolis-terrein, langs de A13, is door DelftWindPower onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om windturbines te plaatsen.
Deze drie turbines zouden echter relatief klein zijn door hoogtebeperkingen van Rotterdam-The Hague Airport (Figuur 7.3). Jaarlijks zou de totale opwekking tussen de 6,1 en 10,7 GWh liggen, 10-15 procent van de totale elektriciteitsvraag van de TU [DelftWindPower]. Hoewel de huidige funderings-technieken trillingen kunnen minimaliseren, is in 2017 het voorstel door de Provincie Zuid-Holland afgewezen in verband met trillingen [Provincie Zuid-Holland, 2017].



Figuur 7.3: Bouwhoogtebeperkingen door landingsbaan Rotterdam Airport

7.2 Potenties thermische energie

7.2.1 Zonthermisch

Naast elektriciteit van de zon, is het ook mogelijk warmte op te wekken met zonnecollectoren en PVT-panelen (PV-thermisch: panelen die zowel stroom als warmte opwekken). De energieopbrengst hiervan is te vinden in tabel 7.1.

Tabel 7.1: Energieopbrengst per m^2 (HT =hoge temperatuur, boven 70°C; MT = middentemperatuur, 40-70°C; LT = lage temperatuur, 40°C maximaal)

PV - elektriciteit	*108 kWh/m^2*
Zonthermisch (HT-MT)	*250 kWh/m^2*
PVT (MT-LT)	*400 kWh/m^2*

7.2.2 Geothermie

Momenteel liggen er vergevorderde plannen voor de realisatie van een geothermiebron op de TU-campus. Naast het gebruik van de geothermiebron als duurzame warmtevoorziening voor de gebouwen op de campus, wordt de bron ook gezien als een Living Lab waarin onderzoek naar geothermie wordt gedaan om daarmee een volgende stap in ontwikkeling te maken. In het lab

gemaakte modellen en theorieën kunnen daadwerkelijk gecontroleerd worden met een werkende geothermieput.

Hoewel er nog vele onzekerheden zijn, streeft de TU naar de realisatie van de geothermiebron door het ontwikkelen van een businesscase. In de huidige businesscase worden de volgende uitgangspunten gebruikt, waarin de ontwikkeling van het geothermienetwerk is ingedeeld in twee fasen.

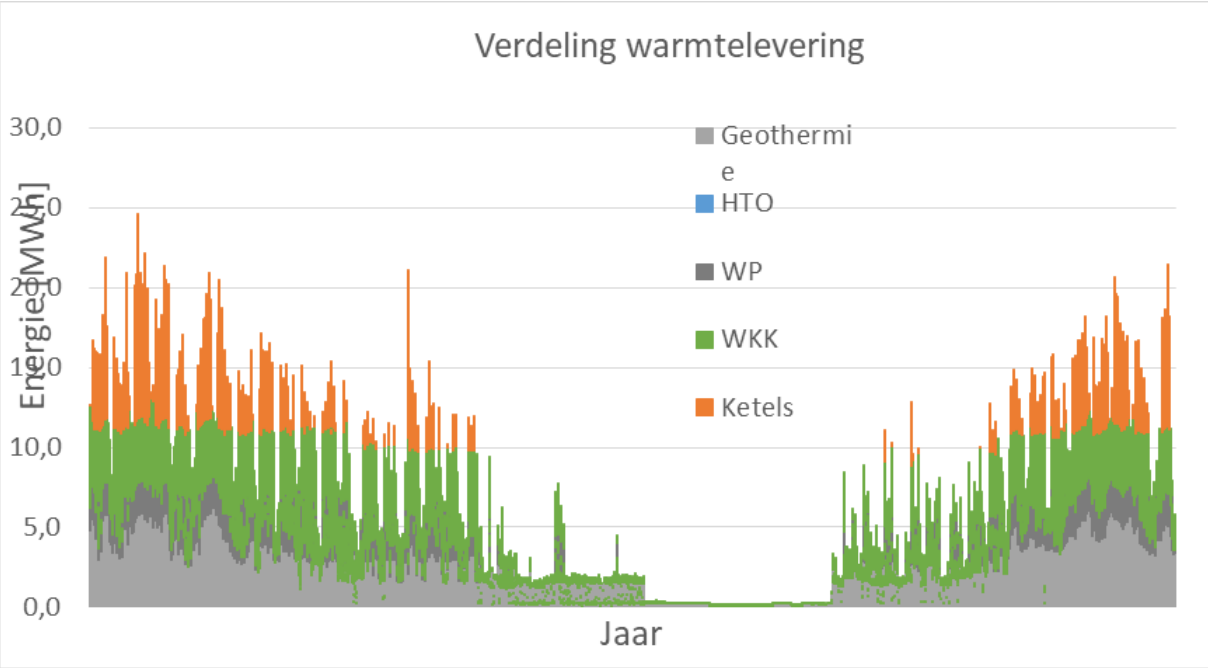
Fase 1: Warmtelevering aan de campus
De geothermiebron zal het huidige warmtenetwerk voeden vanuit de huidige WKC. In de WKC wordt de warmte van de bron gemengd met warmte van de WKK-installatie, die gevoed wordt door met geothermie vrijkomend formatiegas[8].
Doordat de aanvoertemperatuur van de geothermiebron rond de 75°C ligt (maximaal 73°C na warmtewisselaar), is renovatie van aangesloten gebouwen nodig. Naast de gebouwen aangesloten op het huidige warmtenet zullen gebouw 26 (Bouwcampus) en 28 (Wiskunde) worden aangesloten; momenteel worden deze gebouwen verwarmd met individuele gasketels. Doordat de warmtelevering van de geothermiebron groter is dan de afname door de TU zullen ook de DUWO-woningen aan de Leeghwaterstraat en Balthasar van der Polweg worden aangesloten.

Fase 2: Retourleiding naar de Voorhof
In fase 1 is de retourtemperatuur naar de geothermiebron ca. 55°C (ΔT = 20°C). Voor geothermie geldt: hoe groter de ΔT, hoe hoger de efficiëntie van het totale systeem. Om de retourtemperatuur verder te verlagen worden in fase 2 de corporatiewoningen in Voorhof-Oost aangesloten op de retourleiding van de campus.

Zomersituatie
Ter voorkoming van verstoppingen in de warmtewisselaar moet de geothermiebron het hele jaar door draaien. Dit betekent dat er gedurende de zomer een grote hoeveelheid warmte beschikbaar is. Er zal gezocht moeten worden naar de mogelijkheden om deze warmte te gebruiken tijdens te zomer. Hoge-temperatuur seizoensopslag (HTO) zal een gewenste oplossing zijn. Daarvoor zal een combinatie met HTO voor opslaan van zomerrestwarmte van geothermie en de WKK-installatie (bijvangst gas) gewenst zijn, waarnaar nader onderzoek wordt uitgevoerd. Mede hierdoor zijn de DUWO-gebouwen (warmtapwatervraag in de zomer) in de huidige businesscase aangesloten op het geothermiebron.

CO_2-reductie
In de businesscase wordt uitgegaan van een warmtelevering van ongeveer 60% van de totale warmtevraag op de campus. Wanneer ervan wordt uitgegaan dat de resterende warmtevraag met gasketels wordt opgewekt, levert het gebruik van geothermie een CO_2/gasbesparing op van 75% (exclusief emissies door gebruik formatiegas) en een besparing van 51% wanneer gebruik wordt gemaakt van formatiegas. Echter levert de geothermiebron niet alleen energie op: het onttrekken van warmte kost ook energie. In totaal vraagt de bron 3 MW, wat resulteert in een elektriciteitsvraag van 26.280 MWh per jaar, 33% van de totale huidige elektriciteitsvraag.
[bron: persoonlijk contact met Sander Snelleman, CRE Energie]

[8] In de omgeving van de TU Delft leidt de winning van grondwater tot de bijvangst van gas: ca. 1 m^3 gas per m^3 water. Daardoor is ongeveer 20% van de bovengehaalde energie fossiel en 80% aardwarmte. Dit gas moet gescheiden worden van het water om verstopping van de warmtewisselaar te voorkomen. Als we dit gas willen gebruiken moeten we het eerst upgraden tot de kwaliteit van het gas in het netwerk; dit gas kan dan gebruikt worden in een WKK-installatie.



Figuur 7.4: Gemiddeld genomen voorziet de geothermiebron en formatiegas, WKK, 60 procent van de totale warmtevraag [bron: Sander Snelleman, CRE Energie].

Fase 3: levering aan de Delftse binnenstad
Geen onderdeel van de uitgevoerde businesscasestudie, maar een logische vervolgstap zodra panden in de TU-wijk zijn gerenoveerd, waardoor ze geen hoge temperatuurvraag (meer dan 70°C) meer hoeven te hebben, is het omkeren van de levering aan de stad Delft: aanvoer naar delen van de stad die lastig te renoveren zijn – de Delftse binnenstad – en retour langs de inmiddels gerenoveerde TU-panden. Daarmee zou de vraag naar het potentieel uit de geothermiebron toenemen en kan de TU Delft bijdragen aan het verduurzamen van de stad Delft, waar zij onderdeel van is. Zodra de verwarmingsvraag vanuit TU-panden geen hoge temperaturen meer vereisen zou het immers vanuit de optiek van een CO_2-neutrale stad Delft onlogisch zijn die hoge temperaturen te blijven leveren aan de TU Delft, terwijl men in de binnenstad (en mogelijk ook andere wijken) moeite heeft om van het aardgas af te komen.
Dit kan als stap 3 in de fasering worden uitgevoerd, nadat de TU Delft zijn eigen renovatie en nieuwbouwprogramma heeft uitgevoerd.

7.2.3 Biomassa

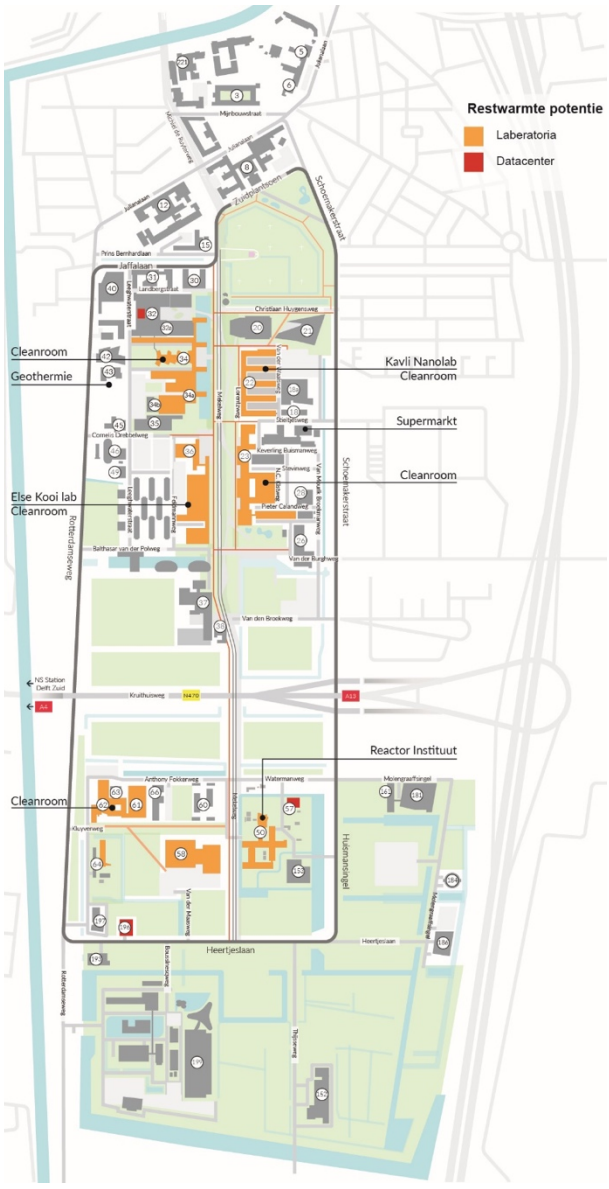
De potentie van energie uit biomassa, houtachtig of vergistbaar, is relatief laag binnen de grenzen van de campus. Momenteel zou er 830 MWh energie kunnen worden geproduceerd door het gebruik van groenafval door onderhoud van de groenvoorziening op de campus, gebruik van hout en *swill* (organisch horeca-afval), zie Tabel 7.2. Een extra 256 MWh zou kunnen worden geproduceerd wanneer in de toekomst ook het GFT-afval op de campus wordt gescheiden. Figuur 7.5 geeft de locaties aan waar met name een grote hoeveelheid GFT-afval (voedselresten) aanwezig is.

Naast het gebruik van afval zouden ook er in het teken van Living Labs ook geëxperimenteerd kunnen worden met andere vormen van biomassa, zoals algenproductie.

Tabel 7.2: Potentie biomassa van beschikbaar afval [Renewi 2019; van Gansewinkel 2018; van Gansewinkel 2017; van Gansewinkel 2016]

Afvalsoort	Hoeveelheid gem '15-'18 [ton]*[1]			Energiepotentie [MWh]		
	Houtachtig	Vergistbaar	Totaal	Houtachtig	Vergistbaar	Totaal
Groen afval (GFT)*[2]	96,0	192,1	384,2	506,9	122,7	629,6
Hout (pellets, deuren, etc.)	38,0	0,0	76,0	200,6	0,0	200,6
Swill	0,0	8,9	8,9	0,0	5,7	5,7
TOTAAL	**133,1**	**200,9**	**467,1**	**702,4**	**128,4**	**830,8**
GFT bij scheiding*[3]	0,0	401,1	401,1	0,0	256,3	256,3

**[1] Afvalaanbod varieert per jaar, daarvoor is gewerkt met het gemiddelde van de afgelopen 4 jaar; *[2] GFT bestaat volledig uit groenafval (zie: paragraaf 4.6); *[3] Potentie door scheiden (36% van het restafval is organisch, zie paragraaf 4.6)*



Figuur 7.5 (links): locaties met een hoge potentie voor de scheiding van GFT-afval
Figuur 7.6 (rechts): functies met restwarmtepotentie

7.2.4 Restwarmtepotenties

Op de campus zijn diverse onderzoeks- en procesfuncties aanwezig met een hoge energievraag (vooral elektriciteit), die gedurende het gehele jaar restwarmte produceren. In figuur 7.6 zijn de grote laboratoria, *cleanrooms*, datacenters en de kernreactor aangegeven. Voor deze functies is een lage-temperatuur restwarmtepotentie.
Het Else Kooi Laboratorium heeft een zeer hoog energiegebruik en is momenteel in slechte staat. Zware renovatie of sloop en nieuwbouw van het laboratorium zou daarmee nodig zijn, wat ook een potentie oplevert om het gebouw zo te ontwikkelen dat warmte kan worden uitgewisseld met andere, nabijgelegen functies. Ook voor andere bestaande en nieuw te bouwen cleanrooms zal de potentie voor energie-uitwisseling met andere functies moeten worden meegenomen.
Tevens bevinden zich op de campus drie datacenters, twee van de TU en een van de Datacenter Group. De datacenters gebruiken het gehele jaar door koeling en produceren daarmee een constante hoeveelheid lage-temperatuur restwarmte. De restwarmtepotentie in MWh_{th} is bijna gelijk aan de totale elektriciteitsvraag in MWh_{el}.
Voor de datacenters 32dc (IO) en 57 (RID) resulteert dit de volgende restwarmtepotenties:

- IO (32dc): 1.920 MWh/jaar
- RID (57): 2.200 MWh/jaar

7.2.5 Aquathermie

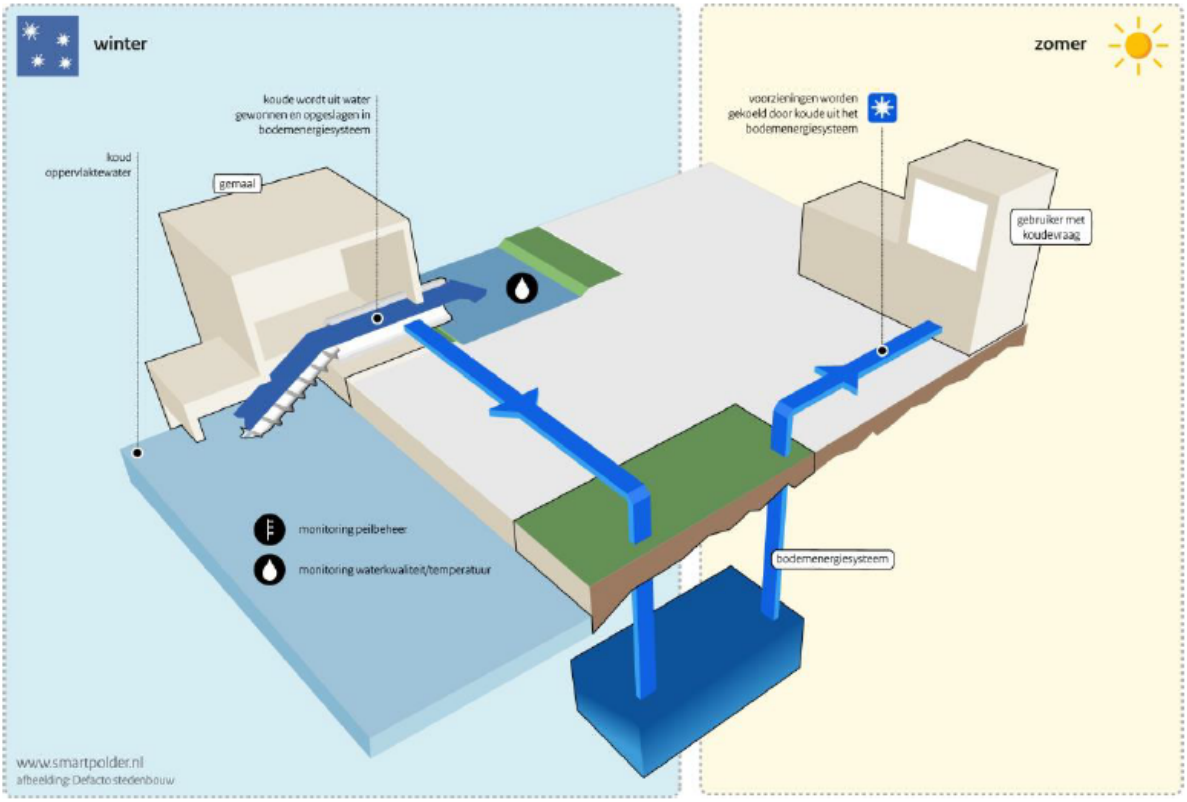
Op de campus zijn diverse potenties voor Aquathermie aanwezig: oppervlaktewater van de Schie, poldergemaal Zuidpolder en de rioolgemalen aan de Watermanweg en het Zuidplantsoen.

Thermische energie uit oppervlaktewater (TEO)

Hieronder vallen de Schie en het poldergemaal. Doordat de temperatuur van het oppervlaktewater tegengesteld is aan de seizoensvraag, dient dit concept te worden gecombineerd met een WKO-systeem. Naast de potentie voor koude- en warmtewinning heeft de onttrekking van warmte aan het oppervlaktewater in de zomer ook andere voordelen: verbetering van de waterkwaliteit en verkoeling van het omliggende stedelijke gebied [Kruit et al. 2018]. Bij onttrekking van warmte uit oppervlaktewater in de winter ontstaat door afkoeling een grotere kans op bevriezing, waarmee schaatsen vaker tot de mogelijkheid behoort, zelfs met klimaatverandering.

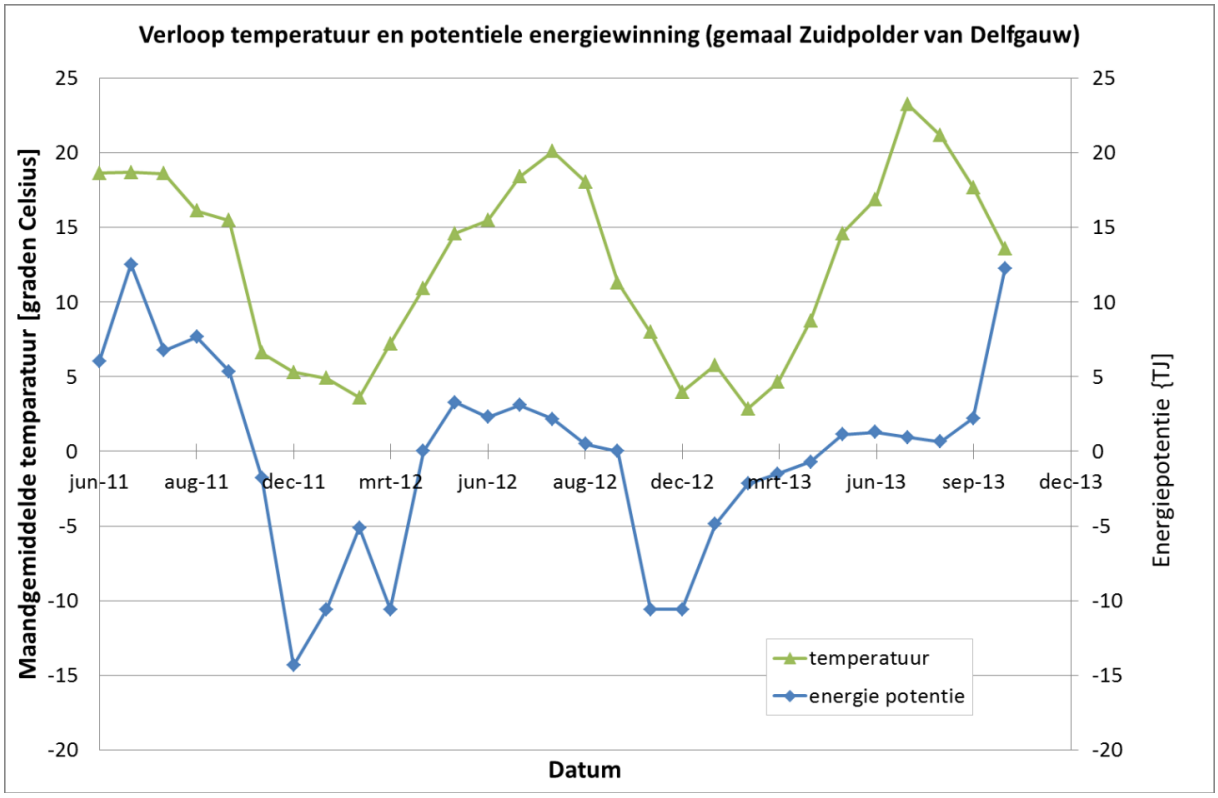
Met een diepte van 2 meter en een breedte van 27-45 m ter hoogte van de campus is de koudepotentie van de Schie geschat op 14.000 MWh_{th} per jaar [Scholten, 2018].

Bij warmtewinning uit water bij het poldergemaal (Figuur 7.8) zal een warmtewisselaar worden geplaatst om de koude uit de persleiding te onttrekken. In de studie ‘Beschouwingspotentieel Smartpolder Campus-Zuid Delft’ is de potentiële beschikbaarheid van koudewinning bij poldergemaal Zuidpolder geschat op 10.000 MWh_{th} per jaar. Hiervoor zijn 1000 vollasturen nodig, waarbij wordt voldaan aan het pompregime vanuit Hoogheemraadschap Delfland [Scholten, 2018].



Figuur 7.8: Principe van het Smart poldergemaal met koudewinning in winter en opslag in WKO [bron: www.smartpolder.nl; Defacto stedenbouw]

Voor de temperatuur van beide bronnen kan worden uitgegaan van Figuur 7.9.



Figuur 7.9: Temperatuurverloop (groen) in de Schie en bij Poldergemaal Zuidpolder [Scholten 2018].

Thermische energie uit afvalwater (TEA)

Door middel van een warmtewisselaar kan lagetemperatuurwarmte onttrokken worden aan het riool. Dit is mogelijk bij de twee rioolgemalen op de campus: aan het Zuidplantsoen in TU-Noord en aan de Watermanweg in Technopolis.
Doordat zowel gedurende de winter als zomer de temperatuur hoog genoeg is, is de combinatie met een WKO-bron niet nodig, maar kan wel worden toegevoegd om de warmte in de zomer te kunnen benutten.

Vanwege de duurzaamheidswens om geleidelijk steeds meer over te gaan op lagetemperatuursystemen, verdient het aanbeveling aquathermie uit zowel oppervlaktewater als afvalwater nader te laten onderzoeken.

7.2.6 WKO

Op het grondgebied van de TU Delft is de aanleg van gesloten warmte- en koudeopslagsystemen[9] enkel toegestaan tot de ondergrens van de eerste scheidende laag, tot 40 meter onder het maaiveld. Daardoor blijven de tweede en derde watervoerende pakketten beschikbaar voor open opslagsystemen in een aquifer, de traditionele WKO-systemen[10].

Campus

Om de ondergrond optimaal te benutten is er een bodemenergieplan ontwikkeld waarin de zoekgebieden voor warmte- en koudebronnen zijn aangegeven voor het campusgebied ten noorden van de Kruithuisweg (Figuur 7.10). Uit Tabel 7.3 is af te lezen dat in totaal 23 extra warmtebronnen en 21 extra koudebronnen kunnen worden gerealiseerd. Een soortgelijke studie zal nodig zijn voor het TU-zuidgebied, vooral omdat daar lagetemperatuursystemen de boventoon zullen voeren.

Figuur 7.10: Zoekgebieden WKO-bronnen TU Delft Campus [IF Technology, 2013].

[9] BTES in het Engels: *Borehole Thermal Energy Storage*
[10] Warmte-koudeopslag, ATES in het Engels: *Aquifer Thermal Energy Storage*

Tabel 7.3: Aantal bronnen per zoekgebied [IF Technology, 2013].

Zoekgebied	Type	# bronnen	Zoekgebied	Type	# bronnen
Z1	Koud	2	**Z14**	Warm	3
Z2	Warm	2	**Z15**	Koud	3
Z2	Koud	2	**Z16**	Koud	2
Z4	Warm	2	**Z17**	Warm	2
Z6	Koud	2	**Z18**	Koud	2
Z7	Warm	1	**Z19**	Warm	2
Z8	Koud	1	**Z20**	Warm	2
Z10	Warm	2	**Z21**	Koud	2
Z11	Koud	3	**Z22**	Warm	2
Z12	Warm	3	**Z23**	koud	2
Z13	warm	2			

Campus-Zuid

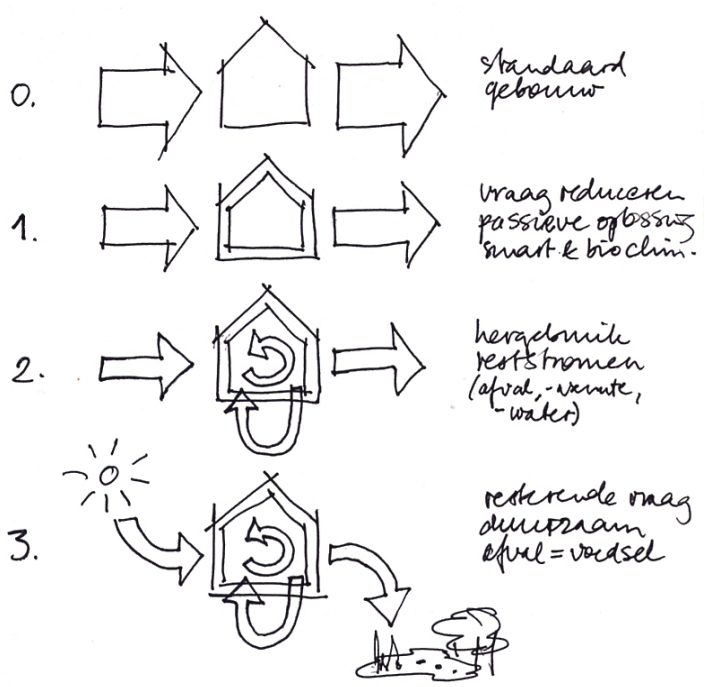
Voor TU-Zuid is een gebiedsvergunning aangevraagd met onder andere bronnen bij de Heertjeslaan/Huismansingel. Met name voor TU-Zuid geldt dat deze locaties niet vaststaan, ze zijn afhankelijk van de uiteindelijk gerealiseerde bouwprojecten.
Er is bepaald dat wanneer TU-Zuid volledig is voorzien van nieuwbouw, de capaciteit in de ondergrond onvoldoende zal zijn om aan de piekkoelvraag te voldoen. Additionele koelsystemen zullen bij nieuwbouw moeten worden mee ontworpen om ook bij volledige bebouwing aan de vraag te blijven voldoen.
[bron: persoonlijk contact Anne Medema, CRE Energie]

8 Voorgestelde energiestrategieën

8.1 Energieaanpak algemeen

De Nieuwe Stappenstrategie

De voorgestelde energiestrategieën in dit hoofdstuk volgen de Nieuwe Stappenstrategie, waarbij als eerste stap de vraag zo ver mogelijk wordt gereduceerd, in de tweede stap worden restbronnen of restenergie hergebruikt, inclusief energie-uitwisseling en –opslag, en tenslotte moet de resterende vraag worden opgewekt uit duurzame bronnen, zonder schadelijke reststoffen achter te laten (Figuur 8.1).



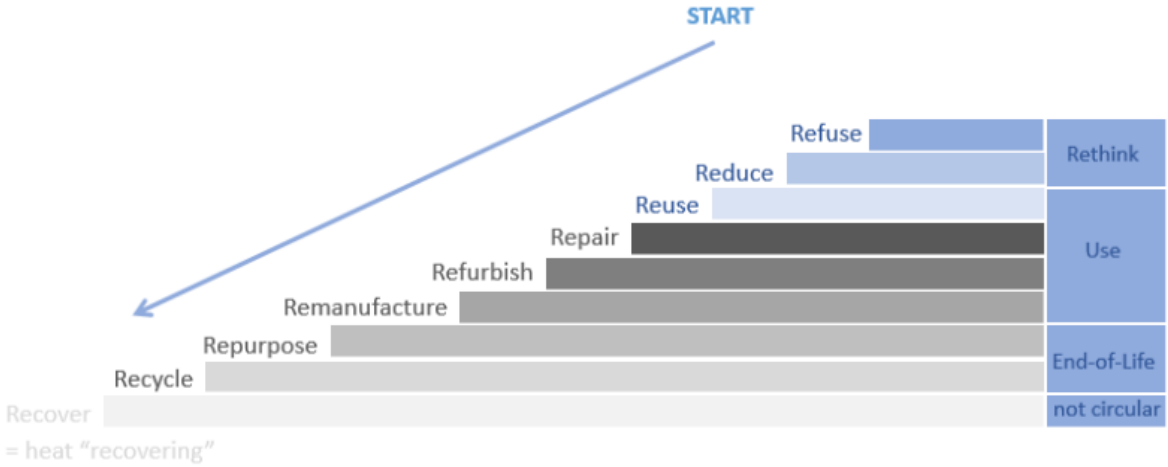
Figuur 8.1 – Nieuwe Stappenstrategie [van den Dobbelsteen, 2008]

Voor de TU Delft kunnen deze stappen in algemene zin als volgt worden ingevuld:

1. **Reduce**
   - Energievraag gebouwen reduceren door renovaties en transformaties
   - Slim bioklimatisch ontwerpen van nieuwe gebouwen, startend met passieve oplossingen
   - Energiezuinige apparatuur gebruiken waar die sowieso nodig zijn
2. **Reuse**
   - Meer gebruik maken van restwarmte en terugwinning van warmte uit lucht en water
   - Slim afstemmen en uitwisselen op de campus (overschotten versus tekorten), mogelijk middels een stedelijk energiemanagementsysteem
   - Geavanceerde energie-opslagsystemen
3. **Produce**
   - Meer zonnepanelen, liefst architectonisch geïntegreerd in daken en gevels
   - Toepassing van windturbines waar mogelijk
   - Eerste geothermienet van Nederland

De R-ladder

De Nieuwe Stappenstrategie heeft veel gelijkenis met de R-ladder (Figuur 8.2), waarmee vanuit de circulaire campus wordt gewerkt, om circulaire aanvragen te beoordelen. Op deze ladder staan vraagreductie en hergebruik van reststromen bovenaan.



