

Technische Universiteit Delft



CTB3000 Bachelor Eindwerk

Energie uit een polderdak

'Is het mogelijk om met een polderdak een gebouw energiezuinig te verwarmen en af te koelen?'

Stijn Lakerveld
4366247

Begeleiders:
dr. ir. Olivier Hoes, TU Delft
ir. Martin Bloemendal, TU Delft
ing. Matthijs Monkelbaan, Polderdak

15 januari 2018

Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
(CiTG)

Samenvatting

De uitstoot van broeikasgassen is gestegen, hierdoor neemt, doordat de aarde moeilijker zijn warmte verliest de gemiddelde temperatuur toe. Hierdoor komen steeds vaker extreme weersomstandigheden voor. Daardoor verandert de wateropgave van stedelijke omgeving. Al het regenwater kan tijdens de periode dat dit neerslaat niet gelijk worden afgevoerd. Een blauw/groen dak, ook wel een polderdak genoemd, biedt hier een oplossing voor. Deze slaat water op onder een groene laag met beplanting.

Een polderdak blijkt zich echter nog moeilijk te verkopen, omdat de investering voor de gebruiker pas na lange termijn is terugverdiend. Dit komt omdat de opslag van water nog niet directe invloed heeft op de gebruiker. Kan er dus aan het polderdak behalve deze wateropslag een functie toegevoegd worden, om dit water te gebruiken om thermische energie te winnen of in op te slaan, zodat een gebouw duurzaam kan worden gekoeld of verwarmd?

Een te verwarmen ruimte in het gebouw heeft een bepaalde warmtestroom nodig om op de juiste temperatuur te blijven. Deze energievraag van een gebouw wordt gegeven door kentallen. Als deze worden verdeeld over een jaar kan een gemiddelde warmtevraag per seconde worden bepaald. Deze warmtevraag wordt uit het water op een polderdak gehaald door middel van een warmtepomp. Hierdoor verandert de temperatuur van het water op het dak. Door de eis te stellen dat geen ijsvorming mag ontstaan op het polderdak, vanwege een lagere warmtecapaciteit van ijs, kan worden berekend hoeveel warmte uit het water kan worden onttrokken op een dag.

De totale hoeveelheid thermische energie die uit water kan worden gehaald hangt af van het volume en de temperatuur van het water. De temperatuur van het water hangt af van de temperatuur van de lucht in contact met het water, inkomende straling van de zon, uitgaande warmte van het onderliggende gebouw. Het volume van het regenwater wordt groter door middel van regenval op het dak en zal afnemen door verdamping en de uitgaande stroom van water vanaf het dak. De invloed van de luchttemperatuur op de watertemperatuur wordt gemodelleerd door middel van de afkoelingswet van Newton met een constante K waarde van $2.25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Door de hiervoor beschreven systemen te modelleren zal een equilibrium temperatuurverschil ontstaan bij een gegeven warmtevraag. Bij koeling zal er ook een equilibrium temperatuurverschil ontstaan, doordat de warmtepomp warmte loost naar het water op het dak welke afkoelt door de omgevingstemperatuur.

Deze methode is voor het verwarmen van een gebouw in Nederland toe te passen van maart tot en met november. Door het gebruik van een andere isolatielaag dan een groene laag, bestaande uit substraat met beplanting, kan de toepasbaarheid in het jaar worden verhoogd, doordat deze andere isolatielaag beter straling kan vasthouden. Koelen kan met een warmtepomp onder de voorwaarde dat de koelingsvraag niet een grote temperatuursverhoging van het water op het dak veroorzaakt. Een te hoge temperatuur van het water zal nadelig zijn voor zowel de efficiëntie van de warmtepomp als de beplanting. Doordat een polderdak een gebouw al beter isoleert dan een conventioneel dak zal hierdoor de minder hoeven worden bijgekoeld door de warmtepomp en zal de temperatuur van het regenwater minder toenemen.

Het gebruik van een warmtepomp is duurzamer dan een conventionele cv installatie, onder de voorwaarde dat de COP van de warmtepomp hoger is dan 1.33.

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	ii
1 Inleiding.....	1
1.1 Aanleiding.....	1
1.2 Onderzoeksvraag.....	1
1.3 Onderzoeksdoel.....	2
1.4 Aanpak / Methode.....	2
2 Blauw/Groen dak.....	3
3 Koel en verwarmingsvraag gebouw.....	4
3.1 Kentallen.....	4
3.2 Verdeling over het jaar.....	4
3.2.1 Verwarmen.....	5
3.2.2 Koelen.....	5
3.3 Koelen versus verwarmen.....	6
3.4 Eisen aan temperatuur regenwater.....	6
3.5 Verdeling over de dag.....	7
3.6 Implementatie model.....	8
4 Beschikbaarheid van thermische energie regenwater.....	9
4.1 Theorie.....	9
4.1.1 Variatie volume regenwater.....	9
4.1.2 Variatie temperatuur regenwater.....	9
4.2 Metingen.....	10
4.2.1 Open water.....	10
4.2.2 Water onder een groene laag.....	11
4.3 Implementatie model.....	12
5 Toepassing en rendement methode / energiebesparing.....	14
5.1 Invloed warmtepomp op watertemperatuur.....	14
5.2 Toepasbaarheid door het jaar.....	17
5.2.1 Verhoging toepasbaarheid.....	18
5.2.2 Koeling.....	18
5.3 Duurzaamheid warmtepompen in vergelijking met conventionele verwarmings- en koelsystemen.....	18
6 Discussie.....	19
7 Conclusie en Aanbevelingen.....	20
7.1 Conclusie.....	20
7.2 Aanbevelingen.....	20

Verwijzingen.....	I
Appendix A: Systeem Warmtepomp	II
Appendix B: Temperatuursverschil zonder opwarming.....	III
Appendix C: Regelschema Smart Flow Control	IV
Appendix D: Open water temperatuur	V
Appendix E: Data Project Smartroof 2.0	VII
Appendix F: KNMI data	VIII
Appendix G: Temperatuurverschillen	IX
Appendix H: Voorspelling watertemperatuur zomer	X
Appendix I: Python code	XI

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Sinds de industriële revolutie is de uitstoot van broeikasgassen gestegen. Dit zorgt, doordat de aarde haar energie moeilijker kwijt raakt, voor een globale stijging van de temperatuur. De gemiddelde temperatuur is van 1880 tot 1975 gestegen met 0.8 °C en stijgt sindsdien hierdoor met 0.15-0.20 °C per decennium volgens NASA's GISS (Carlowicz, 2010). Dit heeft gevolgen voor het milieu; steeds vaker komen extreme weersomstandigheden voor, waardoor de klimaatverandering hoog op de politieke agenda staat. De uitstoot van CO₂ moet dus verminderd worden. Samen met de andere klimaatdoelstellingen van het akkoord van Parijs, is een behoefte ontstaan aan duurzame oplossingen voor energiewinning en het energiegebruik van gebouwen.

Doordat in Nederland in de loop der jaren meer wordt gebouwd en geasfalteerd, wordt regenwater niet meer overal in de grond geïnfiltreerd. Deze wordt hierbij afgevoerd via het rioolnetwerk. Bij extreme regenval is de capaciteit van deze systemen niet meer voldoende of voldoen de in het verleden aangelegde systemen niet meer aan de huidige regenval. Door hevige neerslag en/of langere tijden zonder neerslag verandert de wateropgave in de stedelijke omgeving. Hierdoor is behoefte aan systemen die dit overtollige regenwater opslaan en op een later moment weg kunnen voeren.

Voor de opslag van overtollig regenwater bestaat al een oplossing: een groen/blauw dak, ook wel een polderdak genoemd. Anders dan bij klassieke groene daken kunnen deze polderdaken onder het groene oppervlakte meer (regen)water opslaan, doordat de groene laag op waterbufferkrachten staat.

Een polderdak blijkt zich echter nog moeilijk te verkopen, omdat de investering voor de gebruiker pas na lange termijn is terugverdiend. Dit komt omdat de opslag van water nog niet directe invloed heeft op de gebruiker. Kan er dus aan het polderdak behalve deze wateropslag een functie toegevoegd worden, om dit water te gebruiken om thermische energie te winnen of in op te slaan, zodat een gebouw duurzaam kan worden gekoeld of verwarmd?

1.2 Onderzoeksvraag

Met behulp van warmtepompen kan thermische energie uit water worden onttrokken of aan worden toegevoegd. Kan het opgeslagen regenwater op een dak worden gebruikt met dit systeem als duurzame verwarming en respectievelijk koeling? Bevat het water genoeg energie om ruimtes in een gebouw genoeg te verwarmen? En is deze methode energiezuiniger dan conventionele verwarmings- en koelsystemen?

De hoofdvraag:

- Is het mogelijk om met een polderdak een gebouw energiezuinig te verwarmen en af te koelen?

Met als deelvragen:

- Wat is de energievraag van een gebouw waarbij een polderdak toegepast wordt? Welke eisen worden er op welk moment in het jaar gesteld aan de temperatuur en volume van het water op het polderdak? (hoofdstuk 3)
- Hoe varieert het volume en de temperatuur van regenwater op een dak in het jaar en waar hangen deze variabelen van af? (hoofdstuk 4)
- Op welke momenten in het jaar kan het polderdak worden gebruikt om het gebouw te koelen of te verwarmen? Wat is het rendement en de energiebesparing van deze methode? (hoofdstuk 5)

1.3 Onderzoeksdoel

Het doel van het onderzoek is om te bepalen in hoeverre uit water op een plat dak energie is te winnen en in hoeverre hiermee een gebouw kan worden opgewarmd of afgekoeld.

1.4 Aanpak / Methode

Om dit onderzoeksdoel uit te werken is voor de volgende aanpak gekozen:

Ten eerste wordt de energievraag van ruimtes in een gebouw bepaald. Dit gaat met behulp van kentallen. Deze kentallen worden gebruikt om de verdeling van verwarming en verkoeling over het jaar te berekenen. Hierbij wordt ook stilgestaan bij het energieverbruik overdag en in de nacht.

Daarnaast wordt uitgezocht welke voorwaarden aan de temperatuur van het regenwater worden gesteld. Op welke momenten in het jaar kan warmte/koude onttrokken van of geloosd worden aan het water op het dak.

Ook wordt uitgezocht hoe snel het water weer terug is op de atmosferische temperatuur. Dit wordt bepaald door eerst uit te zoeken waar de temperatuur van het water zonder het afnemen van warmte van afhangt. Er wordt specifiek gekeken naar de invloed die de buitenlucht heeft op de temperatuur van het water. Hierdoor kan worden bepaald hoeveel warmte het water kan afgeven of afnemen, op een bepaald moment.

Dit alles wordt meegenomen en gesimuleerd in een model dat in Python wordt geschreven. Hiermee kan worden berekend hoeveel ruimte kan worden opgewarmd met een hoeveelheid water. Hier kan uiteindelijk mee gevarieerd worden om meerdere situaties te modelleren en kan de onderzoeksvraag beantwoord worden.

2 Blauw/Groen dak

Voordat ingegaan wordt op het systeem wat wordt toegevoegd aan een blauw/groen dak, is het nuttig om te weten wat een blauw/groen dak precies inhoudt.

Een groen dak is een dak met daarop een laag beplanting. De beplanting zorgt voor het filteren van fijnstof, het omzetten van CO₂ in zuurstof en het verlagen van de omgevingstemperatuur.

Het verlagen van de omgevingstemperatuur wordt veroorzaakt doordat de straling van de zon wordt geabsorbeerd door de beplanting en wordt gebruikt voor fotosynthese. Hierdoor wordt 30% van de inkomende straling gereflecteerd (J. Voeten, pers. comm., 18 december 2017).

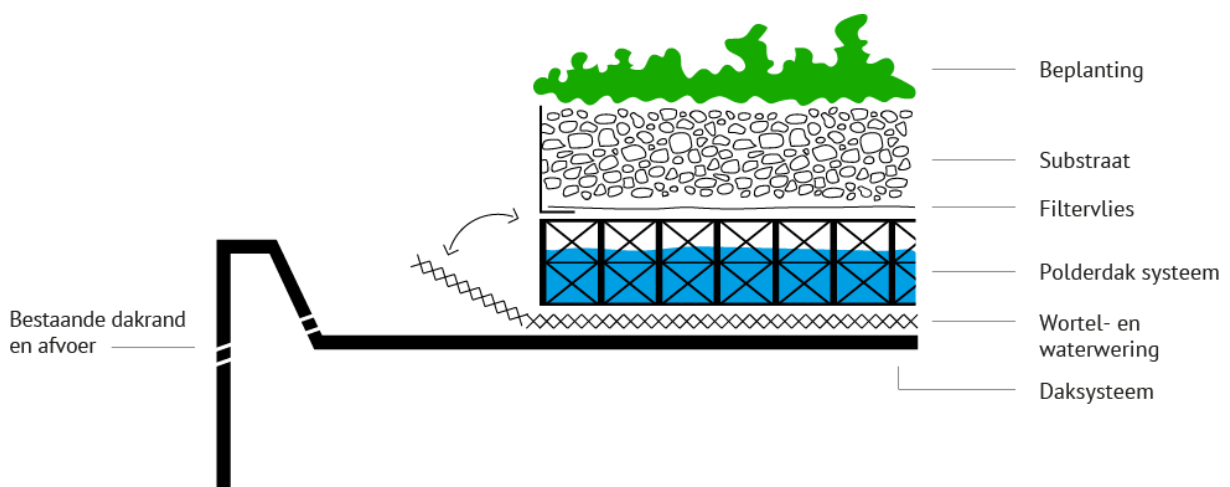
Bij een dakleer laag zal alle straling worden geabsorbeerd. Door de transpiratie van de vegetatie op een dak is een constante warmteonttrekking uit de lucht via waterdamp. Een plant gebruikt hiervan slechts ongeveer 1% en zal de rest van de opgenomen waterdamp met een koelere temperatuur transpireren.

