

Auteur M.K. (Milan) Karakhalil BENG

Verbetering van rekentools voor duurzame bodemenergie

Door internationale klimaatdoelen verduurzamen organisaties met toenemende snelheid. Een belangrijke ontwikkeling is de groeiende populariteit van thermische installaties met ondergrondse warmte koudeopslag (WKO) en luchtgevoede warmtepompen (LWP) waarmee gebouwen volledig elektrisch geklimatiseerd kunnen worden. Omdat de prestaties van luchtgevoede warmtepompen sterk afhankelijk zijn van de buitentemperatuur moeten ze slim worden ingezet om het energieverbruik te minimaliseren. Dit artikel - gebaseerd op een afstudeerproject aan de Hogeschool Utrecht in opdracht voor IF Technology - beschrijft universele eigenschappen voor rekentools die nauwkeurige berekeningen mogelijk maken voor WKO en luchtwarmtepompsystemen. Het artikel biedt een methode om onder andere samenwerkingen tussen ingenieursbureaus te versterken.

De groeiende vraag naar duurzame thermische energie kan de komende decennia leiden tot een tekort aan ingenieurs om alles te ontwerpen. Daarom is het cruciaal om zowel binnen ingenieursbureaus als in hun onderlinge samenwerking zo veel mogelijk processen te optimaliseren. Dit vermindert het aantal benodigde handberekeningen en bevordert de tijd die nodig is voor de onderbouwing van ontwerpkeuzes. Ingenieursbureaus gebruiken hiervoor rekentools, maar die zijn vaak óf specifiek voor bodemenergie, óf voor luchtgevoede warmtepompen.

Deze tools worden intern ontwikkeld en vervolgens intern gehouden. Er is op dit gebied weinig informatie-uitwisseling tussen bedrijven. Daardoor is er geen onderlinge controle en kan de kwaliteit en rekenwijze uiteenlopen. En dat terwijl deze bureaus vaak wel samenwerken aan de meest impactvolle projecten. Met de complexere wordende energiesystemen is het aan de rekentools om mee te groeien. Zo kunnen berekeningen efficiënt blijven en kwaliteitsstandaarden worden gewaarborgd.

Technologische ontwikkeling

WKO's in samenwerking met luchtgevoede warmtepompen, worden steeds vaker toegepast in de transitie naar een duurzame leefomgeving. Deze systeemcomponenten, die worden gebruikt om warmte en koude te leveren, werken op elektriciteit (i.p.v. fossiele brandstoffen) en staan erom bekend dat ze met een hoger rendement warmte leveren dan de gasketel. Warmtepompen leveren warmte met een COP van ongeveer 2 – 5,5 terwijl gasketels ongeveer 100% van de gevoede energie aan warmte levert.

WKO is een techniek die al tientallen jaren bestaat en zelfs al dertig jaar wordt toegepast in Nederland. Om de investeringskosten laag te houden werden WKO-systemen vaak ontworpen in combinatie met gasketels. Op die manier levert de WKO de meeste dagen per jaar de gevraagde warmte en springt de gasketel op de koudste dagen bij. Veel organisaties willen de komende jaren van het gas af, en gasketels worden minder populair. Daarom groeit de vraag naar luchtgevoede warmtepompen als aanvulling op de WKO. Dit maakt het vinden van een goed ontwerp complexer. Gasketels leveren namelijk met een constant rendement en bij luchtwarmtepompen verschilt het rendement in grote mate per moment. Vaak is warmtelevering vanuit de WKO efficiënter, omdat warmte vooral nodig is op koude dagen en de WKO dan een hogere temperatuur heeft dan de buitenlucht. De luchtwarmtepomp zal dus voornamelijk worden gebruikt als aanvulling. Soms is het toch beter om de luchtwarmtepomp prioriteit te geven voor warmtelevering. Bijvoorbeeld wanneer een gebouw altijd gelijktijdige warmte- en koudevraag heeft. Dan heeft de luchtwarmtepomp op warme dagen een hoge brontemperatuur, waardoor hij zeer efficiënt kan verwarmen.

Drie eigenschappen van moderne rekentools

Dit artikel beschrijft drie eigenschappen, die aan bestaande tools kunnen worden toegevoegd om ze geschikt te maken voor toekomstige thermische energiecentrales.

