

Memo

www.tno.nl

Aan

Kopie aan

Van

Onderwerp Deelrapportage

Datum

14 april 2023

Onze referentie

BMS Deelrapportage

Contents

1.	Samenvatting	1
1.1.	Resultaten & beantwoording vraagstelling	1
1.2.	Methodiek	2
1.3.	Aanbeveling en input andere werkpakketten	2
2.	Inleiding	2
3.	Probleemstelling / vraagstelling	4
3.1.	Probleemstelling	4
3.2.	Vraagstelling:	4
4.	Beschrijving methodiek	4
4.1.	Onderzoekrapportage stroombehoefte project	4
4.2.	Praktijkcasus bouwplaats hernieuwbare energie	5
5.	Deelresultaten werkpakket	7
5.1.	WP7 Zero-emissie bouwplaats Oss	7
5.1.1.	PV opbrengst	12
5.1.2.	Thermisch-energetisch model bouwkeet	13
5.1.3.	Temperatuurinstelling	18
5.1.4.	Simulaties	18
6.	Beantwoording vraagstelling	21
7.	Aanbevelingen en input andere werkpakketten	21
8.	Referenties	21
9.	Bijlage 1: Gegevens bouwketen	22

1. Samenvatting

1.1. Resultaten & beantwoording vraagstelling

Gekeken is wat de energievraag is van de bouwplaats, hoe deze kan worden gereduceerd en hoe voldoende energie lokaal duurzaam en emissievrij kan worden opgewekt.

De energievraag kan worden gereduceerd door i.p.v. met elektrische verwarming te verwarmen met een warmtepomp of met de airco systemen. Als met hetzelfde systeem wordt verwarmd en gekoeld kan ook worden voorkomen dat soms tegelijkertijd wordt verwarmd en gekoeld zoals uit de metingen bleek voor

te komen. De berekeningen met verschillende systeemcombinaties laten zien welke combinaties voldoende energie leveren. Wel moet worden bedacht dat het weer van jaar tot jaar varieert en het aantal keten kan variëren.

1.2. Methodiek

Om de energievraag in beeld te krijgen zijn metingen gedaan in een bouwplaats in Oss, waarbij de energievraag voor verwarming, koeling en overig zijn gemeten.

Op basis hiervan is een dynamisch thermo-fysisch model gefit op een bouwfysisch model van de gebruikte bouwketen. Daarnaast is het aanwezige PV systeem met 42 PV panelen en het accu systeem in model gebracht. Met deze modellen is een klimaatjaar doorerekend waarbij is per maand gekeken in welke mate het PV-accu systeem de vraag kan dekken. Dit is ook gedaan voor een matrix van combinaties van PV en accu systemen waardoor een beeld ontstaat welke combinaties in welke maanden welke deel van de energievraag kunnen dekken.

1.3. Aanbeveling en input andere werkpakketten

Uit de metingen kwam naar voren dat de verwarming en de koeling separaat en naar behoefte worden ingesteld waarbij soms tegelijkertijd werd verwarmd en gekoeld. Aanbevolen wordt hier scherp op te zijn of een systeem toe te passen waardoor dit wordt voorkomen.

De verwarming vond plaats met elektrische verwarming. Er zijn alternatieven met een hoger rendement die uiteindelijk minder energie vragen zoals een warmtepomp. Ook kan de ruimte worden verwarmd met de airco unit. Dit levert een substantiële energievraag reductie voor verwarming.

Een mogelijk alternatief is gebruik maken van statiegeldbatterijen die elders worden opgeladen (bijvoorbeeld PV velden) en met elektrische busjes worden omgewisseld.

De metingen gedaan voor dit werkpakketten worden gebruikt als input voor WP9 om emissieberekeningen te kunnen uitvoeren en voor WP8 om de transportbewegingen/energieverbruik overzichtelijk te kunnen maken.

2. Inleiding

De zero emissie bouwplaats richt zich op het reduceren van emissies in de bouwplaatsvoorzieningen. Hierbij wordt onderzocht en getest welke alternatieve energiebronnen beschikbaar zijn om de bouwplaats zoveel mogelijk zelfvoorzienend te maken. Gedacht kan worden aan een ketenpark zonder netaansluiting, laad- en levervoorzieningen van elektrische auto's en materieel, zonne-energie, windenergie, optimaal gebruik van elektrisch klein materieel.

Ook de logistiek op de bouwplaats (de activiteiten voor en na het plaatsen van de woning) is een aandachtspunt, waarbij transportbewegingen geminimaliseerd worden. Het is belangrijk om de transportbewegingen in beeld te hebben voor zowel de emissiebeperking als overlast voor de omgeving en biedt deze andere manier van bouwen kansen voor de stikstofproblematiek (Natura2000 gebieden) en welke andere voordelen levert dit op ten opzichte van (traditionele) referentieprojecten.

Daarnaast is het energienet in Nederland steeds zwaarder belast. Het wordt steeds lastiger om een bouwaansluiting te krijgen. Mocht je er al een toegewezen krijgen is het maar de vraag of deze voldoet aan de waarde die is aangevraagd.

De bouwsector is één van de grootste energieverbruikers ter wereld. In Nederland is de bouwsector verantwoordelijk voor ongeveer 20% van het totale energieverbruik. Dit is een groot probleem, omdat de bouwsector ook veel broeikasgassen uitstoot.

Er zijn verschillende manieren om het energieverbruik in de bouwsector te verduurzamen. Eén van de meest effectieve manieren is om alternatieve energiebronnen te gebruiken. Alternatieve energiebronnen zijn hernieuwbare energiebronnen, zoals zonne-energie, windenergie en biomassa.

In dit onderzoeksrapport zullen we de focus leggen op twee alternatieve energiebronnen die veel potentieel hebben voor de bouwsector: zonne-energie, windenergie gekoppeld aan accu's. We zullen onderzoeken hoe deze energiebronnen kunnen worden gebruikt op de bouwplaats en wat de voordelen zijn van deze energiebronnen.

Zonne energie

Zonne-energie is de meest gebruikte alternatieve energiebron op de bouwplaats. Zonnepanelen kunnen worden gebruikt om elektriciteit op te wekken, die vervolgens kan worden gebruikt voor het opladen van gereedschap, het laten draaien van machines en het verlichten van de bouwplaats.

Windenergie

Windenergie is een andere populaire alternatieve energiebron op de bouwplaats. Windturbines kunnen worden gebruikt om elektriciteit op te wekken, die vervolgens kan worden gebruikt voor dezelfde doeleinden als zonne-energie.

Accu's

Als energie wordt opgewekt met één van bovengenoemde alternatieve bron, kan deze energie worden opgeslagen in een accupakket als de energie niet direct gebruikt kan worden. Op deze manier gaat de duurzaam opgewekte energie niet verloren.

Het gebruik van alternatieve energiebronnen op de bouwplaats zoals wind en zonne-energie heeft naast het voorkomen van beperkingen en lange wachttijden bij het verkrijgen van elektrische (bouw)aansluiting nog andere voordelen, waaronder:

- Energiebesparing
- Minder uitstoot van broeikasgassen
- Betere werkomstandigheden
- Verminderde geluidsoverlast
- Verminderde luchtvervuiling
- Betere gezondheid van werknemers

Naast bovengenoemde voordelen en urgentie, brengt het toepassen van alternatieve energiebronnen op de bouwplaats ook een aantal uitdagingen met zich mee:

Kosten

Alternatieve energiebronnen, zoals zonnepanelen en windturbines, kunnen duur zijn om aan te schaffen en te installeren. Dit kan een belemmering vormen voor bouwbedrijven, die vaak werken met krappe budgetten.

Afhankelijk van weersomstandigheden

Sommige alternatieve energiebronnen, zoals zonnepanelen en windturbines, zijn afhankelijk van weersomstandigheden om elektriciteit op te wekken. Dit kan een probleem zijn in gebieden met weinig zon of wind.

Ook het seizoen speelt mee. Zonne-energie is er veelal in het voorjaar en de zomer. In de winter zijn er minder zonuren maar is er ook meer vraag naar energie om te verwarmen van wegens de temperatuur buiten.

Deze deliverable bevat een beschrijving van de zero emissie bouwplaats. De onderliggende probleem- en vraagstelling wordt gepresenteerd in **hoofdstuk 3**. De overkoepelende methodologie en methodieken die gebruikt zijn om beantwoording van deelvraagstellingen mogelijk te maken worden omschreven in

hoofdstuk 4. In **hoofdstuk 5** worden de resultaten die leiden tot een antwoord op iedere deelvraag stapsgewijs gepresenteerd. Deze resultaten bestaan uit de volgende 4 onderdelen: PV opbrengst, thermisch energetisch model, temperatuurinstelling en simulaties.

In **hoofdstuk 6** worden (deel)vraagstellingen kort beantwoord en tot slot, worden de relaties met andere werkpakketen, referenties en bijlage gepresenteerd in de **hoofdstukken 7-9**.