Bij een groen/blauw dak wordt het water die de beplanting nodig heeft via capillaire conen aangevoerd naar het filtervlies, die de bovenliggende grond, ook wel substraat genoemd, van water voorziet. Bij regenval wordt het water dat niet wordt opgenomen in de grond afgevoerd naar de waterlaag.

De waterlaag onder de beplanting bestaat dus uit regenwater. De hoeveelheid regenwater op het dak kan via of een overlaat of een regelklep worden geregeld. Hierdoor kan het opgeslagen water op een moment dat nodig is, worden afgevoerd naar het rioelstelsel of op een andere manier worden gebruikt.

Een ander voordeel van een groene laag boven het water is dat algengroei in de zomer wordt tegengegaan, doordat de meeste straling op het water door deze laag wordt tegengehouden.

Ook zorgt deze vorm van dakbekleding voor een goede isolatie van het dak. In de zomer staat relatief koeler (in plaats van geen) water op het door de zon verwarmde dak met bitumen-/EPDM-laag. In de winter zal warmte minder snel verdwijnen via het dak als gevolg van de dikkere isolatielaag die wordt gecreëerd.



Figuur 1 Schema Polderdak, bron: polderdak.nl

3 Koel en verwarmingsvraag gebouw

Wat is de energievraag van een gebouw? Welke eisen worden op welk moment in het jaar gesteld aan de temperatuur en volume van het water op het dak?

3.1 Kentallen

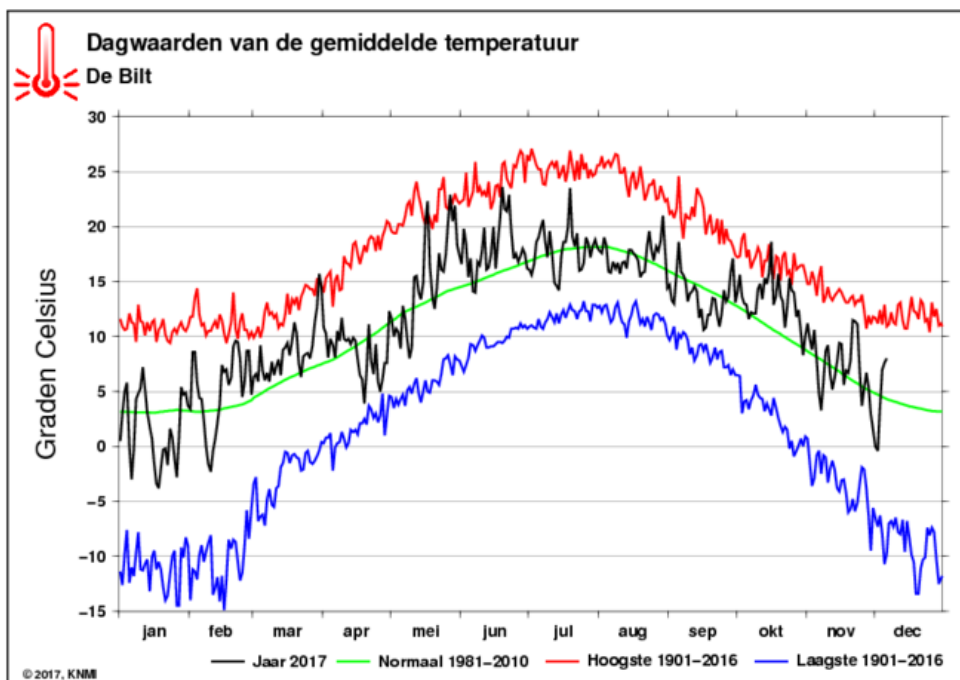
Het Nationaal Expertisecentrum Warmte (NEW) en de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) hebben een protocol en een rekenmodel ontwikkeld 'om de energieprestaties van verschillende technieken (zoals warmtepompen, warmte-koudeopslag, [...]) goed vergelijkbaar te maken.' (Nuiten, et al., 2017). De kentallen van dit model zijn in Nederland de norm voor de energievraag van verschillende gebouwen. De behoefte aan thermische energie is in het model berekend zonder de leiding-, distributie- en opwekkingsverliezen. Volgens M. Bloemendal (pers. comm., 5 december 2017) worden in de praktijk echter iets aangepaste getallen aangehouden die de werkelijkheid beter benaderen; zie Tabel 1. Deze waarden zullen de binnentemperatuur rond de 18-20 °C houden. Deze kentallen kunnen sterk variëren per gebouw, maar is voor dit stadium nog niet relevant om mee te nemen.

Tabel 1 Kentallen Praktijk

	Warmtevraag		Koeling	
	Piekvermogen [W/m ²]	Jaarlijks verbruik [kWh/m ²]	Piekvermogen [W/m ²]	Jaarlijks verbruik [kWh/m ²]
Kantoren	57	57	45	35
Utiliteit	50	50	65	40
Wonen	50	60	30	20

3.2 Verdeling over het jaar

Door het jaar heen is de warmtevraag niet homogeen verdeeld, omdat de buitentemperatuur namelijk varieert, zoals te zien is in Figuur 2. Vanaf oktober t/m april moet een gebouw actief verwarmd worden om de binnentemperatuur op niveau te houden.



Figuur 2 Dagwaarden van de gemiddelde temperatuur, bron schema: KNMI 2017

3.2.1 Verwarmen

Als de buitentemperatuur (naar inschatting) 12 °C is, begint men met verwarmen. De gemiddelde temperatuur per maand is gegeven in Tabel 2 en is berekend met de gehomogeniseerde reeks maandtemperaturen van De Bilt van het KNMI (2017), vanaf 2010. Het maandelijks verbruik wordt volgens Vergelijking 1 verdeeld.

$$Q_{\text{maandelijks}} = \frac{12 - T_{\text{gem}}}{\Sigma(12 - T_{\text{gem}})} * Q_{\text{jaarlijks}}, T_{\text{gem}} < 12$$

Vergelijking 1

Hierbij is Q de eenheid voor warmte. De uitkomst hiervan is in het rechter deel van Tabel 2 te vinden.

Tabel 2 Warmtevraag per maand per vierkante meter

Maand	Gem T	Percentage	Kantoren	Utiliteit	Wonen	Kantoren	Utiliteit	Wonen
	[°C]	[%]	[kWh/m ² /mnd]			Gem. dag [kJ/m ² /d]		
jan	3.371	22.32	12.72	11.16	13.39	1527	1339	1607
feb	3.199	22.76	12.98	11.38	13.66	1557	1366	1639
mrt	6.049	15.39	8.77	7.70	9.24	1053	924	1108
apr	9.759	5.80	3.30	2.90	3.48	396	348	417
mei	12.816	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
jun	15.780	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
jul	18.271	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
aug	17.401	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
sep	14.784	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
okt	10.983	2.63	1.50	1.32	1.58	180	158	189
nov	7.031	12.85	7.33	6.43	7.71	879	771	925
dec	4.946	18.24	10.40	9.12	10.95	1248	1095	1314
Totaal →			57	50	60			

3.2.2 Koelen

In de maanden juni tot september kan de buitentemperatuur zover oplopen dat het nodig is om een gebouw actief te koelen. Per jaar telt Nederland 20-40 ‘zomerse dagen’ waarbij het warmer is dan 25 °C (KNMI, 2010).

Tabel 3 Gemiddeld energieverbruik voor koeling

	Gemiddeld energieverbruik voor koeling (per m ²)	
	kWh/jr	40 dagen kWh/d
Kantoren	35	0.875
Utiliteit	40	1
Wonen	20	0.5

3.3 Koelen versus verwarmen

Doormiddel van een warmtepomp kan thermische energie worden getransporteerd van een kouder naar een warmer medium. Dit werkt volgens het systeem beschreven in Appendix A. De kant bij het koude medium heet de verdamper, en zal warmte opnemen. Het andere uiteinde heet de condensor en zal de warmte afgeven.

Bij het opwarmen van het gebouw zal het water op het dak (het koude medium) zorgen voor de verdamping van de koelvloeistof, en in de ruimte (het warme medium) zal deze koelvloeistof condenseren en zal hierbij warmte afgeven.

Bij het koelen van het gebouw zullen de condensor en de verdamper omgedraaid zijn. De ruimte is nu het koude medium en zal warmte afgeven aan de koelvloeistof. Deze condenseert bij het water op het dak, en zal de warmte aan dit warmere medium afgeven.

3.4 Eisen aan temperatuur regenwater

De warmte die over een bepaalde tijd in of uit een stof gaat, kan worden berekend naar het verschil in temperatuur die deze onttrekking veroorzaakt. Dit wordt berekend met Vergelijking 2.

$$Q = Cm\Delta T = C\rho V\Delta T$$

Vergelijking 2

Hierbij is C de warmtecapaciteit (J/kg/K) van de stof. Voor water varieert deze van 4182 J/kg/K bij 20 °C tot 4213 J/kg/K bij 1 °C. De warmtecapaciteit is dus afhankelijk van de temperatuur van een stof, maar blijft redelijk contant over het gekozen interval en wordt als geen waarde is gespecificeerd aangenomen op 4192 J/kg/K (dit is de waarde bij 10 °C).

Met behulp van de warmtevraag, Vergelijking 2 kan nu worden berekend hoeveel het water bij een bepaalde warmtevraag afkoelt, in een bepaalde periode waarbij de inkomende warmte en de uitgaande warmte naar de atmosfeer niet worden mee genomen, zoals beschreven in Vergelijking 3.

$$\Delta T = \frac{Q_{dak}}{C\rho_{water}V_{dak}}$$

Vergelijking 3

Deze situatie zal in werkelijkheid niet voorkomen, maar biedt al wel voldoende inzicht in het verschil in temperatuur die door de warmteonttrekking wordt veroorzaakt.

Dit proces werkt ook andersom; als warmte wordt toegevoerd door een warmtepomp zal de temperatuur van het water stijgen.

Voorbeeld

Een gebouw met een woonfunctie, met de parameters aangegeven in Tabel 4, wordt een dag met het beschreven systeem verwarmd in februari. Volgens Tabel 2 is er een warmtevraag van 1639 kJ/m²/d.

Tabel 4 Parameters gebouw met woonfunctie

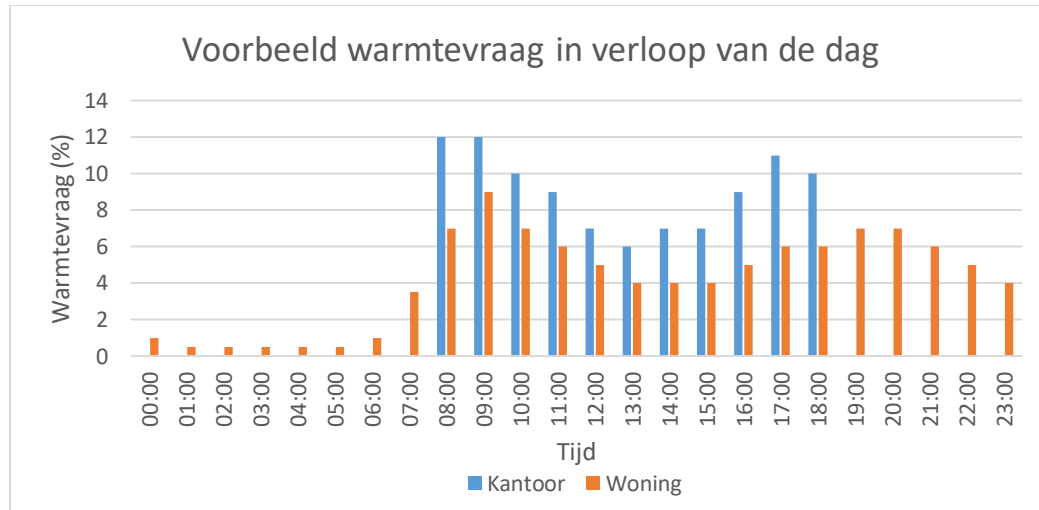
Gegeven	Waarde	Eenheid
A_dak	100	m ²
Waterdiepte	0.04	m
C (3°C)	4207	J/kg/K
A_ruimte	100	m ²
# verdiepingen	1	-

Na een dag verwarmen zorgt dit voor een temperatuurverschil in het water van 9.740 °C. De buitentemperatuur is hierbij 3.2 °C. In de loop van de dag zal een stijging van minimaal 6.54 °C moeten worden gerealiseerd om te zorgen dat het water niet bevriest. Voor meer berekende voorbeelden, zie Appendix B.

Als water bevriest zal dit ongeveer de helft de warmtecapaciteit hebben van vloeibaar water en bedraagt bij 0 °C 1960 J/kg/K. Hierdoor zal het ijs 2 keer zo snel afkoelen of opwarmen als het water. In dit rapport wordt alleen gekeken naar temperaturen tot 0 °C.

3.5 Verdeling over de dag

In het verloop van de dag en nacht zal dezelfde warmte worden gevraagd. Doordat 's ochtends de buitentemperatuur lager is dan het gemiddelde van de dag zal er een hogere warmtevraag zijn. In de nacht zal de warmtevraag lager zijn, omdat voor Utiliteits- en Kantoorbouw geen werknemers aanwezig zijn, of mensen slapen. De warmtevraag kan doormiddel van periodieke functies worden verdeeld.