Fundamentele werking

De eigenschappen zijn opgesteld in het kader van de uitgangspunten 'universele inzetbaarheid', 'nauwkeurigheid' en 'rekenkracht optimalisatie'.

'Universele inzetbaarheid' wil zeggen dat de tool kan worden toegepast op uiteenlopende projecten. Denk aan warmtepompen met verschillende soorten koudemiddelen of met uiteenlopende compressor groottes. 'Nauwkeurigheid' slaat uiteindelijk op het zo nauwkeurig mogelijk inschatten van de prestaties en de energiestromen van het toekomstige systeem, de uitdaging is om dit voor elkaar te krijgen in uiteenlopende, met name niet voor de hand liggende situaties. Het derde uitgangspunt: 'rekenkracht optimalisatie' gaat over het vinden van manieren waarbij het uitvoeren en vergelijken van efficiëntie berekeningen zo min mogelijk ingewikkelde rekenstappen nodig zijn om een traag programma of vastlopende laptops te voorkomen.

De drie tool-eigenschappen die hieruit zijn voortgekomen zijn:

- Tijdstap gebonden COP-schattingen
- Drempeltemperatuur
- Totale energie optimalisatie

Rekentools maken vaak gebruik van klimaatgegevens om met geautomatiseerde berekeningen de energievraag van een gebouw te schatten. Deze klimaatgegevens geven de gemiddelde gemeten buitentemperatuur in de bilt weer over twintig jaar, voor elk uur in het jaar. In combinatie met oppervlakte en isolatiewaardes kan de energievraag worden benaderd. De klimaatgegevens worden vaak niet gebruikt om een per uur COP-schattingen mee te doen. Daarvoor wordt eenmalig een SCOP-berekening gemaakt en dat resultaat wordt voor elke tijdstap gebruikt. Bij zulke berekeningen wordt eenmalig de gemiddelde prestatie van een warmtepomp berekend over een jaar en deze uitkomst wordt elke tijdstap apart toegepast. Dit werkt vaak prima in bestaande tools, omdat de focus ligt op één elektrisch component die boven een bepaalde buitentemperatuur (bijvoorbeeld -5 graden) de voorkeur krijgt over de piekvoorziening. Deze buitentemperatuur wordt al vastgelegd bij de SCOP berekening.

De jaarresultaten van deze systemen benaderen de werkelijkheid. Maar wanneer de klant vraagt om luchtgevoede warmtepomp ter aanvulling van de WKO om volledig elektrisch te gaan, dient ter systeemoptimalisatie per tijdstap bekend te

Figuur 1: Datasets

	R290			
Tbuiten	35	45	55	
-20	1,96	1,70	1,56	
-15	2,23	1,90	1,79	
-10	2,33	2,04	1,90	
-7	2,50	2,25	2,05	
-5	2,70	2,29	2,09	
-2	3,01	2,51	2,18	
0	3,18	2,63	2,26	
2	3,20	2,75	2,45	
5	3,91	3,24	2,75	
7	4,40	3,35	2,85	
10	5,03	4,02	3,34	
12	5,52	4,24	3,55	
15	5,61	4,38	3,61	
20	6,10	4,62	3,79	

	R290		
Tbuiten	5	7	10
20	4,58	4,84	5,27
25	3,62	3,80	4,09
30	2,95	3,08	3,45
35	2,55	2,75	2,89
40	2,51	2,61	2,73
43	2,39	2,50	2,69
46	2,28	2,37	2,55

	R454b				
Tbuiten	35	40	45	50	55
-10	2,75	2,48	2,24	1,92	1,73
-5	3,15	2,84	2,56	2,31	2,04
0	3,60	3,24	2,91	2,62	2,36
10	4,64	4,14	3,70	3,31	2,97
15	5,31	4,71	4,18	3,73	3,33

	R454b		
Tbuiten	5	7	10
15	5,20	5,45	5,83
20	4,51	4,72	5,03
25	3,92	4,09	4,36
30	3,41	3,56	3,78
35	2,95	3,08	3,27

zijn welk component (WKO of luchtwarmtepomp) efficiënter levert. De omgevingstemperatuur speelt een grote rol in de prestaties van luchtwarmtepompen, daarom moet het per uur duidelijk zijn met welke COP de luchtwarmtepomp warmte kan leveren. Dit systeem biedt een beter inzicht in het energieverbruik per tijdstap en het eventueel benodigde opgesteld vermogen van de piekvoorziening. De prestaties en energiestromen van een totaalsysteem worden aanzienlijk nauwkeuriger berekend.