Figuur 8.2 – R-ladder ter beoordeling van de circulaire campus [bron: Layla van Ellen]

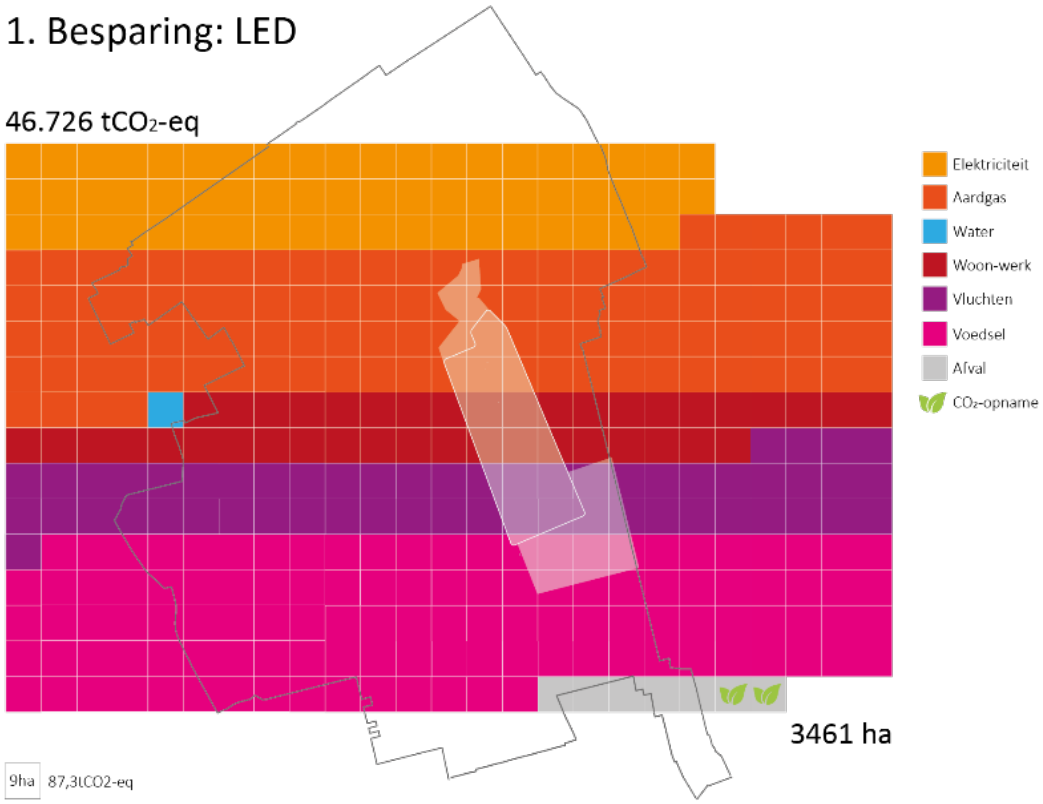
Algemene aanpak van TU-gebouwen

Bovenstaande stappenplannen kunnen het best worden toegepast bij nieuwbouwprojecten, maar ook bij overwegingen over bestaande gebouwen: van elk gebouw kan worden bepaald in welke mate de energievraag kan worden bespaard, of restwarmte kan worden teruggewonnen en hoeveel hernieuwbare energie kan worden opgewekt. Op basis daarvan kan ook worden bepaald of het slim is om een gebouw te renoveren, transformeren, afstoten of slopen en nieuwbouwen. Verderop zullen wij hiertoe een aanzet geven.
In het navolgende worden eerst algemeen toepasbare maatregelen besproken en hun effect op de CO_2-voetafdruk van de TU Delft.

8.2 Generieke energiemaatregelen voor gebouwen

8.2.1 LED-verlichting

Uit paragraaf 2.2.2 blijkt dat 30 procent van de huidige elektriciteitsvraag afkomstig is van verlichting. De transitie naar LED-verlichting en een gereduceerd aantal branduren zal voor de campus een eenvoudige eerste stap zijn om een groot deel van het energiegebruik te reduceren. Momenteel wordt al een groot deel van de verlichting door LED vervangen, zoals in gebouw 8 (Bouwkunde).
In 2018 zijn 9379 armaturen vervangen door LED; voor deze armaturen leverde dat een besparing op van 51% [bron: Excel LED-verlichting 2018, Gilbert de Nijs]. Het aantal branduren bleef hierbij gelijk. Met het plaatsen van bewegingssensoren en individuele lichtschakelaars kan de brandduur van de verlichting verder worden gereduceerd met minimaal 20%. Wanneer de resterende verlichting overgaat op LED-verlichting en tevens de brandduur wordt gereduceerd met 20 procent leidt dit tot een totale besparing van 49% op verlichting.
Figuur 8.3 laat het effect zien op de CO_2-voetafdruk van het overschakelen op LED-verlichting. Te zien is dat een hoekje uit het oranje vlak is verdwenen, equivalent aan 10 vlakjes van 9 ha, dus 90 ha (900.000 m^2) in totaal.



Figuur 8.3 Effect van de overstap op LED-verlichting op de CO_2-voetafdruk van de campus

8.2.2 Domotica

Niet alleen voor verlichting, maar ook voor andere gebouwinstallaties kan energie worden bespaard door het aantal draaiuren te verminderen. Dit kan door domotica of gebouwbeheersystemen: aansturen van de systemen op basis van gegevens van aanwezigheidssensoren, CO_2-sensoren, temperatuursensoren, openingstijden en roostering ruimtes, lichtsensoren, en ook het slim schakelen van de klimaatinstallatie. Hierbij kan gedacht worden aan: ventilatiesystemen, verlichting, verwarming, koeling, ICT, internet.
Domotica hebben invloed op het elektriciteitsgebruik van koeling, ventilatie, apparatuur (72% elektriciteit). Er wordt uitgegaan van een besparing van 10% op elektriciteit.

Voorbeeldproject op de campus

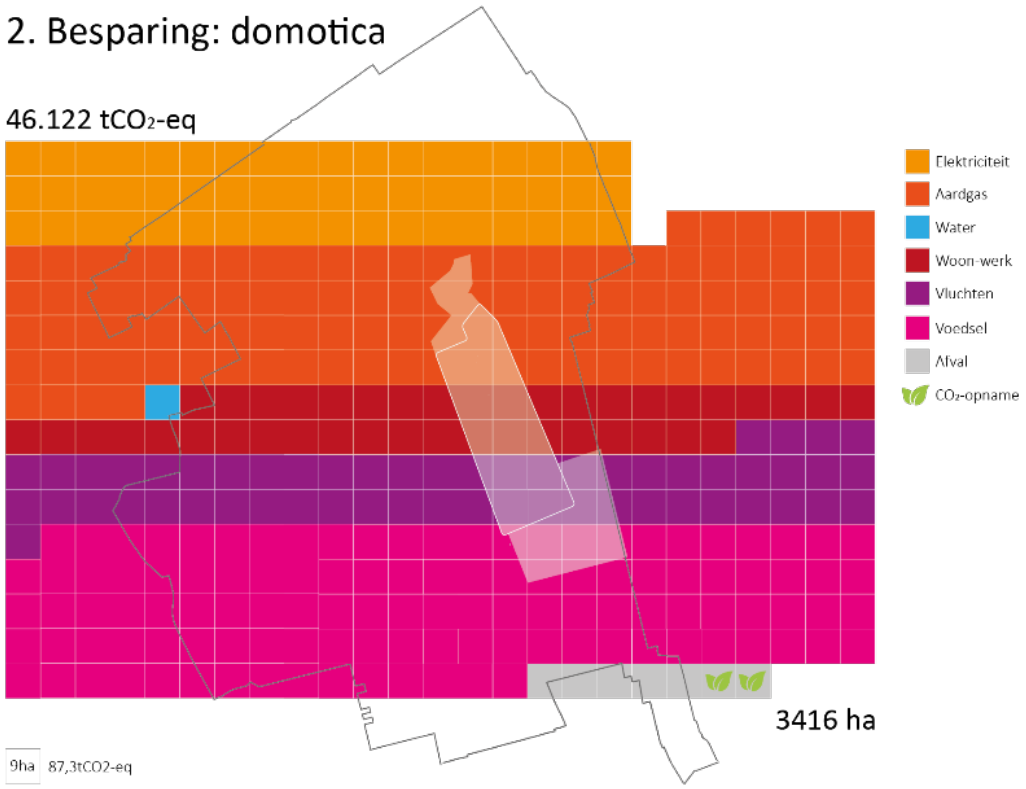
Voor collegezalen met eigen luchtbehandeling is al een pilot uitgevoerd door Marko Djuričić, om het aantal draaiuren en daarmee het elektriciteitsgebruik door ventilatie terug te dringen. In deze pilot zijn de draaiuren van het ventilatiesysteem gekoppeld aan de roostering van de collegezaal, met de volgende resultaten voor pilot collegezaal D in 3ME:

- Minus 50% draaiuren
- Minus 4.500 kWh_{el} (ventilatoren) per jaar
- Minus 45 GJ verwarming per jaar
- Minus 700 euro per jaar (gebaseerd op 250 dagen gebruik)
- Investering: 1.000 euro

Inmiddels is dezelfde besparing van ca. 50% bereikt in collegezalen A, B en C in 3ME.

Daarnaast zijn ook collegezalen A, B, C en D in de Aula uitgerust met CO_2-regeling die reageert op aanwezigheid van personen; hierbij is ook ongeveer 50% elektriciteitsbesparing op ventilatie behaald.
Doorvoeren van deze maatregelen naar andere collegezalen en werkruimtes zal resulteren in een aanzienlijke elektriciteitsbesparing, tegen geringe investeringen. Echter is dit alleen mogelijk als niet meerdere collegezalen op een luchtbehandelingssysteem zijn aangesloten.
[bron: persoonlijk contact Marko Djuričić en Peter de Jong, 15-02-2019]

Het effect op de CO2-voetafdruk van de toepassing van gebouwbeheersystemen/domotica is te zien in Figuur 8.4. Het gaat om 5 blokjes van 9 ha in aanvulling op de eerder afgetrokken uitstootvermindering door LED-verlichting.



Figuur 8.4: Effect van de toepassing van gebouwbeheersystemen/domotica op de CO_2-voetafdruk van de campus

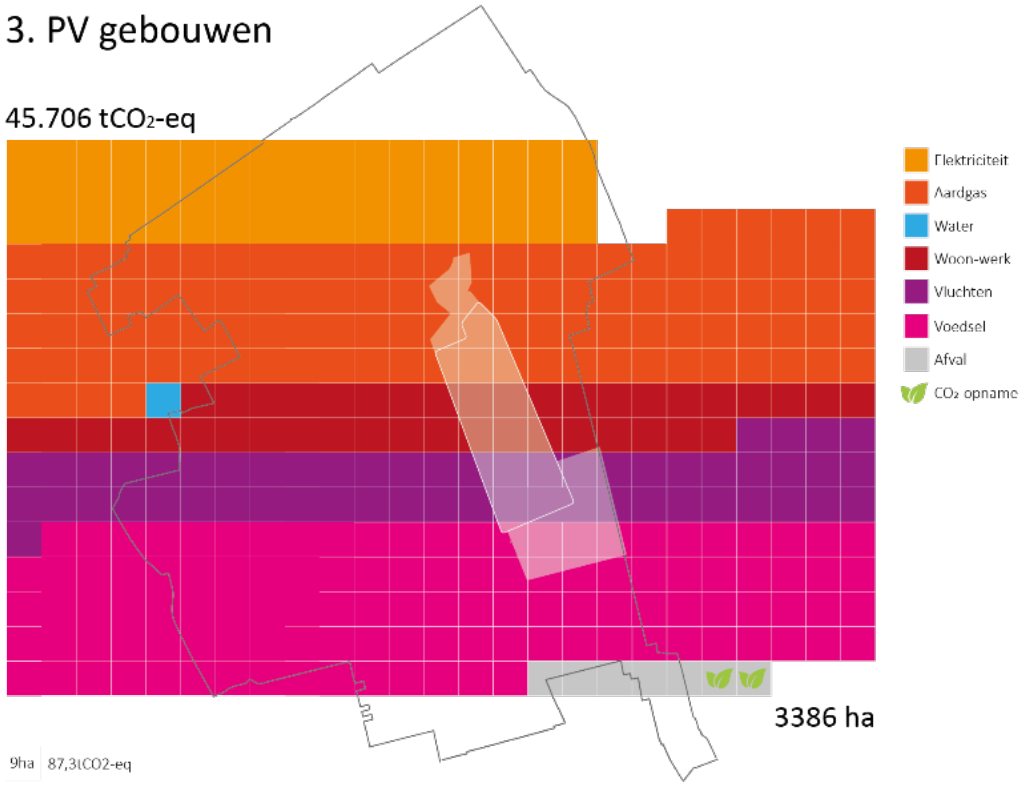
8.2.3 (Extra) PV op daken en gevels

De elektriciteitsvraag van de campus is zeer hoog; daarom moet er een maximale toepassing komen van PV op daken en zullen PV-panelen tevens moeten worden geïntegreerd in gevels. Maatregelen:

- Naast zuidoriëntatie, ook PV toestaan op oostelijke en westelijke oriëntatie, voor extra opwekking en gelijke verdeling aanbod.
- Vermijd terugplaatsing op dak bij vernieuwing installaties.
- EPS-lab, EWI en L&R als eerste testcases voor PV-geïntegreerde façades. Later op meer gevels toe te passen, onder andere bij nieuwbouw.
- Toepassen van (semi-)transparante PV-panelen als daklicht.

In Figuur 8.5 is uitgegaan van een jaarlijkse opwekking van 6.000 MWh door de toepassing van PV op gevels en daken. In de reductie van CO_2 door de opwekking van elektriciteit is tevens de CO_2-emissie van 0,032 kg CO_2-eq per kWh door het produceren van de panelen meegenomen [Pulselli et al.,

2019]. We zien een verdere reductie van 'slechts' drie vlakjes van 9 ha, maar daarbij moet gezegd worden dat niet gerekend is met de maximale potentie van daken en gevels.



Figuur 8.5: CO_2-reductie door opwekking van elektriciteit met behulp van PV

8.3 Specifieke maatregelen voor gebouwen

In de huidige vastgoedstrategie van CRE zijn drie verschillende energieroutes te vinden (1-3); voor de CO_2-roadmap TU Delft worden er twee opties toegevoegd (4-5). In de volgende paragrafen worden voor de hoofdgebouwen met een kantoor/onderwijsfunctie aanbevelingen gedaan over de meest geschikte strategieën:

1. **Sloop & nieuwbouw/vestiging elders**
2. **Afstoot & nieuwbouw/vestiging elders**
3. ***Midlife*-renovatie**: grondige renovatie, geschikt maken voor lagetemperatuurverwarming. Hierbij blijft enkel de constructie van het gebouw behouden, schil, installatie en binnenwanden worden vervangen of grondig aangepakt.
4. ***Light* renovatie**: vervangen van de gebouwinstallaties en toevoegen PV-panelen.
5. **Nauwelijks ingrijpen**: enkel toepassing van de generieke maatregelen: gebouwinstallaties inregelen, beperken van de draaiuren installaties en apparatuur, door middel van domoticasystemen (sensoren etc.).

Onderzoek/procesfuncties

Vanuit de TU is de voorwaarde gesteld: "Onderzoek mag niet belemmerd worden door verduurzaming van de campus". Daarom wordt er voor de gebouwen met een onderzoek/procesfunctie geen extra besparing gerekend dan de besparing behaald met de toepassing van domoticasystemen en LED-verlichting.

Doordat de mogelijkheden voor energiebesparende maatregelen in onderzoeks- en procesfuncties beperkt zijn, zullen deze gebouwen de KPI-eis niet voldoen. Wellicht is het stellen van dezelfde eis aan kantoren, onderwijsruimten en laboratoria ook niet realistisch. Voor kantoren wordt door de Dutch Green Building Council voorgesteld om – teneinde 'Paris Proof' te worden – een energiegebruik van niet meer dan 50 kWh/m^2 te hanteren (voor warmte/koude en elektriciteit). CRE zou daarom voor kantoorfuncties uit kunnen gaan van een strengere eis, terwijl die voor labs minder streng wordt. Dit zou betekenen dat de meeste gebouwen tot voorbij de eis zouden moeten worden gerenoveerd.

8.3.1 Nieuwbouw versus *midlife*-renovatie

Bij de keuze voor nieuwbouw of een *midlife*-renovatie moet naast de kwaliteit (zoals door CRE gedefineerd als kosten/m^2) en bruikbaarheid van het huidige gebouw ook de hoeveelheid energie worden meegenomen die nodig is voor het bouwen, onderhouden en/of slopen van het gebouw, de zogenoemde '*embodied energy*' (energie-inhoud) van het gebouw.

In de volgende vergelijking wordt gekeken naar de energie die nodig is voor een midlife-renovatie en voor nieuwbouw. De TU Delft wilt dat de vervangende nieuwbouwen niet meer faculteit gebonden is. Een voorbeeld hiervan is het Pulse-gebouw. Daarmee is het Pulse-gebouw als uitgangspunt genomen om de hoeveelheid *embodied energy* per vierkante meter voor nieuwbouw op de campus te bepalen.

Figuur 8.6: Onderwijsgebouw Pulse [campusdevelopment.tudelft.nl].

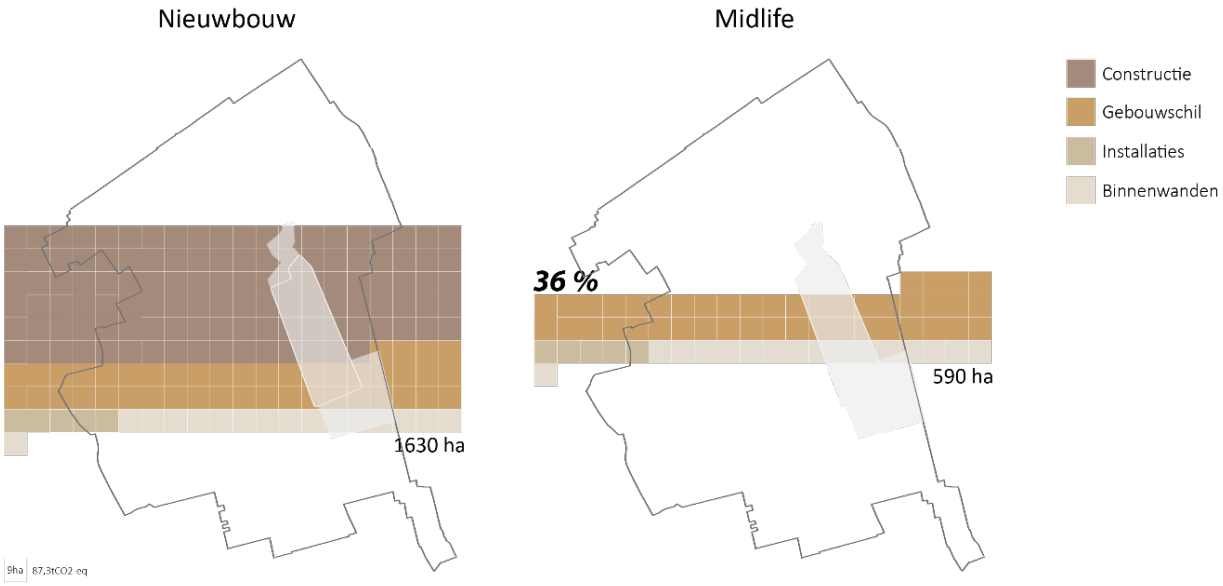
Tabel 8.1 geeft een overzicht van de globale bepaling van de *embodied energy* en de daarbij ontstane CO_2-emissies voor het Pulse-gebouw. Hiervoor zijn inbegrepen de energie die nodig is voor het onttrekken, bewerken, transporteren en weer herverwerken van de materialen. De CO_2-emissies

gerelateerd aan het transport van de materialen naar de bouwplaats en het bouwproces zijn hierbij niet meegenomen.

Tabel 8.1: Globale berekening Embodied Energy Pulse

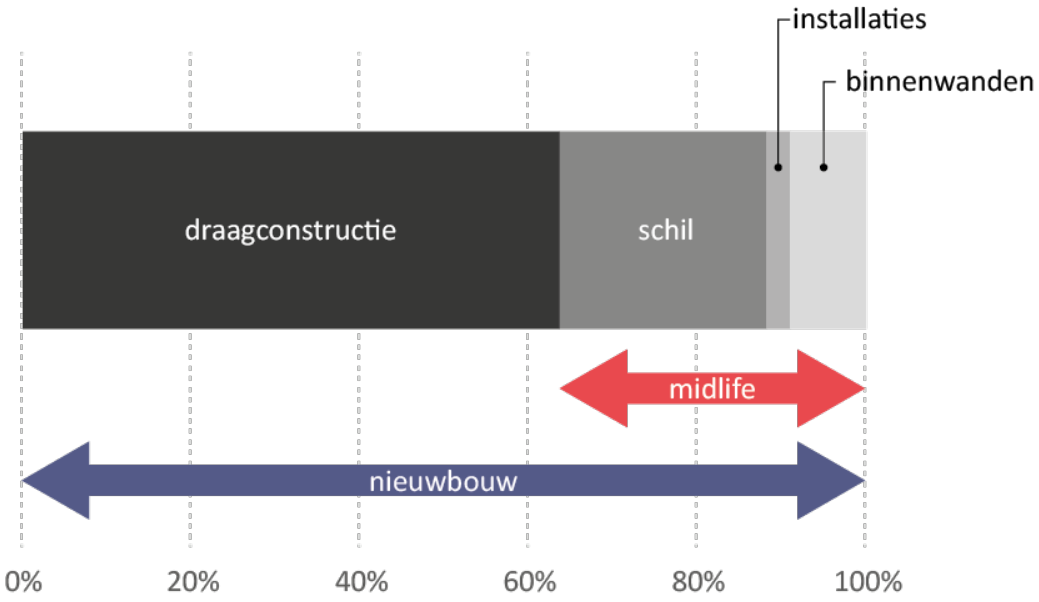
	Materialen	EE (GJ)	tCO_2-eq	Referentie EE (MJ/unit), $kgCO_2$-eq (kg/unit)
Constructie	Staal: kolommen & liggers	3869	247	Dartmouth.edu
	Beton: vloeren	4047	670	Oekobaudat.de
	Beton: funderingsbalken	412	68	Oekobaudat.de
	Totaal	**8329**	**986**	
Gebouwschil	RVS: gevelbekleding	1768	109	Dartmouth.edu
	Natuursteen: gevelbekleding	154	122	Oekobaudat.de
	Glas, driedubbel	746	61252	Oekobaudat.de
	Aluminium profielen	177	134	Oekobaudat.de
	Bitumen dakafwerking	577	81	Oekobaudat.de
	Isolatie	1153	101	Oekobaudat.de
	Totaal	**4575**	**378**	
Installaties	Verwarmen, koelen, ventilatie, warmtapwater, sanitair, verlichting, PV, lift	**1370**	**442**	Oekobaudat.de
Binnenwanden	Metal stud wanden met 2-zijdige beplating en isolatie	**1826**	**137**	Oekobaudat.de
TOTAAL Per m^2 BVO	-	**16100** 3,33	**1545** 0,32	

In Figuur 8.7 is het verschil in CO_2-eq aangegeven in de situatie wanneer Bouwkunde, TBM en CRE vervangen worden door nieuwbouw (links) versus wanneer deze gebouwen met een midlife renovatie worden aangepakt.



Figuur 8.7: Verschil in CO_2-eq wanneer Bouwkunde, TBM en CRE worden vervangen door nieuwgebouw (links) versus wanneer deze gebouwen een midlife-renovatie krijgen, in dit geval blijft de constructie behouden (rechts).

Er kan worden gesteld dat het grootste aandeel van de *embodied energy* in de constructie van het gebouw zit: 64% in het geval van Pulse. De combinatie staal met beton resulteert in hoge emissies. Bij een midlife-renovatie zouden de emissies per vierkante meter vergelijkbaar zijn met de emissies van materialen voor de schil van het gebouw, de installaties en de binnenwanden van een nieuwbouwproject. Door te kiezen voor een midlife-renovatie, waarbij de constructie behouden blijft, wordt een groot aandeel van de emissies beperkt.



Figuur 8.8: Aandeel embodied energy en CO_2-emissies van verschillende gebouwonderdelen in Pulse

8.3.2 Slopen & Nieuwbouw/vestiging elders

Voor de TU Delft is vanuit energetisch oogpunt de keuze voor de sloop van een gebouw geen logische keuze, ook omdat de gebouwen die hier eventueel voor in aanmerking zouden komen (denk aan het oude TNW en Civiele Techniek), een zware, op zich nog technisch goede draagconstructie hebben, die als basis zou kunnen dienen voor een midlife-renovatie.
Wanneer gekozen wordt voor sloop dienen de emissies die vrijkomen bij de sloop mee te worden genomen in de keuze, een conform de methode uit het promotieonderzoek van Andy van den Dobbelsteen [2004], zou ook een resterende milieuschuld (in euro's) in rekening moeten worden gebracht als het gebouw nog niet een bepaalde referentielevensduur heeft bereikt (in het onderzoek van Van den Dobbelsteen 75 jaar), als een niet afbetaalde milieuhypotheek.

8.3.3 Afstoot & Nieuwbouw/vestiging elders

Voor een aantal gebouwen in TU-Noord zijn de plannen voor afstoot al in een vergevorderd stadium. Deze gebouwen verkeren momenteel in een matige conditie, waarbij het verouderingsproces regelmatig het gebouw in zijn greep heeft [Excel TU Benchmark Campusgegevens 2019, via Kees Kerkhoven]. Onderstaande gebouwen worden momenteel verkocht voor herontwikkeling:

- Science Centre (3)
- Biotechnologie (5)
- Botanische Tuin (6)
- Chemische Technologie, 'gele scheikunde' (12)
- Kramerlaboratorium (15)

Van deze gebouwen presteert het Science Centre energetisch niet slecht, en de structuur ervan biedt mogelijkheden voor renovatie tot onderwijsgebouw. Dat de Botanische Tuin energetisch ongunstig is, heeft te maken met de kas, die wellicht zuiniger kan, maar altijd om veel warmte zal vragen. Vervangende nieuwbouw voor deze gebouwen is reeds gerealiseerd of niet van toepassing.

Figuur 8.9: Gebouwen in verkoop voor herontwikkeling [emonitor.tudelft.nl]

Tabel 8.2 geeft de totale energiebesparing van het afstoten van genoemde gebouwen, ervan uitgaande dat resterende ruimtevraag wordt ingevuld door energieneutrale nieuwbouw.

Tabel 8.2: Energiebesparing door afstoot vastgoed

Afstoot	**Energie [MWh]**			
	Warmte	Gas	Elektriciteit	Totaal
03 Science Centre		- 1.201	- 412	- 1.613
05 Biotechnologie		- 2.317	- 388	- 2.705
06 Botanische tuin		- 145	- 27	- 172
12 Scheikunde	- 2.516		- 725	- 3.241
15 Kramerlab		- 539	- 1.035	- 1.574
Totaal afstoot	*-2.516*	*- 4.202*	*- 2.588*	*- 9.306*

8.3.4 Midlife-renovatie

Gebouwen 22, 23, 34 en 36 hebben de hoogste totale energiegebruiken van de campus. Met name het warmtegebruik van de gebouwen ligt hoog en dient te worden gehalveerd om aan de KPI-eisen te voldoen. Tevens zijn dit de gebouwen die samen met de af te stoten gebouwen in een matige technische staat verkeren; daarbij is midlife-renovatie niet alleen nodig voor het energiegebruik, maar tevens om het gebouw de overlast door gebreken aan de bouw- en installatiedelen te verhelpen.

Technische Natuurkunde (22)

Dit gebouw uit 1963 bestaat voor een groot deel uit onderzoek- en procesfuncties, zoals het sinds 2018 hier gesitueerde Qutech. In de nabije toekomst zullen deze laboratoria worden verplaatst naar geplande nieuwbouwlocaties. Van alle gebouwen op de campus heeft het gebouw het hoogste totale energiegebruik.

Figuur 8.10: Technische Natuurkunde [emonitor.tudelft.nl]

Om aan de KPI-eis te voldoen, moet de warmtevraag met 80 procent worden gereduceerd, en is midlife-renovatie de enige optie. De volledige gebouwschil zal dan worden vervangen, samen met de gebouwinstallaties. Enkel de draagconstructie zal behouden blijven. Het creëren van afgesloten atria tussen de vleugels kan het warmtegebruik drastisch reduceren. Tevens biedt de nieuwe overkapping extra ruimte voor het plaatsen van PV-panelen. Bij het vervangen van de installaties moeten nieuwe installaties zo min mogelijk terug op het dak worden geplaatst om plaats te maken voor PV-panelen. Aangezien het gebouw volgens de huidige vastgoedstrategie tijdelijk leeg komt te staan kan deze grondige renovatie zonder al te veel overlast worden uitgevoerd.

Civiele Techniek (23)

Civiele Techniek heeft een midlife-renovatie nodig ten behoeve van 50% warmte- en elektriciteits-reductie. In het gebouw staan enkele installaties, zoals de hexapod, die veel koeling behoeven; studie is nodig naar de mogelijkheden van warmte-uitwisseling binnen het gebouw. De gebouwen aan de achterzijde zijn een gemeentelijk monument, hier zal midlife-renovatie niet mogelijk zijn, de gevel moet behouden blijven.

Figuur 8.11: Civiele techniek [emonitor.tudelft.nl]

3ME (34)

De totale energievraag van 3ME ligt relatief hoog, die gedeeltelijk wordt gecompenseerd door de grote oppervlakte. Er is echter een forse besparing nodig om de nieuwe KPI-eis te bepalen. Met name de warmtevraag zal met 50% moeten worden gereduceerd. Om dit te realiseren is een midlife-renovatie nodig waarbij de gebouwschil en installaties worden aangepakt.

Figuur 8.12: 3ME [emonitor.tudelft.nl]

EWI (36)

EWI is een gemeentelijk monument. Het is nu aangesloten op twee WKO-doubletten van 20 jaar oud, zonder tussenkomst van een warmtepomp. Deze bronnen worden met name gebruikt voor koeling van de laboratoria in het gebouw. Het hoge energiegebruik zal moeten worden beperkt door een midlife-renovatie waarbij de gevel wordt vervangen en tevens gebruikt voor PV-productie. Daarnaast zullen de installaties moeten worden aangepast en kan de mogelijkheid worden onderzocht van restwarmtegebruik van de laboratoria voor verwarmen van de kantoor- en onderwijsruimten.

Figuur 8.13: EWI [emonitor.tudelft.nl]

8.3.5 Light renovatie

Aula (20)

Als Rijksmonument is grondige midlife-renovatie, waarbij de gevel wordt vervangen, hier geen optie. Wel kunnen installaties worden vervangen en meer efficiënt ingeregeld. Door toepassing van domoticasystemen en LED-verlichting kan de benodigde reductie van elektriciteitsgebruik worden behaald.