3. Probleemstelling / vraagstelling

3.1. Probleemstelling

In het huidige bouwproces bepaalt de netbeheerder wanneer de bouw kan worden gestart. Door deze afhankelijkheid aan de netbeheerder vertraagt de bouw vaak en loopt de bouwplanning uit. Hiernaast zijn de geleverde aansluitingen (1 * 80A) kleiner dan de gevraagde aansluitingen (3* 80 A). Ook mag de bouwplaats minder stikstof produceren. Een oplossing hiervoor is om meer elektrisch te regelen. Hiervoor moet er zelf energie worden opgewekt en hoeven er minder fossiele energiebronnen gebruikt te worden. Er is op dit moment nog weinig ervaring met zelf energie opwekken en opslaan en hiernaast is het lastig te voorspellen hoeveel energie er nodig is (met name de piekbelasting).

Kortom: Door stikstofbeperkingen en lange doorlooptijden bij nutspartijen voor de aanvraag van bouwe-
nergie, worden de bouwtrajecten vaak vertraagd. Op dit moment is onbekend wat de energievraag van de bouwplaats is, piek- en dalmomenten, en in hoeverre een off-grid systeem hieraan kan bijdragen.

3.2. Vraagstelling

Op basis van de probleemstelling is de volgende hoofdvraag gedefinieerd: 'In hoeverre kan een emissie-
arme bouwplaats bijdragen om stikstof te reduceren en minder afhankelijk te zijn van nutspartijen voor energie gedurende het bouwtraject?'

Om deze vraag te kunnen beantwoorden worden de volgende deelvragen behandeld:

- **Wat is de energievraag van de bouwplaats?** Om deze deelvraag te kunnen beantwoorden wordt meegenomen wat emissies veroorzaakt; energieverbruik, materieel, laadpaal, etc.
- **Hoe kun je het energieverbruik reduceren op de bouwplaats?**
- **In hoeverre kunnen we aan die vraag voldoen met eigen energie opwekken?** Hierbij wordt onderzocht welke alternatieve energiebronnen beschikbaar zijn om de bouwplaats zoveel mogelijk zelfvoorzienend te maken.

4. Beschrijving methodiek

4.1. Onderzoekrapportage stroombehoefte project

In dit onderzoek kijken we naar de energiebehoefte van de bouwplaats. Een bouwplaats heeft altijd een bouwaansluiting. Dit is een tijdelijke nutsvoorziening die tijdens de bouwfase wordt gebruikt voordat het uiteindelijke gebouw operationeel is. Deze aansluiting is nodig om de bouwactiviteiten uit te voeren. De grootte voor de aansluiting kan variëren afhankelijk van de behoefte en de capaciteit van het net.

Op deze bouwaansluiting worden meerdere energieverbruikers aangesloten. Denk hierbij aan verlichting, gereedschap, machines en het ketenpark (tijdelijke kantoor). Zware machines of voertuigen zijn vaak voorzien van een eigen energiebron zoals een dieselmotor. Met reguliere machines wordt er nagenoeg geen gebruik gemaakt van de bouwstroom.

Voor dit onderzoek hebben we ons gefocust op het ketenpark en het klein gereedschap dat op accu wordt gebruikt. In het ketenpark zijn een aantal energieverbruikers:

- 3x Laptops met extra scherm
- 1x Koelkast
- 6x Kachels verwarming
- 2x Airco
- 2x Koffiezetapparaat
- 1x Printer
- 1x Boiler warm water
- 1x Buitenverlichting (lichtmasten)
- Verlichting in de keet
- Acculadders gereedschap
- Waterkokers
- Tosti-ijzers

Voor dit onderzoek hebben we gekeken hoe we minder energie kunnen gebruiken. Zo hebben we een nieuw ketenpark aangeschaft die beter geïsoleerd is en waar dubbel glas in zit. Daarnaast zijn de deuren voorzien van deurdrangers zodat deze niet onnodig open staan. De verlichting werkt op bewegingssensoren zodat deze niet onnodig aan staan. Minder energieverbruik is natuurlijk altijd de beste manier om klimaatverandering tegen te gaan.

4.2. Praktijkcasus bouwplaats hernieuwbare energie

Om duurzame energie op te wekken op bouwplaatsen hebben we gekeken naar de mogelijkheden. Voor Groene energie kom je op bouwplaatsen voornamelijk uit op wind en zon. Aangezien bouwplaatsen over het algemeen niet heel veel ruimte hebben zijn we op zoek gegaan naar een systeem dat energie opwekt en weinig ruimte inneemt. Een voordeel van wind is dat het constante factor is omdat het nagenoeg het hele jaar waait. Daarnaast zijn zonnepanelen het meest effectief qua opbrengst. Er is ook gekeken naar PVT-panelen i.p.v. zonnepanelen dit is niet interessant voor het huidige ketenpark omdat er maar minimale behoefte is voor warm water. De boiler in de keet heeft namelijk maar een zeer beperkte vraag. Daarnaast was het belangrijk dat de opgewekte energie ook opgeslagen kan worden omdat de energie niet direct wordt verbruikt.

Belangrijke aandachtspunten voor energie opwekken op bouwplaatsen is dat het systeem 'hufter proof' is en tegen stootje kan. We hebben de afgelopen jaren steeds meer te maken met feit dat spullen gestolen worden op de bouwplaats. Het systeem moet dus niet te makkelijk toegankelijk zijn.

Ons oog is gevallen op de Energiehub van Green hybrids. De Energiehub bestaat uit een 20 ft zeecontainer waarboven een stalenframe staat met 6 zonnepanelen en 3 windwakkels. In de zeecontainer staat een groot accupakket met een dockingstation voor het laden van klein gereedschap. Zo kan eind van de werkdag de lege accu aan de lader worden gelegd en zijn de accu's de volgende werkdag weer volledig gevuld. De energie hub is voorzien van 2 laadpunten voor het laden van elektrische voertuigen. Om nog meer energie op te wekken is het dak van het ketenpark voorzien van stalenframes met zonnepanelen. In een frame zitten 6 panelen en op het dakvlak van het ketenpark passen 6 frames. In het ketenpark is nog een extra accu toegevoegd voor meer opslagcapaciteit. Het totale systeem bestaat uit 42 zonnepanelen, 3 windwakkels en 2 accusystemen. Door de toepassing van de Energiehub met de zonnepanelen op de bouwkeet zetten we in op emissievrij werken.

Deze Energiehub staat in Oss op het project Dichterswijk aan de Anna van Schuurmanstraat 398. Bij dit project transformeren we 240 appartementen voor woningcoöperatie BrabantWonen. Dit project heeft

nog een vaste bouwaansluiting vanuit één van de appartementen die wordt getransformeerd zodat we in deze pilot altijd stroom op de bouw hebben als de Energiehub niet voldoende kan leveren. Dit doen we omdat we willen zien of het ketenpark volledig off-grid kan draaien zonder dat er een bouwstroom aansluiting benodigd is. Theoretisch zou het moeten kunnen als we de verschillende apparaten optellen bij elkaar en aannames doen wanneer de apparaten aanstaan. Daarnaast is het van belang om in de praktijk erachter te komen of de energievraag in combinatie met de energielevering overeenkomt en of de accucapaciteit voldoende is. Denk er hierbij aan dat er in de winters verwarmd dient te worden en in de zomer gekoeld. Maar ook dat er 7 dagen per week energie wordt opgewekt en maar 5 dagen intensief energie wordt verbruikt omdat er in de weekenden niet gewerkt wordt.

Er is voor 2 accusystemen gekozen zodat we in de toekomst de Energiehub (6 zonnepalen en 3 windwokkels) en zonnepanelen op de bouwketen (36 zonnepanelen) apart kunnen inzetten indien dat wenselijk is. De accu van de Energiehub is een 400V 16A lithium-accupakket 40kW en bij de zonnepanelen 4x Accu AMG 12v 260Ah.

De windwokkels bleken een beperkte opbrengst te hebben en zijn daarom buiten beschouwing gelaten.

Wanneer we geheel off-grid kunnen met het ketenpark door de Energiehub. Bieden zich ook nieuwe kansen aan naast het verminderen van onze uitstoot:

- Mogelijkheid om nabij Natura 2000 gebieden te bouwen.
- Op het moment is het steeds moeilijker om op tijd een bouwaansluiting te krijgen voor projecten, dit levert nu vertraging op om projecten te kunnen opstarten. Dit zou verhopelijk kunnen worden als er geen bouwaansluiting nodig is of wanneer deze niet direct nodig is in het bouwproces.

Naast het project Oss hebben we ook kleine energiehub op het project in Tricht. Hier hebben wij een klein ketenpark staan vanwege de omvang van het project en de typologie van het project. Doordat we werken met het Premodu concept hebben we minder projectbegeleiding nodig op de bouw maar ook minder vakkrachten en dus minder schaftruimte in de keet. De energiehub bestaat hierbij uit 12 zonnepanelen en een accupakket.

5. Deelresultaten werkpakket

5.1. **WP7** Zero-emissie bouwplaats Oss

De zero-emissie bouwplaats richt zich op het reduceren van emissies in de bouwplaatsvoorzieningen. Beschikbaarheid van alternatieve energiebronnen wordt onderzocht en getest, gericht op een zelfvoorzienende bouwplaats.

Ook de logistiek op de bouwplaats is een aandachtspunt, waarbij transportbewegingen in kaart gebracht en geminimaliseerd worden. Dit is nodig voor zowel emissie- als overlastbeperking.