Tijdstap gebonden COP-berekeningen

De COP-berekeningen van warmtepompen zijn gebaseerd op data sheets van warmtepomp fabrikanten die onder andere COP-resultaten weergeven onder specifieke buiten- en aanvoertemperaturen. Met informatie uit verschillende data sheets is het mogelijk om datasets te maken die COP-prestaties van specifieke warmtepompen weergeven over verschillende aanvoer- en buitentemperaturen (figuur 1). De aanvoertemperatuur is de temperatuur van het water dat het CV-circuit betreedt.

Hierbij is het vrij om te kiezen hoeveel verschillende aanvoertemperaturen en buitentemperaturen worden meegenomen, maar belangrijk is dat datapunten over een groter domein van buiten- en aanvoertemperaturen ervoor zorgt dat de tool in een groter bereik aan buitentemperaturen accuraat COP kan schatten. Hoe dichter de datapunten bij elkaar liggen, hoe nauwkeuriger de schattingen worden gemaakt.

Met verschillende datasets kan onderscheid worden gemaakt tussen verschillende warmtepompen (andere merken, andere koudemiddelen, verschillende compressors) en verschillende standen van de warmtepomp, hiermee kunnen de effecten van verschillende

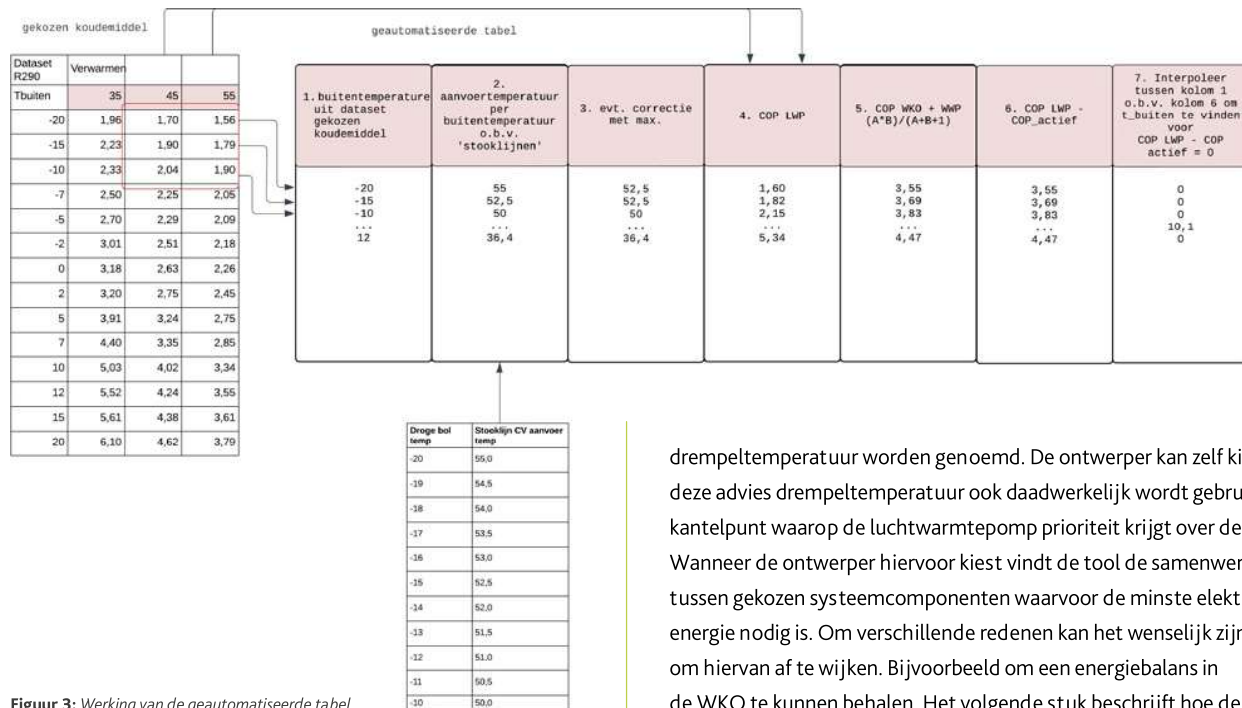
soorten warmtepompen op een project snel inzichtelijk worden gemaakt.