Figuur 8.14: Aula [emonitor.tudelft.nl]

Bibliotheek (21)

Figuur 8.15: Bibliotheek [emonitor.tudelft.nl]

De bibliotheek is aangesloten op het warmtenet, in combinatie met een WKO-systeem zonder warmtepomp. Toevoegen van een warmtepomp is moeilijk door minimale ruimte voor installaties. De huidige installaties zijn ingepast in vloeren en kleine installatieruimten; dit beperkt ook de optimalisatie van andere gebouwsystemen. Daarnaast gelden er strenge klimaateisen voor het boekendepot. Toch zal een reductie van het energiegebruik van 192 kWh/m^2 naar 100 kWh/m^2 moeten plaatsvinden. Er moet wel worden opgemerkt dat de bibliotheek de langste openingstijden heeft: 08.00-24.00, 7 dagen per week. Bij de renovatie moet verlichting worden aangepast, domoticasystemen toegevoegd en waar mogelijk installaties vervangen.

Bouwcampus (26)

Figuur 8.16: Bouwcampus [emonitor.tudelft.nl]

De bouwcampus is niet aangesloten op het warmtenetwerk; wanneer wordt overgestapt op geothermie zal dit (vanuit de businesscase geothermie) wel gewenst zijn. Daarvoor moeten de gebouwinstallaties worden aangepast. Bij de overstap op het warmtenet zal tevens renovatie op gebied van warmte moeten worden uitgevoerd om de warmtevraag met 50% te reduceren.

Technische Bestuurskunde (31)

Figuur 8.17: Technische Bestuurskunde [emonitor.tudelft.nl]

TBM is een onderwijs- en kantoorgebouw, gebouwd in 1998. Naast inregeling en toepassing van domoticasystemen ter verlaging van het elektriciteitsgebruik zal het warmtegebruik moeten worden gereduceerd tot 70 procent van het huidige gebruik (70 kWh/m^2).
Huidige Rc-waardes van het gebouw liggen op 4,0 m^2K/W [bron: Excel IPIN Gebouw invoeren 2016090]; daarmee is verdere isolatie niet van toepassing. Onderzocht moeten worden of het vervangen van gebouwinstallaties de gewenste reductie naar de KPI-eis en naar lage temperatuur kan realiseren.

Industrieel Ontwerpen (32)

Figuur 8.18: Industrieel ontwerpen [emonitor.tudelft.nl]

Met een energiegebruik van 105 kWh/m^2 zal een lichte renovatie nodig zijn om het gebouw te laten voldoen aan de nieuwe KPI-eis. Door slimme inregeling en vervanging van installaties kan de vraag naar verwachting voldoende worden gereduceerd. Momenteel is er geen potentie voor PV op het lagergelegen dak, vanwege de vele lichtkoepels. Vervangen van de lichtkoepels door dakramen van doorzichtige PV-panelen kan hiervoor een oplossing zijn. Het resterende dak is al volledig met PV bedekt.

Wiskunde & Informatica (28)

Figuur 8.19: Wiskunde & Informatica [emonitor.tudelft.nl]

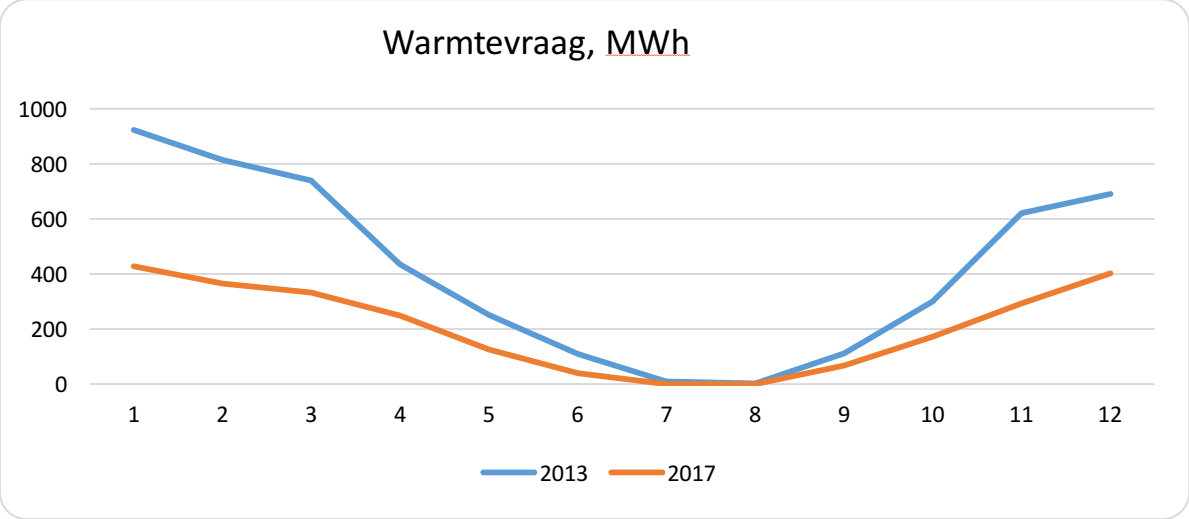
Bij de verhuizing van de kantoren van Wiskunde en Informatica is het gebouw volledig voorzien van LED-verlichting en is het gebouwbeheersysteem vervangen. Het gebouw verkeert momenteel in een uitstekende conditie; er is sprake van geen of zeer beperkte veroudering [Excel TU Benchmark Campusgegevens 2019, via Kees Kerkhoven], echter is een lichte renovatie nodig, doordat het gebouw bij realisatie van de geothermiebron zal worden aangesloten op het warmtenet, waardoor enkele installaties worden vervangen. Met minimale aanpassingen is het mogelijk het gebouw aan te sluiten op lagetemperatuurverwarming.

8.3.6 Nauwelijks ingrijpen

Bouwkunde (8)

Figuur 8.20: Bouwkunde [emonitor.tudelft.nl]

Door de renovatie van dit rijksmonument in 2014 voldoet het gebouw aan de nieuwe KPI-eis voor 2030. Door het gehele gebouw te voorzien van dubbelglas, toepassing van aluminiumkozijnen in de ateliers, gedeeltelijke isolatie van kap en de vloeren van de nok, en toepassing van de mechanische ventilatie is de warmtevraag (2017 t.o.v. 2013) met 50 procent gereduceerd (zie Figuur 8.21).



Figuur 8.21: Warmtevraag Faculteit Bouwkunde voor en na de renovatie [emonitor.tudelft.nl].

In juni 2019 is Bouwkunde voorzien van LED-verlichting. Beter inregelen van lichtschakelaars en sensoren kan de reductie van elektriciteit verder vergroten. Momenteel is het bedienen van de verlichting met schakelaars niet mogelijk in de meeste ruimten, wat nadelig is als iemand het pand verlaat en nog één keer langs alle automatische verlichting loopt, die daardoor onnodig lang aanblijft. Daarnaast kan de potentie voor het opwekken van elektriciteit door middel van PV-panelen op het dak, als PV-geïntegreerde dakleien worden meegenomen.

CRE Jaffalaan (30)

Met een energieverbruik van in totaal 102 kWh/m^2 dient slechts te worden bespaard op elektriciteit. Dit kan door middel van de eerder voorgestelde generieke maatregelen.

Figuur 8.22: CRE [emonitor.tudelft.nl]

Drebbelweg (35)

Het beperkte elektriciteitsgebruik van de Drebbelweg compenseert de warmtevraag van 58 kWh/m^2 tot een totaalgebruik van 79 kWh/m^2; daarmee is in totaal de KPI-eis bijna behaald. De lage elektriciteitsvraag van 21 kWh/m^2 kan worden verklaard door de optimale daglicht-toetreding en het gebruik van LED-verlichting. Besparing op warmtegebruik is gewenst, maar wel als lage prioriteit.

Figuur 8.23: Cornelis Drebbelweg [emonitor.tudelft.nl]

Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek (62)

LR is een van de meest energie-efficiënte gebouwen van de TU-campus met een totaalgebruik van 87 kWh/m^2. In het gebouw heeft een gebouwbeheersysteempilot gedraaid en is tevens LED-verlichting toegepast. Verdere optimalisatie van het GBS zal het gebruik verder kunnen reduceren. Daarnaast is de gevel geschikt voor de integratie van PV[11].

Figuur 8.23: Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek [emonitor.tudelft.nl]

8.3.7 Energiebesparingspotentie gebouwen

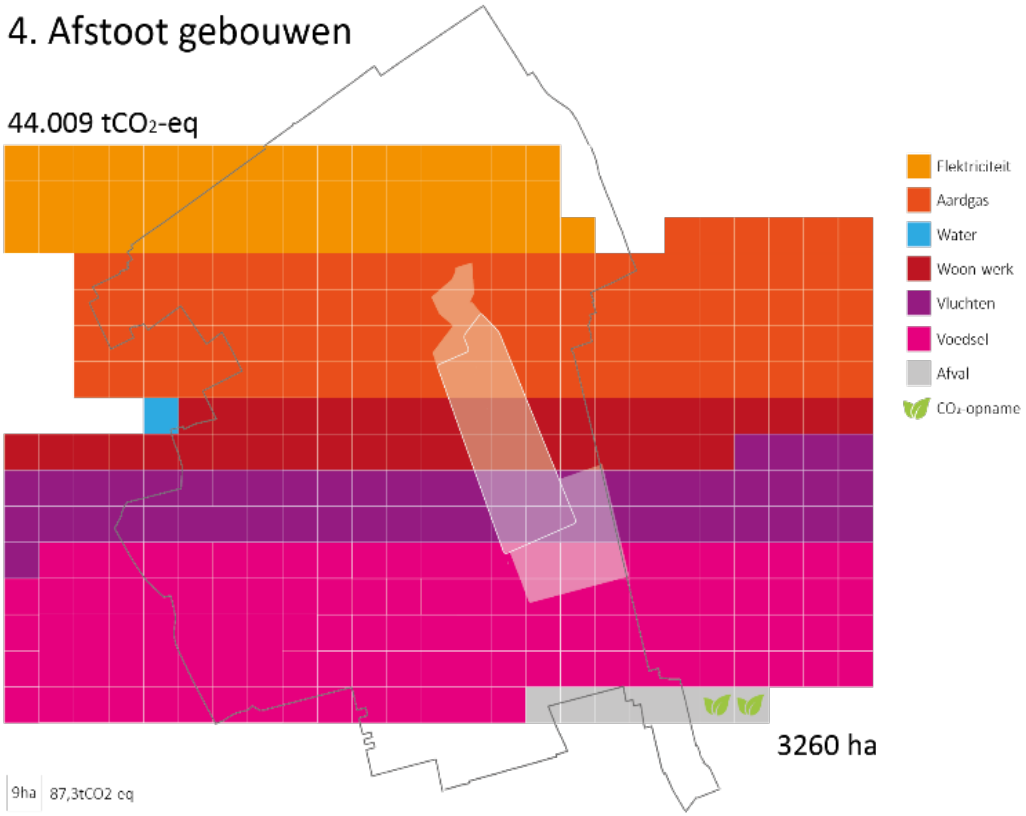
In de generieke maatregelen zijn de besparingen door toepassing van LED-verlichting, domotica-systemen en PV-panelen bepaald. Om de besparing te bepalen is gerekend met een totale besparing van 20 procent voor light renovatie en 50 procent of 50 kWh/m^2 voor midlife-renovaties. Tabel 8.3 geeft de behaalde besparing door afstoot, midlife- en light renovatie aan van de besproken gebouwen.

Tabel 8.3: Besparing door afstoot, midlife- en light renovatie

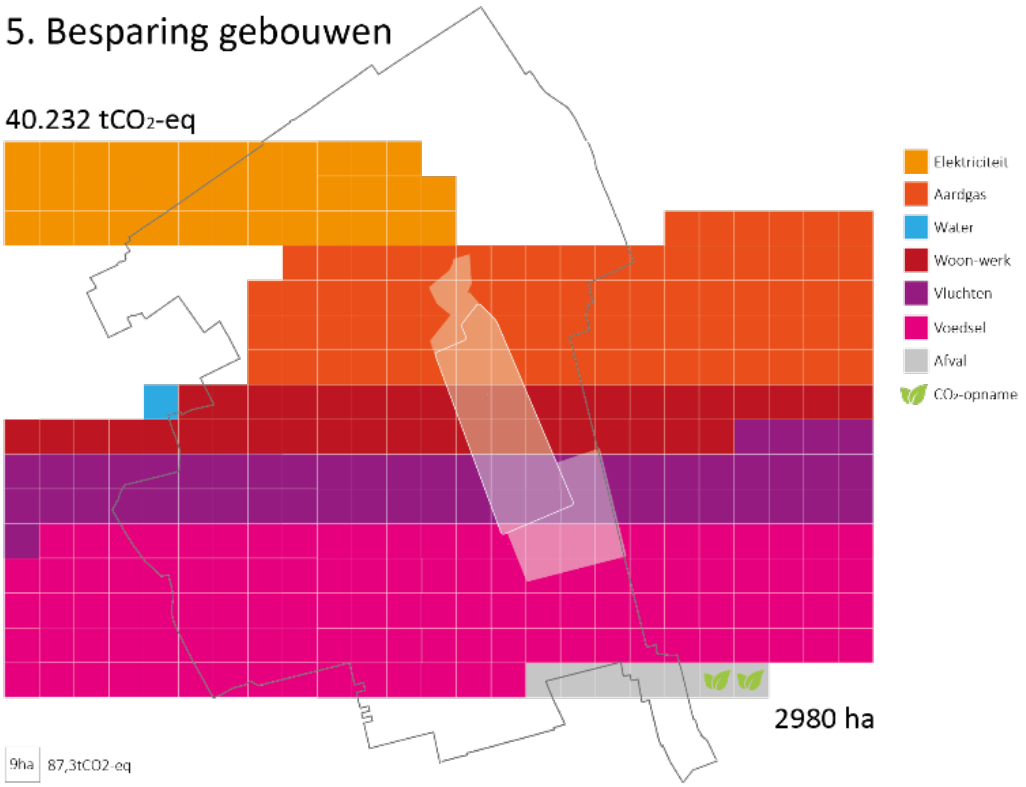
	Besparing [MWh]			
	Gas	Warmte	Elektriciteit	Totaal
Afstoot	4202	2516	2588	9306
Midlife	0	15108	9269	24376
Light	270	1453	2899	4623
Totaal	4472	19077	14756	38305

In Figuur 8.24 en 8.25 worden de in deze paragraaf besproken maatregelen grafisch samengevat.

[11] Als voorbeeld hiervoor kan worden gekeken naar het ontwerp van MOR, de inzending van de TU Delft voor de Solar Decathlon Europe 2019. Het renovatievoorstel voor een kantoortoren heeft verticale geïntegreerde PV-gevelpanelen van Kameleon Solar in groen tot lichtgrijze kleur.



Figuur 8.24: Besparing op warmte en elektriciteit door afstoot van gebouwen



Figuur 8.25: Besparing op warmte en elektriciteit door renovatie van gebouwen

8.4 Energiesysteem campus

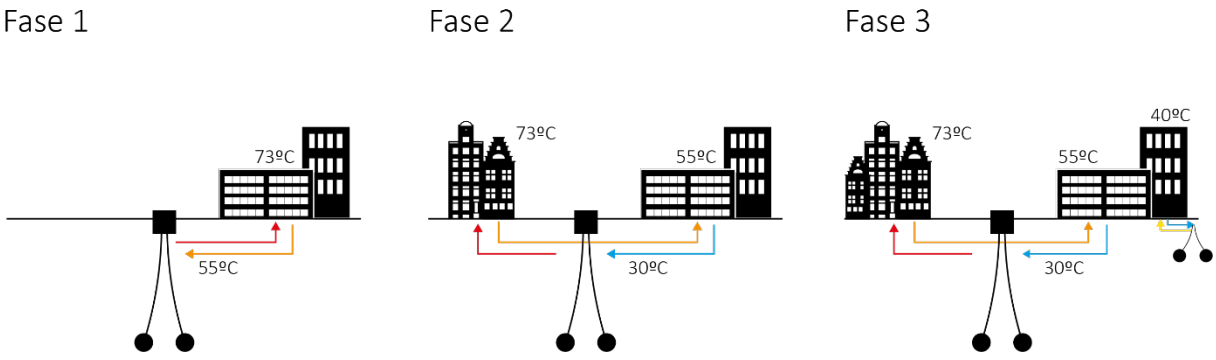
Het energiesysteem zal van hogetemperatuurwarmte (100ºC) afkomstig van gas (WKK en ketels) overgaan op een systeem met lagere-temperatuurwarmte van geothermie en formatiegas (73°C) gecombineerd met lokaal geproduceerd biogas in de winter, middentemperatuur in de retour van de geothermiebron (50°C) en lokale lage-temperatuur miniwarmtenetten.

8.4.1 Geothermie

Een geothermiebron (met formatiegas) kan 60 procent van de huidige totale warmtevraag voorzien [Snelleman, 2018]. Dit is gelijk aan ongeveer 43.000 MWh, oftewel 90% van de warmtevraag na de voorgestelde reducties. Naast de gebouwen van de TU Delft zullen tevens de gebouwen van DUWO (Leeghwaterstraat en Balthasar van der Polweg) worden aangesloten, die gezamenlijk 5.300 MWh vragen [Hellinga, 2017].

Fasering

De implicatie van de geothermiebron zal worden gefaseerd in 3 delen die iets afwijken van het originele plan van CRE (Figuur 8.26). In de *eerste fase* zullen de campusgebouwen die aangesloten zitten op het warmtenet door de geothermiebron worden gevoed (70ºC). Vanwege het feit dat de campusgebouwen door middel van renovatie geschikt worden gemaakt voor midden- en lagetemperatuurwarmte zal tegelijkertijd een warmtenet worden uitgebreid richting de stad Delft, bij voorkeur richting het historische centrum (waar hoge temperatuur het hardste nodig is), eventueel in combinatie met Voorhof-Oost. Bij aansluiting van de stad Delft in de *tweede fase* worden de campusgebouwen op de retourleiding (50ºC) van het centrum aangesloten. Tenslotte zal in de *derde fase* ongeveer 40% van de warmtevraag ten noorden van de Kruithuisweg 80% van de vraag in TU-Zuid worden voorzien door lagetemperatuurnetten. Daarmee wordt meer capaciteit gecreëerd voor de stad Delft. Nieuwbouw wordt volledig aangesloten op lagetemperatuurnetwerken en zal volledig energieneutraal of energiepositief moeten zijn.

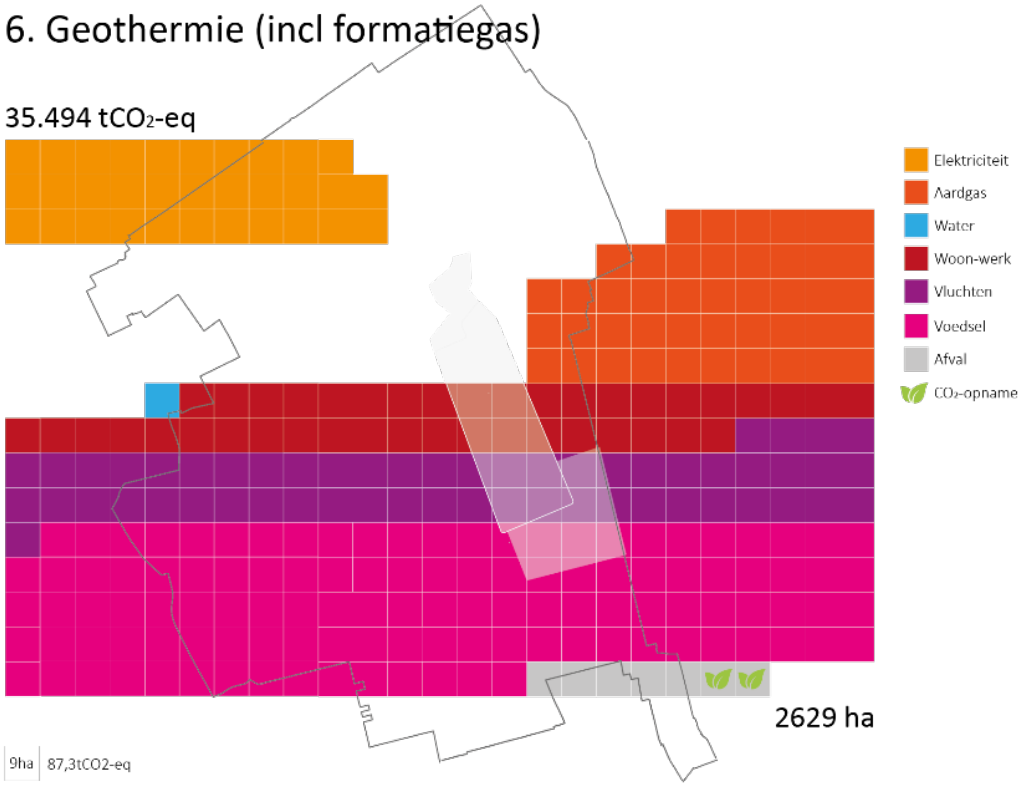


Figuur 8.26: Fasering geothermiebron

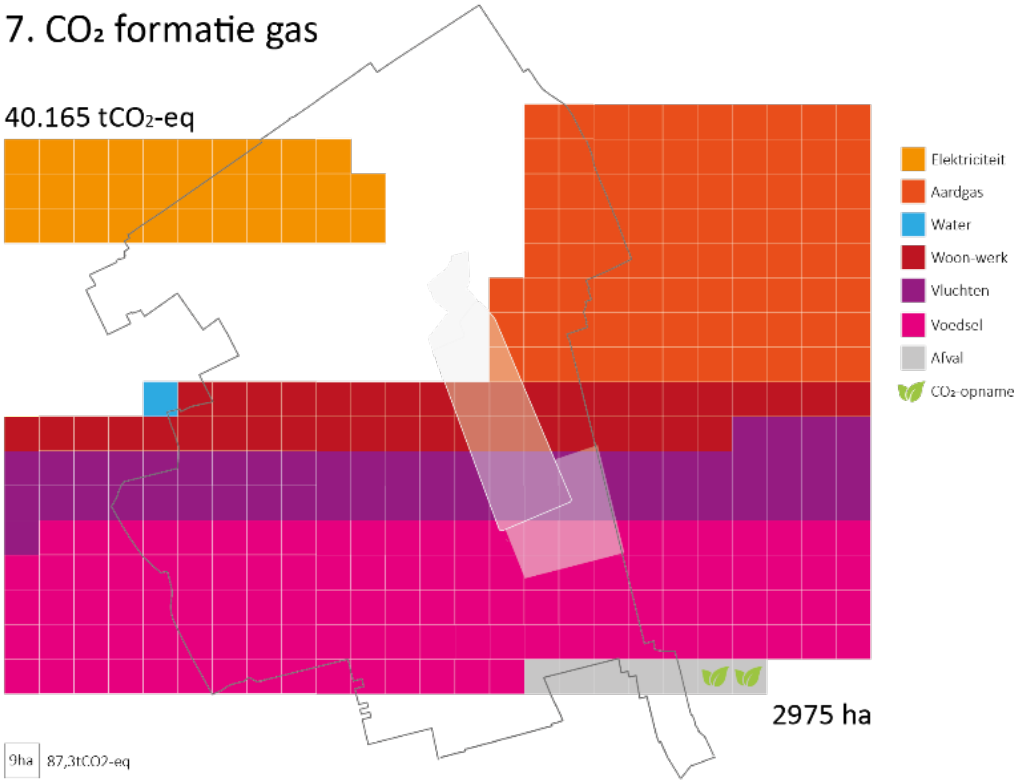
CO_2-besparing

Per kubieke meter water (aardwarmte) die wordt onttrokken wordt tevens 1 m^3 formatiegas opgepompt. Wanneer wordt uitgegaan van bovenstaande warmtelevering, wordt er per jaar 1.900.000 m^3 aardgas onttrokken [Snelleman, 2018], resulterend in 4677 tCO_2-eq. Daarnaast vraagt de geothermie nog 3 MW (26.280 MWh) per jaar voor de pompen. Doordat de TU Delft warmte verkoopt aan de stad en DUWO worden de emissies volledig aan de campus toegerekend. Echter zal

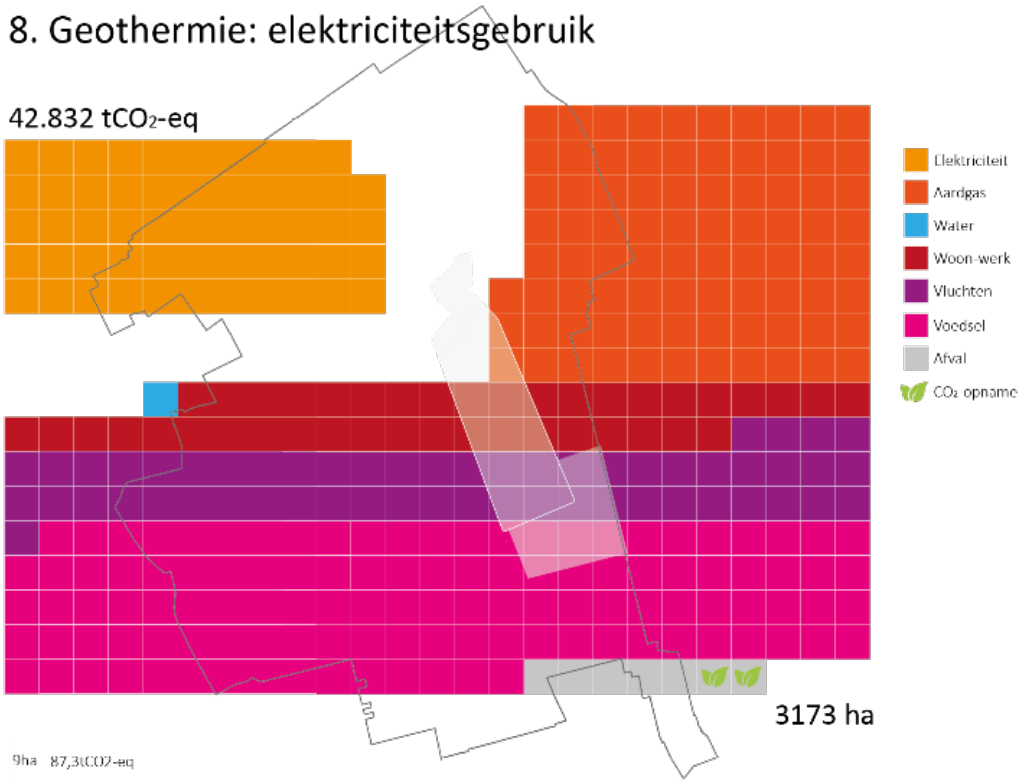
het formatiegas tevens zorgen voor de productie van 7.425 MWh_e met behulp van de huidige WKK-installatie (40% elektrisch rendement).



Figuur 8.27: CO_2-reductie door warmte- en elektriciteitsopwekking door geothermie en formatiegas in de WKK



Figuur 8.28: CO_2-emissies door verbranding formatiegas, volledig toegerekend aan aardgas

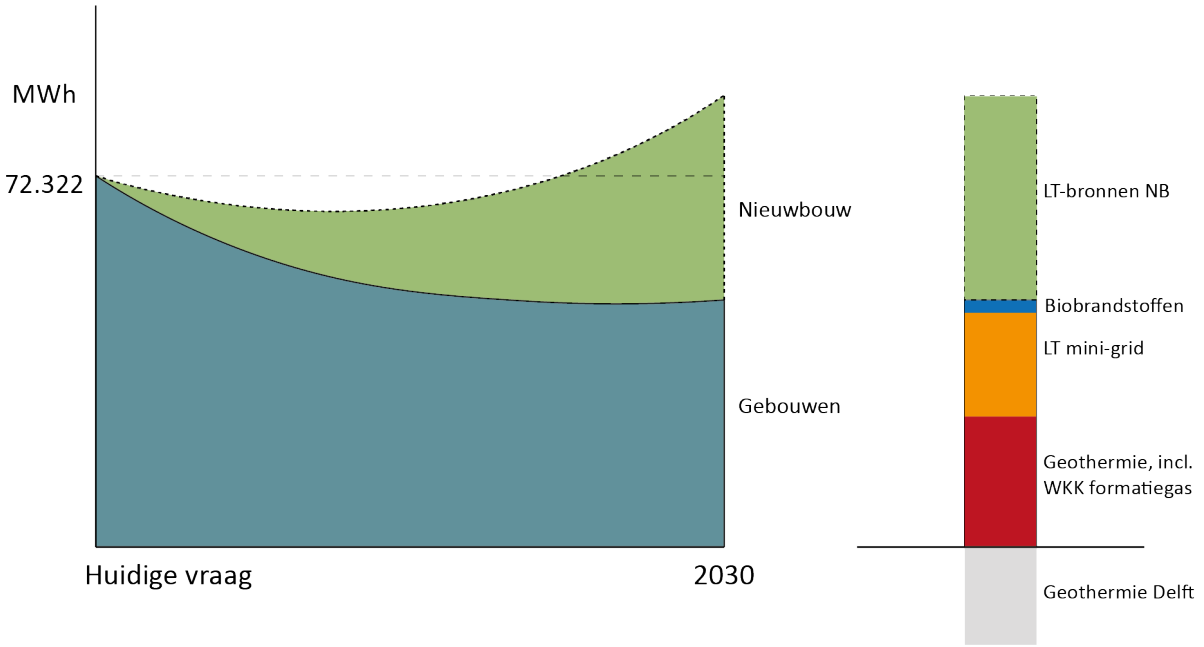


Figuur 8.29: Toename CO_2 door elektriciteitsgebruik pompen geothermiebron

In de CO_2-berekeningen is uitgegaan van fase 3. De volledige CO_2-emissies door toename elektriciteit en formatiegas zijn toegerekend aan de TU Delft. Door de emissies te compenseren op de campus kan de warmte worden verkocht als CO_2-neutraal. Hiermee worden de bespaarde CO_2-emissies voor het verkochte aandeel tevens toegerekend aan de klant: ca. 16.000 MWh. De elektriciteit en warmte opgewekt met het formatiegas in de WKK-installatie wordt gebruikt door de campus.

