

Nieuwe energie uit een oude schoorsteen

Deerns kwam met het idee om de ongebruikte monumentale schoorsteen van de Universiteit Eindhoven nieuw leven in te blazen door hem in te zetten voor vrije koeling. Een studie naar de haalbaarheid hiervan is uitgevoerd met behulp van geavanceerde simulatie en analysetechnieken. Het is gebleken dat de schoorsteen inderdaad effectief kan worden ingezet voor het leveren van koeling aan het naastgelegen Ceres-gebouw. En wat is er duurzamer dan het inzetten van oude elementen voor het leveren van nieuwe energie?

Ir.-ing. T.A.J. van Goch, projectleider Innovatie bij BAM Techniek
Ten tijde onderzoek: Afgestudeerd TU/e en Deerns

De Technische Universiteit Eindhoven (TU/e) beschikt over één van de grootste warmte/ koudeopslagsystemen (wko) van Europa. Maar de TU/e kampt met een warmte overschot; de gebouwen hebben doorgaans meer koeling dan verwarming nodig. Bij een overschot heeft men twee keuzes: het overschot nuttig gebruiken of er goedkoop vanaf komen. Op dit moment gebeurt geen van beide, aangezien energieverlindende koeltorens voor balans in de opslag zorgen.

■ NIEUWE BESTEMMING

Op het terrein van de universiteit staat het Centraal Energie en Regelstation (Ceres). Dit ketelhuis zorgde er vanaf 1959 voor dat alle gebouwen op de campus werden verwarmd. Om de rookgassen die daarbij vrijkwamen af te voeren staat er een (inmiddels monumentale) bakstenen schoorsteen van 68 m hoog naast. Zowel ketelhuis als schoorsteen hadden vanaf 2005 geen functie meer, omdat elk gebouw vanaf dat jaar haar eigen warmteopwekking kreeg en de wko in werking trad. Als onderdeel van de grootschalige herinrichting van de universiteit (Campus 2020 project) werd in 2010 het oude ketelhuis gerenoveerd en kreeg het een nieuwe bestemming. Het gebouw herbergt nu kantoren, ontmoetings-

ruimten en twee collegezalen (zie ook figuur 1). Wat er met de bijbehorende schoorsteen moest gebeuren, bleef lang onduidelijk. Installatie adviesbureau Deerns bedacht een innovatieve oplossing. In de winter, als het buiten koud is, verwarmt water uit de bodem de lucht in de schoorsteen, waardoor er een natuurlijke trek ontstaat. Het water gaat daarna gekoeld weer terug de bodem in. In de zomer krijgt de schoorsteen weer zijn oude functie; hij voert dan warmte af van de warmtepomp in het gerenoveerde Ceres-gebouw. In het voor- en najaar helpt de schoorsteen ook te koelen: de buitenlucht is dan koeler dan het water afkomstig uit de koelplafonds van het gebouw [1].

■ EFFECTIVITEIT EN EFFICIËNTIE

Het gebruiken van de schoorsteen voor vrije koeling van gebouwen en het laden van koude in de wko zorgt ervoor dat de koeltorens minder werk hoeven te verzetten en het gebouw efficiënter opereert. Het mes snijdt dus aan twee kanten. En wat is er duurzamer dan het inzetten van een monumentale industriële constructie voor een nieuwe functie waarbij op een zeer efficiënte manier koeling wordt geleverd? De schoorsteen kan dus worden ingezet voor

het laden van koude in de wko, het leveren van vrije koeling en het afkoelen van de condensator van warmtepompen. Het is dan ook de vraag hoe de schoorsteen het meest efficiënt kan worden ingezet. Daarnaast is het maar de vraag of er daadwerkelijk voldoende thermische trek ontstaat, aangezien de schoorsteen ook warmte uitwisselt met de omgeving en



-Figuur 1- De monumentale schoorsteen op de Technische Universiteit Eindhoven naast het Ceres-gebouw voor de renovatie.