In de instellingen van de rekentool kan een warmtepomp worden gekozen met een bepaalde compressor grootte, koudemiddel, compressortype, etc. Vervolgens worden de buitentemperaturen uit de dataset van de warmtepomp met de gekozen eigenschappen gekopieerd naar de eerste kolom van een geautomatiseerde tabel (figuur 2). Deze tabel dient als een hulpmiddel van de rekentool, waarin met de input van de tool zoveel mogelijk eenmalig wordt berekend om de rekenkracht per tijdstap te beperken. Hierin worden de stooklijnen (de gewenste cv aanvoertemperatuur bij elke buitentemperatuur) van het project gekoppeld aan de buitentemperaturen uit de dataset. Dit gebeurt eerst door m.b.v. de stooklijnen van de casus de gewenste aanvoertemperatuur van het cv-systeem te berekenen bij alle buitentemperaturen uit de gekozen dataset. Vervolgens wordt er teruggekoppeld naar de dataset om te interpoleren tussen de COP waarden om de COP te benaderen bij alle buitentemperaturen uit de dataset en de bijbehorende aanvoertemperaturen van de casus (figuur 3). Omdat de stooklijnen van het gebouw al vast staan kan van tevoren bij elke buitentemperatuur de COP van de warmtepomp worden berekend. Door de stooklijnen te koppelen aan de buitentemperaturen van de datasets wordt de hoogst mogelijke nauwkeurigheid behaald zonder overbodige berekeningen.

De geautomatiseerde tabel retourneert de COP resultaten van de gekozen warmtepomp over het bereik aan buitentemperaturen uit de bijbehorende dataset i.c.m. de daarbijhorende aanvoertemperaturen van de casus. In de berekeningen per tijdstap wordt geïnterpoleerd tussen de COP resultaten uit de geautomatiseerde tabel om voor elke buitentemperatuur de COP van de warmtepomp te benaderen.

Buientemperatuur uit dataset koudemiddel	Gewenste aanvoertemperatuur	Ta gewenst in data?	Kolom nr laag	Kolom nr hoog	Ta_laag	Ta_hoog	COP Ta laag	COP Ta hoog	COP LWP
-15,00	52,5	0	2	3	45	55	1,9	1,79	1,82
-10,00	50	0	2	3	45	55	2,04	1,9	1,97
-7,00	48,5	0	2	3	45	55	2,25	2,05	2,18
-5,00	47,5	0	2	3	45	55	2,29	2,09	2,24
-2,00	46	0	2	3	45	55	2,51	2,18	2,48
0,00	43	0	1	2	35	45	3,18	2,63	2,74
2,00	42	0	1	2	35	45	3,2	2,75	2,89
5,00	40,5	0	1	2	35	45	3,91	3,24	3,54
7,00	39,5	0	1	2	35	45	4,4	3,35	3,93
10,00	38	0	1	2	35	45	5,03	4,02	4,73
12,00	36,4	0	1	2	35	45	5,52	4,24	5,34
15,00	35	1	1	1	35	35	5,61	5,61	5,61
20,00	35	1	1	1	35	35	6,1	6,1	6,10
0,00	0	0	N.V.T	N.V.T.	0	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T	N.V.T.

Figuur 2: Geautomatiseerde tabel.



Figuur 3: Werking van de geautomatiseerde tabel.