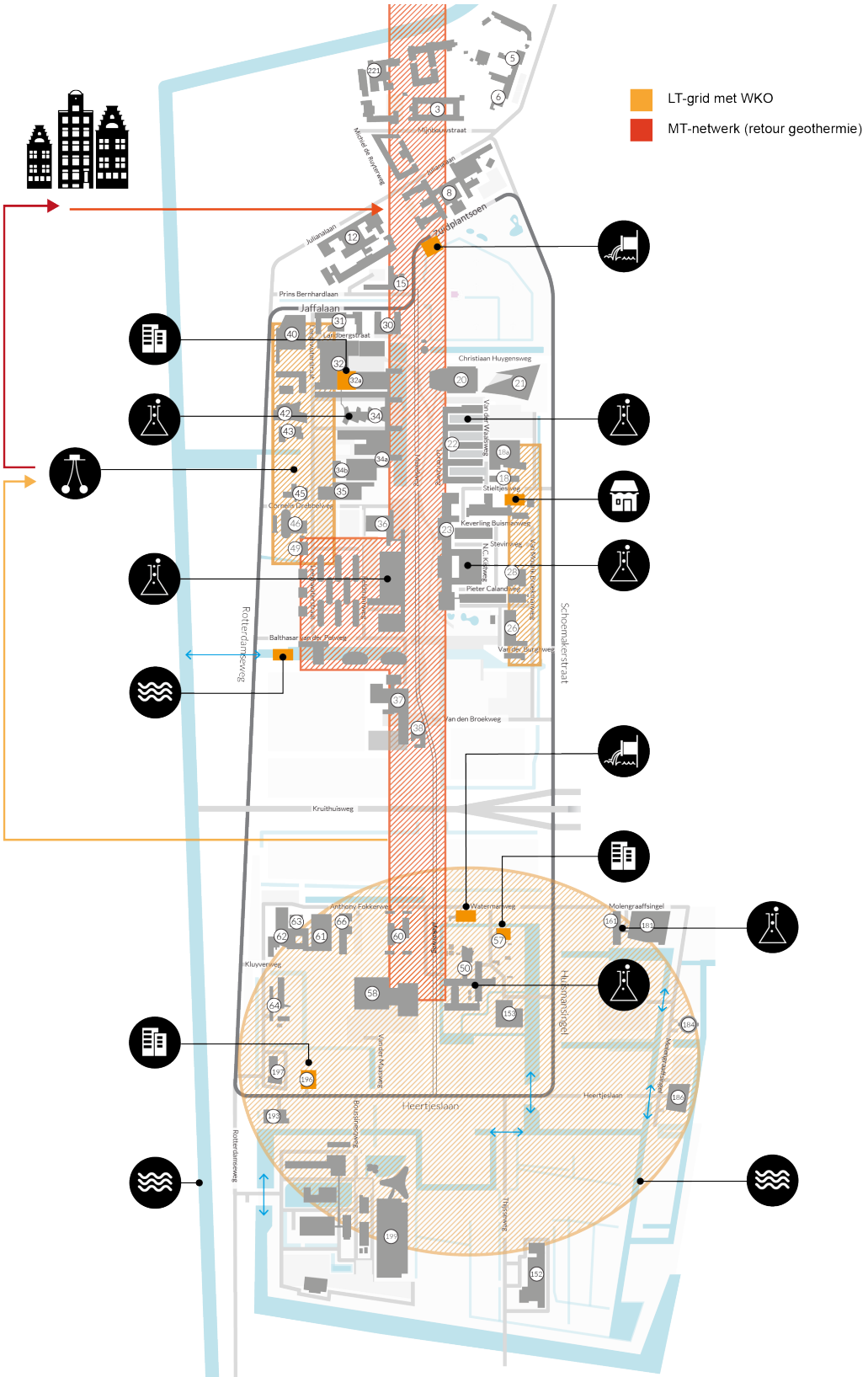
8.4.2 Lagetemperatuurmininetwerken (restwarmte, oppervlaktewater + WKO)

Op weg naar 2030 moet de warmtevraag in de bestaande gebouwen van de TU-campus omlaag worden gebracht, terwijl nieuwbouw zondermeer energieneutraal hoort te zijn. Daarnaast zal de huidige hogetemperatuurvraag van bestaande gebouwen geleidelijk naar lage- of middentemperatuur moeten worden gebracht, middels dezelfde renovaties die de absolute vraag verlagen. Zo zullen volgens deze ontwikkeling de te realiseren nieuwbouw, 40% van de vraag ten noorden van de Kruithuisweg en 80% van de vraag in TU-Zuid in fase 3 worden aangesloten op lagetemperatuurmininetwerken. Figuur 8.30 geeft daarvoor grafisch het beeld.

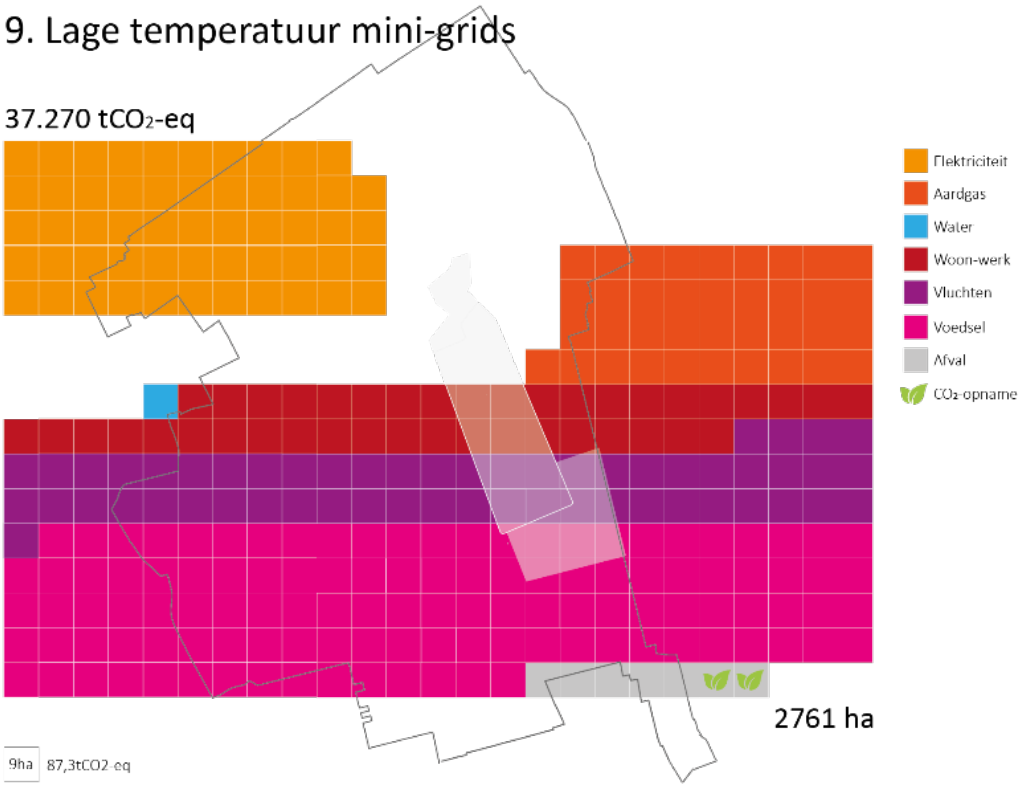


Figuur 8.30: Ontwikkeling warmtevraag en duurzame invulling

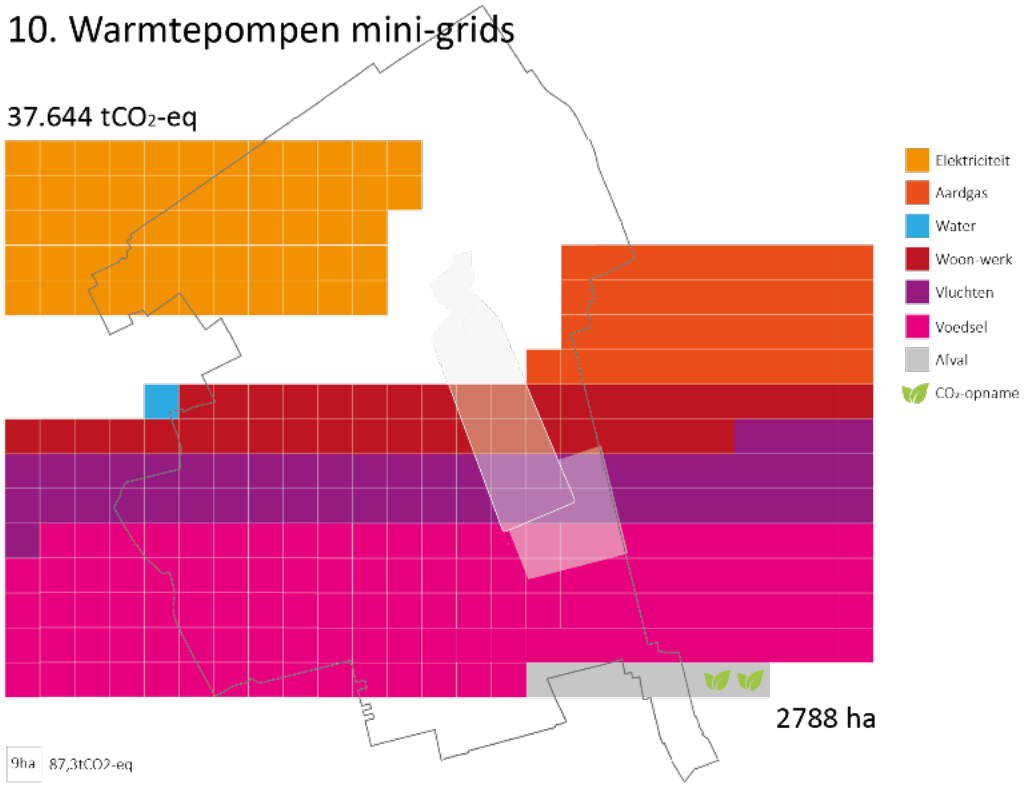
In Figuur 8.31 geeft een indicatie welke gebouwen (na renovatie) kunnen worden aangesloten op de (retour) geothermieleiding of op een lokaal lagetemperatuurnetwerk. De keuze zal bij iedere renovatie opnieuw moeten worden overwogen. Zo kan volgens de huidige vastgoedstrategie Technische Natuurkunde (22) grondig worden aangepakt doordat het gebouw tijdelijk leeg komt te staan. Hierbij zal dus de afweging moeten worden gemaakt of lage- of middentemperatuur-verwarming mogelijk is.
Bronnen voor de lagetemperatuurnetten bestaan uit warmte-uitwisseling met het oppervlaktewater van de Schie, poldergemaal Zuidpolder en de twee rioolgemalen; daarnaast is restwarmte afkomstig van de datacenters (3), supermarkt en de verschillende cleanrooms en laboratoria op de campus, en tenslotte worden er verschillende WKO-doubletten gerealiseerd.
Naast de reductie van CO_2 door de toepassing van een duurzame warmtevoorziening zal de elektriciteitsvraag toenemen door het gebruik van warmtepompen.
Figuren 8.32 en 8.33 geven de consequenties voor de CO_2-voetafdruk.



Figuur 8.31: Warmtenetten in fase 3. Een centraal MT warmtenet op de retour van de geothermie vanuit de stad Delft voorziet 60% van de vraag in het noordelijke campusgebied. De resterende vraag en TU-Zuid wordt gevoed door LT-mininetten op (rest)warmte van laboratoria, datacenters, supermarkten, riool- en poldergemalen, oppervlaktewater en WKO-bronnen. De te realiseren nieuwbouw (met name geplaatst in TU-Zuid) zal ook worden gevoed door de LT-netten en zal tevens energieneutraal zijn.



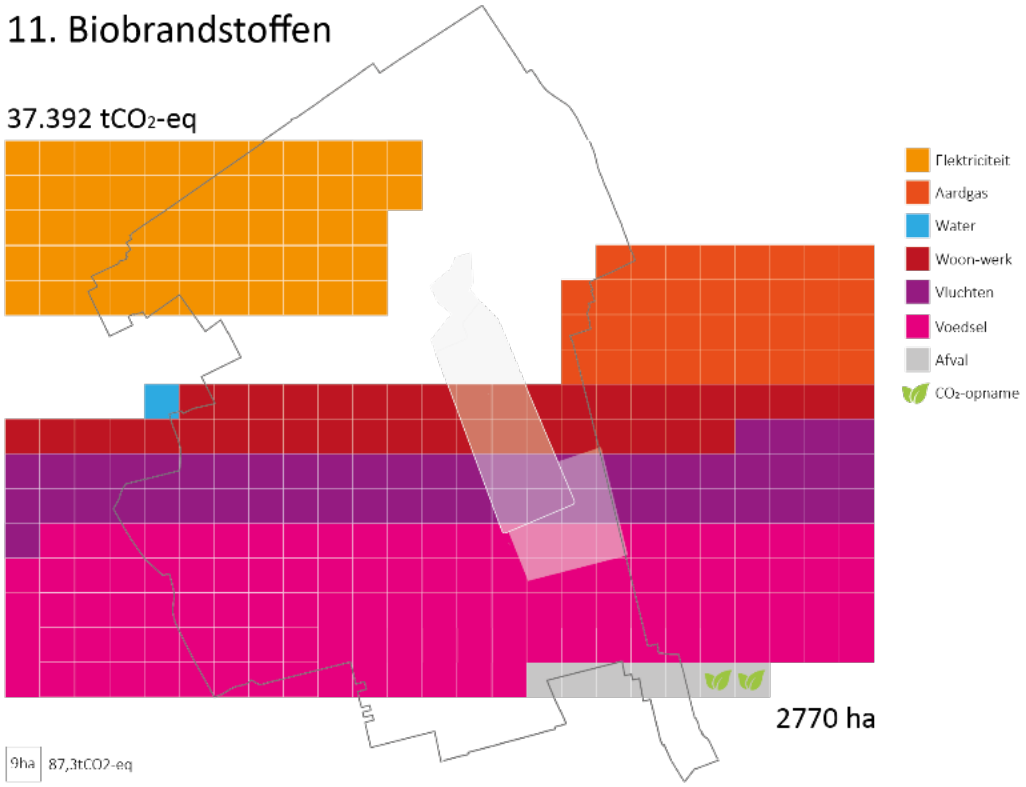
Figuur 8.32: CO_2-reductie door invulling resterende warmtevraag met LT-bronnen



Figuur 8.33: Toename van de elektriciteitsvraag door het gebruik van warmtepompen; in deze berekening is ervan uitgegaan dat nieuwbouw CO_2-neutraal wordt (wel aangesloten op LT)

8.4.3 Biobrandstoffen

Als Living Lab kan in enkele waterpartijen en op de lege plots in TU-Zuid (in gesloten Photo-bioreactors, PBR) worden geëxperimenteerd met biobrandstofproductie uit algen. De geproduceerde energie uit algengroei en afval zal worden gebruikt als seizoensaanvulling voor de WKC (pieken). In de CO_2-berekening is een kleine bijdrage van 1.000 MWh meegerekend voor het gebruik van algen en energie uit afval. Naast de productie van energie draagt dit proces bij aan de verwerking van organisch afval en aande opname van CO_2 gedurende de levensduur van de algen.



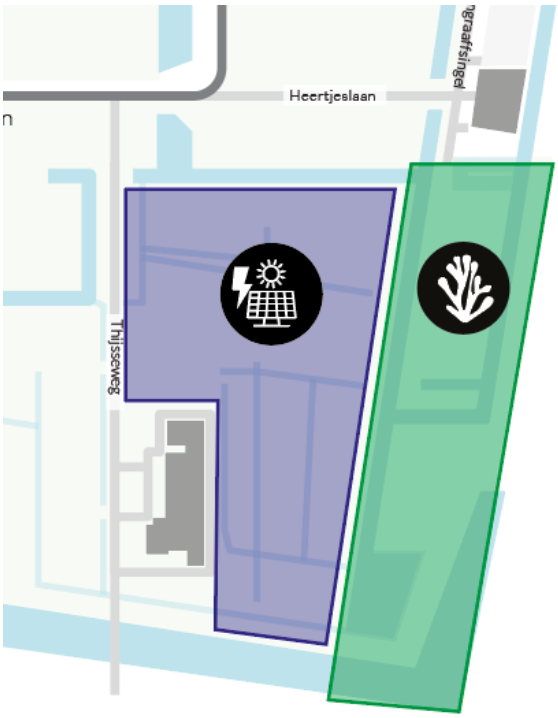
Figuur 8.34: Effect van het gebruik van biobrandstoffen voor seizoenaanvulling

8.4.4 Overige productie van elektriciteit op de campus

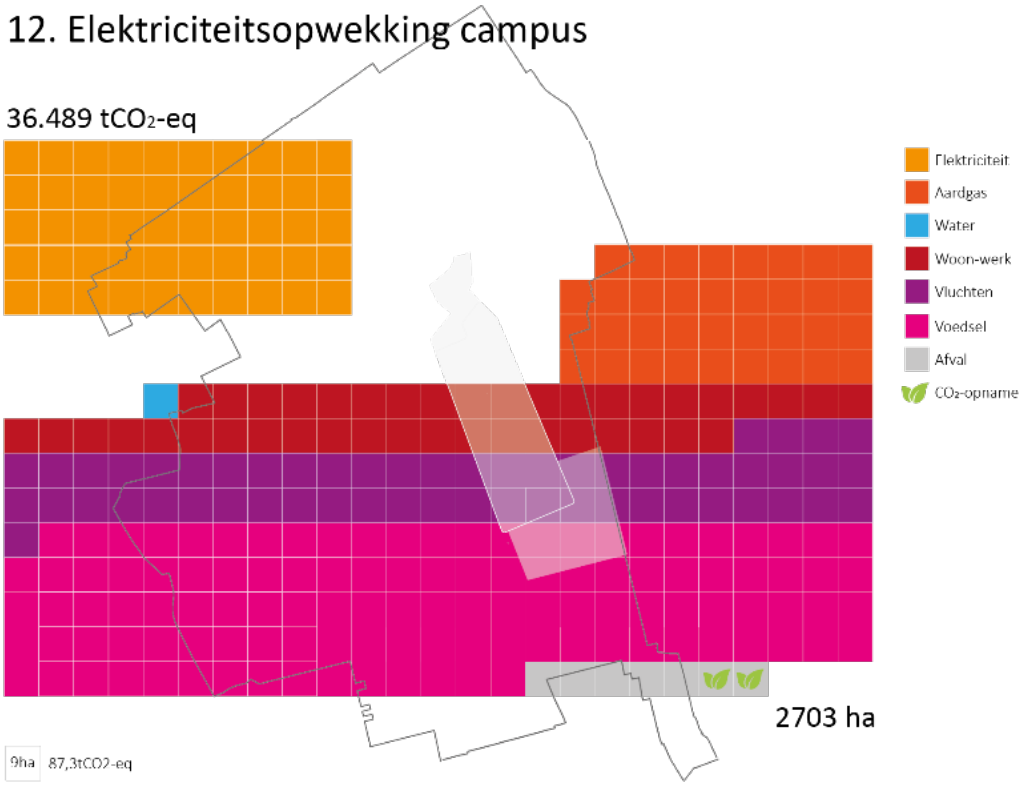
Naast de toepassing van PV op daken en gevels van gebouwen kan, om grootschalige opwekking mogelijk te maken, PV ook worden ingepast op het campusterrein.
De volgende opties zijn meegenomen in de CO_2-studie:

- PV-velden op lege kavels in TU-Zuid: toepassing van de kavel in figuur 8.35: 85.000 m^2
- PV op geluidsbarrières Kruithuisweg: lengte 1 km, 2 m hoogte, 2 zijdes
- Windturbines EWI en Kruithuisweg: 50 stuks, 3.000 kWh/jaar [Turby][12]
- Drijvende PV-panelen

[12] Dit is waarschijnlijk een veel te hoge inschatting van de jaaropbrengst van een Turby



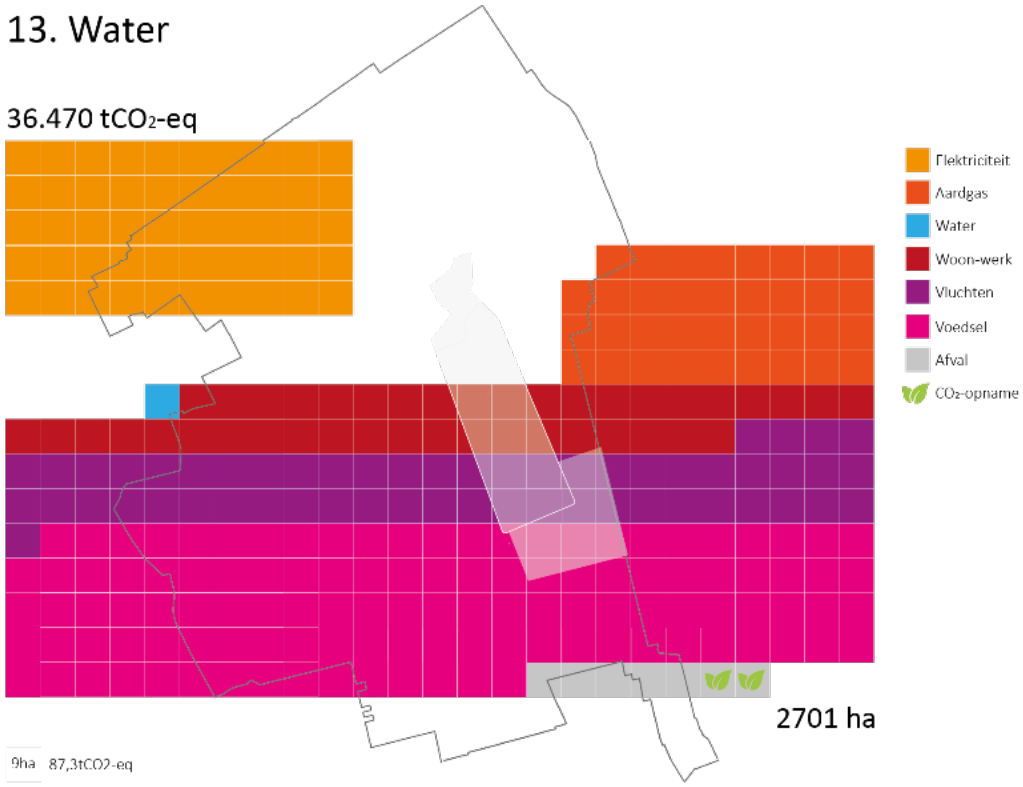
Figuur 8.35: PV-velden en algenproductie in Campus-Zuid (op lege velden)



Figuur 8.36: Effect van elektriciteitsopwekking op de campus door middel van PV-velden, drijvende PV, windturbines en PV-geluidsschermen langs de Kruithuisweg

8.5 Water

Door het beperkte gebruik van water op de campus is de invloed op de CO_2-voetafdruk van de campus bijna nul. Echter, maatregelen op het gebied van water zijn wel van belang voor de duurzaamheid van de campus, met name op het gebied van klimaatadaptatie. Waterberging ondergronds of in overloopgebieden of waterpartijen zal een belangrijke rol spelen in het beperken van wateroverlast. Daarnaast kan regenwater worden gebruikt om een deel van de vraag in te vullen, zoals het doorspoelen van de toiletten. Hiervoor zou ook door algen gezuiverd afvalwater kunnen worden gebruikt. In de CO_2-voetafdruk wordt gerekend met een waterbesparing van 20%.



Figuur 8.37: Reducties door vermindering van het watergebruik met 20% hebben minimaal effect op de totale CO_2-voetafdruk; waterbeheer is echter wel van belang voor de duurzaamheid en klimaatadaptatie van de campus

8.6 Mobiliteit

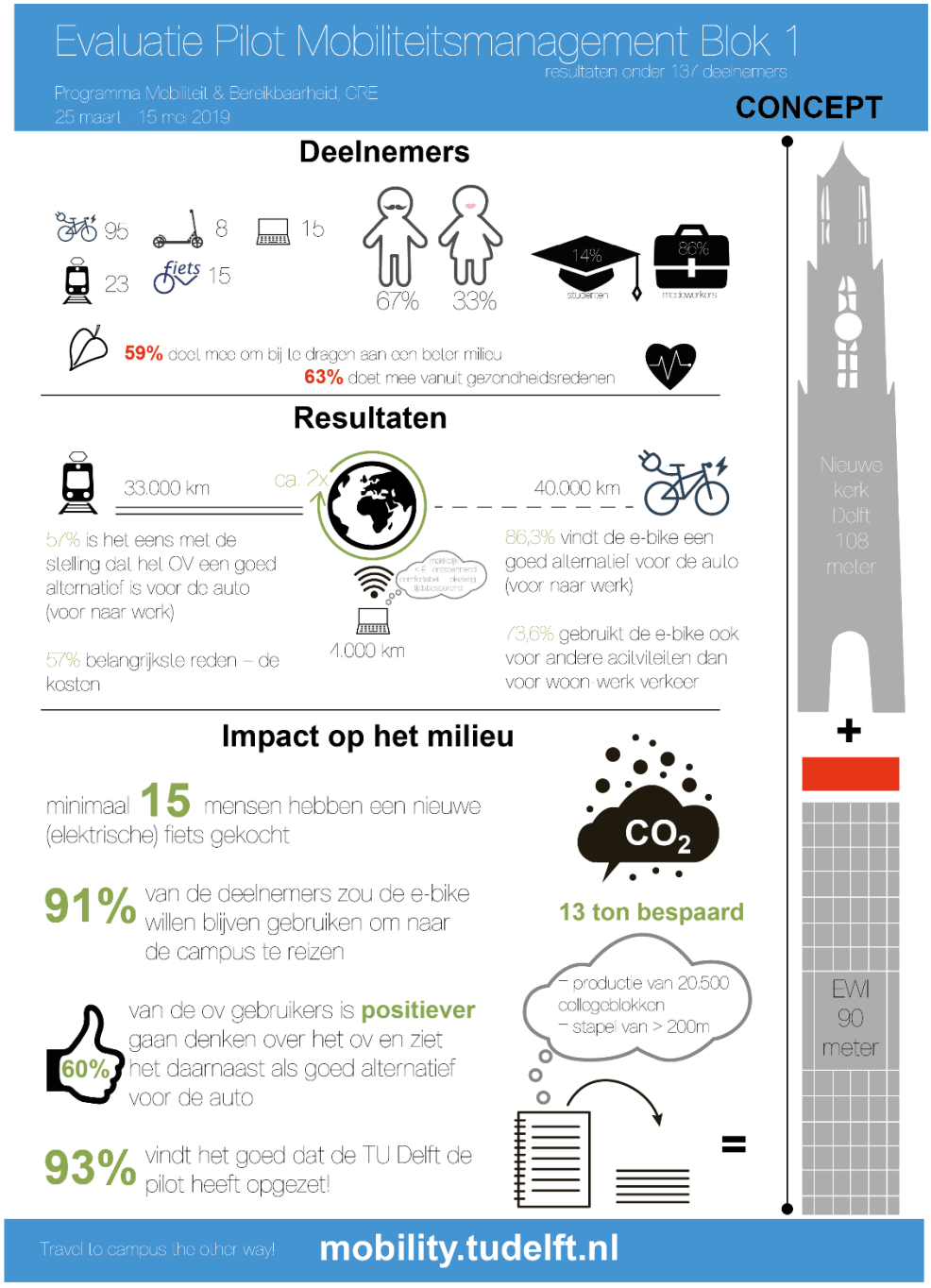
8.6.1 Woon-werkverkeer

De huidige emissies (11,4% van de totale emissies van de TU-campus) worden met name veroorzaakt door het autogebruik van de werknemers. Om het autogebruik te verminderen worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Stimuleren van door mensen aangedreven vervoersmiddelen
  - Herintroduceren van een universiteitsplan voor fietsen en E-bikes
- Stimuleren van openbaar vervoer
  - Verstrekken van NS-business cards, inclusief OV-fietsgebruik
- Promotie van het gebruik van elektrische voertuigen
  - 2030: geen auto's op fossiele brandstoffen meer op de campus zelf

- Toevoegen van extra (snel)laadpunten op de campus, die worden gevoed door hernieuwbare bronnen
- Het CvB rijdt enkel nog in elektrische auto's

Tevens loopt er vanuit CRE de mobiliteitspilot '*Travel to the campus the other way*' (Figuur 8.38), met als doel het autogebruik richting de campus te verminderen. In het eerste blok van de pilot (25 maart – 15 mei 2019) hebben 133 werknemers en studenten die normaal gesproken met de auto komen kunnen kiezen voor het gebruik van een e-bike, NS-businesscard met OV-fiets of voor thuiswerken.

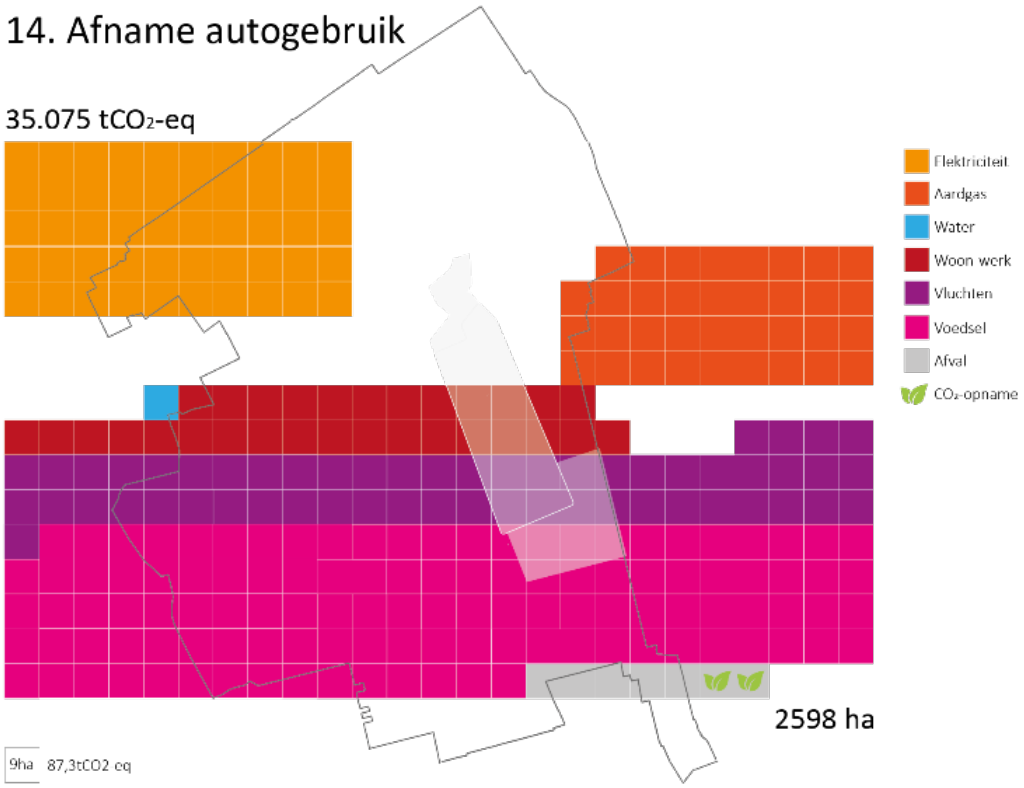


Figuur 8.38: Evaluatie Pilot Mobiliteit CRE, conceptversie [Cathelijn Dijk-Koekkoek en Lisa Bruijntjes, 28-06-2019]

De resultaten van het eerste blok zijn veelbelovend: van de e-bikegebruikers zegt 91 procent met de E-bike te willen blijven reizen naar de campus. In totaal is in 8 weken tijd door gebruik van E-bike, OV en thuiswerken 13 ton CO_2 bespaard [Cathelijn Dijk-Koekkoek]. Een week na het einde van het eerste blok hebben acht gebruikers al een e-bike besteld. Er volgen nog drie blokken in de pilot. Tevens blijkt uit de pilot dat het gebruik van de e-bike niet alleen een positieve invloed heeft op het autogebruik voor woon-werkverkeer, maar tevens wordt de e-bike ook regelmatig buiten werktijden gebruikt.