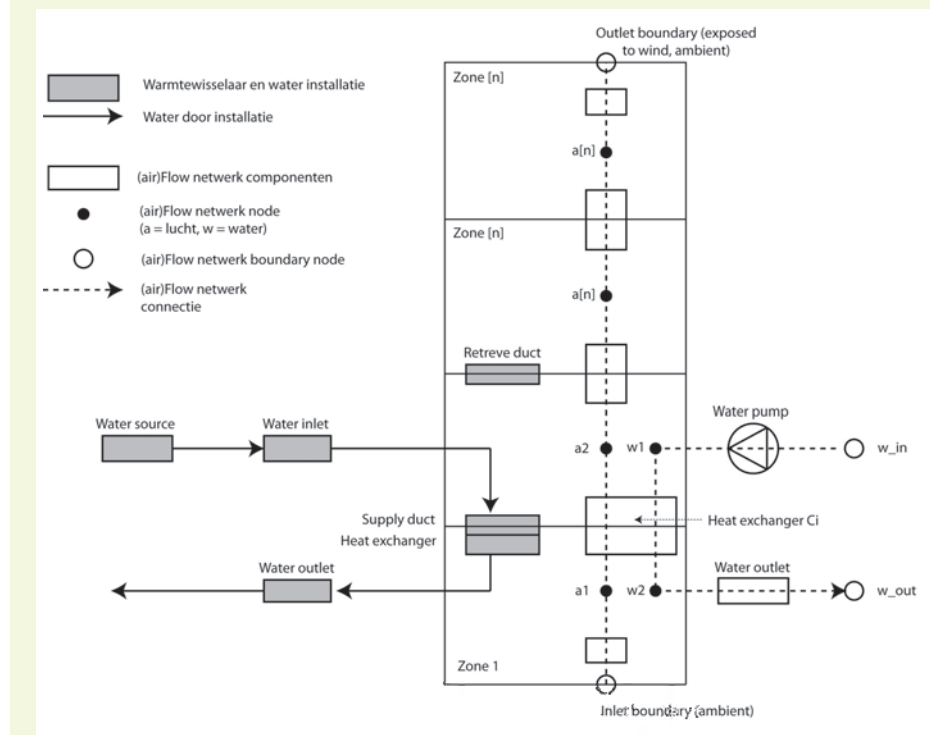
de temperaturen relatief laag zijn. Er is een complexe verhouding tussen natuurlijke trek ten gevolge van warmte-uitwisseling en massastroom. Het zou kunnen dat de lucht halverwege de schoorsteen dusdanig is afgekoeld dat het systeem niet werkt. De haalbaarheid van dit project bleef daarom onbekend. In dit kader is deze studie uitgevoerd waarin met behulp van geavanceerde simulatie methoden is gekeken naar de effectiviteit en efficiëntie van de voorgestelde oplossing [2].

BESLUITVORMING

Het doel is om ontwerpparameters die de warmte-uitwisseling gedurende het jaar beïnvloeden te identificeren en deze parameters te optimaliseren. Daarmee is deze studie een voorbeeld van het toepassen van gebouw simulaties voor ondersteuning van de besluitvorming in een vroege fase van het ontwerpproces. De prestatie van het systeem wordt bepaald door de jaarlijkse warmte-uitwisseling, het rendement en de kosten. Deze factoren vormen de prestatie-indicatoren. De benodigde energie voor de waterpomp ten opzichte uitgewisselde energie bepaalt het systeemrendement, dat wordt uitgedrukt in een efficiëntie coëfficiënt (EC). Kosten zijn onder meer afhankelijk van de grootte van de benodigde warmtewisselaar en de grootte van de pomp. De kosten zijn gebaseerd op benodigde materialen, en niet op fabricage-, montage- en onderhoudskosten.

De verschillende scenario's waarvoor de schoorsteen kan worden ingezet zijn vertaald naar ontwerpvoorwaarden voor de temperaturen van het uitstromende water. Voor het laden van de wko geldt bijvoorbeeld een gewenste injectietemperatuur van 6°C, terwijl er voor vrij koelen een minimum temperatuur geldt van 8°C. In het model wordt de uitgangstemperatuur van het water gecontroleerd door het regelen van massastroom door de waterpomp.