Figuur 3 Voorbeeld warmtevraag in verloop van de dag

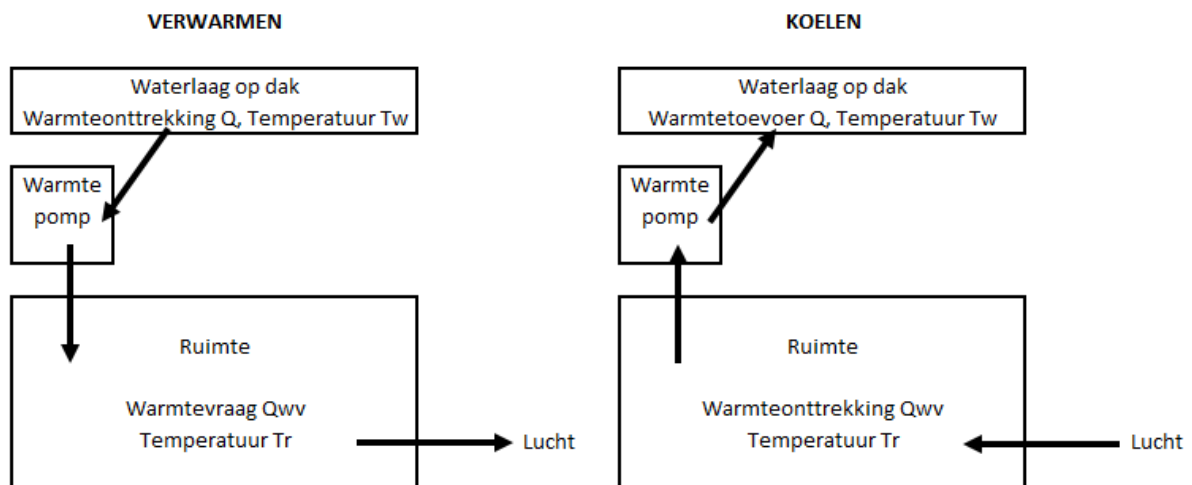
Tabel 5 Gemiddelde warmtevraag per vierkante meter verdeeld over een tijdsinterval van 8 tot 18 uur

Een voorbeeld van een warmtevraag van een kantoorgebouw en woning is in Figuur 3 schematisch weergegeven. Deze verdeling scheelt echter per woning en gebouwfunctie en zal in het model in de loop van 8 tot 18 uur constant over het tijdsinterval worden verdeeld. Een gebouw hoeft maar in een kort deel van de dag actief gekoeld te worden, naar schatting van 11 tot 17 uur. Op dit moment is veel koeling nodig. Hiervoor wordt het piekvermogen uit Tabel 3 gebruikt. In werkelijkheid zal er minder actieve koeling nodig zijn vanwege het Polderdak.

	Kantoren	Utiliteit	Wonen
Maand	<i>Gem. warmtevraag per seconde [W/m²]</i>		
jan	42.42	37.19	44.64
feb	43.25	37.94	45.53
mrt	29.25	25.67	30.78
apr	11.00	9.67	11.58
mei	0.00	0.00	0.00
jun	0.00	0.00	0.00
jul	0.00	0.00	0.00
aug	0.00	0.00	0.00
sep	0.00	0.00	0.00
okt	5.00	4.39	5.25
nov	24.42	21.42	25.69
dec	34.67	30.42	36.50

3.6 Implementatie model

De warmtevraag kan nu worden gemodelleerd met behulp van het volgende schema.



Figuur 4 Warmte-/Koudevraag model

De ruimte heeft een bepaalde warmtestroom nodig om op de juiste temperatuur te blijven. De kentallen uit Tabel 5, worden hiervoor vermenigvuldigd met het oppervlakte van de ruimte om de totale warmtevraag uit te rekenen.

4 Beschikbaarheid van thermische energie regenwater

Hoe varieert het volume en de temperatuur van regenwater op een dak in het jaar; waar hangen deze van af?

4.1 Theorie

Om een inschatting te maken hoeveel thermische energie beschikbaar is in het regenwater op het dak zijn de volgende gegevens nodig:

- Volume van het regenwater
- Temperatuur van het regenwater

Hiermee kan een massa/volumebalans en een energiebalans van het regenwater worden beschreven en kan dit in het model worden geïmplementeerd.

4.1.1 Variatie volume regenwater

Bij regenval zal water worden opgevangen door het polderdak. De hoeveelheid neerslag wordt regulier aangegeven in mm en de mate van regen in mm per tijdseenheid. Een deel van deze neerslag wordt opgenomen door de grond waar de vegetatie zich in bevindt op het dak en het grootste deel zal naar het 'bassin' tussen de waterbufferkratten stromen. Dit gedeelte omgerekend naar meters maal de oppervlakte van het dak zorgt voor een totaal volume regenwater wat beschikbaar is.

Water gaat verloren door de volgende twee manieren:

- Verdamping
- Regelklep / Overlaat

Door de straling van de zon op het polderdak zal water verdampen via zowel het wateroppervlak als deze niet bedekt is, als vanuit de groene laag als de grond niet verzadigd is. De variatie in volume die deze verdamping veroorzaakt wordt niet meegenomen in het model voor verwarming, omdat in de winter deze redelijk klein blijft ten opzichte van de regelklep.

De regelklep op een polderdak werkt via een regelsysteem. Met dit systeem wordt het water op het dak gereguleerd volgens de flowchart aangegeven in Appendix C. Dit zorgt ervoor dat vrijwel altijd een laag water op het dak staat, behalve onder specifieke omstandigheden beschreven in dezelfde appendix. Dit zorgt gemiddeld voor een laag water van 60 mm en kan oplopen tot 75 mm. Door middel van een overlaat kan ook het waterpeil worden geregeld (dit gebeurt bij het Project Smartroof 2.0 experiment).

In het model wordt een constante waterdiepte aangehouden.

4.1.2 Variatie temperatuur regenwater

De temperatuur van het regenwater op het dak hangt voornamelijk van drie parameters af.

- De temperatuur van de lucht in contact met het water
- De inkomende straling van de zon
- De uitgaande warmte van het onderliggende gebouw

Doordat de groene laag een groot deel van de inkomende straling absorbeert, zal de warmtetoevoer door straling naar het regenwater vooral in de winter te verwaarlozen zijn. In de zomer, als koeling benodigd is, zal de straling een grotere rol spelen in de enthalpiebalans van het regenwater.

Er wordt aangenomen dat de warmtewisseling tussen het water en de lucht voornamelijk afhangt van de temperatuurverschillen tussen het water en de lucht.

De meest eenvoudige manier om dit te beschrijven is doormiddel van de volgende vergelijking, ook wel de afkoelingswet van Newton genoemd.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = K \cdot A \cdot \Delta T$$

Vergelijking 4

Hierbij is K een coëfficiënt met de eenheid $W/(m^2 \cdot K)$. Deze coëfficiënt K kan ook beschreven worden door k/x , waarbij k de thermische geleidbaarheid $W/(m \cdot K)$. De k hangt van veel factoren af en wordt in dit rapport bepaald met behulp van metingen. Doordat de waterlaag in vergelijking met de oppervlakte laag is, is de temperatuursverandering in het water als homogeen te beschouwen.

De uitgaande warmte van het gebouw naar het dak, naar schatting ongeveer 25% van het totale warmteverlies, gaat naar het water, waardoor het water opwarmt.

4.2 Metingen

4.2.1 Open water

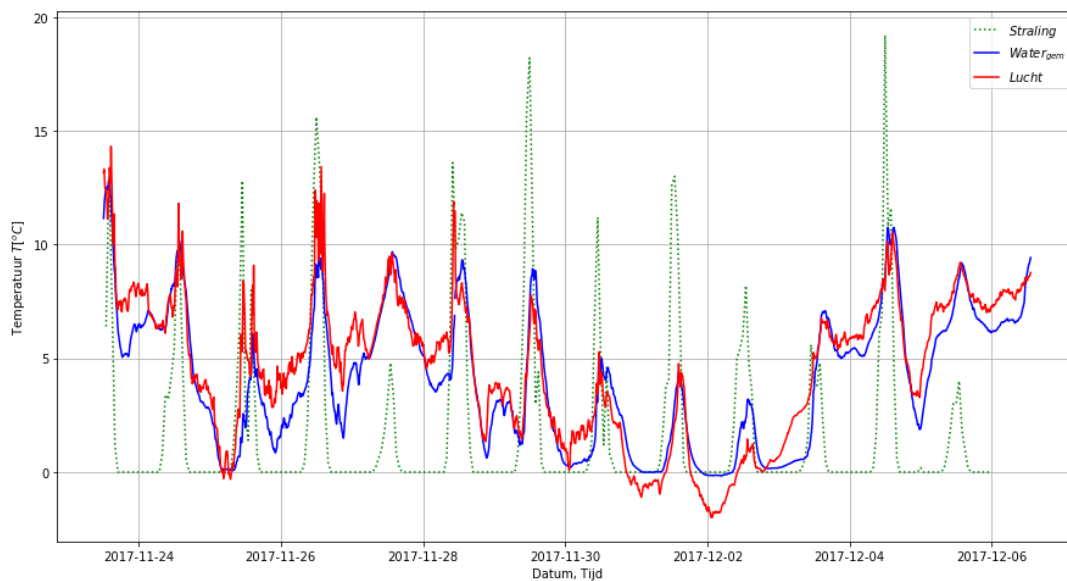
Om uit te zoeken hoe de temperatuur van het regenwater op het dak afhangt van de luchttemperatuur is een experiment uitgevoerd. Hierin werd de luchttemperatuur en de watertemperatuur gemeten op een model van een dak met een EPDM-dakleer laag. De temperatuur van de buitenlucht wordt gemeten en de temperatuur van het water zonder afdekking. Zie voor de opstelling en plot Appendix D.

De temperatuur van het water is op veel tijdstippen gelijk aan de buitentemperatuur, behalve in de nacht, dan koelt het water verder af. Het water koelt af tot $0\text{ }^\circ\text{C}$ en daalt daarna niet, als de luchttemperatuur gedurende lange tijd onder het vriespunt blijft zal het water bevriezen.

Als de totale straling¹ (KNMI, 2017) (geschaald) tegen de temperatuur wordt geplot, is te zien dat bij het ontbreken van deze straling grote verschillen tussen de buitentemperatuur en de watertemperatuur optreden. Bij een grote hoeveelheid straling (te zien op 29 november) zal het water zelfs een hogere temperatuur krijgen dan de buitenlucht.

In de winter is het dus voordelig om veel straling op te vangen. Door het open water op het dak wordt echter geen warmte vastgehouden.

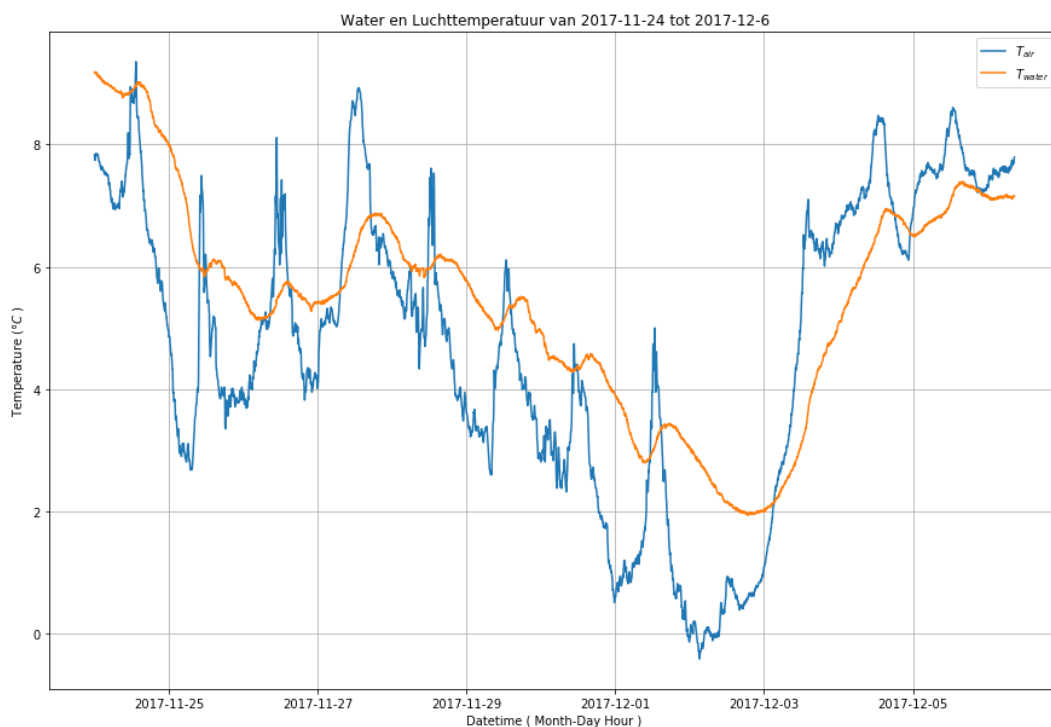
¹ Korte golf straling van de zon en lange golf straling weerkaatst door de atmosfeer



Figuur 5 Temperaturen van Water en Lucht op een model van een dak met een indicatie van de hoeveelheid straling

4.2.2 Water onder een groene laag

Er zijn ook temperatuurmetingen² gedaan bij Project SmartRoof 2.0 in Amsterdam (www.projectsmaartroof.nl). Hierbij wordt niet de open water temperatuur gemeten, maar de temperatuur van het water onder een groene laag van verschillende diktes. In het rapport worden de metingen met een 4 cm groene laag boven de waterbufferkatten gebruikt. Zoals te zien is in figuur 6 fluctueert de temperatuur van dit water minder dan bij de metingen met open water en hangt de temperatuur van het water minder van de buitentemperatuur af.