Voor een proefproject, een bouwlocatie in Oss (Figuur 1) is een analysemodel gemaakt voor het energiegebruik en duurzame energiebronnen: PV-panelen en windwakkels, gekoppeld aan een batterijsysteem.

Metingen van binnentemperaturen en energiegebruik in bouwketen zijn in april gestart en lopen door tot december (Figuur 2).



Figuur 1: Bouwlocatie Oss



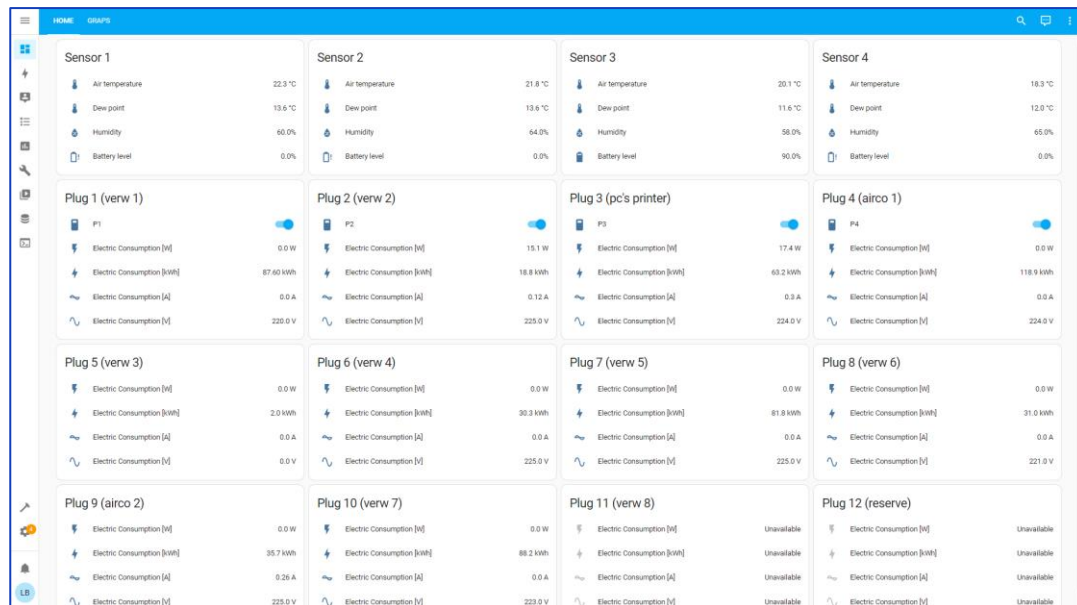
Figuur 2abc: Cloud monitoring system met 1) meetunit 2) draadloze temperatuur-vochtsensoren en 3) smartplugs



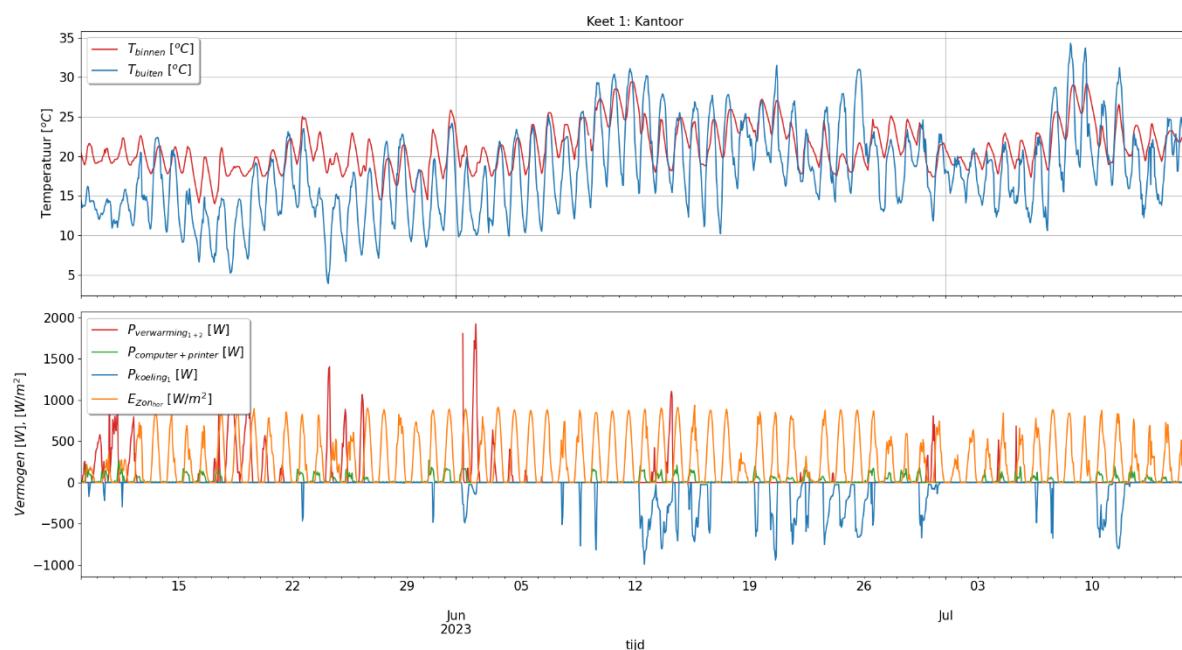
Figuur 3abcd: Kantoor en schaftkeet met temperatuursensoren en smartplugs (tbv elektrische verwarming en airco ed.)

In de bouwketen zijn temperatuur-vocht sensoren en zogenaamde smartplugs aangebracht (Figuur 2, Figuur 3) die de temperaturen en het stroomgebruik van verwarming, koeling en apparatuur meten en draadloos doorsturen naar een centrale unit die via een internetverbinding kan worden benaderd (cloud

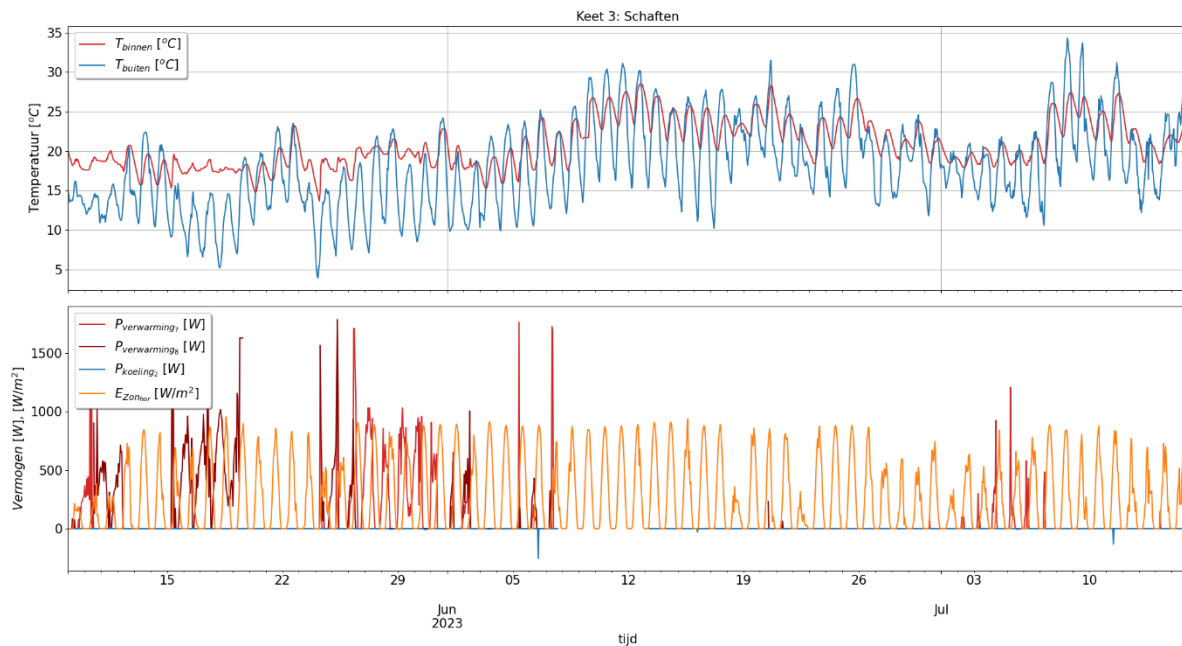
monitoring) (Figuur 4). De uurlijkse buitentemperatuur en zonbelasting zijn/worden online opgehaald bij het KNMI weerstation Volkel (17km ten zuid-oosten van Oss).



Figuur 4: De momentane en historische meetresultaten zijn via internet beschikbaar (cloud monitoring systeem).