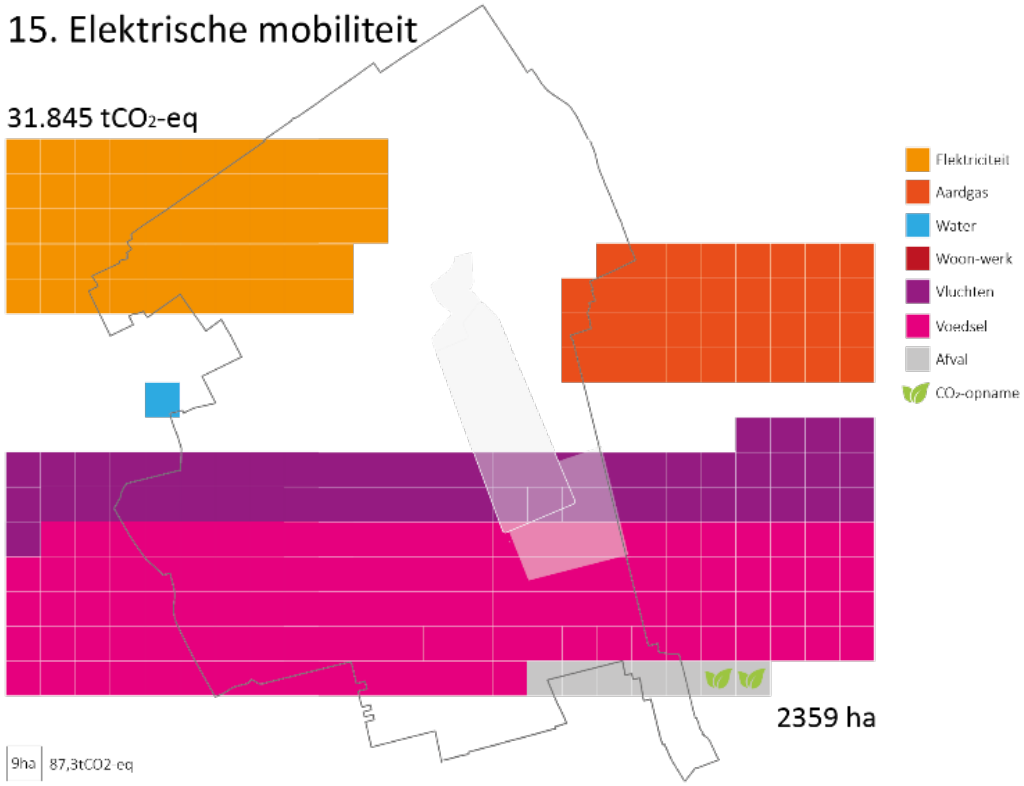
CO_2-reducties

De eerste stap is het verminderen van de automobiliteit, door bovengenoemde maatregelen is er een afname van 30% aangenomen. Hierdoor zal het gebruik van openbaar vervoer en E-bikes toenemen. Alle resterende mobiliteit (autogebruik en openbaar vervoer) zal tenslotte een transitie ondergaan naar elektrische mobiliteit, wat tevens resulteert in een toename van de elektriciteitsvraag (laden).
Figuur 8.39 toont de reducties van de CO_2-uitstoot door een afname van het autogebruik.

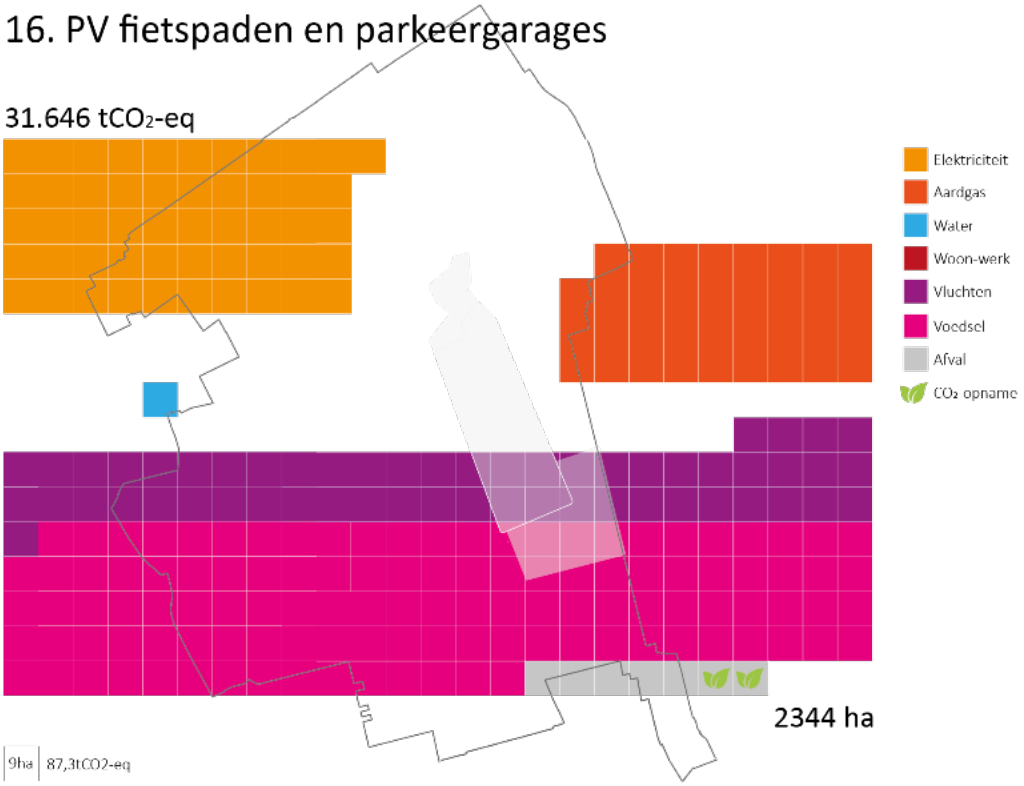


Figuur 8.39: CO_2-reductie door vermindering autoverkeer

Figuur 8.40 toont het effect van de toename van elektrisch vervoer. Voor de compensatie van deze elektriciteitsvraag wordt voorgesteld het centrale fietspad op de campus te overdekken met een PV-afdak (Mekelpark tot Heertjeslaan 1,7 km), waarmee een droge en beschaduwde fietsroute ontstaat over de campus. Daarnaast zullen ook de parkeergarages moeten worden voorzien van PV-geïntegreerde gevels en daken. Voor het effect: zie Figuur 8.41.



Figuur 8.40: Toename elektriciteitsvraag door E-bikes en elektrificatie automobiliteit



Figuur 8.41: Gedeeltelijke compensatie van de energietoename door vervoerselektrificatie door met PV overdekte fietspaden en parkeergarages met PV op dak en geïntegreerd in de gevels

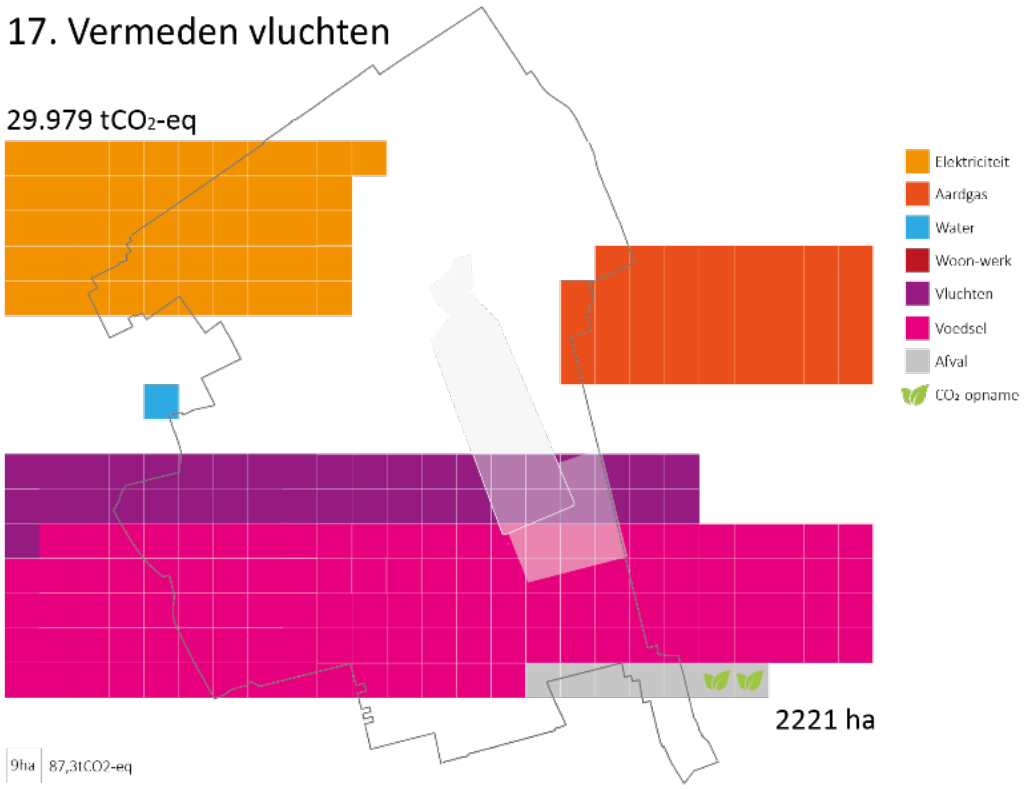
8.6.2 Zakenvluchten

De zakelijke vluchten hebben een grote impact op de emissies in scope 3. Het aantal gevlogen kilometers (33,3 miljoen km) zal drastisch moeten worden teruggedrongen, bijvoorbeeld door:

- Gedragscode: alleen vliegen wanneer echt nodig en wanneer het bijdraagt aan een beter wereld
- Verplicht stellen van reizen per trein tot 700 km afstand
- In de toekomst: alle gemaakte vluchten met duurzame vliegtuigen.

Daarnaast wordt voorgesteld dat TU Delft verplicht gebruik maakt van CO_2-compensatie voor vliegreizen (KLM CO_2-zero / carbonkiller.org / treesforall.nl).

Figuur 8.42 geeft een ruwe inschatting van het effect van vermeden zakenvluchten, een blok van 12 x 9 ha. CO_2-compensatie is hierin niet meegenomen; daarmee zou de uitstoot van vliegen naar 0 gaan.



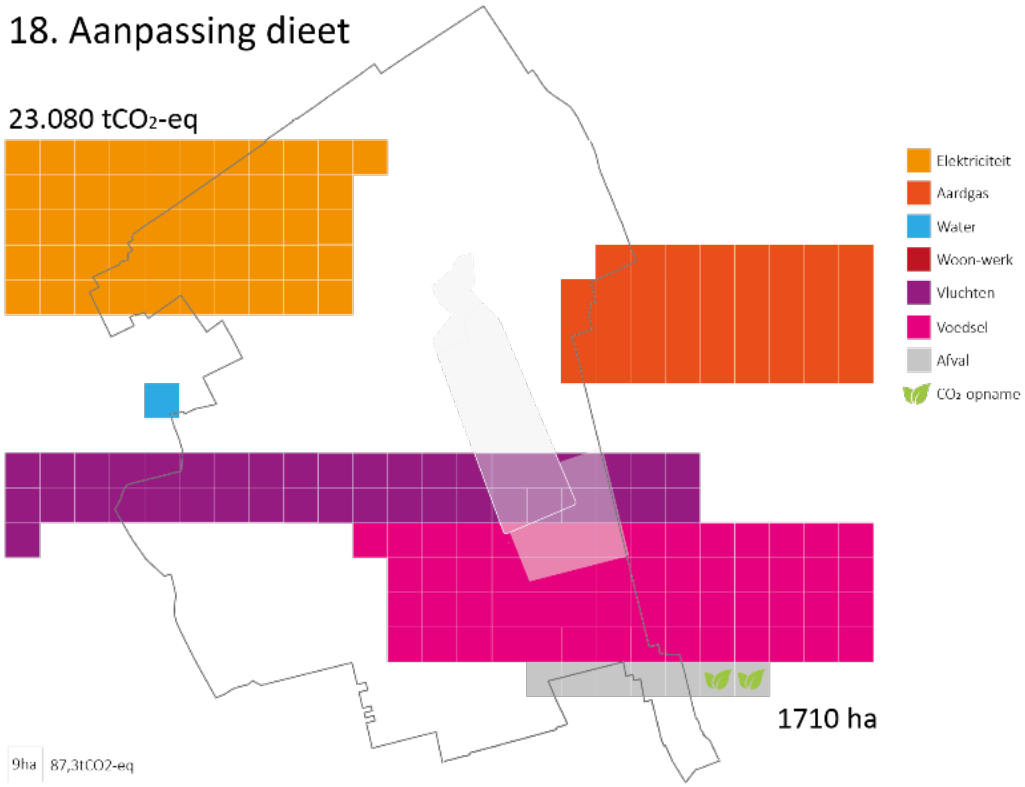
Figuur 8.42: Effect van vermeden vluchten door genoemde maatregelen

8.7 Voedsel

Door het opnemen van meer lokaal geproduceerde producten en verminderen van genuttigde dierlijke producten kan een groot deel van de CO_2-uitstoot worden gereduceerd. Deze aanpassing van het dieet kan worden gestimuleerd door:

- Aanpassen van het aanbod in restaurants
  - Veganistisch, organisch en lokaal geproduceerd voedsel als standaard en goedkoopste optie
  - Toevoegen van kaas, vlees of vis mogelijk tegen extra kosten
  - Lokaal voedsel (Biesland, Oostland, Westland), dat energie voor transport en opslag bespaart
  - Opleiden van keukenpersoneel: veganistische/vegetarische kookcursussen
- Informeren studenten en werknemers
  - Informatie (lezingen, posters) over de impact van voedsel op de CO_2-voetafdruk

Figuur 8.43 laat het niet geringe effect van deze maatregelen zien.



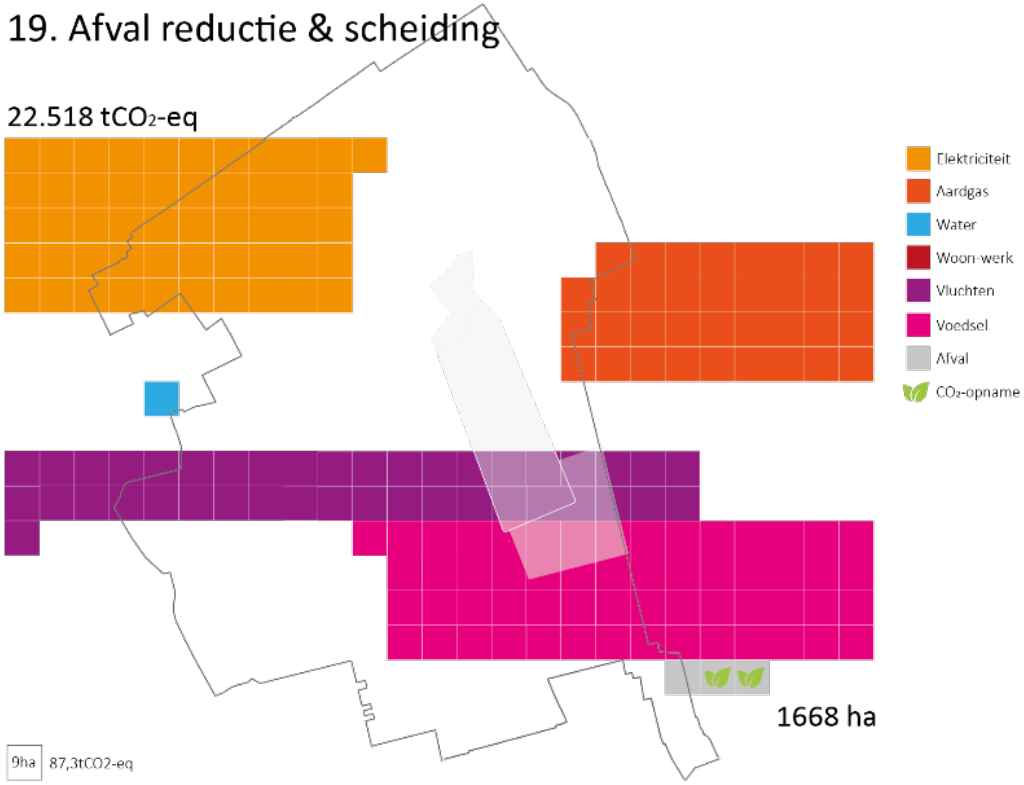
Figuur 8.43: CO_2-reductie door aanpassing dieet naar meer lokaal geproduceerd en plantaardig voedsel

8.8 Afval

Momenteel wordt slechts 42% van het geproduceerde afval gerecycled. Hoewel wordt gestreefd naar een circulaire campus in 2030 ontbreken er duidelijke doelen met betrekking tot afval. Tevens is het de vraag of de afvalverwerking op de campus wel 100% circulair kan, vanwege het gevaarlijke afval dat wordt geproduceerd [Phi Factory 2018]. Phi Factory heeft hiervoor de volgende doelen voor de TU-campus geformuleerd [Phi Factory 2018; Phi Factory 2019]:

- Meer focus op de inkoop- en gebruiksfase, niet alles aan de achterkant oplossen
- Verminderen afvalproductie:
  - Vermijden van onnodig verpakkingsmateriaal
  - Creëren van bewustwording: gedragsverandering voor gescheiden verzamelen van afval en tevens verlagen van de afvalproductie
    - Stimulatie KeepCups: uitreiken aan studenten in de OWEE
    - Reductie papiergebruik
  - Naar een circulaire campus: zo veel mogelijk reeds benutte grondstoffen opnieuw een waarde geven
- Percentage restafval zo laag mogelijk door verbeterde afvalscheiding:
  - Betere scheiding van stromen
  - Gescheiden vuilnisbakken voor GFT-afval bij restaurants
- Verminderen vrachtvervoer op campus (inzamelen)
- Verminderen interne opslag: zo min mogelijk interne ruimtes voor inzamelen en opslag van afval.

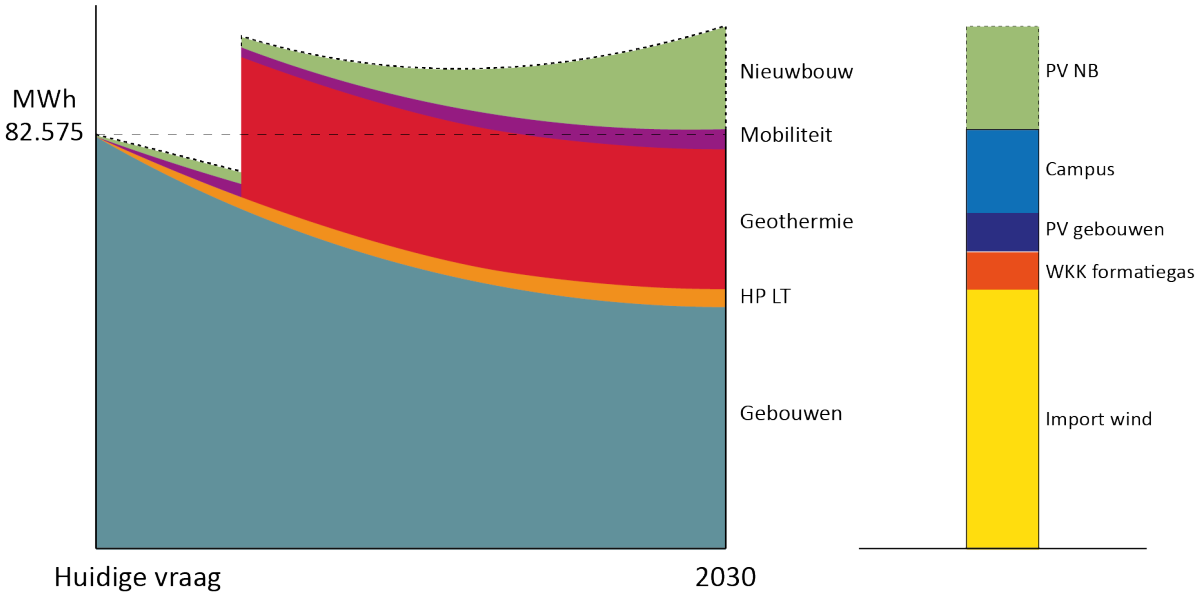
Het effect van deze maatregelen wordt getoond in Figuur 8.44.



Figuur 8.44: Reductie van CO_2 door vermindering afvalproductie en verbeterde scheiding

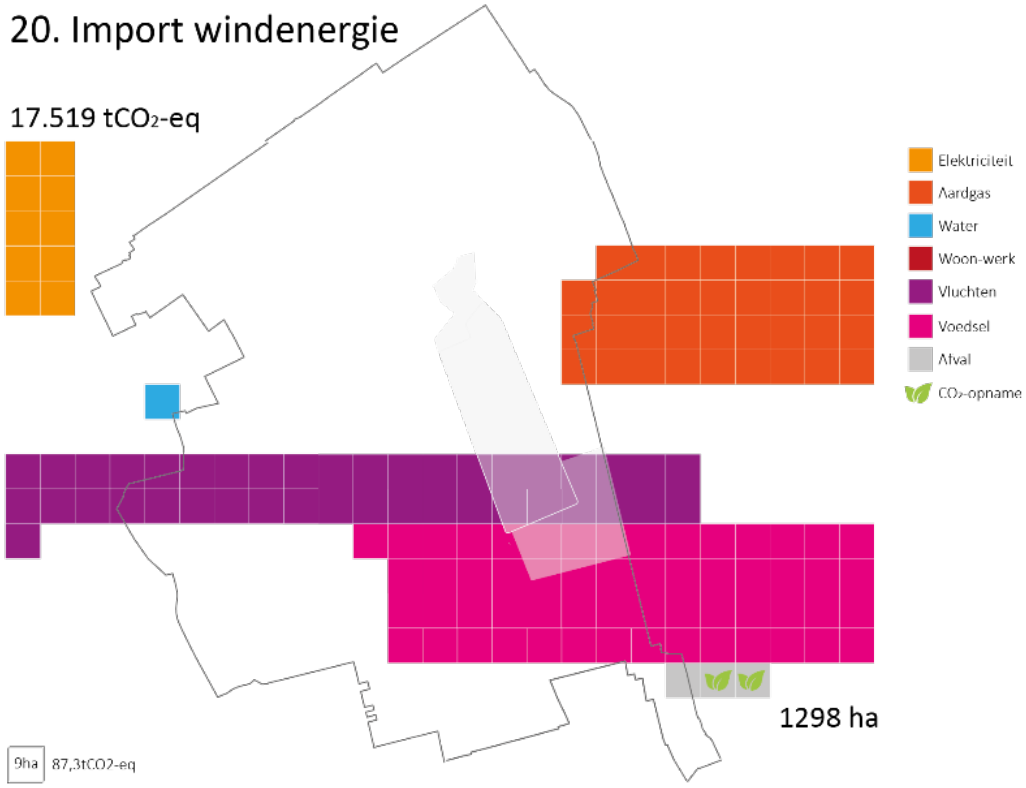
8.9 Import windenergie

In de Figuur 8.45 is de elektriciteitsvraag berekend voor 2030. Afgezien van de toename door nieuwbouw neemt de elektriciteitsvraag met 1% toe (83.470 MWh). Hoewel wordt bespaard op het elektriciteitsgebruik van de gebouwen (gelimiteerd door de beperkte opties voor onderzoek- en procesfuncties) is deze toename te verklaren door de elektriciteitsvraag van de geothermiepompen, warmtepompen voor lagetemperatuurverwarming en de elektrificatie van de mobiliteit. Een gedeelte van de elektriciteitsvraag is ingevuld door PV op gebouwen en in het campusgebied en door de productie van elektriciteit van formatiegas (WKK). De resterende vraag (64%, exclusief nieuwbouw) zal worden geleverd door geïmporteerde windenergie.



Figuur 8.45: Ontwikkeling elektriciteitsvraag en duurzame invulling

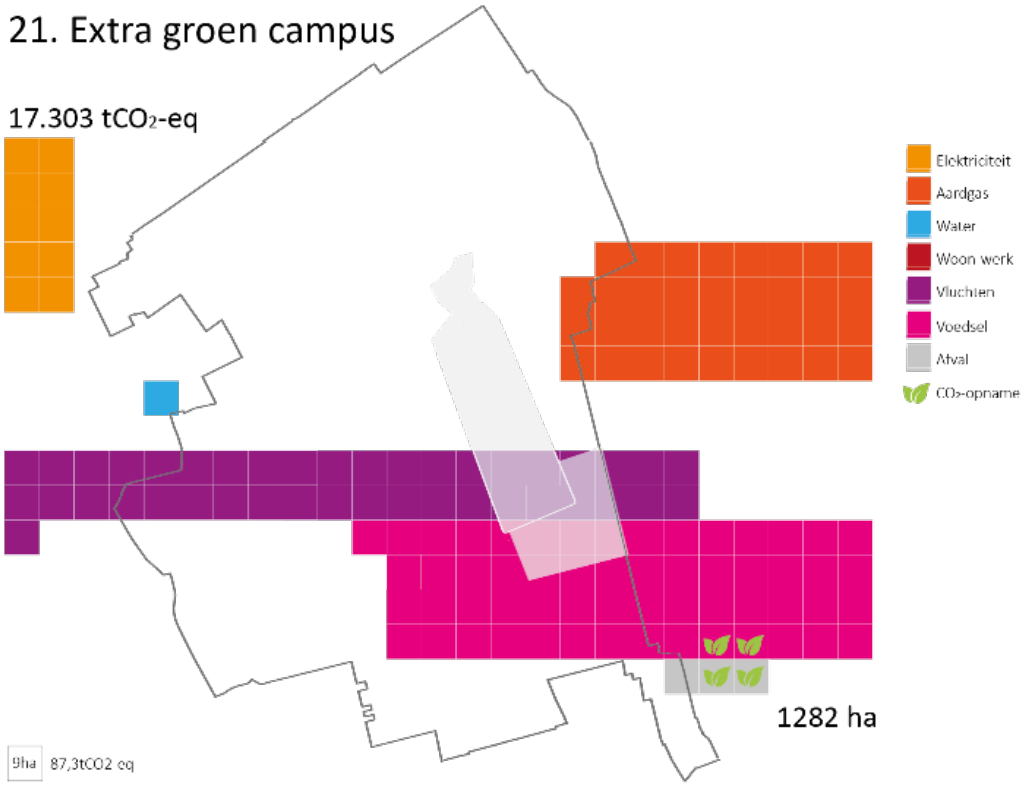
Hoewel de vraag volledig met duurzame bronnen ingevuld blijft, resulteert de elektriciteitsvraag nog in CO_2-emissies. Deze CO_2-emissies worden veroorzaakt door de productie van de PV-panelen (0,032 kg CO_2-eq per kWh) en windturbines (0,010 kg CO_2-eq per kWh) [Pulselli et al., 2019].



Figuur 8.46: Reductie door import windenergie, resterende emissies elektriciteit door productie PV en windturbines

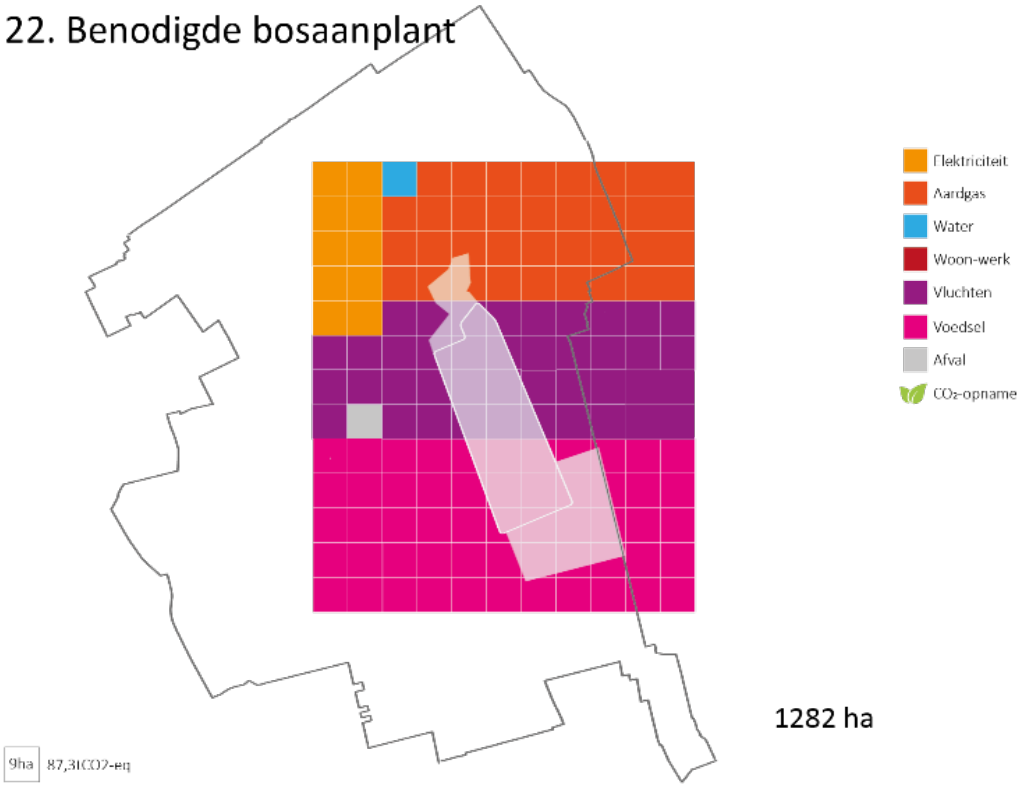
8.10 CO_2-compensatie / Bosaanplant

De CO_2-emissies die niet worden gecompenseerd door bovenstaande maatregelen zullen via een andere weg moeten worden gecompenseerd. Verdubbeling van het groen op de campus (Figuur 8.47) is een eerste stap, maar bij lange na niet voldoende.
Een pilot (Living Lab) met CO_2-opslag of het financieren van bosaanplant op een externe locatie behoren tot de mogelijkheden voor de compensatie van de resterende uitstoot.



Figuur 8.47: Reductie door extra groen op de TU-campus

Wanneer wordt gekozen voor bosaanplant is – na alle voorgaande maatregelen – een bosareaal van 1282 ha nodig. Dit bosareaal moet eenmalig worden aangeplant om de jaarlijkse uitstoot gedurende 40 à 45 jaar ieder jaar weer opnieuw op te nemen (CO_2-opname van een jong bos is hoger).
Figuur 8.48 toont dit resterende bosareaal op de witte achtergrond van het grondgebied van de TU Delft.



Figuur 8.4: Resterende CO_2-emissies en daarvoor te compenseren bosareaal

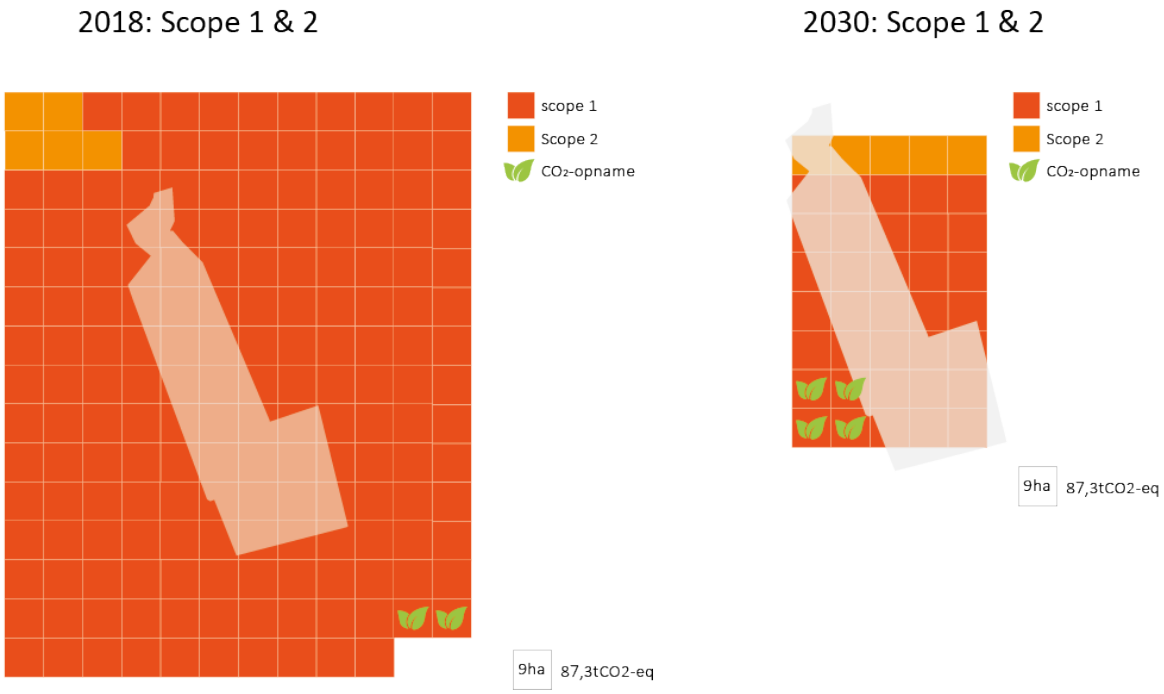
8.11 CO_2-neutraliteit

Op het behalen van CO_2-neutraliteit op de in dit onderzoek meegenomen facetten is enkel haalbaar wanneer 17.303 ton CO_2-eq wordt gecompenseerd. De resterende CO_2-emissies worden met name veroorzaakt door:

- Aandeel CO_2 door productie en onderhoud PV-panelen en windturbines.
- CO_2-emissies die vrijkomen bij verbranding formatiegas: hierbij moet wel vermeld worden dat in de bovenstaande berekening de emissies volledig aan de TU Delft zijn toegerekend, terwijl in de gepresenteerde plannen slechts een deel van de geothermiebron door de campus wordt gebruikt.
- Vluchten zijn momenteel nog niet duurzaam in te vullen; wanneer in de toekomst een duurzame manier (elektrificatie) van vliegen mogelijk is zal de voetafdruk aanzienlijk verminderen. Ongeveer 30% van het benodigde bosareaal wordt bespaard als vluchten vanaf heden automatisch worden gecompenseerd bij boeking.
- Voedselproductie – het grootste deel van de resterende CO2-emissies – zal altijd resulteren in CO_2-emissies. Hierbij moet worden vermeld dat als de TU Delft niet richting een meer plantaardig dieet gaat, het roze oppervlak van Figuur 8.47 bijna verdubbelt.