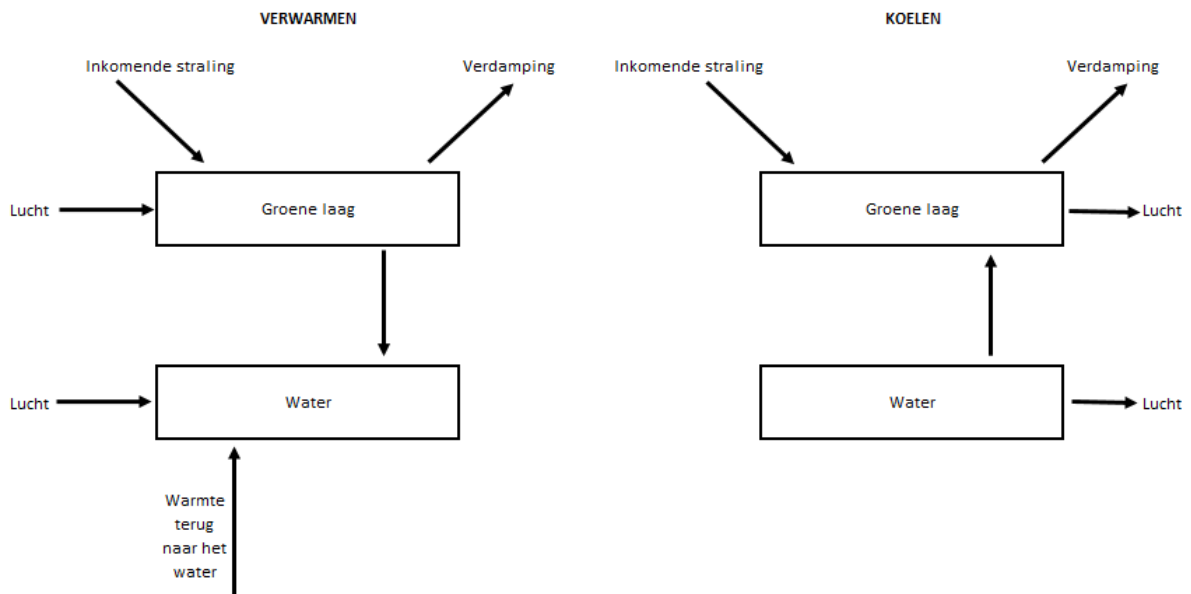
Figuur 6 Water tegen lucht temperatuur, Project Smartroof 2.0

² Verkregen via Joris Voeten, Roofscapes

Dit is te verklaren doordat de groene laag de inkomende straling gebruikt en een deel hiervan (30%) ook reflecteert. Pieken in de temperatuur van de lucht uitend zich in een toename van temperatuurstijging of -daling van de watertemperatuur, hoewel ze hierbij pas op een later tijdstip hun maximale waarde bereiken. Een ander aspect van de groene laag boven het water is dat wanneer geen straling op het water valt, minder verdamping optreedt via de inkomende straling. Hierdoor koelt het water minder snel af en koelt ook niet af tot de luchttemperatuur.

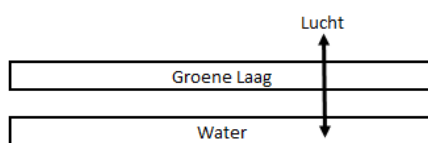
4.3 Implementatie model

Nu alle warmtestromen van het water bekend zijn, kan een schema worden opgesteld voor de warmtestromen op het dak, zoals hieronder weergegeven.



Figuur 7 Warmtestromen op het dak

Omdat de straling in de winter weinig invloed heeft, en de warmtestroom uit het gebouw niet bekend is, wordt het K of k/x waarde met het volgende model geschat.



Figuur 8 Model schatting K waarde

De temperatuursverandering van het water per tijdsstap kan worden berekend door een enthalpiebalans op te stellen en deze in te vullen in Vergelijking 3.

De enthalpiebalans wordt gegeven door:

$$\Delta H = Q_{l \rightarrow w}$$

Vergelijking 5

De $Q_{l \rightarrow w}$ kan berekend worden door $\Delta Q/\Delta t$ uit Vergelijking 4 te vermenigvuldigen met Δt . Door deze in te vullen valt de oppervlakte van het water weg, en volgen hieruit Vergelijking 6 en 7.

$$\Delta T_{w,i} = \frac{\Delta T_{lw,i} \cdot K}{\rho \cdot C \cdot d_w}, \quad K = \frac{k}{x}, \quad \Delta T_{lw} = T_l - T_w$$

Vergelijking 6

$$T_{w,i+1} = T_{w,i} + \Delta T_{w,i} \cdot \Delta t$$

Vergelijking 7

Waarbij:

- subs. w water
- subs. l lucht
- subs. i iteratie nr.
- Δt tijdstap
- d_w waterdiepte

Als x wordt de hoogte van het substraat aangehouden. Bij de Project Smartroof metingen is dit 0.04 m, de waterdiepte is gelijk aan 0.02 m, de tijdstap is 5 minuten. Zie Appendix E voor de plot.

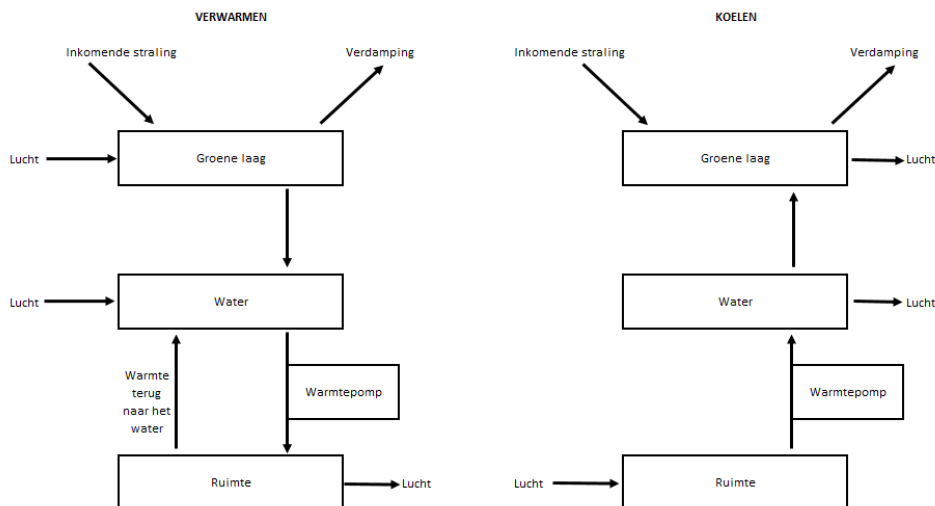
Uit iteratie volgt dat $k = 0.09 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ en $K = 2.25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Deze waarden worden gebruikt in het model.

5 Toepassing en rendement methode / energiebesparing

Op welke momenten in het jaar kan het polderdak worden gebruikt om het gebouw te koelen of verwarmen? Wat is het rendement/de energiebesparing van deze methode?

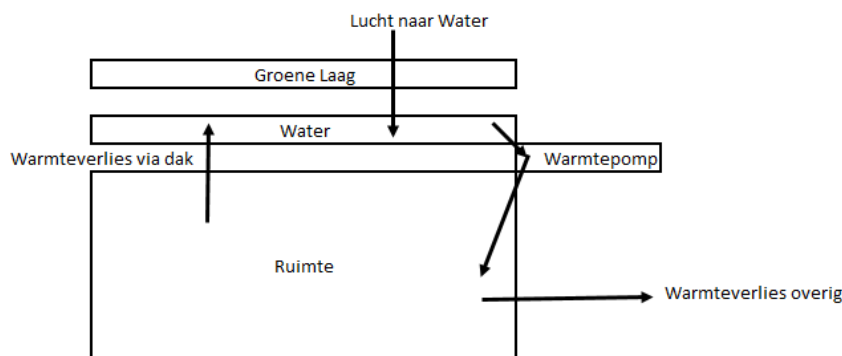
5.1 Invloed warmtepomp op watertemperatuur

Om de invloed te bepalen door de warmtepomp zijn de schema's uit Figuren 4 en 7 samengevoegd, dit resulteert in het schema in Figuur 9.



Figuur 9 Schema Warmtestromen

Als de straling niet wordt meegenomen, vallen deze warmtestromen weg waardoor het schema voor het verwarmen er als volgt uit ziet.



Figuur 10 Schema warmtestromen zonder Straling

De enthalpiebalans (ΔH) van het water wordt volgens het schema in Figuur 10:

$$\Delta H = Q_{l \rightarrow w} - Q_{wp} + Q_{r \rightarrow w}$$

Vergelijking 8

Hierbij is:

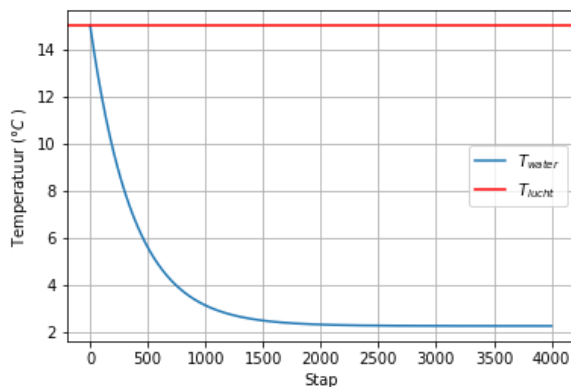
- subs. wp warmtepomp
- subs. r verwarmde ruimte

Als dit in Vergelijking 3 wordt ingevuld, volgt hieruit:

$$\Delta T_{w,i} = \frac{\Delta T_{lw,i} \cdot K \cdot A_{dak} + Q_{r \rightarrow w} - Q_{wp}}{\rho \cdot C \cdot d_w \cdot A_{dak}}$$

Vergelijking 9

Met behulp van Vergelijking 7 kan hiermee per stap worden uitgerekend wat de nieuwe temperatuur is. In figuur 7 is het resultaat geplot met een constante luchttemperatuur van 15 °C. Hierbij is de diepte van het water gelijk aan 0.06 m, de oppervlakte van het dak en de ruimte is gelijk aan 100 m² en de andere parameters zijn gelijk aan degene beschreven in Paragraaf 4.3. De $Q_{r \rightarrow w} - Q_{wp}$ is gelijk aan 28.64 W/m² dus de totale warmteonttrekking is 2865 J/s.



Figuur 11 Constante Luchttemperatuur

Door de constante warmteonttrekking door de warmtepomp zal een temperatuurverschil ontstaan van het water en de buitenlucht die zorgt voor een even grote warmtetoevoer door de lucht. Deze is te berekenen door Vergelijking 9 gelijk te stellen aan 0. Hieruit volgt:

$$\Delta T_{lw,eq} = \frac{Q'_{wp} - Q'_{r \rightarrow w}}{K \cdot A_{dak}}$$

Vergelijking 10

Hierbij is Q' gelijk aan $\Delta Q/\Delta t$ de warmtestroom per seconde. Bij een gelijkvloers gebouw, met de schatting dat een percentage, in de formule aangegeven met α , van de warmte in de ruimte via het dak terug wordt gewonnen, zorgt dit voor een equilibrium. Hieruit volgt de volgende Vergelijking.

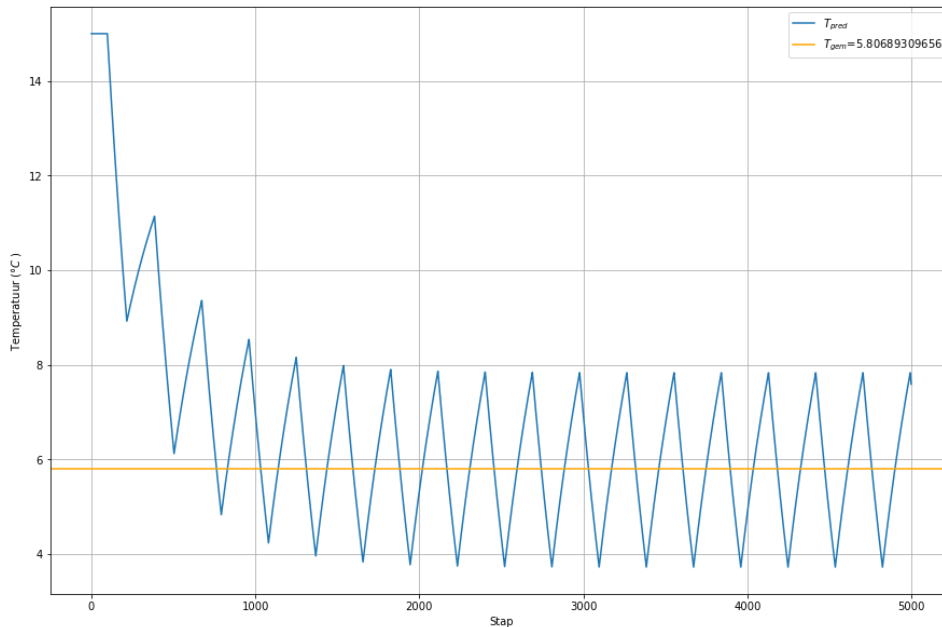
$$\Delta T_{lw,eq} = \frac{(1 - \alpha) \cdot q'_{wv} \cdot A_{ruimte}}{K \cdot A_{dak}}$$

Vergelijking 11

Waarbij q'_{wv} de warmtevraag per seconde per m² (W/m²) is van de ruimte onder het dak; dit zijn de waarden uit Tabel 5. Zoals te zien is in Figuur 11 is dit equilibrium pas bereikt na 2000 stappen; dit staat gelijk aan ($\Delta t = 5$ minuten) 167 uur. Het temperatuurverschil is volgens Vergelijking 11 gelijk aan 12.7 °C.

In hoofdstuk 3 is beschreven dat een gebouw niet een hele dag verwarmt hoeft te worden. Hierdoor kan het water tussen de ‘gebruikstijden’ opwarmen.

Als er een constante warmtevraag is over een dag van 8 tot 18, met nog steeds een constante luchttemperatuur (buiten deze tijden zal er geen warmtevraag zijn) zal geen equilibrium ontstaan maar een periodieke functie, deze is te zien Figuur 8 (hierbij zijn dezelfde waarden gebruikt als bij Figuur 11).