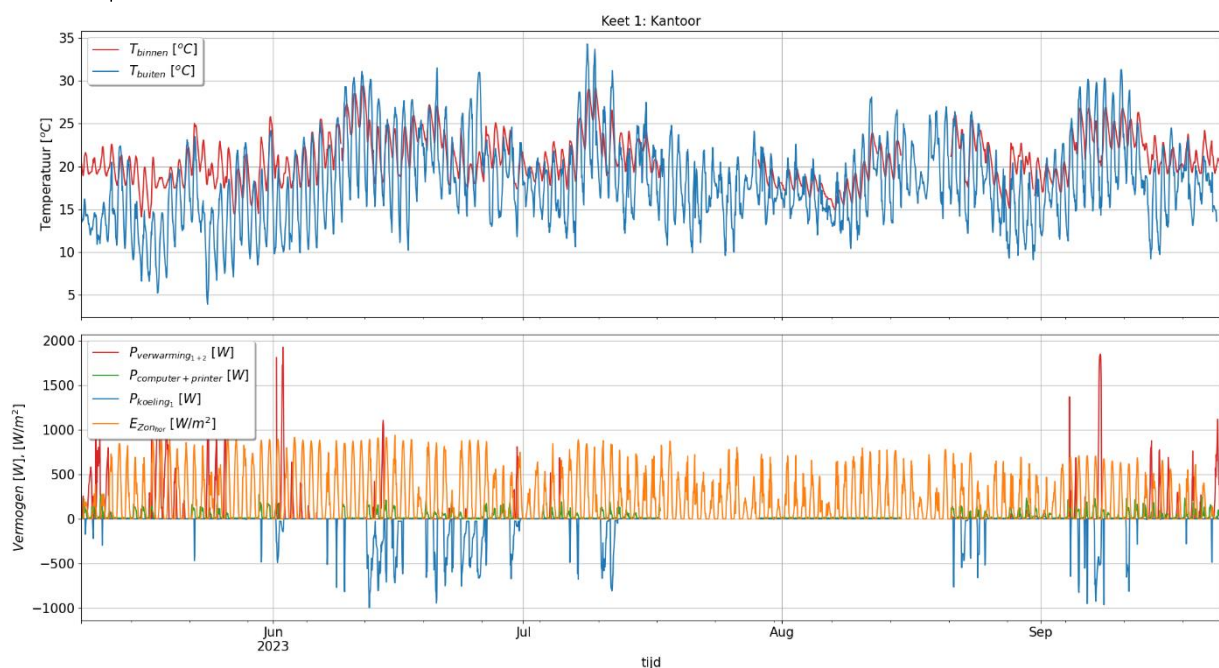
Figuur 5: Meetresultaten kantoorkeet (inclusief buitentemperatuur en zonintensiteit van KNMI weerstation Volkel).



Figuur 6: Meetresultaten schaftkeet ((inclusief buitentemperatuur en zonintensiteit van KNMI weerstation Volkel)

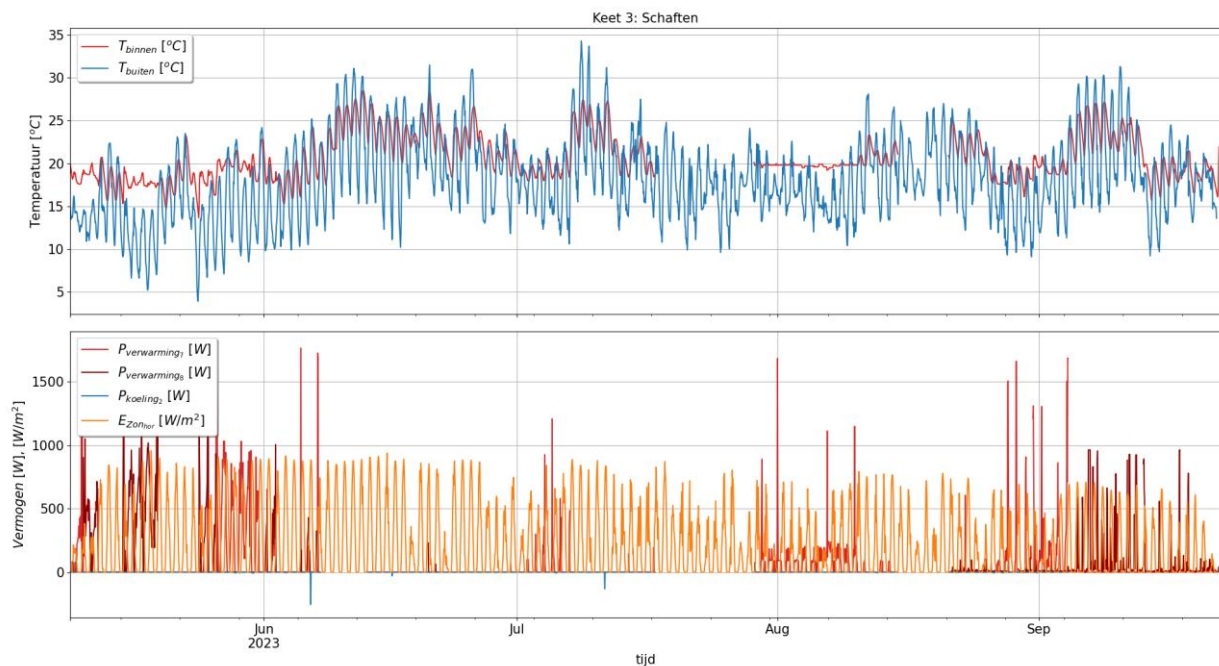
De grafiek laat o.a. zien dat:

- 1- de binnentemperaturen flink kunnen oplopen zonder koeling tijdens warme perioden (bv in het weekend van 10, 11 juni).
- 2- soms in dezelfde periode wordt verwarmd en gekoeld in de kantoorkaet.
- 3- de gerealiseerde binnentemperaturen, de inzet van de airco, en vermoedelijk de verwarming sterk variëren. Vermoedelijk wordt een en ander in/bijgesteld op basis van de comfortbeleving op dat moment.

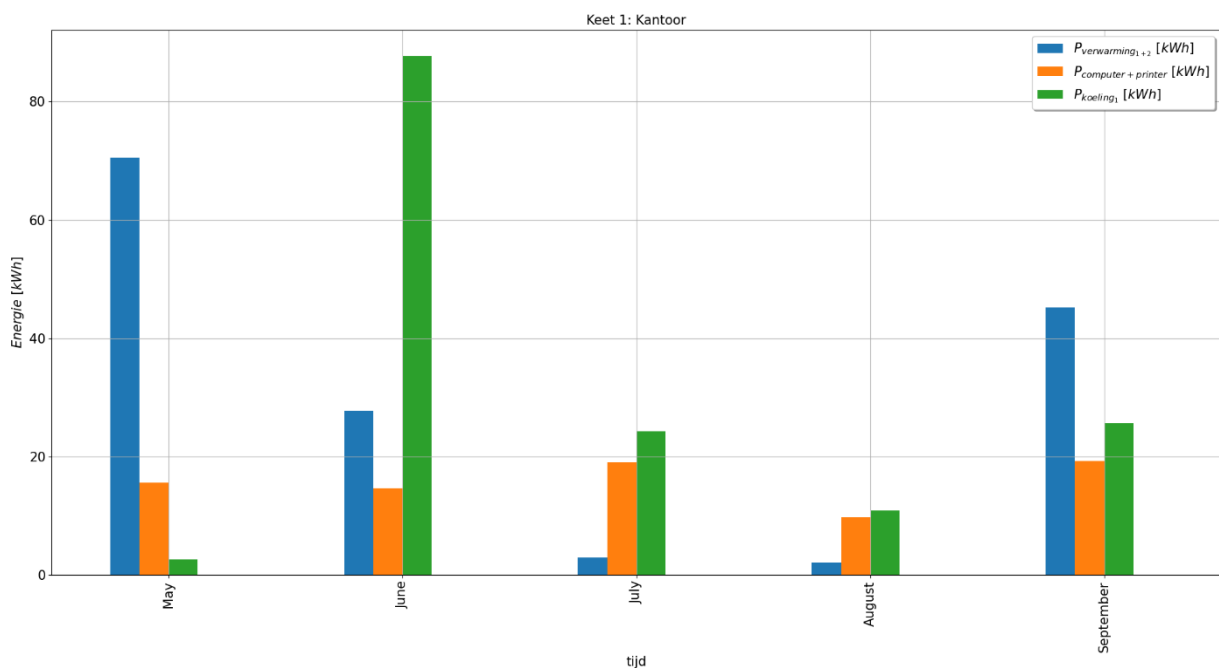


Figuur 7: Meetresultaten kantoorkaet (inclusief buitentemperatuur en zonintensiteit van KNMI weerstation Volkel).

Tijdens de bouwvakvakantie zijn de bouwketen niet gebruikt en is er geen meetdata beschikbaar.