Scope 1 & 2

De huidige CO_2-emissies vallend onder scope 1 en 2 zijn met bovenstaande maatregelen verlaagd met 78%. Om in 2030 CO_2-neutraliteit voor scope 1 & 2 te behalen is CO_2-compensatie nodig van 4886 ton CO_2-eq, oftewel 362 ha bosareaal. Zie Figuur 8.49 en Tabellen 8.4 - 8.6.



Figuur 8.49: Vergelijking CO_2-voetafdruk scope 1 & 2 vóór en na implementatie van energiestrategieën

Tabel 8.4: Vergelijking CO_2-emissies veroorzaakt door bronnen uit scope 1 voor en na implementatie energiestrategieën

2030	tCO_2-eq
Formatiegas geothermie	4.672

2018	tCO_2-eq
Warmtekrachtkoppeling, WKC	7.705
Ketels, WKC	7.073
Individuele ketels	6.288
TOTAAL	21.066

Tabel 8.5: Vergelijking CO_2-emissies veroorzaakt door bronnen uit scope 2 voor en na implementatie energiestrategieën

2030 Scope 2	tCO_2-eq
Ingekochte windenergie	546

2018 Scope 3	tCO_2-eq
Ingekochte windenergie	641

Tabel 8.6: CO_2-opname door groen op de campus

2030 CO_2-opname	tCO_2-eq
Groen campus	- 432

2030 CO_2-opname	tCO_2-eq
Groen campus	- 216

Scope 3

In relatie tot 2018 kunnen met de voorgestelde implementaties de emissies in scope 3 met 53% worden verlaagd. Een extra bosareaal van 951 ha zal moeten worden aangelegd om ook de emissies in scope 3 te compenseren tot CO_2-neutraal (zie Tabel 8.7).

Tabel 8.7: Vergelijking CO_2-emissies veroorzaakt door bronnen uit scope 3 voor en na implementatie energiestrategieën.

2030	tCO_2-eq
Productie PV-panelen	210
Drinkwatergebruik en afvalwaterzuivering	78
Woon-werkverkeer	-
Zakelijke vluchten	5.000
Voedselconsumptie	6.898
Afvalverwerking	346
TOTAAL	12.532

2018	tCO_2-eq
Productie PV-panelen	33
Drinkwatergebruik en afvalwaterzuivering	98
Woon-werkverkeer	4.963
Zakelijke vluchten	6.667
Voedselconsumptie	13.797
Afvalverwerking	908
TOTAAL	26.466

9 Conclusies en aanbevelingen

9.1 Conclusies

9.1.1 Uitstoot van broeikasgassen

Uitstoot totaal en per TU-persoon

De TU Delft heeft een hoge uitstoot van broeikasgassen (CO_2-equivalenten[13]); in 2018 ging het in totaal om 47.957 ton CO_2-eq, veroorzaakt door in totaal 5.421 fte aan medewerkers en 24.703 studenten (die we gemakshalve op 1 fte per persoon zetten) in dat jaar. Dit komt neer op 1,6 ton CO_2 per fte. Is dat veel? Een gemiddelde Nederlander stoot in totaal ongeveer 10 ton CO_2 per jaar uit; daarin is de hele Nederlandse gebouwde omgeving, (energie)industrie, landbouw en mobiliteit meegenomen, behalve lucht- en scheepvaartverkeer. Met die laatste twee erbij zal de uitstoot eerder rond de 14 ton per persoon per jaar zijn.
In het geval van een TU-medewerker, -promovendus of –student ('TU-persoon') dragen werkzaamheden en gebruik van faciliteiten vanuit de TU Delft dus ongeveer 11-12% bij aan diens broeikasgasuitstoot. Maar dat is gemiddeld. Tussen medewerkers en studenten, ook onderling, kunnen onderling grote verschillen bestaan[14].
Goed nieuws is dat de uitstoot ten opzichte van 2017, ondanks een groei van ruim 5% in studenten en medewerkers, iets is gedaald (van 50.054 ton naar 47.957), resulterend in een daling per fte van 9%. De zwaarste reden hiervoor is de lagere afname van elektriciteit vanuit de eigen warmtekracht-centrale (WKC), ten gunste van meer inkoop van (CO_2-arme) windenergie. Maar ook uitstoot ten gevolge van woon-werkverkeer en zakelijke vluchten is in 2018 afgenomen, een goede ontwikkeling.

Bosareaal

Om een helder beeld te krijgen van de magnitude van de CO_2-uitstoot, hebben wij deze door het rapport heen, een belangrijke bijdrage van Dr. Riccardo Pulselli, vertaald in bosareaal dat benodigd is om deze uitstoot te compenseren, oftewel de CO_2-voetafdruk. De CO_2-uitstoot van de TU Delft stond in 2018 gelijk aan een bos ter grootte van 3552 ha. Is dat veel? Ja. Het staat gelijk aan een oppervlak groter dan dat van de hele gemeente Delft. Dit betekent dat de uitstoot niet kan worden gecompenseerd met aanplant van groen in de gemeente, nog losstaand van het feit dat de gemeente zelf van al haar andere wijken ook de CO_2-uitstoot zou moeten compenseren.
Het ligt daarom voor de hand dat dit bosareaal elders zou moeten worden gerealiseerd, waarvoor organisaties zoals Trees for All (www.treesforall.nl) diensten aanbieden.
Los daarvan lijkt het ons zinvol om deze aanplantnoodzaak deels te voorkomen door te investeren in maatregelen die de CO_2-uitstoot reduceren, waarvoor we in dit rapport veel suggesties doen.

Kosten

Zoals al eerder besproken in paragraaf 4.8.1, zou de TU Delft aan deze uitstoot – afhankelijk van de precieze prijs per ton – een jaarlijkse kostenpost van 1,2 tot 6,2 miljoen euro hebben zodra CO_2-uitstoot belast gaat worden. Overigens kan CO_2-uitstoot nu al worden gecompenseerd door aankoop

[13] Waar in dit rapport CO_2 wordt genoemd, gaat het altijd om CO_2-equivalenten, inclusief CH_4 (methaan), H_2O (waterdamp) en N_2O (lachgas), met een verrekening van de specifieke broeikaseffectbijdrage daarvan.

[14] Zo bepaalt het werk voor de TU Delft bij een van de schrijvers dezes, Andy van den Dobbelsteen, 80% van diens uitstoot, ook omdat hij privé een bijzonder lage uitstoot heeft. Het zijn vooral de zakenvluchten die de hoge uitstoot bepalen. Overal zit Andy wel onder het landelijk gemiddelde.

van certificaten, zoals via organisaties als Carbon Killer (www.carbonkiller.org). De prijs daarvoor is de geldende dagwaarde van een ton CO_2.
Desondanks lijkt het hier ook zinvol te melden dat in plaats van de jaarlijkse aankoop van CO_2-certificaten, te investeren in maatregelen waarmee de uitstoot wordt verminderd. Daarvoor hebben wij in dit rapport vele aanbevelingen gedaan.

9.1.2 Oorzaken van de uitstoot op de campus

Voedsel

De grootste factor in de uitstoot van broeikasgassen (458 kg CO_2-eq/fte) is verrassenderwijs het voedsel dat tijdens werktijd wordt genuttigd, in de faculteitsrestaurants, bij de foodtrucks of zelf meegenomen. Het aanbod van met name de kantines is nog vooral gebaseerd op consumptie van vlees en andere dierlijke producten, terwijl die een veel hogere CO_2-voetafdruk hebben dan plantaardige producten. Neemt de TU Delft zijn klimaatdoelstellingen serieus, ook al gaat het hier om een aspect van Scope 3 (niet de primaire focus van CRE), dan zal ze het voedselaanbod meer in balans moeten brengen en daar met name bij de cateraar aan moeten dringen op een verandering in de keuken.

Aardgas

De tweede grootste factor (444 kg CO_2-eq/fte) is het gebruik van aardgas, waarvan het meeste in de WKC wordt verstookt voor elektriciteit en warmte, en waarvan een deel nog wordt gebruikt in individuele gasketels en –boilers. Het moge duidelijk zijn dat we in Nederland van het aardgas afgaan, en dat deze brandstof op de TU Delft dus ook voor 2030 zal moeten worden uitgefaseerd en dus vervangen door andere duurzame bronnen zoals geothermie.
Het gebruik van aardgas heeft zijn oorzaak voornamelijk in het energiegebruik van de gebouwen op de TU-campus, dus naast het omschakelen naar een andere brandstof is het vooral van belang dat alle gebouwen energie-efficiënt, zoniet energieneutraal of –positief moeten worden. Uit onze analyse blijkt dat de meeste panden nog ver van de door CRE gestelde energieprestatiedoelen (maximaal 50 kWh/m^2 voor warmte en maximaal 50 kWh/m^2 voor elektriciteit) zijn verwijderd. Twee gebouwen die al wel (bijna) voldoen, Bouwkunde, CRE en TBM, staan op de nominatie om te worden afgestoten.

Elektriciteit

Nummer 3 bij de broeikasuitstoot vanuit de TU-campus (278 kg CO_2-eq/fte) komt voor rekening van elektriciteit. Zelfs bij de vermindering van het gebruik van elektriciteit uit de WKC, moet een deel CO_2-uitstoot worden berekend voor de ingekochte windenergie, om te compenseren voor de windturbines zelf.
Ook voor elektriciteit geldt dat de bron van de vraag natuurlijk ligt bij het energiegebruik van de TU-gebouwen. Vooral onderzoek- en procesgerelateerde functies hebben een hoog elektriciteitsgebruik. Wellicht is de eis van 50 kWh/m^2 voor deze functies wat te laag, maar dit neemt niet weg dat ook bij deze panden grote besparingen mogelijk zijn.

Zakenvluchten

Vierde factor, niet veel minder dan de uitstoot ten gevolge van elektriciteit is die van zakelijke vluchten vanwege TU-werkzaamheden (221 kg CO_2-eq/fte). De berekende uitstoot is nog aan de voorzichtige kant, omdat niet alle vluchten worden geboekt via BCD Travel, zeker als het gaat om studentenreizen voor projecten, workshops en excursies in het buitenland. De TU Delft kan er

daarom niet onderuit komen dat ze (1) het aantal vluchten reduceert door niet te reizen of de trein te pakken, (2) de uitstoot van benodigde vluchten compenseert.

Woon-werkverkeer

De top 5 van grootste veroorzakers van CO_2-uitstoot wordt gecompleteerd door woon-werkverkeer, waaronder ook studentenbewegingen worden verstaan. Het gaat vooral om vervoer per auto. Pilots in het recente verleden hebben al laten zien dat het stimuleren van openbaar vervoer via NS Businesscards en OV-fietsen enerzijds en het treffen van e-bikeregelingen hier een grote positieve invloed op kunnen hebben.

Andere factoren

Na genoemde vijf grootuitstoters volgen nog het beheer van afval (30 kg CO_2-eq/fte) en water (3 kg CO_2-eq/fte). Die lijken daarmee onbeduidend, maar ze zijn om meer redenen van belang om aan te pakken: circulariteit, gezondheid en milieukwaliteit.
Met groen op de campus wordt 7 kg CO_2-eq/fte gecompenseerd; dit is 0,5% van de totale uitstoot.

Scope 1, 2 en 3

In het navolgende zullen wij wat betreft de aanbevelingen een uitsplitsing maken naar aanbevelingen aan CRE, die vooral te maken hebben met de CO_2-uitstoot ten gevolge van hun primaire Scope 1 en 2, en aan het CvB, dat vooral invloed kan uitoefenen op de CO_2-uitstoot ten gevolge van Scope 3.

9.2 Aanbevelingen aan CRE

9.2.1 Gebouwen

Afstoten of sloop en nieuwbouw versus renovatie

De keuze tussen afstoten of slopen versus renoveren kan worden gebaseerd op het verwachte energiegebruik na oplevering, maar ook op de *embodied energy* of *embodied carbon* van de ingrepen (bouwwerkzaamheden en gebruikte materialen en producten) die daarvoor nodig zijn. In het geval van redelijk presterende gebouwen (zoals L&R, Bouwkunde, CRE, IO en TBM) slaat de balans duidelijk door naar renovatie, terwijl dat bij energetisch zeer slechte gebouwen (zoals het oude TNW en CiTG) wellicht anders licht. Een zware *midlife*-renovatie is het minste wat daar zou moeten gebeuren.

Afstoten

Zoals het er nu voor staat, zullen de volgende gebouwen worden afgestoten:

- Science Centre (3)
- Biotechnologie (5)
- Botanische Tuin (6)
- Chemische Technologie, ‘gele scheikunde’ (12)
- Kramerlaboratorium (15)

Ons advies, op basis van de redelijke energieprestatie, om het afstoten van het Science Centre te heroverwegen. Wij vermoeden dat het pand zou kunnen worden gerenoveerd tot onderwijsgebouw, waar de TU Delft behoefte aan heeft.

Midlife-renovatie

Voor de volgende gebouwen adviseren wij vanwege de huidige slechte energetische prestatie een *midlife*-renovatie:

- Technische Natuurkunde (22)
- Civiele Techniek (23)
- 3ME (34)
- EWI (36)

Zoals beschreven is sloop eventueel ook een optie voor Technische Natuurkunde en Civiele Techniek.

Light renovatie

Een lichte renovatie adviseren wij – om verschillende specifieke redenen – voor de volgende gebouwen:

- Aula (20)
- Bibliotheek (21)
- Bouwcampus (26)
- Technische Bestuurskunde (31)
- Industrieel Ontwerpen (32)
- Wiskunde & Informatica (28)

Nauwelijks ingrijpen

Ten slotte zien wij reden tot nauwelijks ingrijpen bij:

- Bouwkunde (8)
- CRE (30)
- Drebbelweg (35)
- Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek (62)

Bij deze gebouwen zijn zeker nog besparingen mogelijk (door middel van isolatie, LED-verlichting of gebouwbeheersystemen) of kan duurzame opwekking middels zonnepanelen worden gerealiseerd (denk aan PV-leien op Bouwkunde en verticale zonnepanelen op LR), maar deze panden geven momenteel de minste reden tot zorgen.

Het spreekt bovendien voor zich dat, waar dit van toepassing is, nieuwbouw tenminste energieneutraal, klimaatadaptief en circulair zou moeten zijn.

Specifieke quickscans

Voor alle gebouwen wordt geadviseerd specifiek onderzoek (een *quickscan*) te laten verrichten naar het energiepatroon, teneinde onregelmatigheden, onlogische afwijkingen en fouten in de installaties of hun schakeling te vinden. Dit is al gebeurd bij een paar panden, met grote effecten op het energiegebruik of het comfort. Kleine moeite, groot plezier. Terwijl wij dit onderzoek deden, kregen we de suggestie van Kees Kerkhoven en Hugo Kraal om dit in het komende jaar door hen te laten doen. Ons lijkt dit een uitgelezen kans om een grote besparing te bereiken, enkel dankzij tijdsinspanning van een paar medewerkers.

Laaghangend fruit

Wat bij alle gebouwen nuttige investeringen zijn, zijn de volgende:

- Isoleren van de schil, waar dat mogelijk en toegestaan is
- LED-verlichting
- Gebouwbeheersystemen
- Benutting daken en gevels voor PV

9.2.2 Energiesysteem van de campus

Geothermie

Geadviseerd wordt de ingezette ontwikkelingen naar het benutten van een geothermiebron door te zetten, om drie belangrijke redenen:

1. Voor zijn warmtesysteem heeft de TU Delft weinig andere alternatieven. Duurzame vormen van gas zijn onvoldoende beschikbaar, nu en in de toekomst, en er is onvoldoende potentie voor zonnewarmte. Geothermie is de enige bron met voldoende vermogen.
2. Het vermogen van geothermie is vermoedelijk zo groot dat delen van de stad Delft er ook mee voorzien kunnen worden. Daarbij gaat het om wijken die weinig alternatieven hebben om van het aardgas af te gaan, zoals de historische binnenstad en sommige buitenwijken. Met een start in de TU-wijk kan de TU Delft op termijn de stad helpen energieneutraal te worden.
3. TU Delft zou met een groot geothermienet een wereldprimeur hebben, hetgeen bijdraagt aan de naam en faam van de universiteit, maar waarmee ook op wetenschappelijke wijze ervaring kan worden opgedaan met deze vorm van warmtevoorziening. Dit is belangrijk aangezien veel steden in Nederland naar verwachting op termijn geothermie zullen gaan gebruiken.

Belangrijk te melden dat de TU Delft ook voor een *duurzaam* geothermienet zou moeten gaan. Daarmee bedoelen wij dat het systeem op termijn geschikt zou moeten zijn om te worden geregenereerd. Daartoe bestaan goede mogelijkheden als er ’s zomers overproductie van warmte is, wat bij een veranderend klimaat nog meer het geval zal zijn.

De realisatie en uitrol van het geothermienet kan gefaseerd:

- Bron inzetten voor voeding van het bestaande warmtenet van de TU-wijk, bijstook met aardgas om tot 90-100 graden te komen. Gelijktijdig starten met renovatie van de grootste warmtevragers naar lage HT, MT of zelfs LT. Nieuwbouwprojecten krijgen een LT-systeem met warmtepompen en WKO, bij voorkeur lokaal op elkaar aangesloten via een LT-mininet.
- Met renovatie naar lagere HT warmtevraag is de bijstook van aardgas niet meer nodig, hoogstens bij een piekvraag in de winter, die kan worden ingevuld met duurzaam gas (biogas, waterstof, synthetisch methaan) van de campus zelf. Gebouwen niet direct aan het Mekelpark kunnen van het warmtenet af om te worden aangesloten op een lokaal LT- (en koude)systeem met uitwisseling tussen verschillende panden. Het geothermienet kan worden aangesloten op dat van de Voorhof in Delft.
- Uitrol van het warmtenet via TU-Noord naar de Delftse binnenstad, om daar de historische panden aan te sluiten. Met verdere renovatie naar MT niveau kunnen de resterende panden in de TU-wijk met een MT warmtevraag worden aangesloten op de retourleiding van het geothermienet.

Energie-uitwisseling

In algemene zin kan in de ontwikkeling van de TU-campus meer rekening worden gehouden met het energetisch programmeren van functies, zoals wisselende gebruikstijden en verschillende vraag en aanbod met elkaar kunnen worden afgestemd, waarmee overschotten (en tekorten) in warmte maximaal kunnen worden benut en waarmee hoge pieken worden voorkomen en de maximale capaciteit omlaag kan.
Het benutten van overschotten en tekorten geldt met name voor de grote energievragers, die veel warmte of juist koeling behoeven (datacenters, cleanrooms en laboratoria): deze kunnen in een gemeenschappelijk warmte- en koudenet met elkaar verbonden zijn voor optimale uitwisseling, gecombineerd met dag-, week- en seizoensopslag.

Nieuwe functies in TU-Noord (verdichting) zouden bij afwijkende energiepatronen aldaar energie-uitwisseling en een gelijkmatiger over de dag of over de seizoenen verdeelde vraag mogelijk maken.

LT-warmtesystemen en hun bronnen

Bij het noemen van LT-warmtesystemen, bedoelen wij naast lagetemperatuurwarmte ook hogetemperatuurkoeling, omdat beide in balans kunnen worden gecombineerd met seizoensopslag in een WKO.
Op de campus zijn veel bronnen voorradig voor LT-warmte (en HT-koude). Naast restenergie van verschillende functies gaat het om aquathermiebronnen, zoals afvalwater (enkel voor warmte), via de twee rioolgemalen, en oppervlaktewater (voor warmte en koude), vooral van het Schiekanaal. Deze energie is gratis beschikbaar, dus wij raden CRE aan het potentieel en de praktische benutting ervan te laten onderzoeken door een terzake deskundig bureau. Naast de benutting van warmte in het energiesysteem van de TU Delft, kan onttrekking daarvan uit de Schie bijdragen aan eerdere bevriezing (in de winter) of waterkwaliteitsverbetering (in de zomer). Dit kan nader besproken worden met het Hoogheemraadschap Delfland.

Elektriciteitsopwekking op de campus

Naast PV op daken en gevels kan extra elektriciteitsopwekking via PV worden gerealiseerd op de campus, bijvoorbeeld op vrije kavels, in drijvende vorm, op nieuwe parkeergarages, op of boven fietsroutes, in een geluidswal langs de Kruithuisweg en in specifieke living labs.
Voor windenergie bestaat niet zoveel potentie, en dan vooral langs de Kruithuisweg en via kleine turbines op daken en rondom hoge gebouwen, zoals de hoogbouw van EWI.
De duurzame elektriciteitspotentie op de TU-campus is niet voldoende om de vraag, nu en hoogstwaarschijnlijk ook in de toekomst, volledig te kunnen dekken. Daarom blijft import van CO_2-neutrale elektriciteit, zoals nu het geval is, noodzakelijk.

Algen en andere biomassa

Geadviseerd wordt een serieuze studie te doen – met betrekking van deskundige wetenschappers in dezen – naar de mogelijkheid om waterzuivering via algen te realiseren, als living lab. Deze algen kunnen bijdragen aan een gesloten koolstofsysteem: ze absorberen CO_2, zijn de bron van biodiesel, die in de WKC kan worden bijgestookt, waarvan vervolgens de CO_2 kan worden afgevangen en opgenomen door algen. Hernieuwbare energie en CO_2-afvang in één.
Een soortgelijk voordeel ontstaat als organisch afval van de campus wordt omgezet in biogas of andere vorm van biobrandstof. Ons advies is om dit systeem eveneens onderdeel te laten zijn van een living lab, waarmee wetenschappelijke kennis wordt opgedaan en tegelijkertijd een afvalprobleem van de campus wordt aangepakt.

Blauw-groene infrastructuur

Blauw-groene infrastructuur verbonden en verspreid over de campus kan, naast een gering positief effect op de CO_2-boekhouding, bijdragen aan meer leefkwaliteit en biodiversiteit.

9.2.3 CRE en Scope 3

Zoals beschreven in paragraaf 9.1 hangt de grootste uitstoot van broeikasgassen door de TU Delft samen met aspecten die vallen onder Scope 3, zaken die deels worden bepaald door individuen zelf (woon-werkverkeer, vluchten, voedsel, afvalproductie) of die worden ingekocht door CRE of andere diensten binnen de TU Delft.

Duurzaam afvalbeheer

Met momenteel ongeveer de helft aan niet-gerecycleerd of verwerkt afval op de TU-campus, is een grote impact te verwachten van een beter afvalbeheer. Meer focus is nodig op inkoop en gebruiksfase, minder afvalproductie door andere producten en verbeterde scheiding
Hier wordt op dit moment onderzoek naar gedaan en advies over uitgebracht door Phi Factory. Geadviseerd wordt de adviezen daaruit op te volgen, voor een lage CO_2-voetafdruk.

Circulaire inkoop

Voor wat betreft de inkoop van Scope 3 willen wij adviseren deze zeker mee te nemen in de eigen klimaatdoelstellingen van CRE. Immers, wie inkoopt, bepaalt wat de kwaliteit en milieugevolgen van die inkoop zijn.
Het is belangrijk te beseffen dat CRE niet al haar inkopen in detail – met betrekking tot klimaatgevolgen – hoeft te kennen. Dat kan namelijk worden geregeld met de leveranciers, die vanuit hun expertise (a) inzicht dienen te hebben in de milieu- en gezondheidsaspecten van hun producten en diensten, (b) de duurzaamheidsvisie van de TU Delft dienen te onderschrijven, en (c) daarmee vanuit hun eigen verantwoordelijkheid actie toe kunnen nemen. Daarvoor is het wel goed om een scherpe uitvraag te formuleren, zoals dat bijvoorbeeld is gebeurd bij de nieuwbouw van ECHO (ook al is dat een eenmalig project).
Belangrijker nog is circulaire inkoop te realiseren bij andere onderdelen die een hoge CO_2-uitstoot veroorzaken, vooral de voedselvoorziening. Momenteel wordt aan een adviesrapport over circulariteit geschreven door ir. Layla van Ellen. Verder kunnen gespecialiseerde adviesbureaus bij de praktische uitvoering ondersteunen.

Duurzame partnerschappen

En meer nog dan de circulaire inkoop zelf, is het belangrijk dat TU Delft, en CRE in het bijzonder, samenwerkt met partijen die de duurzame visie van de TU Delft onderschrijven, begrijpen en mede verder vorm kunnen geven vanuit hun eigen expertiseveld. Het is lastig en vermoeiend om partners en leveranciers telkens op geleverde kwaliteit te moeten bevragen en controleren middels nauwkeurig omschreven juridische documenten, waarmee vervolgens via hiaten zaken buiten beschouwing worden gelaten of waarvan vanwege de formulering gemakkelijk kan worden afgeweken. Partners en leveranciers van de TU Delft zouden proactief moeten meewerken aan een duurzame, kwalitatief hoogwaardige universiteit en campus. Dus selectie van de juiste partner of leverancier is waarschijnlijk belangrijker dan selectie van de juiste producten, geleverd door eender welke partij.
CRE moet altijd wel sturend blijven.

9.3 Aanbevelingen aan het CvB

9.3.1 Verbinding en verbondenheid met Delft, de stad

Zoals meermaals omschreven is het belangrijk dat de TU Delft zich als belangrijk onderdeel van de stad Delft blijft zien, ook wat betreft de klimaatdoelstellingen. Stad en universiteit zijn onlosmakelijk verbonden in hun streven om CO_2-neutraal te worden. Als de TU Delft, zoals beschreven in Bijlage 6, gaat functioneren als stad van de toekomst, zal ze daarmee ook de stad Delft dienen in de voortgang.

Warmtenet

Die verbinding kan technisch concreet worden als het warmtenet van de TU Delft wordt uitgebreid naar de binnenstad of andere wijken van Delft. Vraag en aanbod kunnen beter worden afgestemd bij koppeling aan en uitwisseling met stadsfuncties die een ander energiepatroon (vooral een hogere warmtevraag) hebben dan de TU Delft.

Nabijheid

Het niet te ver van de stad ontwikkelen van TU-functies waar veel studenten en medewerkers gebruik van maken (vooral de faculteiten en onderwijsgebouwen) resulteert in kortere woon-werkafstanden, gebruik van duurzamer vervoer en een betere verbondenheid met de stad.
Functioneren als ecosysteem
Demonstratie nieuwe technologieën, living labs: energieproductie, geïntegreerde voedselproductie, energie-uitwisseling, etc.

9.3.2 Duurzame mobiliteit

Integratie van meer functies

Een campus met meer geïntegreerde functies die op andere tijden opereren levert een levendiger gebied op, met meer menselijke maat, en maakt een betere energiebalans en dus lagere CO2-utstoot mogelijk. Daarnaast resulteert dit in een betere beloopbaarheid van de campus en daarmee milieuvriendelijkere mobiliteit.

Weg van belastende automobiliteit

Voor een reductie van de CO_2-uitstoot ten gevolge van woon-werkverkeer is het vooral belangrijk dat autoverkeer wordt beperkt, door de volgende maatregelen, zowel 'wortels' als 'stokken':

- Verbeterde beloopbaarheid campus door verdichting in het kerngebied. Dit werd hierboven al besproken.
- Meer aantrekkelijke fietsroutes die de druk van het Mekelpark weghalen. De Mekelweg is momenteel zwaar belast, wat tot gevaarlijke situaties voor voetgangers en fietsers zelf leidt. Meerdere comfortabele fietseroutes, zoals die achter IO en 3ME langs, zal fietsen verder bevorderen.
- Een elektrische-fietsenplan. Zoals uit de succesvolle pilot is gebleken, helpt het aanbieden van aanschafsubsidies voor e-bikes bij het verminderen van auto- en brommermobiliteit. Dit geldt vooral voor mensen tussen 7 en 25 km van de campus wonen.
- NS-businesscard met OV-fietsabonnement voor alle medewerkers, niet alleen voor huidige automobilisten. Ga hierover een *gentleman's agreement* aan, om deze kaart ook enkel te gebruiken voor zakelijk vervoer. Maak hier ook het gebruik van een OV-fiets onderdeel van en de CO_2-uitstoot van de betreffende medewerker gaat naar nihil.
- Parkeren van auto's naar de rand van de campus. Het onmogelijk maken van parkeren voor de deur van de werkplek – buiten bijzondere gevallen en voor leveren en afhalen – maakt het gebruik van de auto onaantrekkelijker. Een uitzondering zou kunnen worden gemaakt voor auto's zonder emissies (elektrisch of op waterstof, met brandstofcel), hoewel fiets en OV altijd milieuvriendelijker zijn.
- Meer laadstations voor elektrische auto's, brommers en fietsen. Het aandeel parkeerplekken met een laadpaal is nu bedroevend laag. Geleidelijk zouden deze parkeerplekken – zij het in een lager aantal dan er nu parkeerplaatsen zijn – de norm moeten worden.

- Enkel nog bedrijfs- en dienstwagens zonder emissie. Concreet betekent dit bijvoorbeeld dat het CvB met directe ingang enkel nog gebruik zou moeten maken van elektrische auto's, in plaats van de huidige dieselwagens.
- Experiment met waterstofstation. Zoals nu bij The Green Village in gang is gezet, kan de TU Delft een pilot uitbouwen voor waterstofauto's, die op de campus met duurzaam geproduceerde waterstof kunnen worden bijgevuld.
- Milieuzone. De TU-wijk zou – in navolging van de plannen van bijvoorbeeld Amsterdam en vele buitenlandse steden – in 2030 volledig moeten zijn geblokkeerd voor fossiel vervoer. Het behoeft geen toelichting dat dit naast een positief effect op de CO_2-balans ook gezonder is voor de campusgebruikers.