Figuur 12 Periodieke functie temperatuur

Zoals te zien is het gemiddelde verschil tussen lucht en watertemperatuur in vergelijking met Figuur 11 maar 9.2 °C (15 - 5.8 °C).

Voor voorbeelden voor een variabele temperatuur is in de tweede grafiek van Appendix E een warmteonttrekking toegevoegd aan de meetdata van Project Smartroof. Hierbij wordt 37 W/m² uit het water gehaald, dus een netto onttrekking van 27.75 W/m² (met de aanname dat 25% van de warmte van het gebouw terug gaat naar het water op het dak). In Appendix F is zowel de watertemperatuur met warmteonttrekking van 50 W/m² als zonder onttrekking te zien met gegevens van het KNMI.

Door met het model het verschil tussen de luchttemperatuur en de laagste watertemperatuur van deze periodieke functie te laten uitrekenen met een oplopende warmtevraag, blijkt dit een recht evenredig verband te hebben met de warmtevraag, lijkend op Vergelijking 11.

De coëfficiënt hiervan hangt af van de waterdiepte van het regenwater, hierna β genoemd. Deze coëfficiënt heeft net zoals K de eenheid W/m²/K.

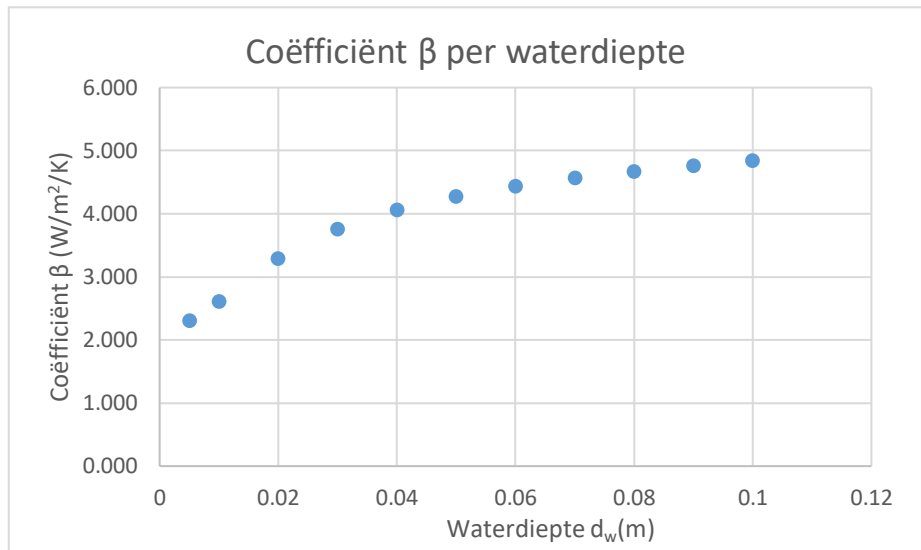
$$\Delta T_{lw,8-18uur} = \frac{(1 - \alpha) \cdot q'_{wv}}{\beta_{8-18uur}} \cdot \frac{A_{ruimte}}{A_{dak}}$$

Vergelijking 12

De waarde van β hangt voornamelijk af van de waterdiepte op het dak. Daarnaast zal deze afhangen van de gebruikstijd van de warmtepomp; bij een langere gebruikstijd wordt β kleiner. Bij een verhoging van coëfficiënt K wordt β hoger.

Tabel 6 Coëfficiënt β bij 8-18uur en $K=2.25$

d_w (m)	Coëfficiënt β (W/m ² /K)
0.005	2.296
0.01	2.606
0.02	3.286
0.03	3.750
0.04	4.057
0.05	4.273
0.06	4.433
0.07	4.558
0.08	4.662
0.09	4.752
0.1	4.835



Figuur 13 Coëfficiënt per waterdiepte

Omdat een gebouw niet de hele dag gekoeld hoeft te worden, geeft vergelijking 12 ook een indicatie voor het temperatuurverschil bij koeling. Dit temperatuurverschil zorgt bij koeling van het gebouw voor een toename in de temperatuur van het water en bij verwarming een afname in de temperatuur van het water. Bij een waterdiepte op het dak van 60 mm zal dit voor de warmtevraag met piekvermogens van de kantallen uit Tabel 1 de volgende temperatuurverschillen tussen het water en de lucht vereisen bij dagelijks gebruik.

Tabel 7 Piekvermogens met bijbehorende temperatuurverschillen

	Piekvermogen		Temperatuurverschil	
	[W/m ²]		[°C]	
	Warmtevraag	Koeling	Warmtevraag	Koeling
Kantoren	57	45	-12.87	+10.16
Utiliteit	50	65	-11.29	+14.67
Wonen	50	30	-11.29	+6.77

5.2 Toepasbaarheid door het jaar

Met de waarden uit Tabel 6 kan worden bepaald hoe groot het temperatuurverschil van het water met de buitenlucht moet zijn om een ruimte met dezelfde oppervlakte als het Polderdak te koelen. In Appendix G is dit uitgerekend met de waarden gegeven in Tabel 5. Hieruit blijkt dat bij een waterdiepte van 0.06 m, zonder warmtestroom vanuit het gebouw naar het polderdak, de temperatuur van het water gemiddeld boven 0 graden blijft van april tot en met november. Met de aanname dat $\alpha=25\%$ zal het systeem ook in maart werken. In de wintermaanden, december tot februari, zullen de gemiddelde temperatuursveranderingen te groot zijn om water in vloeibare vorm te houden.

5.2.1 Verhoging toepasbaarheid

Door in de winter meer straling vast te houden in het water, zal het water sneller opwarmen, zoals blijkt uit de open water metingen (figuur 5). Door het water echter niet te bedekken met een isolatielaag zal ook sneller warmte verdwijnen uit het water. Dit is op te lossen door een andere vorm isolatielaag zoals een zwart zeil aan te brengen, welke de straling absorbeert en afgeeft aan het water. Deze isolatielaag zorgt hierbij ook dat het water minder snel afkoelt.

5.2.2 Koeling

Koelen met een warmtepomp kan worden toegepast tot een bepaald niveau. Bij Kantoort en Utiliteitsbouw is de temperatuurstijging bij piekvermogen erg hoog. Dit heeft gevolgen voor de groei van de beplanting op het polderdak, wat nadelige gevolgen heeft voor de andere functies van het polderdak, beschreven in Hoofdstuk 2. Ook zal de hoge watertemperatuur zorgen voor een laag rendement zoals wordt beschreven in Paragraaf 5.3, dus een hoog energieverbruik. De gegeven kentallen houden echter geen rekening met de isolerende functie van een blauw/groen dak. Volgens de kentallen uit de Uniforme Maatlat Bebouwde Omgeving (Nuiten, et al., 2017), is de koelingsvraag van 'Bijna Energie Neutrale Gebouwen' (BENG) gemiddeld een factor 5 lager dan het piekvermogen gegeven in Tabel 7. De temperatuurstijging die de koeling veroorzaakt is hierdoor ook gemiddeld een factor 5 lager dan de temperatuurverschillen aangegeven in Tabel 7. Actief koelen met een warmtepomp en polderdak lijkt hierdoor een goede oplossing voor klimaatbeheersing in een BENG.

5.3 Duurzaamheid warmtepompen in vergelijking met conventionele verwarmings- en koelsystemen

Een warmtepomp verbruikt energie om warmte te transporteren. Zoals beschreven in Appendix A heeft het systeem arbeid nodig. De effectiviteit van een warmtepomp wordt aangegeven met een COP, de 'coefficient of performance'.

$$P = \frac{Q'}{COP}$$

Vergelijking 13

De COP van een warmtepomp hangt van meerdere factoren af. Naast het rendement van de compressor zal de COP ook worden beïnvloed door de temperatuur van het koudemiddel. Hoe kleiner het verschil tussen de temperatuur van de verdamper en condensor hoe hoger de COP.

Bij conventionele verwarmingssystemen wordt gas gebruikt om het verwarmingssysteem te voorzien van energie. De efficiëntie van de omzetting van de energie uit het gas naar energie naar het verwarmingssysteem rond de 80% (Sommer, Valstar, Leusbrock, Grotenhuis, & Rijnaarts, 2015).

Een methode om duurzaamheid te berekenen is door middel van CO₂ emissie factoren. Volgens Sommer et al. (2015) zijn deze factoren voor elektriciteit en gas respectievelijk 460 (370-550) en 277 kg CO₂ / MWh. Per effectieve MWh bedraagt de CO₂ emissiefactor 277/0.80 = 346 kg CO₂ / MWh. De gemiddelde COP van de warmtepomp toegepast op een Polderdak moet dus minimaal 460/346=1.33 zijn om duurzamer te zijn dan conventionele verwarmingssystemen. Bij al bestaande warmtepomp systemen bedraagt de COP tussen de 4-6, dus zal het gebruik van dit systeem duurzamer zijn dan conventionele systemen.

6 Discussie

In het rapport zijn verschillende factoren aangenomen of verwaarloosd.

De afkoelingswet van Newton (Vergelijking 4) is een versimpeling van het proces wat speelt op het dak. De K waarde varieert net zoals de warmtecapaciteit met de temperatuur van het medium. Zoals aangegeven in Figuur 9 is de warmteoverdracht tussen de groene laag ook van belang voor een volledige warmtebalans. Om deze reden is de K waarde bepaald voor het gehele tussenliggende medium, dus de luchtlaag en de groene laag. Bij het gebruik van deze methode met metingen in de zomer, zie Appendix H, is te zien dat de voorspelde temperatuur hoger is dan de gemeten temperatuur. Dit is te verklaren doordat in de zomer veel water verdampt via de beplanting op het substraat, waardoor ook warmte verdwijnt uit de grondlaag.

Bij de bepaling van de K waarde bij Vergelijking 4 is de warmtestroom van het gebouw naar het dak verwaarloosd. Dit omdat de benadering door middel van Vergelijking 4 zonder dat deze warmtestroom wordt meegenomen, vooral in de winter, erg dicht bij de gemeten temperatuur ligt.

In het rapport is aangenomen dat het Polderdak in Nederland staat. De kentallen zijn namelijk de Nederlandse waarden en worden verdeeld over de gemiddelde temperatuur van Nederland. De theorie, beschreven in het rapport, is echter wel toepasbaar in andere landen. De waarden van de parameters kunnen hierbij echter verschillen dus moeten via metingen ter plekke of onder soortgelijke omstandigheden worden geschat.

Er zijn kentallen gebruikt om de warmtevraag van een gebouw uit te drukken. De warmtevraag hangt in de realiteit af van veel meer factoren, onder andere de isolatie van een gebouw en de buitentemperatuur op dat moment. Om de specifieke warmtevraag op het moment uit te rekenen dient een model gemaakt te worden die deze factoren meeneemt. Zo kan ook de warmtevraag in de loop van de dag worden meegenomen in het uiteindelijke model.

Zoals al aangegeven in Paragraaf 5.2, nemen de wortels van planten minder goed water op als de temperatuur van het water te hoog wordt. Volgens Joris Voeten (pers. comm. 18 december 2017) neemt de effectiviteit van het opnemen van water door wortels af vanaf een watertemperatuur van 20 °C.

Het verschil in temperatuur van leiding door het water op het dak zal aan het begin hoger zijn dan aan het uiteinde. Hierdoor is de warmtewisseling tussen de leiding en het water niet homogeen verdeeld over het oppervlakte van het dak.

7 Conclusie en Aanbevelingen

7.1 Conclusie

In dit rapport staat de volgende vraag centraal:

Is het mogelijk om met een polderdak een gebouw energiezuinig te verwarmen en af te koelen?

Waarbij het doel van het onderzoek is om te bepalen in hoeverre uit water op een plat dak energie is te winnen en in hoeverre hiermee een gebouw kan worden opgewarmd of afgekoeld.

De omgevingstemperatuur is de belangrijkste factor voor de aanpassing van de watertemperatuur op een polderdak. Door middel van een warmtepomp is thermische energie uit water te winnen. Dit resulteert bij verwarming en koeling respectievelijk in een afname en een toename van de watertemperatuur op het dak. Bij de verwarming van een gebouw zal door de combinatie van de warmtetoever van de lucht naar het water en de onttrekking van energie door de warmtepomp de afname van de watertemperatuur per tijdseenheid naar $0\text{ }^{\circ}\text{C}/[\text{t}]$ gaan, waardoor een equilibrium temperatuurverschil zal ontstaan bij een gegeven warmtevraag. Bij koeling zal er ook een equilibrium temperatuurverschil ontstaan, doordat de warmtepomp warmte loost naar het water op het dak welke afkoelt door de omgevingstemperatuur.

Deze methode is voor het verwarmen van een gebouw in Nederland toe te passen van maart tot en met november; door het gebruik van de warmtepomp ontstaat dan geen ijsvorming op het dak. Door het gebruik van een andere isolatielaag dan een groene laag, bestaande uit substraat met beplanting, kan de toepasbaarheid in het jaar worden verhoogd, doordat deze andere isolatielaag beter straling kan vasthouden.

Koelen kan met een warmtepomp onder de voorwaarde dat de koelingsvraag niet een grote temperatuursverhoging van het water op het dak veroorzaakt. Een te hoge temperatuur van het water zal nadelig zijn voor zowel de efficiëntie van de warmtepomp als de beplanting. Doordat een polderdak een gebouw al beter isoleert dan een conventioneel dak zal hierdoor de koudevraag lager zijn. Hierdoor kan, wanneer dit nodig is, met een warmtepomp worden bijgekoeld.

Het gebruik van een warmtepomp is duurzamer dan een conventionele cv installatie, onder de voorwaarde dat de COP van de warmtepomp hoger is dan 1.33. Dit wordt bereikt door de verschillen in de watertemperatuur en de temperatuur in het gebouw laag te houden.