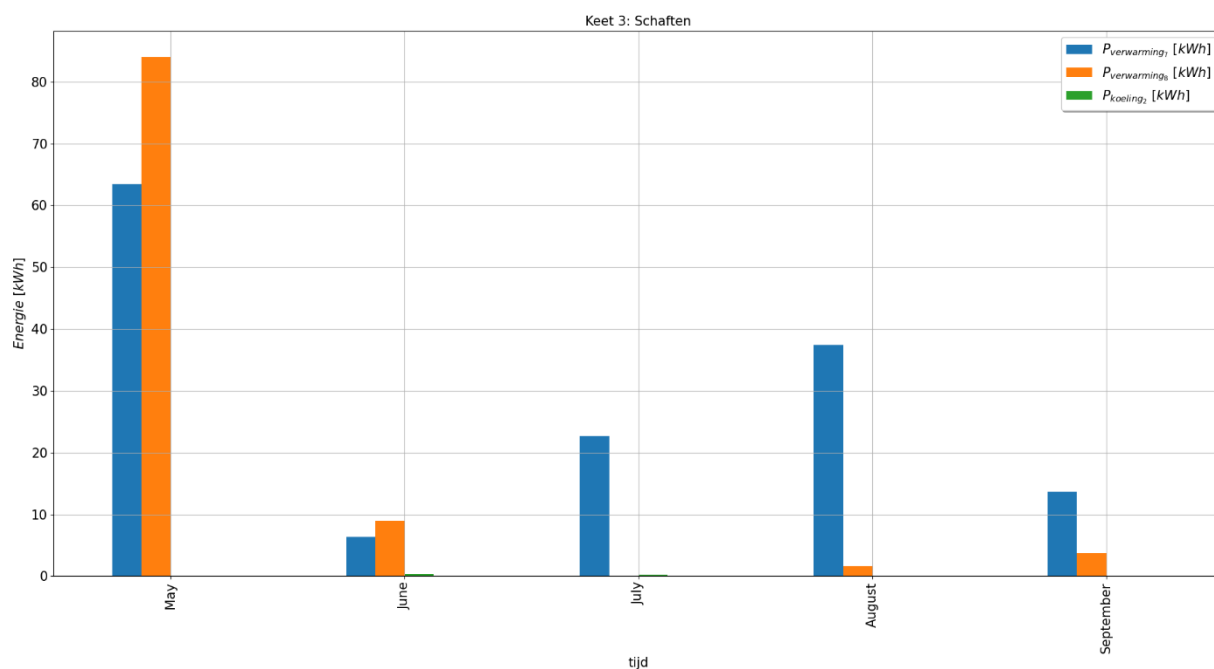
Figuur 8: Meetresultaten schaftkeet ((inclusief buitentemperatuur en zonintensiteit van KNMI weerstation Volkel)



Figuur 9: Gemeten (elektrisch) energieverbruik in de kantoorkeet voor verwarmen en koelen.

Wat opvalt is:

- 1- relatief veel koeling in juni. Minder in Juli (mede door bouwvakantie in juli) en augustus.
- 2- Verwarming in zomermaanden beperkt

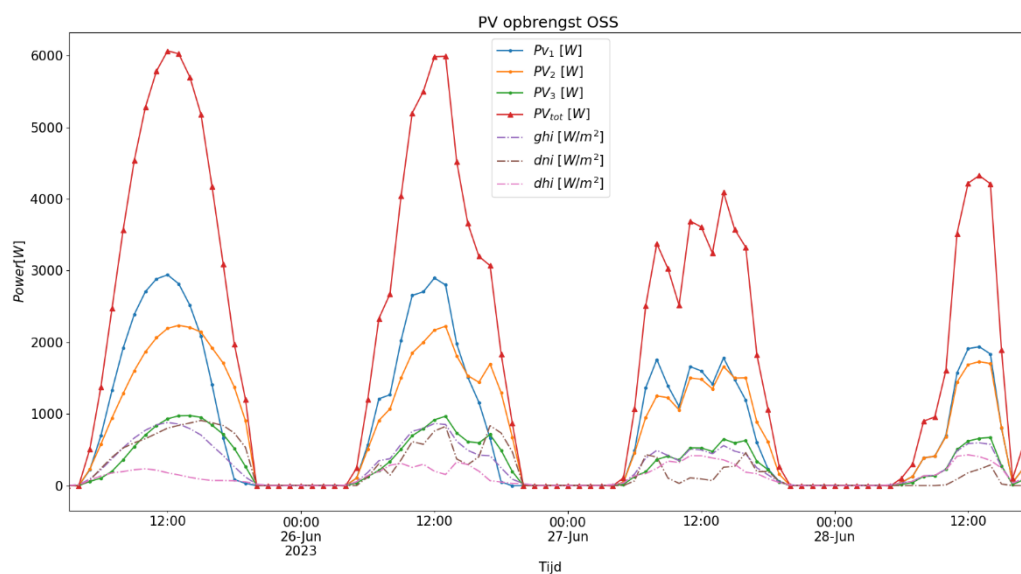


Figuur 10: Gemeten (elektrisch) energiegebruik in de schaftkeet voor verwarmen en koelen

5.1.1. PV opbrengst

Het PV opbrengst is gemodelleerd aan de hand van het systeem in Oss.

In Oss zijn 18 panelen met azimuth 160 graden (op 20 graden na zuid) 18 panelen op 340 graden (bijna noord) en 6 panelen op 250 graden (bijna west) van bijna 400 W_{peak} per stuk (zie figuurFiguur 11).



Figuur 11: Voorbeeld PV simulatie uitkomsten met de opbrengsten voor de 3 oriëntaties (Pv_1 , Pv_2 , Pv_3), de totale opbrengst (Pv_{tot}), de zonintensiteit voor globaal horizontaal (ghi), direct normaal (dni) en diffuus horizontaal (dhi).

De simulaties zijn uitgevoerd met PVlib (<https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/>) Door de hoge bomen in Oss is het lastig om het effect van de beschaduwing mee te nemen. Aanvankelijk zou de PV opbrengst in Oss worden gemeten door Green Hybrids. Het idee was om op basis van de metingen per maand een correctiefactor te bepalen voor de beschaduwing. Daarom zal in 1^e instantie de PV opbrengst worden berekend zonder beschaduwing en in 2^e instantie een globale afschatting en correctie voor beschaduwing worden gemaakt.

Ter controle is de jaaropbrengst per paneel berekend (voor bijna zuid, bijna noord en bijna west oriëntatie resulteerde dit in respectievelijk 333kWh/m², 290kWh/m² en 352kWh/m²) Dit komt overeen met wat we verwachten voor dit systeem.

5.1.2. Thermisch-energetisch model bouwkeet

Het analysemodel bestaat o.a. uit een dynamisch thermisch energetisch gebouwmodel van de bouwketen waarmee de energievraag voor verschillende weersomstandigheden kan worden bepaald en waarmee later ook de potentiële effecten van systeeminstellingen en/of aanpassingen op het energiegebruik kunnen worden bepaald.

Het model van de bouwkeet is in 1^e instantie samengesteld op basis van de bouwfysische eigenschappen van de bouwkeet.

Tabel 1ab: Bouwfysische eigenschappen bouwkeet

Transmissie											enkel	dubbel
	L	b	d	A	gevel L	gevel k	A_tot	U	Vol	U*A	(U*A) _{tot}	(U*A) _{tot}
	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[W/(m ² K)]	[m ³]	[W/K]	[W/K]	[W/K]
schil keet enkel	2.8	6	3	18	16.8	8.4	86.4	0.4	50.4	34.56	1	
schil keet dubbel	2.8	6	6	36	16.8	16.8	139.2		100.8	55.68		1
ramen g	1.1	2.3					2.53	2.8		7.084	2	4
ramen k	1.1	1.1					1.21	2.8		3.388		
deur	2	1						1		2	2	2
											52.7	88.0
Ventilatie												
Lucht												
soortelijke massa	1.29	kg/m ³										
soortelijke warmte	710	J/(kg.K)										
	915.9	J/(m ³ K)									W/K	W/K
Ventilatie	40	L/s	==	2.86	ACH						36.6	73.3
Thermische massa												
lucht keet	46161	J/K	12.823	wh/K	46.161	kJ/K						1.61
corr factor	3										J/K	J/K
Effectief	138484	J/K									138484	223113
keet											enkel	dubbel
Transmissie		[W/K]									52.7	88.0
Ventilatie		[W/K]									36.6	73.3
Thermische massa		[kJ/K]									138	223

De volgende figuur en differentiaalvergelijkingen beschrijven het thermisch-energetische model van de bouwkeet.

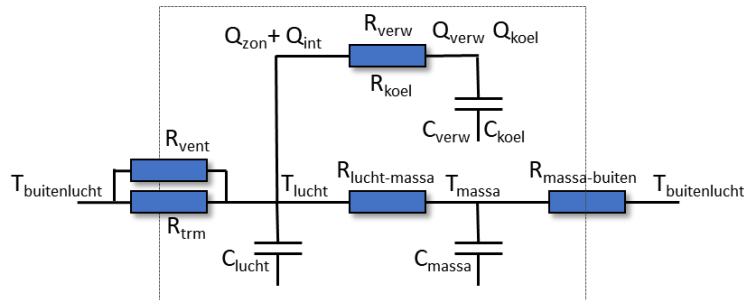


Figure 12: Schema thermisch energetisch bouwkeet model

$$\begin{aligned}\frac{d[T_{lucht}]}{dt} &= \frac{1}{C_{lucht}} \left(\left(\frac{T_{buiten} - T_{lucht}}{R_{buiten-lucht}} \right) + \left(\frac{T_{massa} - T_{lucht}}{R_{massa-lucht}} \right) + \left(\frac{T_{verw} - T_{lucht}}{R_{verw-lucht}} \right) + f_{zl} I_{zon} + f_{il} I_{int} + I_{vent} \right) \\ \frac{d[T_{massa}]}{dt} &= \frac{1}{C_{massa}} \left(\left(\frac{T_{buiten} - T_{massa}}{R_{buiten-massa}} \right) + \left(\frac{T_{lucht} - T_{massa}}{R_{massa-lucht}} \right) + f_{zm} I_{zon} + f_{im} I_{int} \right) \\ \frac{d[T_{verw}]}{dt} &= \frac{1}{C_{verw}} \left(\left(\frac{T_{massa} - T_{verw}}{R_{massa-verw}} \right) + \left(\frac{T_{lucht} - T_{verw}}{R_{lucht-verw}} \right) + I_{verw} \right) \\ \frac{d[T_{koel}]}{dt} &= \frac{1}{C_{koel}} \left(\left(\frac{T_{massa} - T_{koel}}{R_{massa-koel}} \right) + \left(\frac{T_{lucht} - T_{koel}}{R_{lucht-koel}} \right) + I_{koel} \right)\end{aligned}$$