Drempeltemperatuur

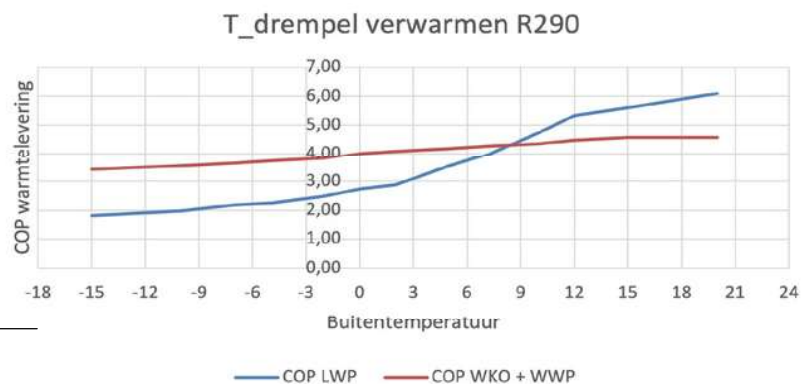
Meestal is actieve warmtelevering vanuit de WKO efficiënter dan de luchtwarmtepomp. Een WKO heeft namelijk een warme bron en een koude bron waarvan de warme door het jaar heen zo'n vier graden verschilt. Daardoor is de brontemperatuur maximaal zo'n zestien graden, ook al is het buiten erg warm.

De prestaties van de luchtwarmtepomp staan wel in direct verband met buitenluchttemperatuur. De buitenlucht is namelijk de bron. Dit maakt dat het rendement van warmtelevering vanuit de WKO minder stijgt wanneer de buitentemperatuur omhoog gaat dan het rendement van de luchtwarmtepomp (figuur 4).

Door de COP van actieve warmtelevering vanuit de WKO toe te voegen aan de geautomatiseerde tabel (figuur 5) kan het kantelpunt worden berekend waarop de luchtwarmtepomp met een hoger rendement warmte levert dan de WKO. Deze berekening levert een buitentemperatuur op waarbij de luchtwarmtepomp rendabeler warmte levert dan de WKO (figuur 4). Die temperatuur kan de advies

Totale energie optimalisatie

De drempeltemperatuur is niet alles. De werking ervan moet juist in de bestaande tool worden geïntegreerd om het geheel te laten werken. Daarbij kan het schema in figuur 6 helpen. Het schema maakt gebruik van universele regels én de door de ontwerper gekozen drempeltemperatuur om te bepalen welke componenten in bedrijf gaan. 'LWP' staat hierin voor luchtwarmtepomp en 'WWP' voor waterwarmtepomp. 'WWP' verwijst naar de geothermische warmtepomp, die staat opgesteld tussen de WKO en het cv-systeem. 'T_{drempel}' verwijst naar de door de ontwerper ingestelde drempeltemperatuur.



Figuur 4: Drempeltemperatuur.

COP LWP	COP WKO	COP WWP	COP WKO + WWP	COP verschil	Drempeltemperatuur
1,82	35	3,90	3,42	-1,60	0
1,97	35	4,06	3,55	-1,58	0
2,18	35	4,19	3,65	-1,47	0
2,24	35	4,27	3,71	-1,47	0
2,48	35	4,40	3,81	-1,33	0
2,74	35	4,66	4,01	-1,27	0
2,89	35	4,75	4,08	-1,19	0
3,54	35	4,89	4,18	-0,64	0
3,93	35	4,98	4,25	-0,32	8,406249492
4,73	35	5,12	4,36	0,37	0
5,34	35	5,28	4,47	0,87	0
5,61	35	5,41	4,57	1,04	0
6,10	35	5,41	4,57	1,53	0
N.V.T.	35	4,66	4,01	N.V.T.	0

Figuur 5:
Drempeltemperatuur in de geautomatiseerde tabel.

In Figuur 6 is een deel van een stroomschema van een rekentool te zien. Dit deel van het stroomschema wordt elke tijdstap herhaald. Eerst controleert de tool of de buitentemperatuur in die tijdstap hoger ligt dan de door de ontwerper ingevulde drempeltemperatuur. Als dat het geval is, krijgt de luchtwarmtepomp prioriteit bij warmtelevering. In de laatste controlestep in het schema wordt er gecontroleerd of de component met prioriteit in staat is zelfstandig warmtevraag te leveren. Als dat niet het geval is, springt het tweede elektronische component bij voorkeur zoveel bij als nodig maar anders zoveel als mogelijk.