7.2 Aanbevelingen

Naar aanleiding van het rapport worden 7 aanbevelingen gegeven voor verder onderzoek.

Bij de faseovergang van water naar ijs zal kristallatiewarmte vrijkomen. Als eenmaal ijs op het dak ligt zal een gelijke hoeveelheid warmte uit de lucht worden onttrokken om weer naar een vloeibare fase te gaan. In sommige warmtepompen in combinatie met grondwatersystemen wordt dit proces al toegepast voor een hogere energieopbrengst. Kan dit ook voor het Polderdak systeem worden gebruikt?

Adiabatische koeling is koeling door de verdamping van water. Is deze vorm van koeling te combineren met het water opgeslagen op een Polderdak of het warmtepompsysteem?

Het water onder een polderdak is in de zomer kouder dan de omgevingstemperatuur op de warmste momenten van de dag. Op deze momenten kan ook met het water zonder warmtepomp worden gekoeld. Is deze temperatuur koel genoeg om een gebouw af te koelen?

Warmtepompen worden ook veel gebruikt in combinatie met open water, grondwater en aardwarmte. Hoe verhouden de kosten en efficiëntie van deze systemen zich in vergelijking met een polderdak als medium?

Om inzicht te krijgen in hoeverre het systeem in de praktijk werkt kan een fysiek model worden gemaakt, waarin wordt gevarieerd met verschillende parameters beschreven in het rapport. En kloppen de aannames die zijn gemaakt in het rapport met de werkelijkheid?

De energiebehoefte van een warmtepomp kan uit zonnepanelen worden gehaald. Zo kan het gebouw energie neutraal worden. Hoeveel zonnepanelen zijn nodig om een warmtepomp te voorzien van genoeg energie? Zijn zonnepanelen effectief genoeg in de winter? Het rendement van zonnepanelen is afhankelijk van de temperatuur van de panelen. Is het praktisch om een dak te koelen zodat zonnepanelen een hoger rendement hebben? Waar kan de warmte die hierbij wordt geproduceerd voor worden gebruikt?

In de zomer isoleert een polderdak een gebouw al; in hoeverre moet een gebouw met een polderdak gekoeld worden?

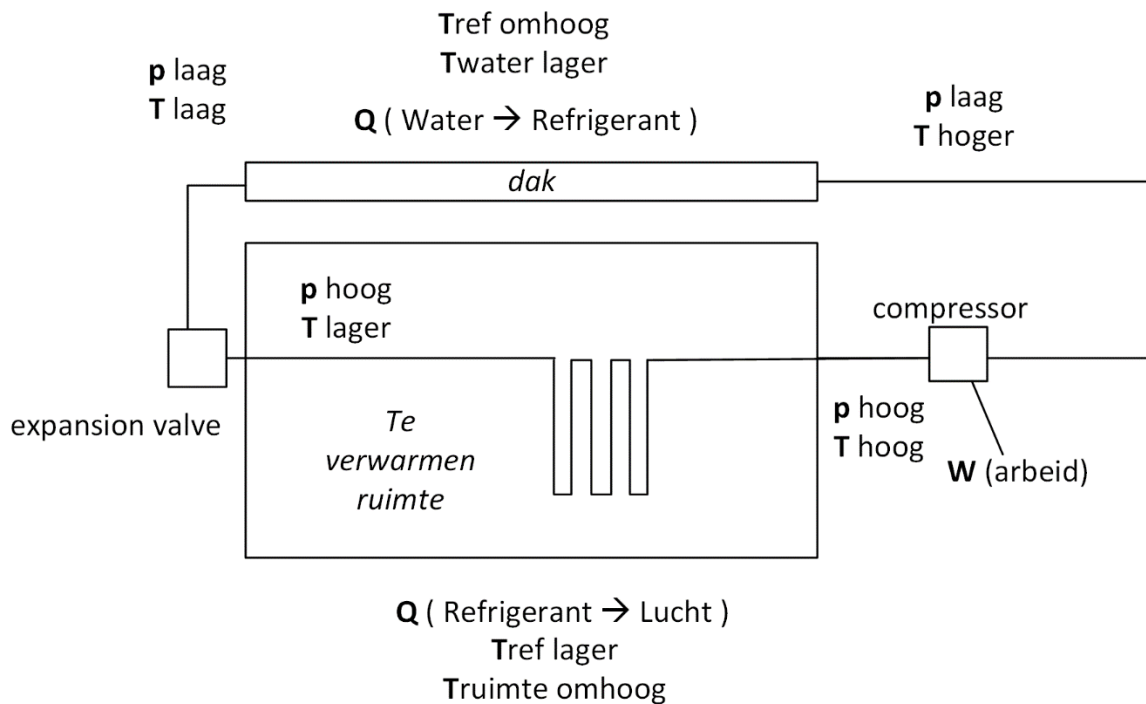
Verwijzingen

- Carlowicz, M. (2010, december). *Global Temperatures*. Opgeroepen op november 29, 2017, van Earth Observatory, NASA:
<https://earthobservatory.nasa.gov/Features/WorldOfChange/decadaltemp.php>
- KNMI. (2010). *Zomerse Dagen*. Opgehaald van <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/zomerse-dagen>
- KNMI. (2017, december). *Gehomogeniseerde reeks maandtemperaturen De Bilt*. Opgehaald van http://projects.knmi.nl/klimatologie/onderzoeksgegevens/homogeen_260/index.html
- KNMI. (2017, december). *Uurgegevens van het weer in Nederland, 344 Rotterdam*. Opgehaald van <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/uurgegevens>
- Nuiten, P., Goud, J., Hoiting, H., Ree, B. v., Harmelink, M., Bosseaar, L., & Rienstra, J. (2017). *Uniforme Maatlat Gebouwde Omgeving (UMGO) voor de warmtevoorziening in de woning- en utiliteitsbouw*. W/E adviseurs, Primum, Harmelink consulting, RVO. Eindhoven: Nationaal Expertisecentrum Warmte.
- Sommer, W., Valstar, J., Leusbrock, I., Grotenhuis, T., & Rijnaarts, H. (2015). Optimization and spatial pattern of large-scale aquifer thermal energy. *Applied Energy* 137, 332-337.

Alle figuren en tabellen zijn gemaakt door de auteur van dit rapport, tenzij een bronvermelding is gegeven bij het desbetreffende figuur of de tabel.

Appendix A: Stelsel Warmtepomp

Refrigerant is de Engelse benaming voor koudemiddel of koelvloeistof, dit is een vloeistof dat gebruikt wordt in warmtepomp systemen.



Verwarmen ruimte d.m.v. warmtepomp

Er staat een laag water op het dak tussen de waterkratten. Door een leiding die hierdoor is aangelegd stroomt een koude refrigerant, waardoor het water op het dak afneemt in temperatuur en de temperatuur van de refrigerant toeneemt. Hierbij vindt dus een warmteoverdracht plaats van het water naar de refrigerant. De compressor verhoogt de druk in de leiding doormiddel van de arbeid die eraan wordt toegevoegd. Dit zorgt voor een hogere temperatuur na de compressor, omdat $p \propto T$. Binnen in het gebouw vindt een warmteoverdracht plaats van deze warmere refrigerant naar de lucht binnen. Hierdoor is de refrigerant weer kouder geworden. De druk in de leiding wordt bij de expansion valve naar een lagere druk gebracht. De refrigerant is hierbij weer koeler dan de watertemperatuur.

Door dit proces koelt het water op het dak geleidelijk af, maar warmt ook op door de omgeving. Dit proces wordt in het rapport beschreven.

Koelen ruimte d.m.v. warmtepomp

Het proces werkt bij het koelen de andere kant op. Refrigerant met hoge druk en dus een hoge temperatuur stroomt tussen de leidingen tussen de waterkratten. De refrigerant zal warmte afgeven aan het water op het dak. De refrigerant zal hierdoor zijn afgekoeld. Deze refrigerant wordt in druk verlaagd door de expansion valve. Hierdoor is de temperatuur lager dan de binnentemperatuur. De ruimte zal de refrigerant opwarmen. Een compressor verhoogt de druk en dus ook de temperatuur van deze refrigerant zal bij het dak weer warmte afgeven.

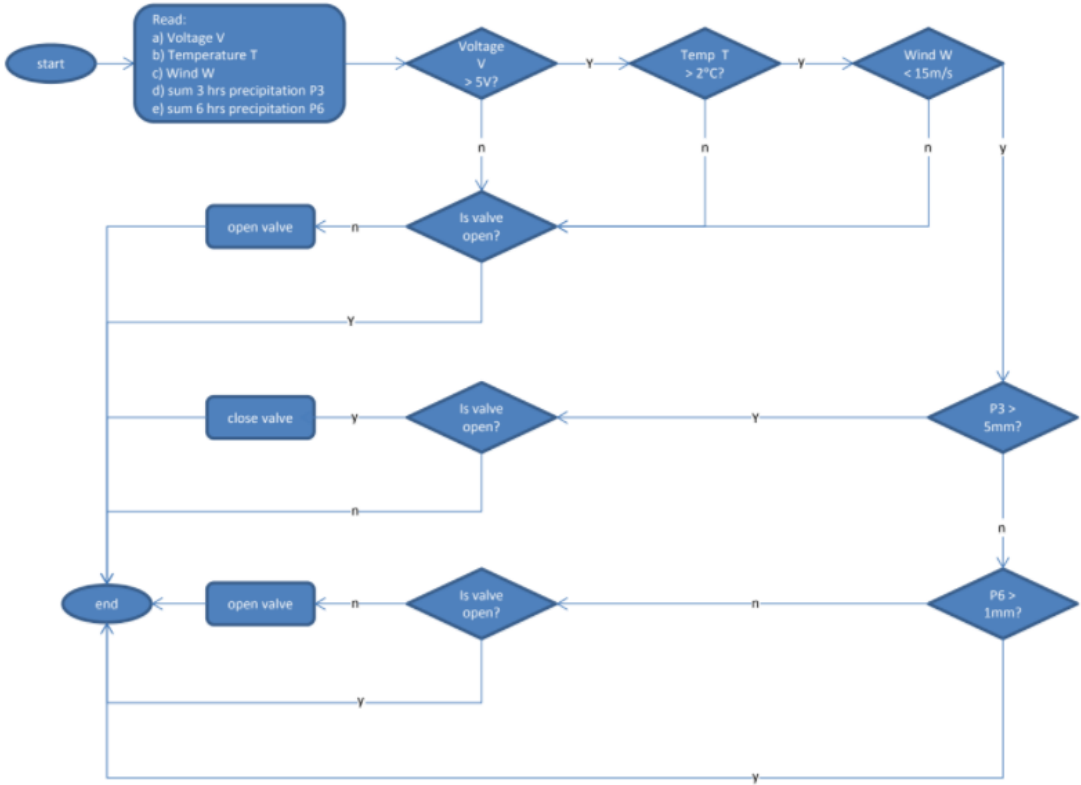
Door dit proces warmt het water op het dak geleidelijk op. Doordat de omgeving kouder is dan het water zal een warmteoverdracht plaats vinden van het water naar de lucht.

Appendix B: Temperatuursverschil zonder opwarming

Adak	100 m ²	rho	1000 kg/m ³							
waterdiepte	0.04 m	m	4000 kg							
Aruimte	100 m ²	Tot oppervlakt	100 m ²							
# verdiepingen	1									
Warmtevraag uit het water										
Maand	Kantoren [kJ/m ² /d]	Utiliteit [kJ/m ² /d]	Wonen [kJ/m ² /d]	C [J/kg/K]	Kantoren [°C/m ² /d]	Utiliteit [°C/m ² /d]	Wonen [°C/m ² /d]	Kantoren [°C/d]	Utiliteit [°C/d]	Wonen [°C/d]
jan	1527	1339	1607	4207	0.091	0.080	0.095	9.072	7.958	9.549
feb	1557	1366	1639	4207	0.093	0.081	0.097	9.253	8.116	9.740
mrt	1053	924	1108	4200	0.063	0.055	0.066	6.267	5.497	6.597
apr	396	348	417	4192	0.024	0.021	0.025	2.364	2.074	2.489
mei	0	0	0	4188	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
jun	0	0	0	4185	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
jul	0	0	0	4183	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
aug	0	0	0	4184	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
sep	0	0	0	4186	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
okt	180	158	189	4191	0.011	0.009	0.011	1.073	0.942	1.130
nov	879	771	925	4198	0.052	0.046	0.055	5.236	4.593	5.511
dec	1248	1095	1314	4202	0.074	0.065	0.078	7.425	6.513	7.815

verschil met de buitentemperatuur										
Maand	Gem T [°C]	Kantoren [°C/d]	Utiliteit [°C/d]	Wonen [°C/d]	Kantoren [°C/d]	Utiliteit [°C/d]	Wonen [°C/d]	Kantoren [°C/d]	Utiliteit [°C/d]	Wonen [°C/d]
jan	3.371	9.072	7.958	9.549	-5.701	-4.587	-6.178	-5.701	-4.587	-6.178
feb	3.199	9.253	8.116	9.740	-6.054	-4.917	-6.541	-6.054	-4.917	-6.541
mrt	6.049	6.267	5.497	6.597	-0.218	0.551	-0.548	-0.218	0.551	-0.548
apr	9.759	2.364	2.074	2.489	7.395	7.685	7.270	7.395	7.685	7.270
mei	12.816	0.000	0.000	0.000	12.816	12.816	12.816	12.816	12.816	12.816
jun	15.780	0.000	0.000	0.000	15.780	15.780	15.780	15.780	15.780	15.780
jul	18.271	0.000	0.000	0.000	18.271	18.271	18.271	18.271	18.271	18.271
aug	17.401	0.000	0.000	0.000	17.401	17.401	17.401	17.401	17.401	17.401
sep	14.784	0.000	0.000	0.000	14.784	14.784	14.784	14.784	14.784	14.784
okt	10.983	1.073	0.942	1.130	9.909	10.041	9.853	9.909	10.041	9.853
nov	7.031	5.236	4.593	5.511	1.795	2.438	1.519	1.795	2.438	1.519
dec	4.946	7.425	6.513	7.815	-2.478	-1.566	-2.869	-2.478	-1.566	-2.869