Simulatiemodellen zijn ontwikkeld in de open simulatie omgeving ESP-r. ESP-r is een flexibele gebouw simulatie-omgeving waarin energie-uitwisseling, luchtverplaatsing en installaties kunnen worden gesimuleerd. In ESP-r worden de schoorsteen en de warmtewisselaar beschreven en wordt de stroming gemodelleerd met behulp van stromingsnetwerken. In dergelijke netwerken worden gebouwzones en lucht/watersystemen gezien als netwerken van zones en systeemcomponenten. Verondersteld wordt dat er voor elk type verbinding een eenduidig verband bestaat tussen de stroming door de component en het drukverschil. Het stromingsnetwerk wordt gekoppeld aan modellen die de warmte-uitwisseling uitrekenen. Zo wordt voor elke



-Figuur 2- Schematische weergave van het simulatiemodel. Voor het berekenen van stroming door de schoorsteen en de warmtewisselaar wordt gebruik gemaakt van de stromingsnetwerken. De warmte-uitwisseling tussen de warmtewisselaar en de lucht in de schoorsteen, en tussen de schoorsteen en de omgeving wordt apart uitgerekend voor elke tijdstap. De waterpomp maakt deel uit van het stromingsnetwerk, dit is nodig voor de drukberekeningen en de controle van de massastroom. De pomp maakt deel uit van het zelfde fysieke systeem als de warmtewisselaar. In dit geval is het 'installatie'-gedeelte niet verantwoordelijk voor de berekening van de drukken en massastromen, waardoor de waterpomp ook in het schema enkel in het stromingsnetwerk is opgenomen.

tijdstap de warmte-uitwisseling tussen de zones en door de constructie berekend. Hieruit volgen de drukverschillen, zodat de massastromen berekend kunnen worden. De waterstroom door de installatie wordt apart berekend met behulp van een tweede stromingsnetwerk. Een schematische weergave van het simulatiemodel is te zien in figuur 2.

GEVOELIGHEIDSANALYSE

De belangrijkste ontwerpparameters en de relatieve invloed van deze parameters op de prestatie-indicatoren zijn geanalyseerd op basis van een gevoeligheidsanalyse. Door gebruik te maken van geavanceerde steekproeven wordt het aantal uit te voeren simulaties verkleind, terwijl er een goed beeld ontstaat van de resultaat ruimte ('Latin-Hypercube-Sampling' [3]). Met deze analyse zijn de algemene ontwerp richtlijnen in kaart gebracht. In de gevoeligheidsanalyse is onder andere gekeken naar de invloed van watertemperaturen, de plaats van de warmtewisselaar in de schoorsteen en het ontwerp van de warmtewisselaar.

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de temperaturen van de water aan- en afvoer en de geometrie van de warmtewisselaar een grote invloed hebben op de jaarlijkse warmte-uitwisseling. Wanneer hogere uitvoertempera-

turen worden toegestaan, kan de schoorsteen gedurende meer uren van het jaar worden gebruikt. In het algemeen, verbetert de jaarlijkse warmte-uitwisseling bij een verlaging van de stroomweerstand van de warmtewisselaar (het oppervlakte wordt dan ook verkleind). Ook de efficiëntie is voornamelijk afhankelijk van de watertemperaturen. Daarnaast dient de warmtewisselaar aan de onderzijde van de schoorsteen te worden geplaatst. Deze resultaten lijken triviaal, maar de complexe samenhang tussen luchtstroming en warmte-uitwisseling zorgt ervoor dat de exacte werking niet zomaar te voorspellen is. Zo leidt het vergroten van de plaat afstand in de warmtewisselaar tot een kleiner oppervlak, terwijl de jaarlijkse warmte-uitwisseling wordt vergroot. Daarnaast verbeteren de prestaties naarmate de warmtewisselaar lager in de schoorsteen wordt geplaatst. Warmte-uitwisseling met de schoorsteenmantel speelt een kleinere rol dan gedacht.