Waarbij:

T_{lucht}	= temperatuur luchtknooppunt	[°C]
T_{massa}	= temperatuur gebouwmassa knooppunt	[°C]
T_{buiten}	= temperatuur buiten	[°C]
$R_{buiten-lucht}$	= warmteweerstand tussen buiten en luchtknooppunt	[K/W]
C_{lucht}	= thermische capaciteit luchtknooppunt	[Joule/K]
I_{zon}	= zonbelasting	[W]
I_{int}	= interne belasting	[W]
I_{vent}	= warmtestroom t.g.v. ventilatie	[W]
I_{verw}	= warmtestroom verwarming	[W]
f_{zl}	= fractie zonbelasting afgegeven aan luchtknoop	[-]

Verder geldt:

$$I_{vent} = \Phi_{WTW} * \rho_{lucht} * C_p *$$

Waarbij:

Φ_{WTW}	= Volumeflow van buiten naar binnen [m³/sec]
ρ_{lucht}	= soortelijke massa lucht [kg/m³]
C_p	= soortelijke warmte lucht [J/K]

En:

$$I_{zon} = I_{op\ beglazing} * A_{beglazing} * g_{beglazing} * f_{zonwering}$$

Waarbij:

$I_{op\ beglazing}$	= zonnebelasting op de gevel [W/m ²]
$A_{beglazing}$	= oppervlakte beglazing [m ²]
$g_{beglazing}$	= g waarde beglazing [-]
$f_{zonwering}$	= reductiefactor zonwering [-]

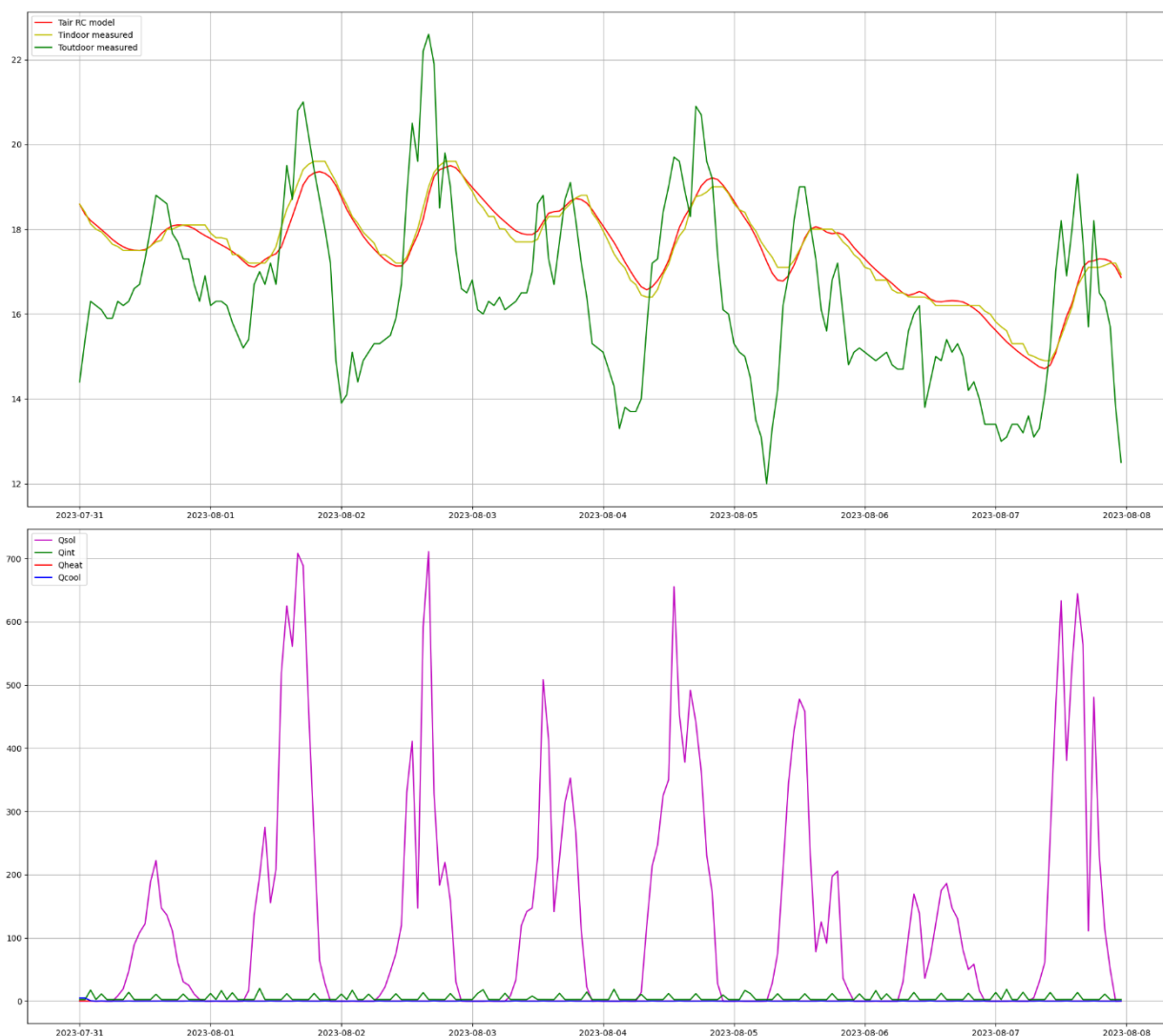
Tijdens het fitten van bovenstaande model bleek het volgende eenvoudige model te voldoen:

$$\frac{d[T_{binnen}]}{dt} = \frac{1}{C_{binnen}} \left(\left(\frac{T_{buiten} - T_{binnen}}{R_{buiten-binnen}} \right) + I_{zon} + I_{int} + I_{verw/koeling} \right)$$

Waarbij:

T_{binnen}	= temperatuur binnen	[°C]
T_{buiten}	= temperatuur buiten	[°C]
$R_{buiten-binnen}$	= warmteweerstand tussen buiten en luchtknooppunt	[K/W]
C_{binnen}	= thermische capaciteit binnenruimte	[Joule/K]
I_{zon}	= zonbelasting	[W]
I_{int}	= interne belasting	[W]
I_{vent}	= warmtestroom t.g.v. ventilatie	[W]
$I_{verw/koeling}$	= warmtestroom verwarming koelen	[W]

Door de beperkte thermische massa van een bouwkeet en het verwarmingssysteem kan de thermische massa worden verwaarloosd. Dit model is per week gefit voor de weken van 15-5-2023 tot 16-10-2023.



Figuur 13: Voorbeeld 1 gemeten data en gefit model. In de bovenste grafiek zijn de gemeten buitentemperatuur (groen) en binnentemperatuur (geel) gegeven samen met het gefitte model berekende binnentemperatuur (rood). Te zien is dat de gemeten binnentemperatuur (geel) en de met het model berekende binnentemperatuur (rood) goed overeenkomen. NB: Dit was tijdens een vakantieperiode waarbij niet werd verwarmd en geen deuren zijn geopend.



Figuur 14: Voorbeeld 2 gemeten data en gefit model. In de bovenste grafiek zijn weer de gemeten buitentemperatuur (groen) en binnentemperatuur (geel) gegeven samen met het gefitte model berekende binnentemperatuur (rood). Te zien is dat de gemeten binnentemperatuur (geel) en de met het model berekende binnentemperatuur (rood) minder goed overeenkomen dan bij de vorige (vakantie). Dat het minder goed overeenkomt is wel te verwachten omdat er veel onbekende factoren in het spel zijn zoals het openen van binnen en buitendeuren, het aantal aanwezige personen, de beschaduwing van omliggende bomen en het gebruik van raamluiken. Daarnaast volgt de met het model berekende binnentemperatuur de trend van de gemeten binnentemperatuur.

Het model is per week gefit voor de weken van 15-5-2023 tot 16-10-2023.

De volgende parameters zijn daarbij gevonden.

- 1- Capaciteit is 2 MJ/K.
- 2- U-waarde is 77 W/K
- 3- Zontoetredingsfactor voor zonintensiteit is 0.80 [-] uitgaande van zonnestraling op zuid.