Appendix C: Regelschema Smart Flow Control



Regelschema Smart Flow Control, van Matthijs Monkelbaan (Polderdak)

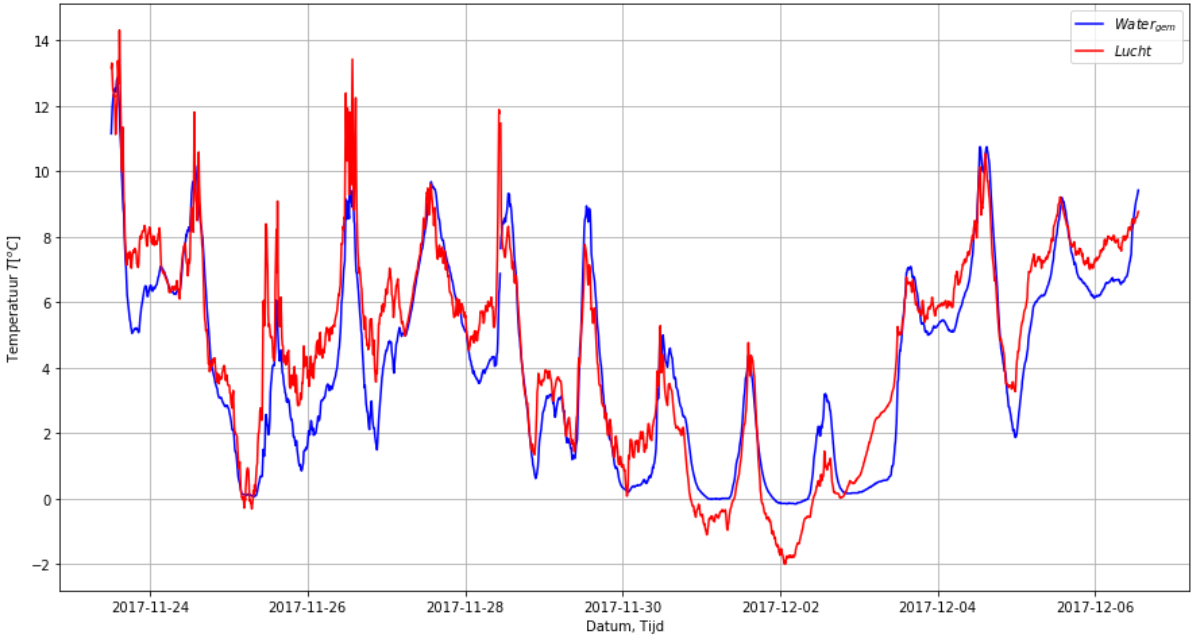
Appendix D: Open water temperatuur

Opstelling polderdak



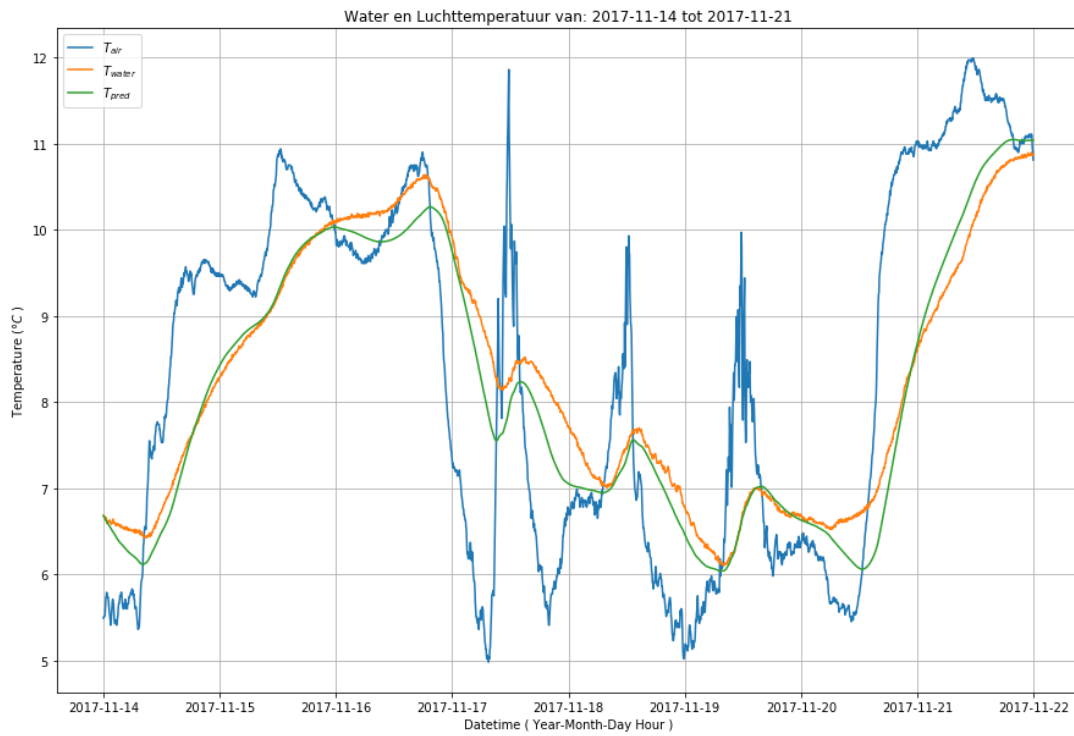
De temperatuur wordt gemeten met TidbiT's. Één meet de buitentemperatuur de andere twee meten de watertemperatuur. Er ligt ongeveer 4 cm water op het dak. Dit varieert door de regenval en verdamping van het water. De TidbiT die de buitentemperatuur meet is een paar dagen later in de schaduw gelegd. De dagen dat deze niet in de schaduw lag, was er veel bewolking, dus heeft het niet veel invloed gehad op de metingen.

Metingen



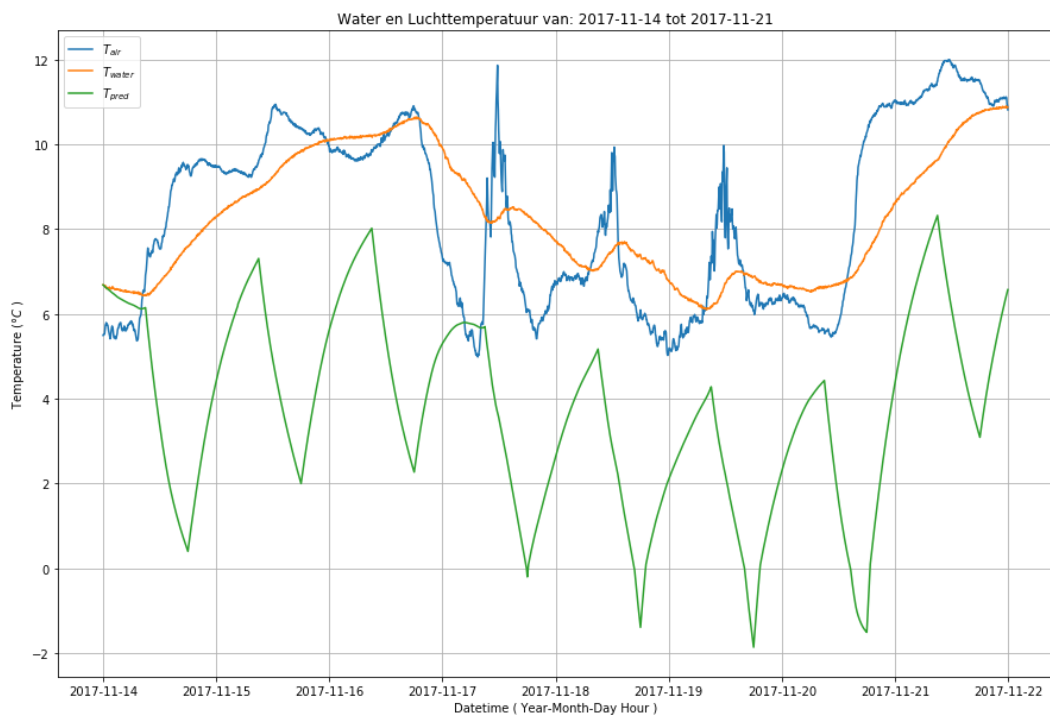
Appendix E: Data Project Smartroof 2.0

Zonder warmtepomp



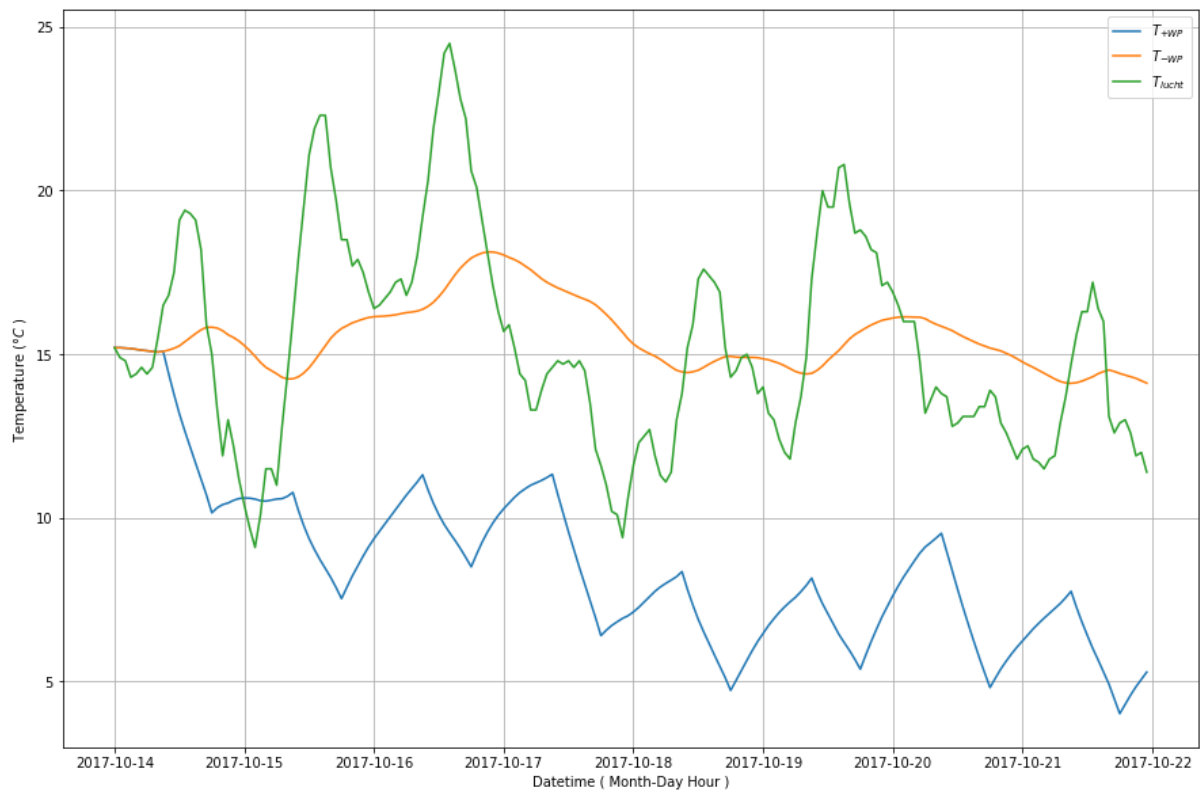
Meetdata verkregen van Joris Voeten (Roofscapes), Project Smartroof 2.0

Met warmtepomp



Warmte onttrekking van 37 W/m^2 uit het water dus een netto onttrekking van 27.75 W/m^2

Appendix F: KNMI data



Luchttemperatuur van KNMI

- Blauwe grafiek watertemperatuur met gebruik warmtepomp
- Oranje grafiek watertemperatuur zonder gebruik warmtepomp
- Groene grafiek luchttemperatuur

Appendix G: Temperatuurverschillen

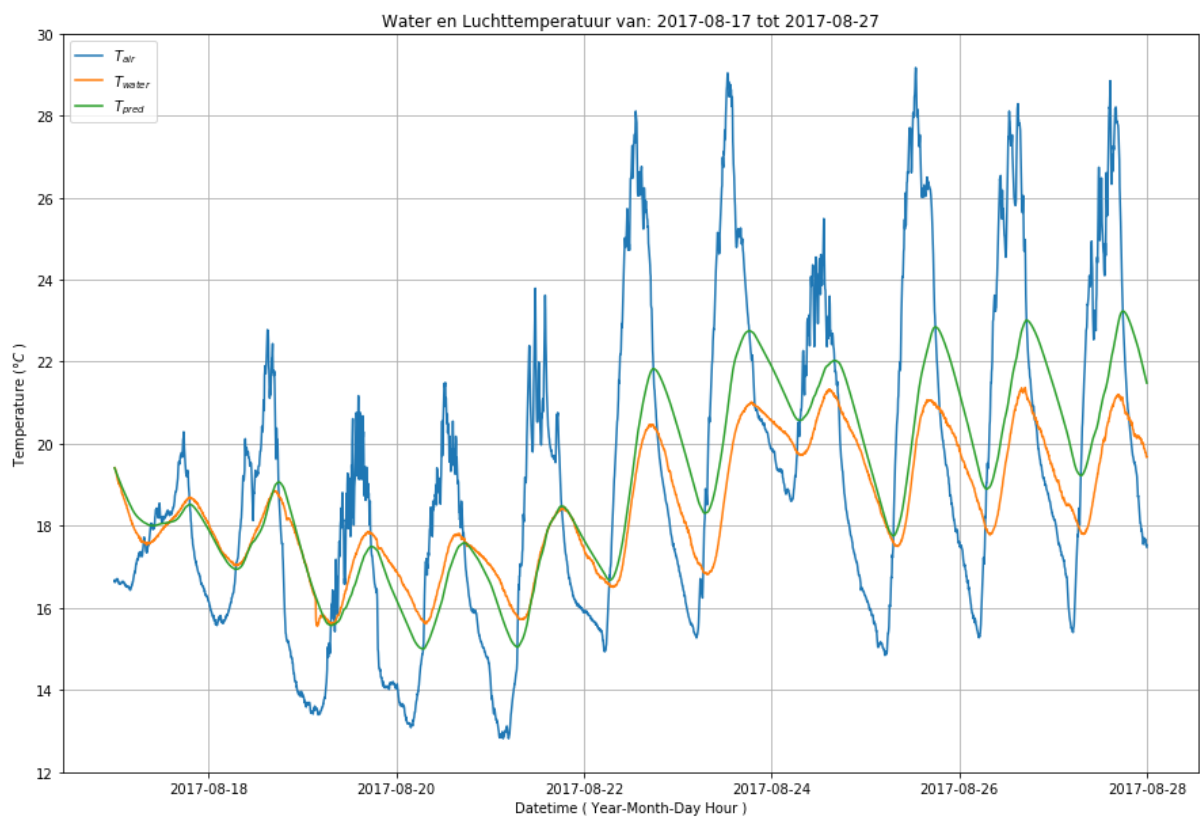
d = 0.06 m, beta = 4.43 W/m²/K, 0% warmte terug uit gebouw naar water