Vervolgens is er een optimalisatie van de ontwerpparameters uitgevoerd, m.b.v. de neurale netwerk mogelijkheden van optimalisatie-omgeving ModeFrontier. Voor optimalisatie dienen enkele honderden simulaties te worden uitgevoerd; een deel daarvan wordt met neurale netwerken gedaan waardoor de optimalisatie tijd wordt gehalveerd. Het systeem

is geoptimaliseerd voor maximale jaarlijkse warmte-uitwisseling tegen minimale kosten.

■ PARETO-FRONT

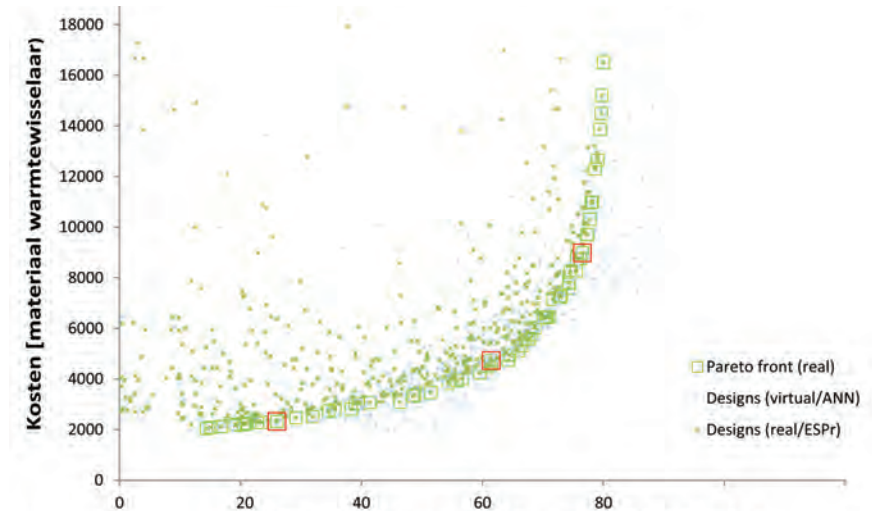
Een verzameling optimale resultaten is opgenomen in figuur 3, waarin een zogenaamd Pareto-front is opgenomen. Het Pareto-front is de verzameling optimale resultaten. Hoewel alle punten op het Pareto-front optimaal zijn, zou er één optimum vastgesteld kunnen worden op grond van een evenwicht tussen kosten en warmte-uitwisseling. We kijken hier vooral naar de mogelijkheid om de schoorsteen in te zetten voor het laden (koelen) van de wko. In dit geval is daarom gekozen voor het punt waarbij 72 MWh/jaar wordt geladen in de wko. Een echte 'optimale waarde' is afhankelijk van keuzes van de cliënt. De schoorsteen kan voor een combinatie van scenario's worden ingezet, waardoor warmte kan worden uitgewisseld met zowel de wko als het Ceres-gebouw, afhankelijk van de buitentemperatuur. In figuur 4 staat een overzicht van de resultaten.

72 MWh/yr is ongeveer 1,8% van de koude opwekking van één koeltoren in het huidige systeem. Het inzetten van de schoorsteen voor het laden van de wko lijkt in dit geval dus niet effectief. De efficiëntie is echter hoog in vergelijking met de koeltorens. De EC (uitgewisselde energie ten opzichte van benodigd pompvermogen) van de schoorsteen ligt boven de 100 en eindigt bij 400 in de winter (in vergelijking: tot 5 tot 22 voor de koeltorens). Het potentieel voor vrije koeling is 541 MWh/jaar, afhankelijk van de keuze van het gebruik (wko laden en/of vrije koeling). Dit is voldoende om de het Ceres-gebouw te voorzien van vrije koeling. Deze koeling is beschikbaar wanneer de buitentemperatuur onder de 19°C is (zie ook figuur 5). In de zomer zou lokale buffering kunnen worden gebruikt die in de nacht geladen kan worden. Het Ceres-gebouw kent een koelbehoefte vanaf een buitentemperatuur van ongeveer 12°C (op zonnige dagen), zodat voor die momenten vrije koeling beschikbaar is (voor- en najaar).