Zoals te zien aan de eerste voorwaarde hangt welk component prioriteit krijgt af van de buitentemperatuur. Bij een buitentemperatuur hoger dan de gekozen drempeltemperatuur heeft de luchtwarmtepomp eerste prioriteit. Bij een buitentemperatuur lager dan de drempeltemperatuur heeft de waterwarmtepomp de eerste prioriteit. Wanneer de component met tweede prioriteit zoveel bijspringt als mogelijk, is de warmtevraag groter dan het totale leverbare vermogen van zowel de luchtwarmtepomp als actieve levering vanuit de WKO. Dan wordt er berekend hoeveel warmtelevering er in die tijdstap van de piekvoorziening nodig is.

Zoals te zien is in dit schema is er geen mogelijkheid dat er koudevraag (zie GKW vraag) is bij een buitentemperatuur onder de drempeltemperatuur. Dat is omdat koudevraag bij lage temperaturen minder voorkomt dan warmtevraag bij hoge temperaturen. Of dit

soort stappen nodig zijn kan verschillen per toepassing van de tool. Afhankelijk van de overeenkomsten tussen opdrachten van een ingenieursbureau kan het mogelijk zijn dat er in een andere tool bijvoorbeeld wel gecontroleerd moet worden op GKW vraag bij lage buitentemperaturen.

Potentie in de sector

Rekentools worden al jaren ingezet door energie-ingenieurs om de jaarresultaten van conceptsystemen in te schatten. Door de stijgende eisen aan duurzaamheid en complexiteit van projecten is het belangrijk om deze tools verder te ontwikkelen en hun gebruik te stroomlijnen.

De toevoeging van tijdstap-gebonden COP-berekeningen en de drempeltemperatuur draagt hieraan bij. Deze functies zorgen ervoor dat tools de efficiëntie van verschillende systeemcomponenten dynamisch kunnen vergelijken waardoor de energieprestaties per tijdstap nauwkeurig in kaart worden gebracht. Een optimale inzet van elektrische systeemcomponenten bespaart energiekosten voor de klant en overbodige druk op elektriciteitsnet. Bovendien zijn rekentools niet meer per definitie geoptimaliseerd voor gemiddelde omstandigheden, maar ook voor extremen en schommelingen. Ontwerpers kunnen eenvoudig andere klimaatdata gebruiken, bijvoorbeeld voor buitenlandse projecten of om systeemprestaties met extreme buitentemperaturen in te schatten. In een Excel tool zou