Duurzame luchtvaart

Zoals beschreven in dit rapport moet de TU Delft ernaar streven het klimaateffect van zakelijke vluchtbewegingen zoveel mogelijk te beperken. Dit kan door de volgende maatregelen:

- Code of Conduct voor vliegen. Medewerkers, promovendi en studenten moeten zich bewust zijn van de klimaatimpact van vliegen en daarnaar handelen. Dat betekent dat ze bij elke reis bewust moeten nagaan of die reis echt nodig is (kan de reiziger op de plek van bestemming een verschil maken), of er andere vormen van reizen mogelijk zijn (vooral internationale treinen) en hoe de vliegreis over zo kort mogelijke afstand kan worden uitgevoerd (wat mogelijk tot hogere vliegprijzen kan leiden).
- Verbod op vliegen binnen 700 km vanaf Delft. Voor deze korte afstanden in Europa (denk aan Brussel, Parijs, Londen, Berlijn, Frankfurt etc.) zijn goede treinverbindingen beschikbaar. De reistijd is meestal niet eens langer en kan werkend worden ingevuld. Wel zijn treinreizen momenteel vaak nog duurder, maar dit zal veranderen als eindelijk CO_2-belastingen of accijnzen geheven gaan worden op vliegverkeer.
- Standaard compensatie van CO_2-uitstoot van vliegverkeer. Of dit geschiedt via de vliegmaatschappij zelf (bijv. CO2zero van KLM) of via een speciale overeenkomst met een gespecialiseerd bedrijf (zoals Trees for All of Carbon Killer), laten wij aan het CvB. Vermoedelijk is er meer zekerheid op geschikte compensatie wanneer de TU Delft daarover een verbintenis aangaat met een organisatie die CO_2 compenseert.
- Bijdragen aan duurzame luchtvaart. Dit is bij de Faculteit Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek natuurlijk een van de kerndoelstellingen en naast het gebruik van steeds meer duurzame brandstoffen zal het onderzoek naar duurzame toestellen bijdragen aan de wereldwijde vermindering van CO_2-uitstoot van vliegen.

Duurzaam vervoer naar de luchthaven

Momenteel is Rotterdam-The Hague Airport alleen te bereiken per auto, taxi, fiets (zonder grote bagage) of via een grote omweg met de bus. TU Delft, als organisatie geografisch dicht bij de luchthaven, zou naast het bijdragen aan duurzaam luchtverkeer daarvandaan (waardoor het aantal bewegingen daar weer kan toenemen) een duurzame verbinding ernaartoe kunnen regelen vanuit de TU-wijk. Denk aan de verlenging van de tramlijn op duurzame energie van de TU Delft, of innovatieve oplossingen zoals een hyperloopbaan, elektrische zelfsturende voertuigen of een comfortabele menskrachtverbinding.

9.3.3 Naar volledig duurzaam voedsel

Zoals in dit afsluitende hoofdstuk beschreven is de consumptie van voedsel tijdens werk- en studietijd de grootste factor van broeikasgasuitstoot aan de TU Delft. Een serieus klimaatplan van de universiteit kan dan ook niet zonder een visie op en actieplan voor duurzaam voedsel. De basis van

de hele voedselvoorziening zou moeten worden gevormd door plantaardig voedsel, terwijl kaas, vis en vlees aanvullend en duurder wordt, in tegenstelling tot de huidige situatie, die juist omgekeerd is. Plantaardig, lokaal, seizoenspassend voedsel zal de CO_2-voetafdruk van dit onderdeel meer dan halveren.
Bij de gebruikers van de TU-campus is naast gezondheids- en milieueffecten, bewustwording van de klimaatimpact van voedsel essentieel, zodat mensen individueel hun gedrag kunnen veranderen. Keukenpersoneel, die momenteel doorgaans nog traditionele, niet-duurzame gerechten bereiden, zouden door de cateraar moeten worden geschoold in duurzaam voedsel. Zonder juiste kennis in de keuken verandert er niets in het aanbod.

9.3.4 CO_2-compensatie, of anders?

In onze berekeningen hebben wij laten zien dat zelfs met een uitgebreid – zij het volkomen realistisch – pakket aan klimaatmaatregelen een zekere CO_2-voetafdruk overblijft, die gelijkstaat aan een groter oppervlak aan bosareaal dan het grondgebied van de TU Delft zelf.
Om volledig CO2-neutraal te worden is daarom compensatie nodig, in de vorm van jaarlijkse aankoop van CO_2-certificaten, of (eenmalig of gefaseerd) bosaanplant. In beide gevallen moet in de begroting van de TU Delft geld worden gereserveerd voor deze compensatie. Uitgaande van de huidige prijs per ton CO_2 zou de TU Delft nu jaarlijks 1,2 miljoen moeten besteden aan het afkopen van CO_2-uitstoot. Bij het door de VN vastgestelde duurzame niveau van 130 euro per ton CO_2 gaat het zelfs om 6,2 miljoen euro. Jaarlijks.
Wij adviseren niet dit hele bedrag in CO_2-compensatie te steken maar grotendeels aan te wenden voor investeringen waarmee de CO_2-uitstoot van de campus wordt verminderd. Dus dan gaat het om een jaarlijks budget van 1,2 tot 6,2 miljoen euro in klimaatmaatregelen. Dat bedrag zou op termijn, met afnemende uitstoot, kleiner kunnen worden.

9.3.5 Engagement

Wellicht het allerbelangrijkste van het klimaatactieplan van de TU Delft betreft de bewustwording van studenten en medewerkers over het klimaat en wat zij daar zelf aan bij kunnen en horen te dragen.

Real-time monitoring

Als onderdeel van de eigen verantwoordelijkheid als organisatie, zou de TU Delft Inzichtelijk maken van de CO_2-uitstoot van haar bedrijfsvoering en van haar medewerkers. Dat betekent dat – bijvoorbeeld op basis van dit rapport en actualisaties hierna – inzicht zou moeten worden verstrekt in de CO_2-boekhouding van gebouwen, catering, waterbeheer, grondstoffengebruik, afvalbeheer, mobiliteit, vluchten etcetera.
Voor medewerkers en studenten zelf zou het goed zijn als hun bewustwording werd gestimuleerd via (online) inzicht in persoonlijke CO_2-prestaties, waar men zelf zijn specifieke gegevens kan invullen, waarmee de TU Delft – binnen de grenzen van de privacywetgeving – steeds meer nauwkeurig inzicht krijgt in haar CO_2-boekhouding.

Terms of Engagement

Een gedragscode van de TU Delft, die – naast aandacht voor inclusiviteit qua cultuur, sekse, geaardheid en levensovertuiging – gericht kan zijn op het verbeteren van de maatschappij en de wereld, en dus ook gaat over duurzaamheid en de verantwoordelijkheid van iedere gebruiker van de TU-campus. Deze Terms of Engagement zouden door alle medewerkers, promovendi en studenten moeten worden ondertekend, te beginnen bij nieuwe collega's en eerstejaarsstudenten.

Graag herhalen wij in het kader hiervan een eerdere stelling:

Hier werken en studeren betekent dat je de missie van de TU Delft onderschrijft, inclusief die van duurzaamheid. Niet alleen in wat je studeert, doceert, onderzoekt en ondersteunt, maar ook in gedrag op de campus en daarbuiten.

10 Referentielijst

- BCD travel (2018). *Emissions summary by Airport code <> Airport Code 2249 TU Delft* [Excel]. Ontvangen via: Youri de Water, TU Delft.
- Bhatia P., Cummis C., Brown A., Draucker L., Rich D., & Lahd H. (2011). *Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard.* GHG Protocol.
- BTL Advies (2016). *Beleid- en onderhoudsplan TU Delft.* BTL Advies B.V. Oisterwijk
- Broersma S., Dobbelsteen A. van den, Blom T., Fremouw M., Sturkenboom J., Keeffe G., Pulselli R. & Vandevyvere H. (2018). *Amsterdam Roadmap*. TU Delft/City-zen.
- CFP Green Buildings (2018-12-11). *TU Delft duurzaam: €2,1 miljoen potentiele energiebesparing op de campus* [PowerPoint presentatie].
- Campus and Real Estate (2018). *Campusstrategie 2017-2027: Concept 80% versie.* Technische Universiteit Delft.
- Campus and Real Estate (2019). *KPIs duurzaamheid TU Delft: versie maart 2019*. Technische Universiteit Delft.
- DelftWindPower (n.d.). *Projectnotitie DelftWindPower* [website]. Geraadpleegd via: http://www.windparktechnopolis.nl/workspace/uploads/projectnotitie_delftwindpower.pdf
- Dobbelsteen A. van den, Broersma S., Fremouw M., Blom T., Sturkenboom J. & Martin C.L. (2018). The City-zen Urban Energy Transition Methodology - The Amsterdam Roadmap towards a zero-carbon city. *Proceedings SASBE2018* (1-12). Sydney.
- Eneco (n.d.). *Partnership Eneco en TU Delft: TU Delft draait op Eneco Hollandse wind uit windpark Luchterduinen* [website]. Geraadpleegd van: https://www.eneco.nl/zakelijk/samen-innoveren/cases/tu-delft/
- Van Gansewinkel (2018). *Afvalrapportage TU Delft 2017.* [dataset]. Ontvangen via: Michiel Faber, TU Delft.
- Van Gansewinkel (2017). *Afvalrapportage TU Delft 2016.* [dataset]. Ontvangen via: Michiel Faber, TU Delft.
- Van Gansewinkel (2016). *Afvalrapportage TU Delft 2015.* [dataset]. Ontvangen via: Michiel Faber, TU Delft.
- Gemeente Delft (2015). *Beleidsregel gesloten bodemenergiesystemen.* Geraadpleegd via: https://www.delft.nl/sites/default/files/2018-02/2017_26_09_Beleidsregel_gesloten_BES_delft_incl_bijlagen_26-09-2017.pdf
- Hellinga C. (2017). *Introductie van een aardwarmtedoublet op de TU Delft campus*. Technische Universiteit Delft.
- IF Technology (2013). *Bodemenergieplan TU Delft en omgeving.* IF Technology: Delft.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Klugt S. van de, Oostlander I., Ykema P., Lakerveld E., Walta D., & Numann M. (2018). *Visie Mobiliteit en Bereikbaarheid: Campus TU Delft 2018-2023.* Technische Universiteit Delft.
- Kruit K., Schepers B., Roosjen R., & Boderie P. (2018). *Nationaal potentieel van Aquathermie: analyse en review van de mogelijkheden*. Delft: CE Delft.
- KWA Bedrijfsadviseurs (2018). *Graaddagen-en-koeldagen 2018* [dataset]. Geraadpleegd via: www.kwa.nl/diensten/graaddagen-en-koeldagen
- KWA Bedrijfsadviseurs (2017). *Graaddagen-en-koeldagen 2017* [dataset]. Geraadpleegd via: www.kwa.nl/diensten/graaddagen-en-koeldagen
- Nijs Gilbert de (2018-12-13). *Analyse van Haalbaarheid 50% energiereductie*. [PowerPoint presentatie]. Technische Universiteit Delft.

- Phi Factory (2018). *Ambitiedocument: TU Delft van Reststromen naar Grondstofstromen.*
- Phi Factory (2019). *De eigen organisatie: TU Delft van Reststromen naar Grondstofstromen.*
- Provincie Zuid-Holland (2017, december). *Vaststelling Partiële herziening Visie ruimte en mobiliteit windenergie* [Statenvoorstel]. Geraadpleegd via: https://staten.zuid-holland.nl/DMS_Import/Provinciale_Staten/2017/Provinciale_Staten_20_december_2017/Bespreekstukken/Vaststelling_partiele_herziening_VRM_Windenergie/Stuknr_623390959.org
- Pulselli M.P., Marchi M., Neri E., Marchettini N., & Bastianoni S. (2019). Carbon accounting framework for decarbonisation of European city neighbourhoods. *Journal of Cleaner Production **2019**, 208, 850–868.*
- Ranganathan J., Corbier L., Bhatia P., Schmitz S., Gage P., & Oren K. (2004). *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*. GHG Protocol.
- Renewi (2019). *Afvalrapportage TU Delft 2018.* [dataset]. Ontvangen via: Michiel Faber, TU Delft.
- Scholten B. (2018). *Beschouwing Smartpolder Campus-Zuid Delft.* IF technology.
- Stoelinga P., Kind R., Aalbers R., Wesdorp D., van der Zwan S., Pothof I., Staal M., Beekwilder M., Hoeven G. van der, & Veldkamp M. (2016). *Intelligent Warmtenet Campus TU Delft.* Rijswijk: Deerns Nederland.
- Stoelinga P., Kind R., & Aalbers R. (2017). *Intelligent Warmtenet Campus TU Delft: Studie naar potentieel van de dynamische warmtenetregeling in relatie tot de implementatie van een geothermische bron.* Rijswijk: Deerns Nederland.
- Technische Universiteit Delft (2019). *Jaarverslag 2018 Technische Universiteit Delft.* Technische Universiteit Delft.
- Turby (n.d.). *Ons verhaal* [website]. Geraadpleegd via: www.turby.nl

BIJLAGEN

B1 Verklaring gebouwnummers

Tabel B1.1 – Verklaring gebouwnummers

nr	Name
	EIGENDOM TU DELFT
3	Science Centre Delft
4	House Julianalaan 65
5	Biotechnology
6	Botanical Garden
8	Architecture and the Built Environment (A+BE)
12	Chemical Engineering
13	House Julianalaan 138
14	House Julianalaan 140
15	Physical and Chemical Technology / kramer lab.
18a	Van Leeuwenhoek laboratory
19	STUD
20	Aula Conference Centre
21	TU Delft Library
22	Applied Physics
23	Civil Engineering and Geosciences (CEG)
26	Van der Burghweg 1 (bouwcampus)
28	Van Mourik Broekmanweg 6
30	International Child Centre (ICC)
30a	Education & Student Affairs (O&S)
30b	Campus and Real Estate
31	TMB
32	IO + New media centre
32a	Teaching Lab
33a	Pulse
33b	Coffee & Bikes
34	3ME
34a	Executive Board / Supervisory Board
34b	Process & Energy Laboratory
35	Education Building Cornelis Drebbelweg 5
36	EWI
37	Sports
38	Culture
39	Reserved plot for EWI (new)
45	Low Speed Wind Laboratory / VSSD / Inholland
46	TNO Leeghwaterstraat 44
50	Reactor Institute Delft
53	House Watermanweg 6
57	Data Center RID
58	Applied Sciences (AS South building)
60	Logistics & Environment
61	Delft Aerospace Structures & Materials Laboratory
62	Aerospace Engineering (AE)
63	SIMONA Research Flight Simulator
64	High Speed Wind Laboratory
66	The Fellowship
67	Catalysis lab (new)
68	Manage Prometheus
69	Reserved plot Cleanroom
70	Parking Building TNW
71	Reserved plot parking building 3ME
72	Reserved plot parking building Sport
76	House Hammenboerderij
78	Reserved for geothermal project
92	TNO Leeghwaterstraat 46
97	TNO Stieltjesweg 1
	NON-TU
140	The Hague University of Applied Science
142	Inholland University
49	TNO Science and Industry, separation Technology
68	Riding School Prometheus
101	Döner company
104	TNO Van der Waalsweg 16
105	TNO Keverling Buismanweg - CMC- hal/schokbank
116	Deltares Stieltjesweg 2
138	Groendepot
139	Loods
152	VSL + NMi (meetinstituut) + FDI
161	YES!Delft Labs
181	YES!Delft
184	3M
186	Exact
193	Applikon Biotechnology
194	Reserved plot for Qutech
196	The Datacentre Group
197	Radex Innovation Centre (bedrijfsverzamelgebouw)
199	Deltares Rotterdamse weg

nr	Name
	DUWO
141	Rotterdamseweg
200	Balthasar van der polweg
202	Korverzeestraat
214	Leeghwaterstraat (3 blokken)
215	Balthasar van der polweg
216	Balthasar van der polweg 2
221	Gebouw kanaalweg 2a 2b en 2c
222	Mijnbouwplein
227	Michiel de Ruyterweg 2a-488
230	Kanaalweg 4
231	Kanaalweg3 / prof schermerhornstraat
116	(deels) Stieljesweg
	TECHNISCH (van TU)
25	Transformer Station Green Village
43	Thermal Power Station
55	Transformer Station 2st 10 kV Station
56	Sewage Pumping Station RID
79	Utility Building Technopolis
80	Transformer Station Botanical Garden
81	Transformer Station B CE
82	Transformer Station C CE
84	Transformer Station AE 1
85	Gas Reducing Station LP
86	Transformer Station AE 2
87	Gas Reducing Station HP
88	Gas Reducing Station LP Feldmanweg
89	Transformer Station Leeghwaterstraat 44
90	Transformer Station 1st 10 kV Station
91	Transformer Station TU Delft Library
	TECHNISCH (NIET-TU)
148	Vijzelgemaal Oudelaanmolenschot
220	Trafostation 23kV watermanweg

B2 Energiegebruik gebouwen

Tabel 11.2 – Energiegebruik gebouwen [emonitor.tudelft.nl]

		TOTAAL [MWh]				Per m2 BVO [kWh/m2]			
nr	BVO (m^2)	Gas	Wamte	Elektriciteit	Totaal	Gas	Wamte	Elektriciteit	Totaal
3	13111	1201		412	1613	92		31	123
5	13657	2317		388	2705	170		28	198
6	365	145		27	172	398		74	471
8	47098		2159	2189	4348		46	46	92
12	28114		2516	725	3241		89	26	115
15	5131	539		1035	1574	105		202	307
20	14086		1094	1354	2448		78	96	174
21	15068		1457	1442	2899		97	96	192
22	43104		10840	7472	18312		251	173	425
23	66600		6232	6427	12659		94	97	190
26	13140	1350		767	2118	103		58	161
28	10767	450		774	1225	42		72	114
30	9344		409	540	949		44	58	102
31	12428		865	725	1590		70	58	128
32	34325		1635	1952	3587		48	57	105
32dc	696			2221	2221			3190	3190
34	47575	25	5246	3120	8390	1	110	66	176
35	5247		302	111	413		58	21	79
36	67868		4047	3507	7554		60	52	111
36EKL	1159	2945		5858	8803	2541		5054	7595
37	11604		961	1382	2343		83	119	202
38	3476	35		243	278	10		70	80
43	3486			1307	1307			375	375
45	3851		322	256	578		84	66	150
50	16294	3144		3310	6454	193		203	396
57	696			2805	2805			4029	4029
58	31981	14		8779	8793	0		275	275
60	2763	718		169	887	260		61	321
61	5130		620	1293	1913		121	252	373
62	21088		1144	694	1838		54	33	87
63	951			33	33			35	35
64	3157		387	385	772		123	122	245
66	4795		451	428	879		94	89	183

B3 Scopes

Scopes
De emissies worden onderverdeeld in directe en indirecte emissies. Directe emissies zijn de emissies afkomstig van bronnen die eigendom zijn, of aangestuurd worden door het betreffende bedrijf. Indirecte emissies komen voort uit activiteiten van dit bedrijf, maar ze zijn ontstaan bij bronnen die eigendom zijn of aangestuurd worden door een ander bedrijf [Bhatia et al. 2011].
Deze emissies zijn verder onderverdeeld in drie scopes, waarbij de directe emissies vallen onder scope 1 en de indirecte onder scope 2 en 3. De registratie van de emissies voortkomend uit scope 1 en 2 is verplicht, scope 3 is momenteel optioneel.

Scope 1
Onder scope vallen de directe emissies, het bedrijf heeft hier directe controle over.
- Emissies die vrijkomen door de opwekking van elektriciteit warmte of stoom: deze emissies zijn het resultaat van het verbranden van fossiele brandstoffen in ketels, kachels en turbines die in bezit zijn van het bedrijf.
- Emissies door het verbranden van fossiele brandstoffen door voertuigen die in bezit zijn van het bedrijf.
- Emissies door het verwerken of produceren van chemische stoffen en materialen door het bedrijf.
- Diffuse emissies, komen vrij door lekken in installaties, leidingen of door het gebruik van vriezers of airconditioners.

[Ranganathan et al. 2004].

Scope 2
Emissies die vrijkomen bij de productie van de door het bedrijf ingekochte en geconsumeerde hoeveelheid elektriciteit, warmte, stoom of koeling [Bhatia et al. 2011].

Scope 3
Emissies die ontstaan door bronnen die eigendom zijn of aangestuurd worden door een andere intensiteit.

Table [5.1] Overview of the scopes

Emissions type	*Scope*	*Definition*	*Examples*
Direct emissions	Scope 1	Emissions from operations that are owned or controlled by the reporting company	Emissions from combustion in owned or controlled boilers, furnaces, vehicles, etc.; emissions from chemical production in owned or controlled process equipment
Indirect emissions	Scope 2	Emissions from the generation of purchased or acquired electricity, steam, heating, or cooling consumed by the reporting company	Use of purchased electricity, steam, heating, or cooling
	Scope 3	All indirect emissions (not included in scope 2) that occur in the value chain of the reporting company, including both upstream and downstream emissions	Production of purchased products, transportation of purchased products, or use of sold products

[Bhatia et al. 2011]

Table [5.3] List of scope 3 categories

Upstream or downstream	*Scope 3 category*
Upstream scope 3 emissions	**1.** Purchased goods and services **2.** Capital goods **3.** Fuel- and energy-related activities (not included in scope 1 or scope 2) **4.** Upstream transportation and distribution **5.** Waste generated in operations **6.** Business travel **7.** Employee commuting **8.** Upstream leased assets
Downstream scope 3 emissions	**9.** Downstream transportation and distribution **10.** Processing of sold products **11.** Use of sold products **12.** End-of-life treatment of sold products **13.** Downstream leased assets **14.** Franchises **15.** Investments

[Bhatia et al. 2011]

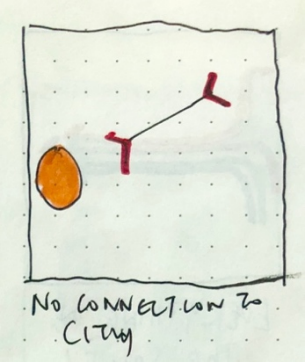
B4 CO_2-voetafdruk 2017

CO_2-voetafdruk (Status Quo)				**TU Delft campus**		
Bronnen	EF	EF eenheid	Eenheid	Data	t CO_2-eq	%
ELEKTRICITEIT			**MWh_e**	**76.756**	**9.330**	**18,6%**
verlichting	0,122	kg CO_2eq/kWh	MWh_e	23.027	2.799	5,6%
koeling	0,122	kg CO_2eq/kWh	MWh_e	8.443	1.026	2,1%
andere	0,122	kg CO_2eq/kWh	MWh_e	45.286	5.505	11,0%
AARDGAS			**MWh_{th}**	**72.404**	**13.955**	**27,9%**
verwarming	0,252	kg CO_2eq/kWh	MWh_{th}	24.530	6.174	12,3%
warmtenet	0,163	kg CO_2eq/kWh	MWh_{th}	47.874	7.781	15,5%
WATER			**m^3**	**196.861**	**115**	**0,2%**
m^3 per jaar (huis)	0,000585	t CO_2eq/m^3	m^3	196.861	115	0,2%
MOBILITEIT			**km**	**36.460.153**	**6.104**	**12,2%**
auto's (staf)	0,000168	t CO_2eq/km	km	27.268.683	4.593	9,2%
openbaar vervoer (staf)	0,000021	t CO_2eq/km	km	255.644	5	0,0%
auto's (studenten)	0,000168	t CO_2eq/km	km	8.935.826	1.505	3,0%
VLUCHTEN			**km**	**34.753.111**	**6.951**	**13,9%**
vluchten	0,000200	t CO_2eq/km	km	34.753.111	6.951	13,9%
VOEDSEL			**dagen**	**6.085.029**	**13.123**	**26,2%**
gemiddeld dieet	0,00216	t CO_2eq/p/dag	dagen	6.083.957	13.123	26,2%
AFVAL			**kg**	**2.085.029**	**690**	**1,4%**
% gestort afval	0,001160	t CO_2eq/kg	kg	311.976	362	0,7%
% afvalenergie	0,000652	t CO_2eq/kg	kg	431.778	282	0,6%
% organisch-hergebruik	0,000091	t CO_2eq/kg	kg	517.474	47	0,1%
% recycling	0,000000	t CO_2eq/kg		823.801	0	0,0%
OPNAME			**m^2**	**574.333**	**-216**	**-0,4%**
bomen	-1,350	kg CO_2eq/m^2	m^2	25.680	-35	
gras	-0,330	kg CO_2eq/m^2	m^2	499.192	-165	
planten	-0,330	kg CO_2eq/m^2	m^2	49.461	-16	
TOTAAL					**50.054**	**100%**

B5 Een andere kijk op de campus - analyse

Deze bijlage is gebaseerd op de bijdrage van Prof. Greg Keeffe, hoogleraar Sustainable Urbanism and Architecture en voorzitter van de School of Natural and Built Environment aan Queens University Belfast. In een workshop die werd gehouden in de eerste week van april 2019 was Greg met Dr. Riccardo Pulselli speciale gast, die meedacht in de analyse en vooral oplossingen voor het CO_2-vraagstuk van de TU Delft. In dit hoofdstuk wordt zijn analyse van de campus van de TU Delft besproken, een scherpe blik van een buitenstaander die de TU Delft nochtans goed kent.

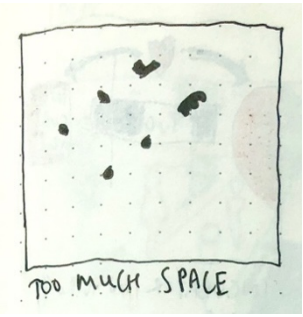
B5.1 Verbindingen



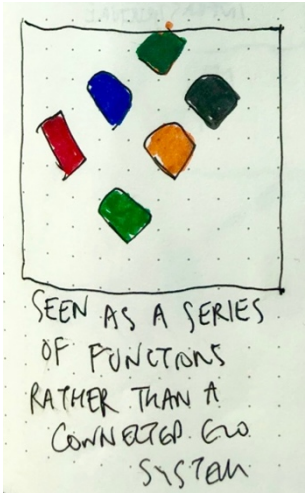
De TU-campus heeft geen goede verbinding met de stad, terwijl die er logischerwijs wel zou moeten zijn: het is de TU Delft, maar in alles lijkt de universiteit zich te willen gedragen als een eigen stad. Dat is jammer, want de connectie tussen historische, aantrekkelijke binnenstad en innovatieve topuniversiteit via het fraaie TU-Noord zou elkaar alleen maar versterken. En ook op energiegebied ligt een verbinding van de TU Delft met de rest van de stad voor de hand, want ze is er onlosmakelijk mee verbonden en bij de ambitie om CO_2-neutraal te worden zullen stad en universiteit elkaar moeten aanvullen.

Los van de missende connectie met de stad ligt ook de plek van de incubatorbedrijven van Yes!Delft op de verkeerde plek. Men zou verwachten dat deze bedrijven met nieuwe technische producten en diensten het liefst dicht bij de mogelijke klanten zou willen zitten: bij de stad. En omgekeerd is dat ook zo: Delft is een nieuwsgierige stad en de meest concrete innovaties die ontspringen aan de TU Delft komen van de startups van Yes!Delft en daaromheen. Het niet met de stad verbonden campus van de TU Delft zit daar als een obstakel tussen, en dat is een gemiste kans voor die bedrijven en voor promotie van de TU Delft.

10.1 Identiteit

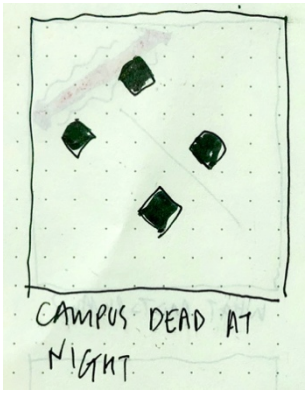


De campus van de TU Delft heeft veel ruimte, te veel ruimte, waardoor grote afstanden moeten worden afgelegd en het ruimtegebruik en het energiesysteem inefficiënter zijn dan ze zouden kunnen zijn. Gebouwen functioneren hierdoor ook als eilandjes, waardoor potenties van bijvoorbeeld programmatische afstemming en energie-uitwisseling lastig kunnen worden benut. De grote ruimte tussen de gebouwen zou nu een voordeel kunnen zijn, omdat het verdichting mogelijk maakt, waarmee uitbreiding naar TU-Zuid in mindere mate nodig is en het gebied commercieel kan worden geëxploiteerd.



De faculteitsgebouwen aan weerszijden van het Mekelpark beantwoorden eigenlijk ook aan het missende beeld van een samenhangende universiteit wiens kracht het is dat het topfaculteiten heeft en combineert in gedeeld onderwijs en onderzoek, Dreamteams en een gemeenschappelijke missie. De gebouwen langs de Mekelas zijn eerder een opeenvolging van losse functies dan een verbonden ecosysteem, en dat is jammer, want een integraal ecosysteem is zoveel efficiënter in zijn gebruik van grondstoffen dan separate elementen. De huidige opzet draagt eraan bij dat men denkt 'ik ben een civiel / elektrotechneut / bouwko / natuurkundige' in plaats van 'ik ben een TU-er'. Het is bijna alsof de verschillende faculteiten met elkaar concurreren in plaats van aanvullen of trots voor elkaar tonen.

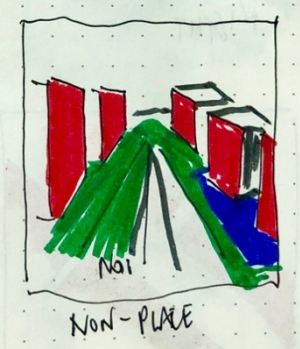
Daarbij komt dat de TU-wijk momenteel geen menselijke maat toont. Behalve aan het begin van de Mekelweg, bij de Döner Company en uitzendbureau STUD, en (nota bene) het blok waar het CvB gehuisvest is. De faculteitsgebouwen zelf staan als onvriendelijke reuzen afstandelijk te zijn aan het Mekelpark, met nauwelijks verwelkomende intreegedeelten. Het park zelf heeft wel een prettige schaal, zeker als er foodtrucks staan, maar deze zijn slechts tijdelijk en winkels, paviljoens, werkplaatsen, horeca en terrasjes ontbreken, terwijl die de levendigheid – en energiebalans van de TU-wijk – zouden kunnen verbeteren.



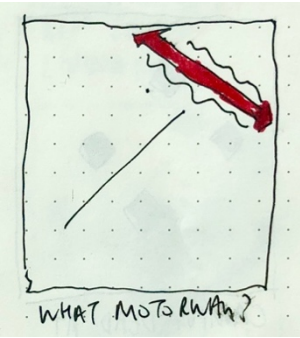
Het is verbeterd sinds, na de woningen aan de Korvezeestraat en de studentenflats langs het sportcentrum, weer een woongebouw in de TU-campus is gerealiseerd, maar de bewoners daarvan verplaatsen zich hoofdzakelijk over straten buiten de Mekelzone, waardoor het hart van de campus 's avonds laat dood is. Behalve X aan het eind van de centrale campus zijn er geen functies in het Mekelpark die een langere levendigheid stimuleren. Energetisch is dit ongunstig, want er is een enorme piek in het energiegebruik overdag, en die zakt 's avonds enorm in, waardoor alalles op piekvermogen moet worden berekend, terwijl er 's nachts onbenutte capaciteit is.

B5.2 De centrale as

De as van de TU-campus, ooit ontworpen als een steiger waaraan de faculteitsgebouwen als schepen liggen, is wel een ruggengraat, maar geen straat die als zodanig herkend kan worden. Veel van de eraan gelegen gebouwen hebben slechts weinig uitnodigende ingangen en die zijn vaak ook nog verstopt. Iemand die over de campus loopt, legt grote afstanden af van het ene naar het andere gebouw en vindt onderweg weinig belevenswaardigs. In een stadsstraat zou dat wel zo zijn.

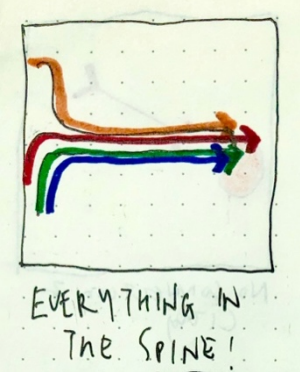


Mede door het voorgaande is – hoe veel beter het ontwerp van het Mekelpark ook al is ten opzichte van de situatie in de jaren ’90 – de hele Mekelzone een plaats zonder bepaalde betekenis of karakter. Het is groen, er zijn plekken om te zitten of rond te hangen en er staan een paar foodtrucks, maar het hele gebied toont niet waar de TU Delft zich mee bezighoudt, welke innovaties hier zijn bedacht, of wat de huidige stand der wetenschap, Dreamteams of spin-offbedrijven is. In de as zou de TU Delft juist het nieuwe elan van een duurzame, toonaangevende campus kunnen laten zien, met zichtbare elementen van het energiesysteem.