5.1.3. Temperatuurinstelling

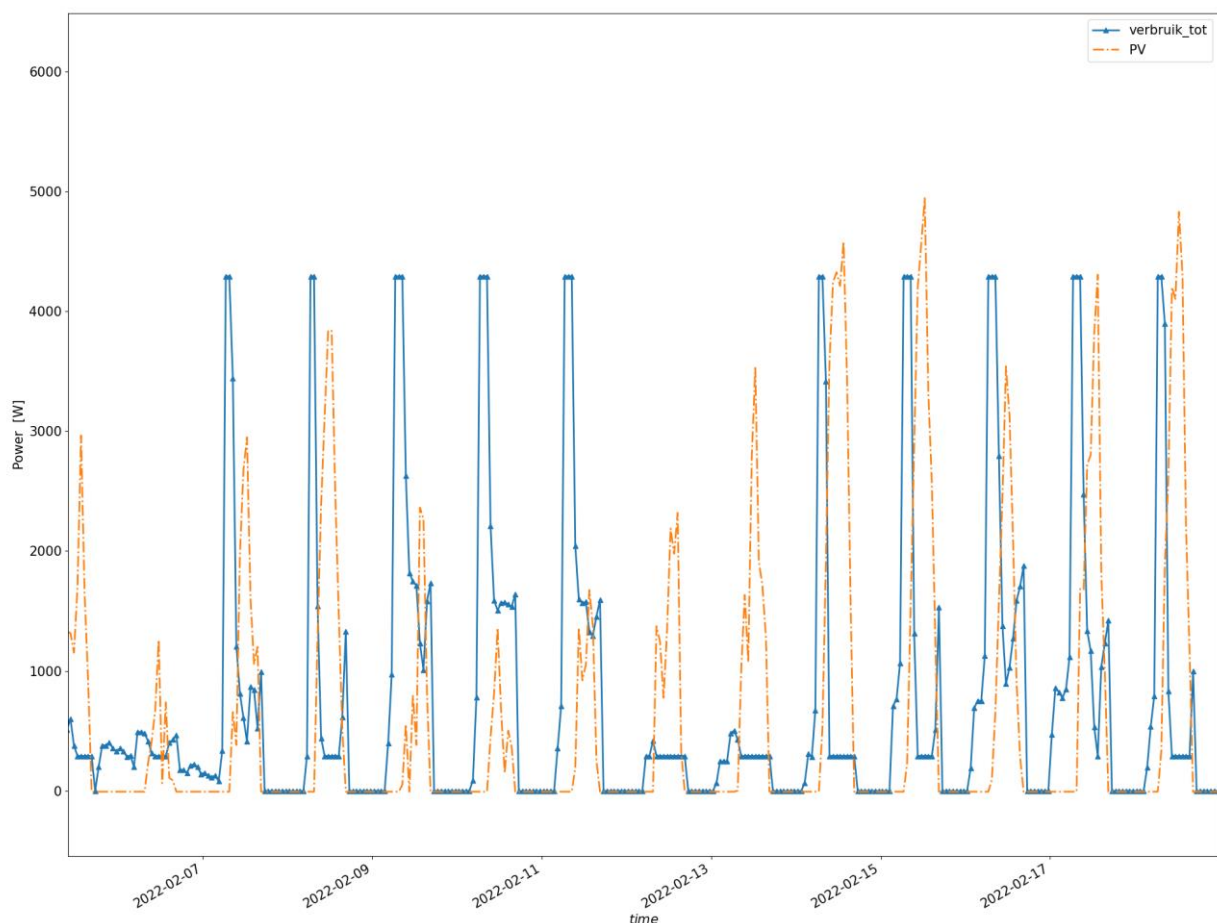
Voor de ruimte temperatuurinstellingen kan een setpointtemperatuur worden ingesteld op de verwarmingselementen. Daarnaast kan met een afstandsbediening een temperatuur worden ingesteld op de airco unit. Op de knop van de verwarmingselementen kan een temperatuur-tijdschema en voor de airco is dit mogelijk maar gebeurt bij navraag in de praktijk niet.

Het nadeel van ad-hoc met de hand instellen is dat tegelijk wordt verwarmd en gekoeld. De meetresultaten laten ook zien dat dat wel eens voorkomt. Een ander nadeel is dat de verwarming wel eens blijft aanstaan op momenten dat dat niet nodig is. Het voordeel van ad-hoc met de hand instellen is dat er niet wordt verwarmd of gekoeld op momenten dat daar geen behoefte aan is door gebruikers.

Lastig is wel dat de ingestelde setpoints een sterke variatie laten zien waardoor het lastiger is om voorspellingen te doen op basis van modellen.

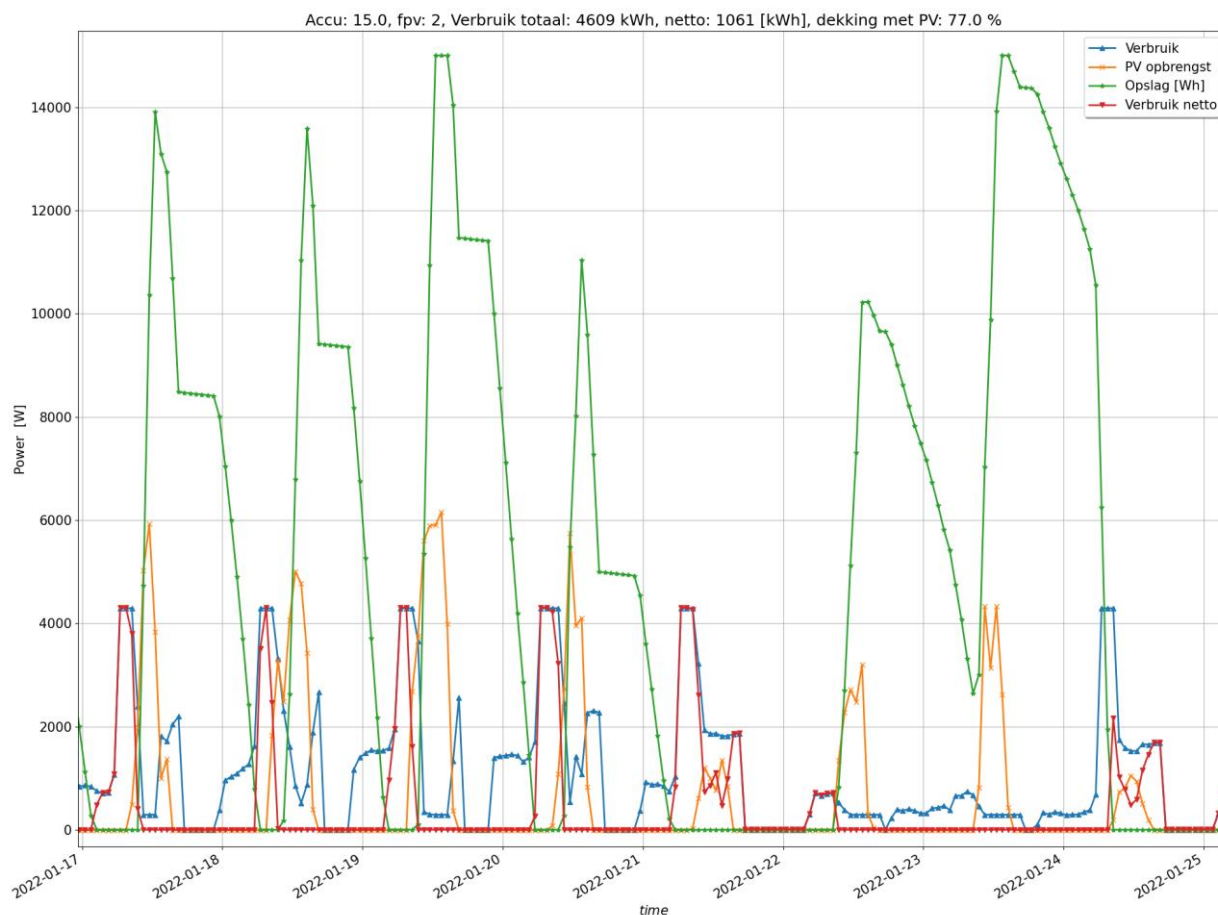
5.1.4. Simulaties

Om een beeld te krijgen hoeveel van de energievraag kan worden ingevuld met het PV-systeem zijn de PV-opbrengst en de energievraag voor een jaar (2022) berekend.



Figuur 15: Voorbeeld van het totale energiegebruik van de bouwketen (verwarming en kraan) en de PV-opbrengst voor 7 t/m 18 februari 2022.

Figuur 15 laat zien dat het energieaanbod van het PV-systeem niet goed past bij energievraag. De piek ligt namelijk in de morgen als de thermostaat wordt opgehoogd naar comforttemperatuur als er nog geen PV-aanbod is.



Figuur 16: Voorbeeld van 1) verbruik: de totale energievraag (verwarmen, koelen, kraan ed.), 2) PV-opbrengst, 3) Opslag in de accu, 4) Verbruik netto na aftrek van PV en in de accu opgeslagen energie voor de periode van 17 t/m 24 januari 2022 voor een accu van 15 kWh en twee keer zoveel PV als in Oss geïnstalleerd.

De simulatie (zie Figuur 16) laat zien dat de netto energievraag flink afneemt door tijdelijke energieopslag in de accu.

Deze berekeningen zijn gedaan voor een combinatiematrix van opgesteld PV en accu grootte om inzicht te krijgen in de dekkingsgraad die met verschillende combinaties kan worden gerealiseerd waarbij een dekkingsgraad van 100% inhoudt dat 100% van de energie door PV kan worden gedekt (zie figuur 18).