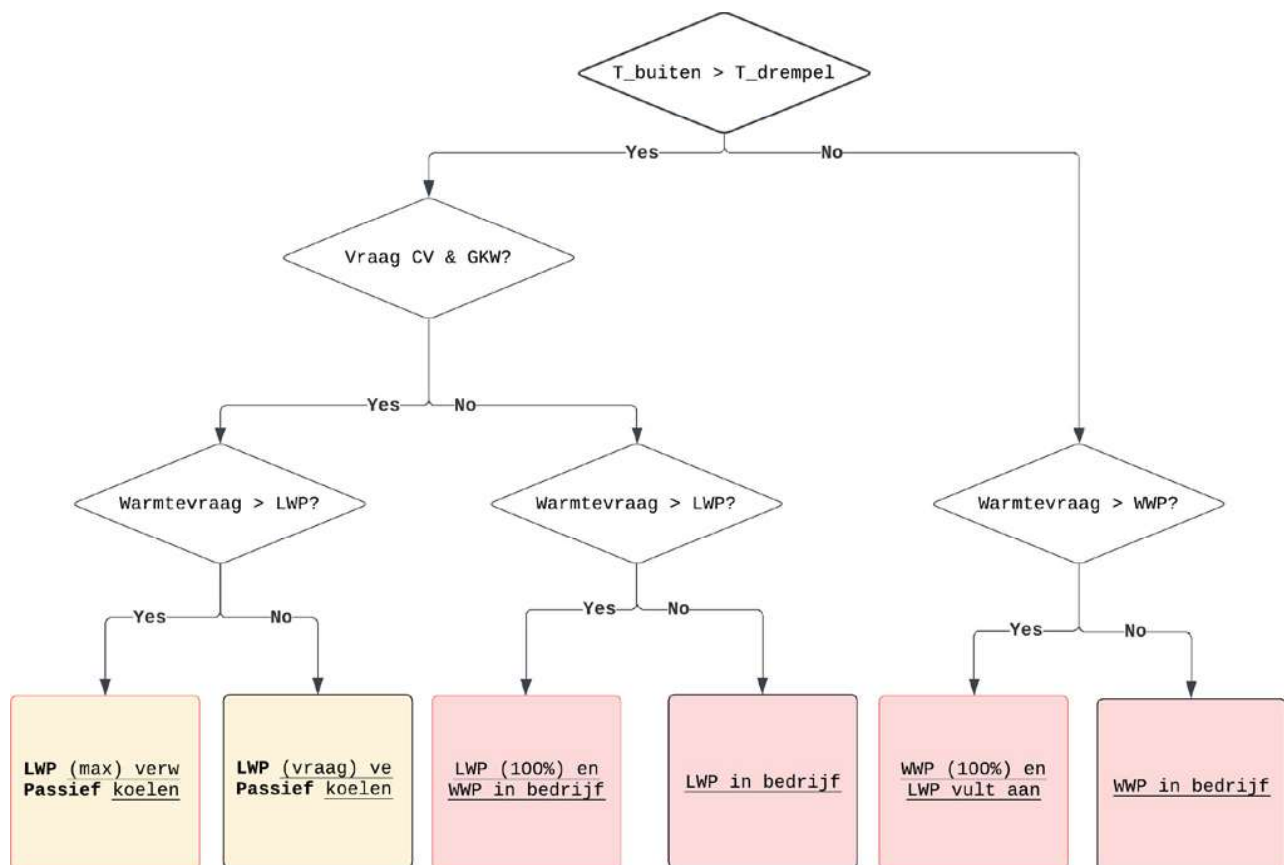
je daarvoor de nieuwe klimaatdata moeten downloaden en die neerzetten in de cellen waar de bestaande klimaatdata staat. Dit verlaagt de marges van foutieve aannames en maakt de tools relevanter voor het ontwerpen van systemen die gedurende het jaar geoptimaliseerd blijven presteren.

De gevisualiseerde informatiestromen in stroomschema's kunnen in de toekomst van grote waarde zijn. Een eenduidige manier om rekentools te visualiseren kan ervoor zorgen dat samenwerkende partijen elkaar snel kunnen begrijpen ondanks andere specialisaties en anders werkende rekentools. Deze schema's vormen een gemeenschappelijke taal die samenwerkingen tussen verschillende partijen kan versterken. Het gebruik van schema's wordt steeds waardevoller naarmate de complexiteit van rekentools toeneemt, omdat de werking dan steeds minder tot de verbeelding spreekt. Als meerdere mensen samenwerken aan de ontwikkeling van een rekentool, helpt het schema de programmeurs om elkaars ideeën beter te begrijpen en eventuele denkfouten kunnen worden herkend voordat de tool in elkaar is gezet.

Ook helpt het vastleggen van rekenstappen in een schema met de communicatie naar collega's die niet betrokken zijn bij de ontwikkeling, maar wel gebruikmaken van de tool. Zij kunnen op laagdrempelige wijze inzicht krijgen in de werking van rekentool. Ten slotte kan dit de communicatie met externe partijen bevorderen.

De grootste verduurzamingsprojecten hebben de meeste invloed, en daarbij zijn vaak meerdere ingenieursbureaus betrokken. Bij zulke projecten zit er een verband tussen de slagingskans en de communicatie tussen betrokken partijen. Deze schema's bevorderen een gedeeld begrip van complexe berekeningen. Met nauwkeurige berekeningen en verbeterde onderlinge afstemming tussen ingenieursbureaus dragen deze functies van rekentools bij aan het succesvol realiseren van de energietransitie.

Over de auteur: Milan Karakhalil is onlangs afgestudeerd als werktuigbouwkundige op de hogeschool Utrecht op dit thema. Dit artikel is gebaseerd op zijn scriptie: Tooluitbreiding met geautomatiseerde berekeningen voor lucht-water warmtepompen (te vinden op HBO-kennisbank.nl). Het project is uitgevoerd in opdracht van IF Technology, in het ontwerprapport worden alle toeigenschappen die zijn behandeld in dit artikel verder toegelicht.



Figuur 6: Stroomschema.