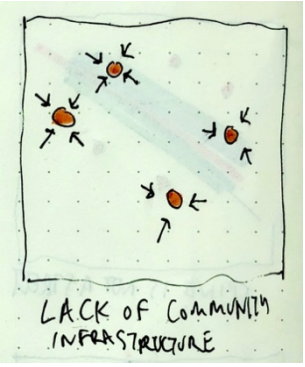


De Kruithuisweg aan de zuidkant van TU-centraal (een vrij belangrijke verbindingsader van Delft) is enerzijds een harde begrenzing van de campus, waarna de fietser of busreiziger zich in een heel andere omgeving begeeft; anderzijds heeft men vanaf de snelweg – behoudens de toren van EWI – geen enkel zicht op de TU-wijk en is elk verband met de topuniversiteit weg. De eerste plek waar men iets van de stad ziet is bij de Voorhofdreef, niet bepaald een interessant stuk Delft. De TU zou veel meer langs de Kruithuiswegas kunnen doen om te laten zien dat ze er is. Ook al omdat de TU vanaf de A13 (behalve weer EWI) niet bepaald zichtbaar is.

B5.3 Infrastructuur



Alle infrastructuur en verkeer, vooral fietsverkeer, loopt door de as van de TU-campus, waardoor overdag enorme opstoppingen en gevaarlijke situaties ontstaan, vooral waar meerdere vervoersassen evenwijdig aan elkaar lopen en ineens aftakkingen ontstaan bij zijwegen of faculteitsingangen. Bekend hiervan zijn de oversteekplek (die er niet is) bij de westingang van Bouwkunde, het knooppunt-Jaffalaan, de afslagen bij de Aula en kruisingen bij EWI en CiTG. Soms levensgevaarlijk, vooral waar voetganger, fietser, brommer, auto en bus langs elkaar razen en een van hen moet afslaan.

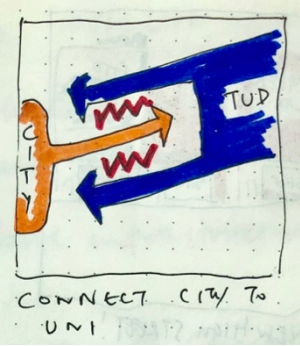


Samenhangend met het gebrek aan samenhang tussen de verschillende gebouwen is ook het gebrek aan gemeenschappelijke infrastructuur. Behoudens het warmtenet van de TU Delft, centraal aangestuurd vanuit de warmtekrachtcentrale (WKC), is er geen onderlinge verbinding tussen de gebouwen, en voor het beheer van energie-, water-, materiaal-, voedsel- en hun afvalstromen is dat een gemiste kans. Elk gebouw lost het zelf op (of niet) en ook al wordt tegelijk gekoeld en verwarmd, er vindt geen afstemming plaats. Met de enorme dakoppervlakken ligt een gemeenschappelijke regenwateropvang, –opslag en -gebruik voor de hand, maar dat gebeurt nu niet.

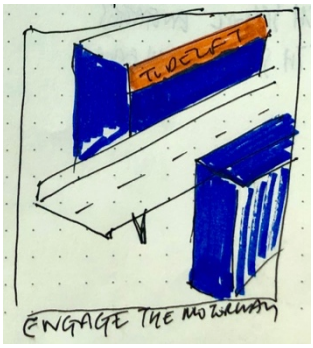
B6 Een andere kijk op de campus – een toekomstbeeld

Deze bijlage is een gevolg van de uitkomsten van de workshop die begin april 2019 werd gehouden naar aanleiding van de CO2-roadmap van de TU Delft en bevat inbreng van Prof. Greg Keeffe, Dr. Riccardo Pulselli, de twee auteurs en aanwezigen van CRE.
Uitgangspunt zijn de duurzame doelen van de Campusvisie van CRE: klimaatrobuust, CO_2-neutraal en circulair. En in lijn met adviezen van de commissie-Deetman aan de Gemeente Delft waarin de TU Delft beter verbonden zou moeten zijn met de stad Delft en nog beter ingebed kunnen raken met de Delftse burgers. Delft zou het innovatieve karakter van wat aan de TU Delft plaatsvindt beter kunnen uitventen. Sterker nog: de TU Delft ligt in het hart van de Metropoolregio Rotterdam-Den Haag, en die zou de kracht van de universiteit beter kunnen benutten; de TU Delft is immers een internationaal topinstituut, een spin in het web van wetenschappelijke kennis, industriële innovatie en maatschappelijke ontwikkelingen.
Bij al deze ontwikkelingen kan een campusstrategie van de TU Delft helpen. Dit hoofdstuk doet daartoe suggesties, niet alleen direct energie- en CO_2-gerelateerd, maar wel als onderdeel van de duurzame campus van de toekomst.

B6.1 Een sterkere verbinding met stad en regio

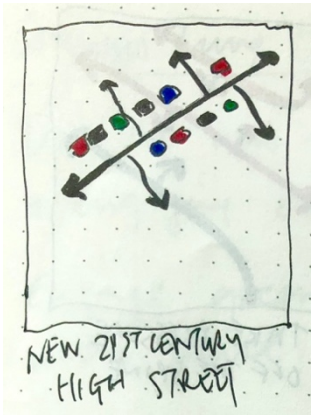


De campus zou beter verbonden kunnen zijn met de stad, in plaats van zich terug te trekken in de polder. Eerder al constateerden we dat er op de centrale campus genoeg ruimte is voor de meeste functies van de TU Delft. Een sterke verbinding met de stad door concentratie van de primaire functies van de TU Delft in het centrumgebied heeft ook energetische voordelen omdat daarmee het meeste woon-werk/studeerverkeer kort blijft, verschillende vormen van vraag en aanbod beter kunnen worden afgestemd en gemakkelijker een stadsnetwerk kan worden gedeeld, terwijl nieuwe functies in TU-Zuid individueel of middels lokale mininetwerken zelfvoorzienend zouden kunnen zijn.
Niet in lijn met de campusvisie van CRE, maar vanuit deze gedachte valt te overwegen de gebouwen in TU-Noord niet af te stoten maar te renoveren/transformeren naar onderwijsgebouwen. Dit zou studentenverkeer over de campus reduceren en de noodzaak voor nieuwbouw, weliswaar energieneutraal maar vanwege alle nieuwe bouwmaterialen ook een bron van CO_2-uitstoot die over de levensduur moet worden afgeschreven, voorkomen. Uit het onderzoek blijkt dat de gebouwen 8 (Bouwkunde), 30 (CRE o.a.) en 31 (TBM) onder de energetisch best presterende gebouwen vallen en dus per gebruiker en vierkante meter lage energiekosten hebben, hetgeen afstoten, ook op langere termijn, onlogisch maakt. Renovatie van deze gebouwen in de toekomst kan ze energieneutraal maken onder lagere investeringskosten.



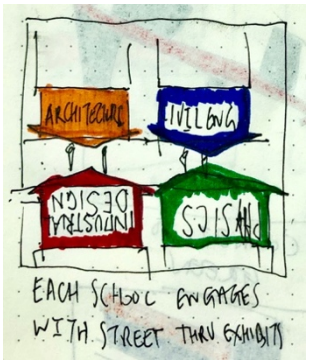
Aan de andere kant van het centrale deel van de TU-campus kan de Kruithuisweg, de 'natuurlijke' barrière met TU-Zuid, worden omarmd (en dit geldt wellicht ook voor de A13). Laat zien welke topuniversiteit zich hier bevindt en exploiteer deze zone middels commerciële en eventueel woonfuncties. Een veel betere zichtlocatie bestaat in deze regio immers niet.

B6.2 De Mekelweg als wetenschappelijke winkelstraat

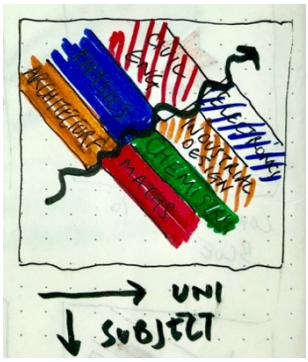


In lijn met 6.1 zou de Mekelweg (of het Mekelpark) een verbindingszone tussen stad en universiteit en techbedrijven kunnen zijn. Een ons inziens logische volgorde zou zijn: stad – universiteit – startups – techbedrijven/maakindustrie, waarbij de startups, zoals eerder besproken gebaat zijn bij een niet te grote afstand met de stad. Daarover zo meer. Dit betekent ook dat in de polder van TU-Zuid de grond commercieel geëxploiteerd zou kunnen worden voor bedrijven die het stadium van startup zijn ontgroeid en voor makerbedrijven, die meer ruimte nodig hebben (in Delft is zodra de Schieoevers worden ontwikkeld tot hoofdzakelijk woongebied nauwelijks plek voor maakindustrie) en waarvoor TU-Zuid dan een ideale plek kan zijn.

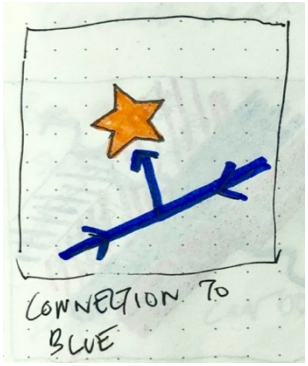
In tegenstelling tot de vrij karakterloze voorkanten van de faculteiten op dit moment kan aan het Mekelpark een technisch-wetenschappelijke winkelstraat kunnen worden, waarin labs, winkels en tentoonstellingen kunnen plaatsen. Het Mekelpark wordt dan het medium voor interactie met de mensen die zich erover verplaatsen; voor de startups is het een mogelijkheid om hun producten tentoon te stellen en verkopen. Dit deel is daarom ook commercieel te exploiteren. Energetisch interessant wordt het doordat andere functies met een ander energiepatroon gaan mengen met de faculteiten, waardoor uitwisseling mogelijk is.

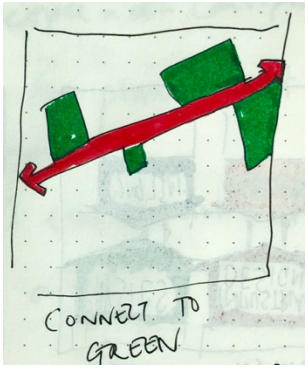


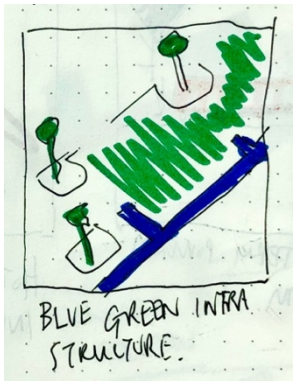
Projecten van de Dreamteams van TU Delft kunnen worden getoond, waarmee het Mekelpark een etalage wordt voor de TU Delft.
Voor de faculteiten wordt de Mekelweg (en daarvoor ook al de Michiel de Ruyterweg) ook een etalage waarin de werkzaamheden, projecten en producten van de verschillende faculteiten kunnen worden tentoongesteld, waarmee een beter begrip voor de verschillende disciplines van de TU Delft ontstaat en burgers, bedrijven, buitenlandse bezoekers en media veel sneller een beeld krijgen van wat er zoal gebeurt op de campus.



Op die manier wordt het Mekelpark – meer nog dan nu het geval is – de levenslijn van de TU Delft en zijn *offspring*, terwijl faculteiten hun specifieke karakter behouden en hun specifieke disciplines tentoonspreiden, maar veel meer een eenheid vormen met andere faculteiten en met de TU Delft als geheel.



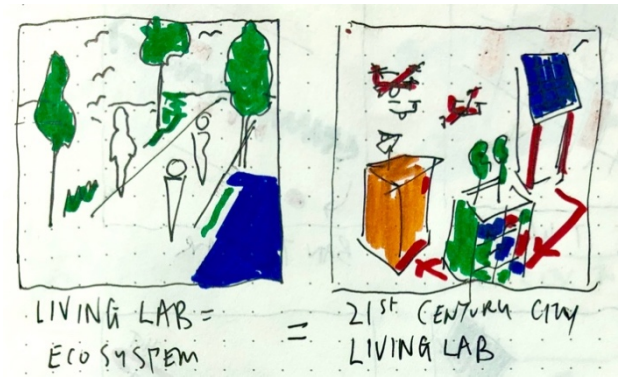




Andere verbindingen die kunnen worden gelegd, zijn die met water en groen.
De TU Delft heeft nu geen link met de Schie, terwijl dat niet een onlogische zou zijn, ook in verband met de mogelijkheid van aquathermie en innovatief vervoer over water.
Het Mekelpark is daarnaast een logische verbindingsas met groene vlekken, beginnend met het park tegenover de faculteit Bouwkunde, via de Jaffabegraafplaats, met een sprong naar het groen rondom X en The Green Village en vervolgens de polder van TU-Zuid.
In de toekomst zal wellicht meer aanplant van bomen, en toepassing van groen op en aan gebouwen nodig zijn, waarmee de TU-campus een groen-blauwe infrastructuur zou bieden die goed is voor de leefkwaliteit, biodiversiteit en CO_2-boekhouding.

B6.3 Ecosysteem en living lab – City of the Future

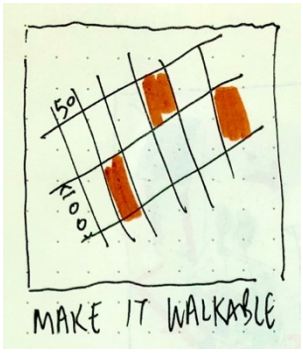
In hoofdstuk 5 constateerden we dat de TU Delft nu niet echt als een geïntegreerd, gebalanceerd ecosysteem functioneert, en de suggesties bij 6.2 gaven al een richting aan waarmee dat wel zo zou zijn.



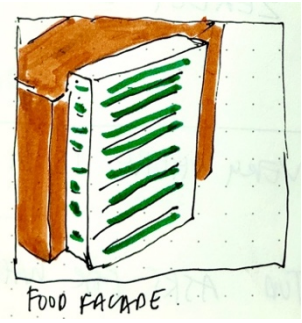
De campus van de TU Delft zou de weergave van de stad van de toekomst kunnen zijn als daar meer gedemonstreerd werd waar het met nieuwe technieken en ontwerpen in die toekomst naartoe gaat – de TU Delft als stad die 10 jaar vooruitloopt op andere steden. Op dit moment is daar nauwelijks iets van te zien, en dat is een gemiste kans. Wil de TU Delft de nummer 1 technische universiteit van de wereld worden, dan zal ze dat ook moeten laten zien op de campus, die een living lab kan

zijn van nieuwe technieken, ontwerpen en ook menselijke leefstijlen. Hier wordt de toekomst getest! De eerste contouren hiervan worden getoond op The Green Village, maar dit kan nog veel uitgebreider en ook gericht op meer dan alleen gebouwen.
Consequentie van een *City of the Future* is dat er een betere mix van functies aangeboden zou moeten worden, en dat is ook wat energetisch verstandig is, weer vanwege het meer in balans brengen van vraag en aanbod door het koppelen van verschillende energiepatronen en andere gebruikstijden.

Voor de bewoners van deze stad (studenten, staf, bezoekers van de TU Delft) betekent dit dat ze onderdeel zijn van deze toekomstgerichte gemeenschap en dat ze mede onderdeel van het experiment zijn.
Het draait om mensen en dus zou de TU-campus meer op de menselijke maat gericht moeten zijn. Het voorstel van de wetenschappelijke straat is daar een aanzet toe, maar ook publieke ruimten kunnen meer op de mens worden afgestemd. Het plein voor Pulse en IO is daar een goed voorbeeld van dat navolging verdient.



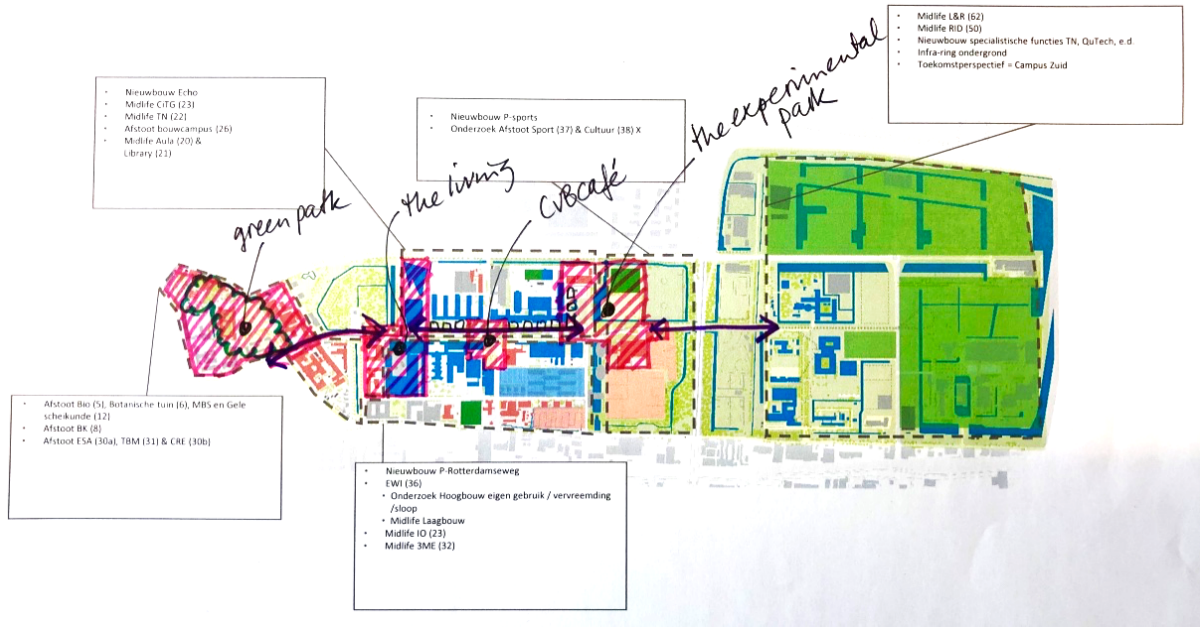
De menselijke maat kan ook vertaald worden in bewegingen over de campus. Eerdergenoemde verdichting en menselijke maat in de stedenbouwkundige indeling zouden leiden tot beter loopbare afstanden. Stukken van 50-100 meter in plaats van de honderden meters die men nu doorgaans moet afleggen om van het ene naar het andere gebouw te gaan. Een kleiner grid, vriendelijker voor de gebruiker van de TU-campus.



Wat ook past bij de campus als living lab is de duurzame productie van voedsel. Oorspronkelijk meer het domein van de Universiteit Wageningen is mede door de hightechontwikkelingen in de voedselindustrie de TU Delft steeds meer betrokken bij nieuwe concepten, zowel buiten als in de stad. Op de TU-campus kan daarom geëxperimenteerd worden met nieuwe geïntegreerde vormen van voedselproductie. Denk aan kassen op daken (met PV-technologie te combineren), maar ook aan gevels.

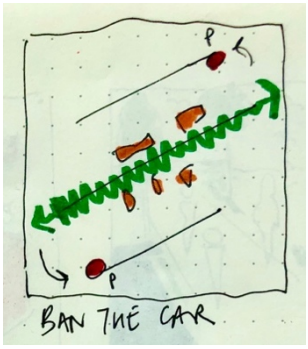
Verschillende groenten en fruit zijn gebaat bij hoge groeimogelijkheden, en gebouwen zijn in Nederland nog steeds gebaat bij een extra huid. Het Prêt-à-Logerhuis op The Green Village, prijswinnende inzending van de TU Delft voor de Solar Decathlon Europe 2014, liet zien dat een glazen huid over een gebouw vele voordelen met zich mee kan brengen: warmtebuffering, warmtecollector, elektriciteitsopwekking, gebruiksruimte-uitbreiding, en ook verbouwing van voedsel. Bij een kas tegen een hoger gebouw (denk aan CiTG, het oude TNW en waarom niet EWI) bestaan als die mogelijkheden ook, met extra veel potentie voor effectieve teelt van gewassen (die in de zomer zonwering vormen).

Zo wordt de TU-campus een zeer interessante strook van innovatie en inspiratie, waarvan de openbare ruimten ook onderdeel uitmaken. Hieronder een uitwerking van uit de workshop daarvan, met enkele ideeën: *The Green Park* rondom de Mijnbouwstraat (Science Centre) en Julianalaan (Bouwkunde) inclusief Botanische Tuin, *The Living* rondom de Bibliotheek, Aula en het plein bij IO en Pulse, *The CvB Café* als nieuwe horecaplek in het hart van de campus, en *The Experimental Park* rondom The Green Village en X. Een keten van boeiende plekken.

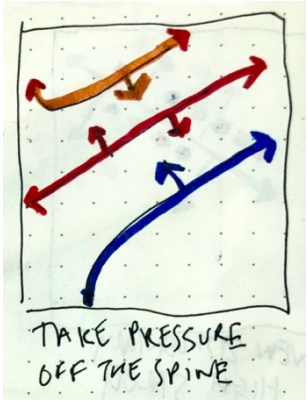


B6.4 Naar 100% duurzaam transport

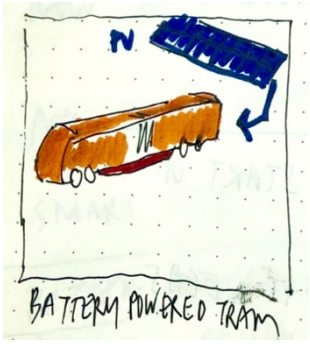
De TU-campus zou een hub voor duurzaam transport kunnen zijn, gericht op verbeterde vervoersvormen op menskracht, vervoer op elektriciteit, waterstof en biobrandstoffen, inclusief nieuwe laad- en tankfaciliteiten daarvoor, Hyperloop en andere innovatieve vormen van transport, duurzame (onder)watervoertuigen, en duurzaam luchtverkeer.



Onderdeel van een duurzame campus zou allereerst het vermijden van autoverkeer moeten zijn. Over de Mekelweg zelf rijden geen auto's meer, maar via de 'achterkant' komen dagelijks nog duizenden wagens de TU-wijk in. Het concentreren van deze autostromen op een beperkt aantal gecontroleerde parkeerplekken zou – in combinatie met de loopbaarheid van de campus en het hierna genoemde openbaar vervoer – tot minder autoverkeer en minder hinder of schadelijke uitstoot op de campus zelf leiden. Dat daarbij een groot deel gericht moet zijn op elektrische en waterstofauto's spreekt voor zich.



Het fietsverkeer, dat nu vaak voor overlast en gevaar zorgt, zou – zoals door CRE nu ook wordt uitgewerkt – over meer snelle routes dan alleen de Mekelweg moeten worden gevoerd, waarmee het Mekelpark meer een voetgangersgebied wordt, met als alternatief vervoer vooral de tram. Daarover zo meer. Het aanbieden van meerdere aantrekkelijke (snelle, veilige) fietsroutes zou de druk van de Mekelweg halen, waardoor die veiliger en prettiger wordt om te verblijven.

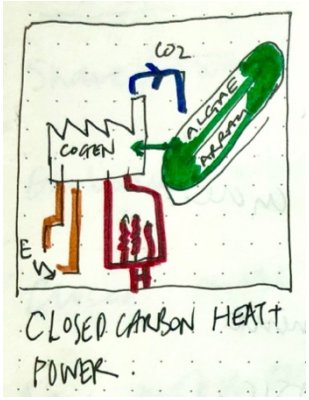


Het zou de TU Delft niet misstaan als de tram die over de campus rijdt op batterijen rijdt die op de campus zelf worden opgeladen middels duurzame stroom. In dat geval zijn de bovenleidingen ook helemaal niet nodig, wat de ruimtelijke kwaliteit en veiligheid ten goede komt. Ook kan een onbemande soort tram een optie zijn. Hierover zou de TU Delft met de HTM (of andere exploitant van de tramlijn) in overleg kunnen treden.

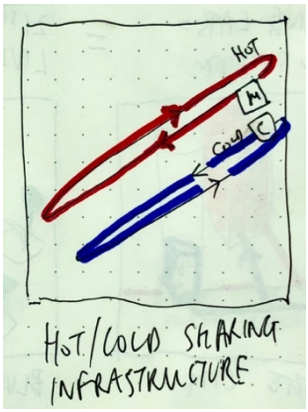
Dat geldt ook voor de optie om de tramlijn, die nu zal eindigen op een dood punt, door te trekken naar Rotterdam-The Hague Airport. Het is bijna onuitlegbaar dat deze luchthaven geen directe OV-verbinding heeft met Delft en de TU Delft.
De tram of andere vorm van duurzaam transport ontwikkeld aan de TU Delft: Hyperloop, onbemande elektrische voertuigen, snel pad voor (elektrische) fietsen.
Natuurlijk past een directe verbinding alleen bij een duurzame vorm van luchtvaart in de toekomst, een onderwerp waar juist aan de TU Delft onderzoek naar gedaan wordt. TU Delft kan eraan bijdragen dat vanaf Rotterdam-The Hague Airport enkel nog duurzaam luchtverkeer vertrekt, elektrisch of op bio- of e-brandstoffen, waarmee de luchthaven ook extra ruimte zou krijgen voor meer vluchten, want op dit moment zit ze aan haar taks.
En over de naam, gezien de ligging en zeker bij een grote rol in duurzaam vervoer naar en van de luchthaven, zou het net zo goed TU Delft Airport kunnen gaan heten.

B6.5 De slimme, duurzame energiecampus

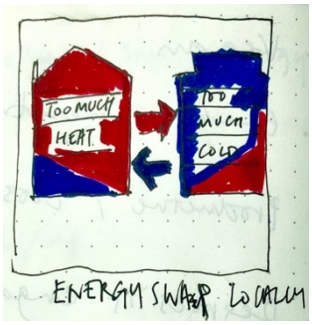
Als hoofdonderdeel van deze studie kan vanuit een stedenbouwkundig oogpunt een toekomstvisie op het duurzame energiesysteem van de campus natuurlijk niet ontbreken. In hoofdstuk 7 gaan we hier dieper en technischer op in.



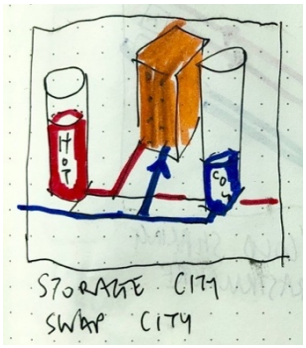
Allereerst zou het uitgangspunt van de duurzame energiecampus een gesloten koolstofsysteem van warmte en elektriciteit moeten zijn. De warmtekrachtcentrale (WKC) die nu uit aardgas warmte en elektriciteit produceert zou moeten overschakelen op geothermie en andere vormen van hernieuwbare energie, waarbij de CO_2 in dat geval moet worden afgevangen om vervolgens nuttig gebruikt te kunnen worden, bijvoorbeeld voor algenproductie, die vervolgens weer de bron kunnen zijn voor biobrandstoffen die in de WKC worden verstookt. Algen hebben licht, een beetje warmte en nutriënten nodig, en alle drie zijn op de TU-campus voorhanden.



Daarnaast zou de TU-campus infrastructuur moeten hebben waarmee warmte en koude uitgewisseld kan worden. Op kleine schaal kan dit met mininetwerken die vooral bij de nieuwbouwprojecten in TU-Zuid en TU-centraal kunnen worden aangelegd, terwijl het oudere deel op de centrale warmtevoorziening van een dan duurzame WKC aangesloten wordt. Slimme uitwisseling, gekoppeld aan seizoensopslag, van warmte en koude, is een must voor een universiteit die zich richt op duurzame, innovatieve energiesystemen.



Zoals eerder gezegd: de TU-campus hoort daarvan de living lab te zijn, zonder dat dit overigens een groot risico bevat, want dit soort systemen bestaan al – *proven technology*.
Deze warmte-koudenetten maken het mogelijk dat gebouwen met te veel warmte gelijktijdig gebouwen met een tekort daaraan kunnen voeden, en vice versa. Daarmee wordt de totale energievraag evenals pieken en dalen in vraag en aanbod gereduceerd.



Seizoensverschillen kunnen hiermee niet helemaal overbrugd worden, waarvoor dan seizoensopslag nodig is. Warmte-koudeopslag (WKO) is een bekende *proven technology*, en in de toekomst zullen vanuit het onderzoek aan de TU Delft nog vele andere vormen van energieopslag benut kunnen worden.

Daarmee ontstaat een slim en duurzaam uitwisselings- en opslagsysteem dat aansluit bij de ambities en activiteiten binnen de TU Delft.

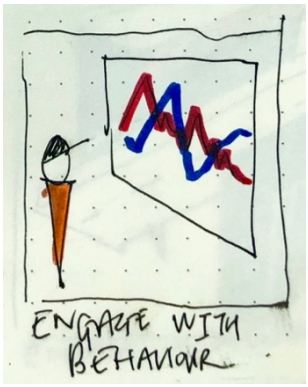
B6.6 De duurzame campus, dat zijn wij zelf – onze *Terms of Engagement*

Zoals erover gepraat en geschreven wordt, is de energieneutrale, circulaire, duurzame campus vooral een opgave voor CRE en het CvB. Dat is niet eerlijk en ook niet realistisch want iedere gebruiker van de campus bepaalt mede de ecologische voetafdruk van de TU Delft, en dus is voor een volledig CO_2-

neutrale, circulaire, duurzame TU-campus een volledig CO_2-neutrale, circulaire, duurzame gebruiker van die TU-campus nodig. Het gaat allemaal om ons als mens.

Hier werken en studeren betekent dat je de missie van de TU Delft onderschrijft, inclusief die van duurzaamheid. Niet alleen in wat je studeert, doceert, onderzoekt en ondersteunt, maar ook in gedrag op de campus en daarbuiten.

In dit kader is het niet vreemd om de hele TU-gemeenschap te vragen zogenoemde *Terms of Engagement* te tekenen, een document waarin men belooft zich ethisch te gedragen: inclusief qua cultuur, sekse, geaardheid en levensovertuiging, gericht op het verbeteren van de maatschappij en de wereld, en dus ook duurzaam.



Om duurzaam gedrag te ondersteunen, zou de TU Delft veel beter inzichtelijk en zichtbaar kunnen maken wat (bijvoorbeeld) de CO_2-emissies van haar gebouwen zijn, *real time*, maar ook van haar catering, water- en grondstoffengebruik en afvalbeheer. En ook van de mobiliteit – woon-werkverkeer en zakelijk vervoer – van haar medewerkers. Zien is bewust worden en de keuze hebben zich ernaar te gedragen.
Passend binnen de *open online* ambities kan de TU Delft voor studenten en medewerkers kan de TU Delft een invulbaar en aanpasbaar webpagina aanmaken voor iemands persoonlijke CO_2-prestatie, waarmee op termijn een nauwkeuriger meting van de totale CO_2-uitstoot wordt verkregen.

Hierover kan jaarlijks worden gerapporteerd.
Op speelse een eenvoudige wijze kan ook duurzaam gedrag in de hand worden gewerkt door middel van CO_2-competities of -prestatieladders van faculteiten en afdelingen, met prijzen voor (of alleen eervolle vermeldingen van) topprestaties.

Het zal wellicht lastig zijn om studenten en staf die er allang zitten te overtuigen van deze nieuwe duurzame wind door de TU-campus, maar met elke nieuw instromende student, PhD en medewerker kunnen de Terms of Engagement worden ingebed in het gedachtegoed. Te beginnen in de Owee en bij de opening van het academische jaar. Dit diesjaar van de TU Delft is gericht op Climate Action, en dit kan bij elke gelegenheid worden gecommuniceerd.