	Gem T	Kantoren	Utiliteit	Wonen	Kantoren	Utiliteit	Wonen
Maand	[°C]	Max. temp. verschil bij 8-18uur [°C]			Verschil met gem T bij 8-18uur [°C]		
jan	3.371	9.575	8.396	10.076	-6.204	-5.025	-6.705
feb	3.199	9.763	8.565	10.277	-6.564	-5.366	-7.078
mrt	6.049	6.603	5.794	6.948	-0.554	0.255	-0.899
apr	9.759	2.483	2.182	2.615	7.276	7.577	7.144
mei	12.816	0.000	0.000	0.000	12.816	12.816	12.816
jun	15.780	0.000	0.000	0.000	15.780	15.780	15.780
jul	18.271	0.000	0.000	0.000	18.271	18.271	18.271
aug	17.401	0.000	0.000	0.000	17.401	17.401	17.401
sep	14.784	0.000	0.000	0.000	14.784	14.784	14.784
okt	10.983	1.129	0.991	1.185	9.854	9.992	9.798
nov	7.031	5.512	4.834	5.800	1.519	2.196	1.230
dec	4.946	7.825	6.866	8.239	-2.879	-1.920	-3.293

d = 0.06 m, beta = 4.43 W/m²/K, 25% warmte terug uit gebouw naar water

	Gem T	Kantoren	Utiliteit	Wonen	Kantoren	Utiliteit	Wonen
Maand	[°C]	Max. temp. verschil bij 8-18uur [°C]			Verschil met gem T bij 8-18uur [°C]		
jan	3.371	7.181	6.297	7.557	-3.810	-2.926	-4.186
feb	3.199	7.322	6.424	7.708	-4.123	-3.225	-4.509
mrt	6.049	4.952	4.345	5.211	1.097	1.703	0.838
apr	9.759	1.862	1.637	1.961	7.897	8.123	7.798
mei	12.816	0.000	0.000	0.000	12.816	12.816	12.816
jun	15.780	0.000	0.000	0.000	15.780	15.780	15.780
jul	18.271	0.000	0.000	0.000	18.271	18.271	18.271
aug	17.401	0.000	0.000	0.000	17.401	17.401	17.401
sep	14.784	0.000	0.000	0.000	14.784	14.784	14.784
okt	10.983	0.847	0.743	0.889	10.136	10.240	10.094
nov	7.031	4.134	3.626	4.350	2.897	3.405	2.680
dec	4.946	5.869	5.150	6.179	-0.923	-0.203	-1.233

Appendix H: Voorspelling watertemperatuur zomer



Appendix I: Python code

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import pandas as pd
```

Figuur 11

```
1 delta = 60.*5.
2 A = 100.
3 rho = 1000.
4 dwater = 0.06
5 C = 4180.
6 warm = 30
7
8 def C(T, cons=False):
9     if cons:
10         return 4190
11     else:
12         if T > 0:
13             cc = 4.214 - 2.286e-3 * T + 4.991e-5 * T**2 - 4.519e-7 * T**3 + 1.857e-9 * T**4
14         else:
15             cc = 2.108
16         return cc*1000.
17
18 def conduction(Twater, Tair=15., k=0.09, d=0.04):
19     dT = Tair - Twater
20     return k*dT/d
21
22 def wp(t, Qdag=1650.*1000., delta=1., daglen=12., Aruimte=100. ):
23     return Qdag/daglen/60./60.*Aruimte
24
25
26 time = np.arange(0, 4000)
27 water = np.zeros(len(time))
28 water[0] = 15.
29 for i in range(len(water)-1):
30     Hwater = conduction(water[i], Tair=15.)*A - warm*A
31     water[i+1] = water[i] + Hwater / (rho*dwater*C(water[i])*A) * delta
32 plt.figure()
33 plt.plot(time, water, label='$T_{water}$')
34 plt.ylabel('Temperatuur ('+'$\\degree$ C$' + ' ')')
35 plt.xlabel('Stap')
36 plt.grid()
```

Figuur 12

```
1 def C(T, cons=False):
2     if cons:
3         return 4190
4     else:
5         if T > 0:
6             cc = 4.214 - 2.286e-3 * T + 4.991e-5 * T**2 - 4.519e-7 * T**3 + 1.857e-9 * T**4
7         else:
8             cc = 2.108
9         return cc*1000.
10
11 def wp(uur):
12     if uur > 8 and uur < 18:
13         wp = Wpm
14     else:
15         wp = 0
16     return wp
17
18 k = 0.09
19 dwater = 0.06
20 dsoil = 0.04
21 rho = 1000.
22 dt = 60. * 5.
23 Wpm = 30.
24 dagg = 15.
25
26 # dagg.index.hour[i]
27 pred = np.zeros(5000)
28 pred[0] = 15.
29 for i in range(len(pred)-1):
30     dTemp = dagg - pred[i]
31     pred[i+1] = pred[i] + ( dTemp * k / dsoil - wp(i/12.*24) ) / ( rho * C(pred[i]) * dwater) * dt
32
33
34 plt.figure(figsize=[15,10])
35 plt.plot(pred, label='$T_{pred}$')
36 plt.axhline(np.mean(pred[3000:]), c='orange', label='$T_{gem}$'+'+'+str(np.mean(pred[3000:]))))
37 plt.legend()
38 plt.xlabel('Stap')
39 plt.ylabel('Temperatuur ('+'$\\degree$ C$' + ' ')')
40 plt.grid()
41 plt.show()
42 print(15-np.min(pred)) # verschil met Luchttemperatuur
```

Importeren KNMI data

```
1 uurgeg = pd.read_csv('uurgeg_344_2011-2020.txt', skiprows=31, sep=',', skipinitialspace=True, index_col=1, parse_dates=True)
2 uurgeg.HH = pd.to_timedelta(uurgeg.HH, unit='h')
3 uurgeg.index = uurgeg.index + uurgeg.HH
4 uurgeg = uurgeg.drop('HH', axis=1)
5 uurgeg.index.name = 'Datetime'
```

Model met KNMI data, de tijdstap is een uur

```
1 k = 0.09
2 dwater = 0.06
3 dsoil = 0.04
4 rho = 1000.
5 dt = 60. * 60.
6 Wpm = 50.
7 dagg = data['T']/10.
8 times = dagg.index
9 pred = np.zeros(len(dagg))
10 pred[0] = dagg[0]
11 orig = np.zeros(len(dagg))
12 orig[0] = dagg[0]
13 for i in range(len(pred)-1):
14     dTemp = dagg[i] - pred[i]
15     pred[i+1] = pred[i] + ( dTemp * k / dsoil - wp(times[i].hour) ) / ( rho * C(pred[i]) * dwater ) * dt
16     dorig = dagg[i] - orig[i]
17     orig[i+1] = orig[i] + ( dorig * k / dsoil ) / ( rho * C(orig[i]) * dwater ) * dt
18
19 plt.figure(figsize=[15,10])
20 plt.plot(times, pred, label='$T_{+WP}$')
21 plt.plot(times, orig, label='$T_{-WP}$')
22 plt.plot(dagg, label='$T_{lucht}$')
23 plt.legend()
24 plt.xlabel('Datetime ( Month-Day Hour )')
25 plt.ylabel('Temperature ( '+ '$\degree$ C$' + ' )')
26 plt.grid()
27 plt.show()
```

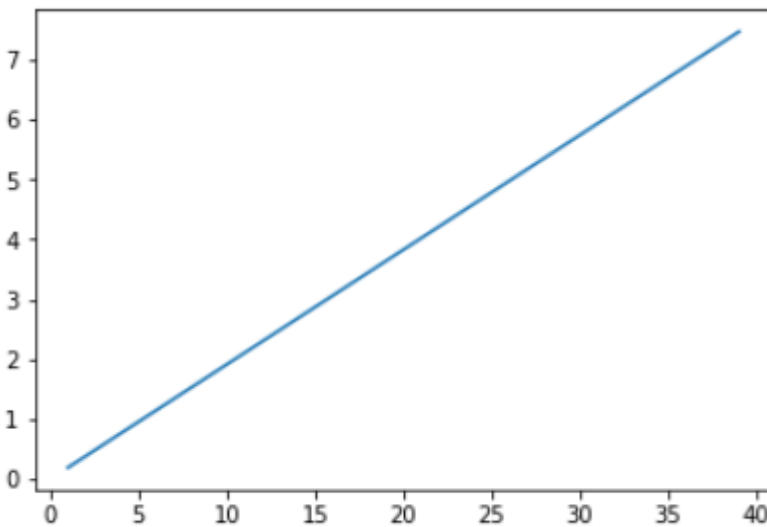
Coefficient bepalen

```
1 def C(T, cons=False):
2     if cons:
3         return 4190
4     else:
5         if T > 0:
6             cc = 4.214 - 2.286e-3 * T + 4.991e-5 * T**2 - 4.519e-7 * T**3 + 1.857e-9 * T**4
7         else:
8             cc = 2.108
9         return cc*1000.
10
11 def wp(uur):
12     if uur > 8 and uur < 18:
13         wp = Wpm
14     else:
15         wp = 0
16     return wp
17
18 k = 0.09
19 dwater = 0.15
20 dsoil = 0.04
21 rho = 1000.
22 dt = 60. * 5.
23 Wpm = 30.
24 dagg = 15.
25
26 # dagg.index.hour[i]
27 pred = np.zeros(3000)
```

```

29 arr = np.arange(1, 40)
30 verschil = np.zeros(len(arr))
31 for j in range(len(arr)):
32     Wpm = arr[j]
33     pred[0] = 15.
34     for i in range(len(pred)-1):
35         dTemp = dagg - pred[i]
36         pred[i+1] = pred[i] + ( dTemp * k / dsoil - wp(i/12.%24) ) / ( rho * C(pred[i], True) * dwater) * dt
37     verschil[j] = (15-np.min(pred))
38
39 #plt.figure(figsize=[15,10])
40 #plt.plot(pred, Label='${T}_{pred}$')
41 #plt.axhline(np.mean(pred[3000:]), c='orange', Label='${T}_{gem}$'+'+str(np.mean(pred[3000:]))')
42 #plt.legend()
43 #plt.xlabel('Stap')
44 #plt.ylabel('Temperatuur ('+$\degree$ C$' + ' )')
45 #plt.grid()
46 #plt.show()
47
48 plt.figure()
49 plt.plot(arr, verschil)
50 plt.show()
51 arr[-1]/verschil[-1]

```



5.2258479780532854

Project Smartroof 2 data

```

1 def C(T, cons=False):
2     if cons:
3         return 4190
4     else:
5         if T > 0:
6             cc = 4.214 - 2.286e-3 * T + 4.991e-5 * T**2 - 4.519e-7 * T**3 + 1.857e-9 * T**4
7         else:
8             cc = 2.108
9         return cc*1000.
10
11 def wp(uur):
12     if uur > 8 and uur < 18:
13         wp = Wpm
14     else:
15         wp = 0
16     return wp
17
18 k = 0.09
19 dwater = 0.02
20 dsoil = 0.04
21 rho = 1000.
22 dt = 60. * 5.
23 Wpm = 27.75
24 dagg = airtemp.loc[datum:datum2]
25 ts = dagg.index
26
27 # dagg.index.hour[i]
28 pred = np.zeros(len(ts))
29 pred[0] = watertemp.loc[datum].iloc[0]
30 for i in range(len(ts)-1):
31     dTemp = dagg.iloc[i].values - pred[i]
32     pred[i+1] = pred[i] + ( dTemp * k / dsoil - wp(dagg.index.hour[i]) ) / ( rho * C(pred[i]) * dwater) * dt
33

```

```
34 plt.figure(figsize=[15,10])
35 plt.plot(airtemp.loc[datum:datum2], label='$T_{air}$')
36 plt.plot(watertemp.loc[datum:datum2], label='$T_{water}$')
37 plt.plot(ts, pred, label='$T_{pred}$')
38 plt.legend()
39 plt.xlabel('Datetime ( Year-Month-Day Hour )')
40 plt.ylabel('Temperature ( '+'$\\degree$ C$' + ' )')
41 plt.title('Water en Luchttemperatuur van: ' + datum + ' tot ' + datum2)
42 plt.grid()
43 plt.show()
```