In figuur 5 is het beschikbare koelvermogen ten opzichte van de buitentemperatuur weergegeven. Het blijkt dat de koelcapaciteit lineair afneemt met een toename in de luchttemperatuur. De luchtstroom (kg/s), luchttemperatuur (°C) en watermassastroom (kg/s) zijn dus in evenwicht. De variatie in warmte-uitwisseling bij een zelfde buitenluchttemperatuur wordt waarschijnlijk veroorzaakt door factoren zoals de wind.

■ ONZEKERHEIDSANALYSE

Ten slotte is de onzekerheid in de geoptimaliseerde resultaten geanalyseerd m.b.v. een



-Figuur 3- Een voorbeeld van het resultaat van de optimalisatie met op de horizontale as de jaarlijkse warmte die kan worden weggevoerd uit het wko en op de verticale as de kosten (relatief)

onzekerheidsanalyse. Hierbij is gekeken naar de invloed van onder andere wind en onzekerheden in natuurkundige parameters. Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat wind van hoge invloed is op de jaarlijkse warmte-uitwisseling. De toevoeging van een dak bedoeld om het gebruik van winddruk te optimaliseren, kan de prestaties verbeteren en het rookkanaal beschermen tegen eroderende regen.

■ CONCLUSIE

De conclusie is dat de monumentale schoorsteen op de TU/e campus kan worden ingezet ten bate van duurzame koeling, in het bijzonder voor het verstrekken van vrije koeling

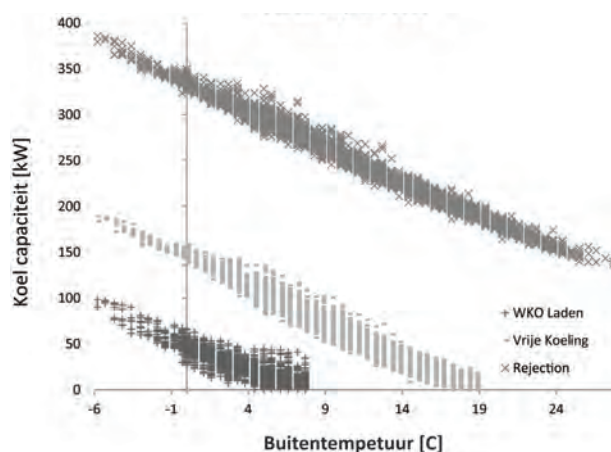
aan het Ceres-gebouw. Er zijn ongeveer 600 monumentale, soortgelijke schoorstenen in Nederland. Andere monumentale schoorstenen kunnen worden gebruikt voor soortgelijke toepassingen. Dit is een manier om nieuw leven te geven aan industriële monumenten.

■ BRONNEN

1. Hoving D, Deerns benut schoorsteen bij warmte/koudeopslag, in de Ingenieur. 2010
2. van Goch, T.A.J., Computational Optimization of Heat Exchange in Stack Chimneys, Master Thesis, Eindhoven
3. Iman, R. L. 2008. Latin University of Technology, 2012

Inzet afhankelijk van buitentemperaturen mogelijk tot:	Warmte-uitwisseling (MWh / jaar)	EC	Doel
<8 °C	72	103	WKO laden
8-19 °C	143	151	Vrije koeling (naast laden WKO)
> 19 °C	79	233	Afvoeren warmte warmtepomp (naast laden WKO)
<19 °C	541	166	Exclusief voor vrije koeling
Alle	2275	350	Exclusief voor afvoeren condensator warmte

-Figuur 4- Prestatie van het geoptimaliseerd ontwerp op basis van het Pareto-resultaat van 72 MWh/jaar voor het laden van de wko



-Figuur 5- Het beschikbare koelvermogen van de schoorsteen afhankelijk van de buitentemperatuur voor de verschillende gebruiksscenario's. De variaties in warmte-uitwisseling bij gelijke buitentemperaturen is te wijten aan externe condities zoals de wind