Index	ian	feb	mrt	apr	mei	iun	iul	aug	sept	oct	nov	dec
PV:(0.25), Accu:(0)	6.2	12.7	20.1	41.1	65.7	85.2	93.9	92.8	66.8	31.9	11.4	5.3
PV:(0.25), Accu:(0.1)	7.9	21.2	33.4	73.3	99.9	100	100	100	94.2	54.3	17.3	7.2
PV:(0.25), Accu:(0.25)	8.6	21.2	35.1	81.2	100	100	100	100	99.9	58.8	17.4	7.2
PV:(0.25), Accu:(0.5)	9.6	21.2	35.4	83.6	100	100	100	100	100	64.2	17.4	7.2
PV:(0.25), Accu:(1)	11.7	21.2	35.4	83.6	100	100	100	100	100	75	17.4	7.2
PV:(0.25), Accu:(2)	15.9	21.2	35.4	83.6	100	100	100	100	100	96.6	17.4	7.2
PV:(0.25), Accu:(4)	24.3	21.2	35.4	83.6	100	100	100	100	100	100	42	7.2
PV:(0.5), Accu:(0)	9.6	17.1	27.6	51.7	73.5	89.3	96.5	95.9	72.6	38.2	16	7.5
PV:(0.5), Accu:(0.1)	15.2	36.1	46.7	84.4	100	100	100	100	98.9	69.7	33.9	14.1
PV:(0.5), Accu:(0.25)	16.1	42	55.8	96.9	100	100	100	100	100	77.8	37.2	14.4
PV:(0.5), Accu:(0.5)	17.1	42.4	58.2	100	100	100	100	100	100	85.9	39	14.4
PV:(0.5), Accu:(1)	19.2	42.4	58.2	100	100	100	100	100	100	96.7	39	14.4
PV:(0.5), Accu:(2)	23.4	42.4	58.2	100	100	100	100	100	100	100	50.3	14.4
PV:(0.5), Accu:(4)	31.9	42.4	58.2	100	100	100	100	100	100	100	77	14.4
PV:(1), Accu:(0)	14.6	22.8	37.1	66.2	84.1	94.4	97.7	97.1	77.7	43.5	21.4	10.5
PV:(1), Accu:(0.1)	25.8	46.4	59.6	95.1	100	100	100	100	99.6	77.2	48.6	21.5
PV:(1), Accu:(0.25)	30	66.3	69.1	100	100	100	100	100	100	86	63.8	25.6
PV:(1), Accu:(0.5)	32.1	75.5	71.9	100	100	100	100	100	100	91.5	72.8	27.8
PV:(1), Accu:(1)	34.2	81.6	80	100	100	100	100	100	100	100	81.1	27.8
PV:(1), Accu:(2)	38.5	81.6	87.6	100	100	100	100	100	100	100	94.4	27.8
PV:(1), Accu:(4)	46.9	81.6	87.6	100	100	100	100	100	100	100	100	42.2
PV:(2), Accu:(0)	21	29.6	48	82.1	93.6	95.5	97.2	96.8	82.7	48.6	26.9	15.3
PV:(2), Accu:(0.1)	37.2	55.5	72.4	98.1	100	100	100	100	100	85.8	57.4	28.1
PV:(2), Accu:(0.25)	50.8	79.1	82.8	100	100	100	100	100	100	94.3	83.8	36.9
PV:(2), Accu:(0.5)	58.1	92.4	89.7	100	100	100	100	100	100	99.7	95.4	42.3
PV:(2), Accu:(1)	63.4	98.8	97.8	100	100	100	100	100	100	100	100	48.2
PV:(2), Accu:(2)	67.6	98.8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	64.7
PV:(2), Accu:(4)	76	98.8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	82.9
PV:(4), Accu:(0)	26	35.5	56.6	89.2	94.9	95.1	95.8	95.3	85.3	52.5	30.8	20.1
PV:(4), Accu:(0.1)	46.6	63.1	80.9	99.2	100	100	100	100	100	90.6	66	38.2
PV:(4), Accu:(0.25)	66.4	86.8	95.4	100	100	100	100	100	100	97.8	91.5	49
PV:(4), Accu:(0.5)	84.2	97.2	99	100	100	100	100	100	100	100	99.4	59.3
PV:(4), Accu:(1)	93.4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	70.9
PV:(4), Accu:(2)	98.1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	84.5
PV:(4), Accu:(4)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Figuur 17: Dekkingspercentage van de opgewekte energie voor de energievraag in de keten per maand voor verschillende combinaties van PV (PV: 0.25, 0.5, 1, 2 of 4 keer wat in Oss staat opgesteld zonder schaduw en Accu is 0, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2 of 4 * 60 kWh).

De dekking (zie Figuur 17) is gegeven voor verschillende systeemconfiguraties per maand. Voor de zomersituatie is een beperkter batterijpakket en PV systeem nodig dan nu zijn toegepast in Oss voor een 100% dekking.

Enige voorzichtigheid is echter wel op zijn plaats. Het weer kan per jaar variëren en daarmee de energievraag voor verwarmen en koelen. Daarnaast is hier uitgegaan van een enkele kraan met beperkte rijbeweging.

6. Beantwoording vraagstelling

De energievraag van de bouwplaats is in beeld gebracht.

Deze kan worden gereduceerd door i.p.v. met elektrische verwarming te verwarmen met een warmtepomp of met de airco systemen. Als met één systeem zowel wordt verwarmd als gekoeld kan ook worden voorkomen dat soms tegelijkertijd wordt verwarmd en gekoeld zoals uit de metingen bleek voor te komen.

De berekeningen met verschillende systeemcombinaties laten zien welke combinaties wanneer voldoende energie leveren. Wel moet worden bedacht dat het weer van jaar tot jaar varieert en het aantal keten kan variëren.

7. Aanbevelingen en input andere werkpakketten

Als aangegeven kwam uit de metingen naar voren dat de verwarming en de koeling separaat en naar behoefte worden ingesteld waarbij soms tegelijkertijd werd verwarmd en gekoeld. Aanbevolen wordt hier scherp op te zijn of een systeem toe te passen waardoor dit wordt voorkomen.

De verwarming vond plaats met elektrische verwarming. Er zijn alternatieven met een hoger rendement die uiteindelijk minder energie vragen zoals een warmtepomp. Ook kan de ruimte worden verwarmd met de aanwezige airco unit. Dit levert een substantiële energievraagreductie voor verwarming op.

Een mogelijk alternatief of toevoeging is gebruik maken van “statiegeldbatterijen” die elders worden opgeladen (bijvoorbeeld nabije PV velden) en met elektrische busjes worden vervoerd en omgewisseld.

De metingen gedaan voor dit werkpakketten worden gebruikt als input voor WP9 om emissieberekeningen te kunnen uitvoeren en voor WP8 om de transportbewegingen/energieverbruik overzichtelijk te kunnen maken.

8. Referenties

Gebruikt voor PV opbrengstberekening <https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/>

9. Bijlage 1: Gegevens bouwketen





Klok Materieel B.V.

Isolatie	Mineraal wol: 100/100/100mm - dak/wand/vloer
Type elektra:	400V/32A/5-polig
Verlichting	2 LED armaturen afm. 595x595mm
Aantal wandschakelaars:	2
Aantal dubbele wandcontactdozen:	4
Aantal enkele wandcontactdozen:	2
Aantal convectorkachels:	2 (1kW)
Boiler	1, 30L
Type Ventilatie :	1 mechanische ventilatoren
Aantal buitendeuren:	1 (RAL6018) met glasvenster afm. 1010x2163mm en 2 zonder glasvenster
Aantal ramen:	1 kiep sanitair raam afm. 1010x1200mm
Aantal toiletten	2 v.v. toiletbril en toiletrolhouder
Aantal wastroggen:	1 RVS met 2 kranen warm en koud water
Aantal urinoirs	2 met drukknop
Overige zaken:	2 vloerputjes in sanitair gedeelte
Overige zaken:	ventilatie-roosters in de wanden
Overige zaken:	Opening in de wand voor de doorvoer van kabels
Indeling:	Scheidingswanden incl. binnendeuren volgens tekening

Type A1:

Hoofdverdeelkast aanwezig:	Ja
Binnenmaat hoogte:	2500mm
Buitenmaathoogte	2960mm
Kleur Buitenwandafwerking	RAL6018
Binnenwandafwerking:	Melamine panelen, grijs
Type vloer	Cementgebonden houten vloer
Type vloerbedekking:	PVC, Fatra DOMO, 1,4mm, grijs
Isolatie	Mineraal wol: 100/100/100mm - dak/wand/vloer
Type elektra:	400V/32A/5-polig
Verlichting	2 LED armaturen afm. 595x595mm en 1 LED bol-armatuur
Aantal wandschakelaars:	3
Aantal dubbele wandcontactdozen:	3
Aantal enkele wandcontactdozen:	5 waarvoor 1 voor de airconditioner
Aantal convectorkachels:	1 (1kW), 1 (2kW)
Type Ventilatie :	1 mechanische ventilator
Aantal buitendeuren:	3 waarvan 1 voorzien van glasvenster afm. 1010x2163mm
Aantal ramen:	1 PVC tweevlaks-raam v.v. ventilatie-rooster en rolluik afm. 2360x1200mm
Aantal toiletten	1 v.v. toiletbril en toiletrolhouder
Aantal wasbakken	1, alleen koudwater
Aantal keukenblokken:	1 v.v. 5L boiler en koelkast
Overige zaken:	Opening in de wand voor de doorvoer van kabels