Auteurs J. (Jonas) Brinkmann, M.Eng. Vertaling en bewerking: W.G. (Walter) van der Schee

Validatie SIMDEUM voor een hotel

Simdeum staat voor Simulation of water Demand End-Use Model en is een stochastisch simulatiemodel om het waterverbruik in verschillende soorten gebouwen te voorspellen. Simdeum is ontwikkeld door M. Blokker van KWR in Nieuwegein. Jonas Brinkmann heeft in het kader van zijn masterscriptie, die hij aan de FH Münster in samenwerking met Kemper heeft geschreven, SIMDEUM gevalideerd aan de hand van meetgegevens van een hotel. SIMDEUM is in staat om de typische verbruikspatronen van een hotel realistisch weer te geven. Echter, er is nog ruimte voor verbetering in de aannames van het model.

Afnamepatronen zijn belangrijk voor het dimensioneren van leidingwaterinstallaties en voor de selectie van warmtapwaterbereiders. Afnamepatronen kunnen voorspeld worden met het stochastisch simulatiemodel SIMDEUM. SIMDEUM is door KWR ontwikkeld in het kader van het bedrijfstakonderzoek van de Nederlandse waterleidingbedrijven (Waterwijs) en Techniek Nederland en TVVL om huishoudelijke afnamepatronen van woningen en woongebouwen te kunnen voorspellen.[1] In 2009 is dit simulatiemodel uitgebreid om ook niet-huishoudelijk waterverbruik in de utiliteitsbouw te voorspellen. [2] SIMDEUM voorspelt zowel het totale waterverbruik als het verbruik over de dag goed voor verschillende typen woningen en verschillende categorieën in de utiliteitsbouw, namelijk kantoren, hotels en zorginstellingen.

Om te beoordelen of SIMDEUM ook geschikt is om het waterverbruik in een Duits gebouw te voorspellen heeft J. Brinkmann van Kemper dit als onderwerp voor zijn masterscriptie gekozen.[3] Het gebouw betreft een hotel uit 2002 in Noordrijn-Westfalen. Het hotel ligt 12 minuten rijden van een vliegveld en is 3 kilometer van een stadscentrum verwijderd, dus aantrekkelijk voor zakenreizigers. Het hotel omvat 150 tweepersoonskamers en telt in totaal zeven verdiepingen. Iedere kamer beschikt over een badkamer met douche, wastafel en closet. Op de begane grond is de keuken gesitueerd waar het ontbijt voor de gasten wordt voorbereid en het servies wordt afgewassen. In de twee kelderverdiepingen bevinden zich een technische ruimte en een ondergrondse parkeergarage.

Validatie met Simdeum

Het waterverbruik van het hotel is met behulp van volumestroommetingen in kaart gebracht, in SIMDEUM nagebouwd en vervolgens gesimuleerd en gevalideerd. Hiermee wordt nagegaan of het gebruikersgedrag goed kan worden nagebootst.

De drinkwaterinstallatie bestaat uit een koud- én warmwatercirculatiesysteem. Het koude en warme water circuleert alleen in de verdeelschachten en niet tot in de badkamer bij de tappunten. Aan het einde van de koudwaterstijgleidingen is een spoelgroep geïnstalleerd, die driemaal per week voor waterverversing zorgt. Dit simuleert een gebruik volgens de Duitse voorschriften. Elke maandag, donderdag en zondag van de week wordt van 5:00 uur tot 8:30 uur met regelmatige tussenpozen het drinkwater in de stijgleidingen achtereenvolgens ververst. In totaal verbruikt dit gemiddeld 2.850 liter drinkwater per week, dat wordt weggespoeld. Omdat de automatische spoeling zich beperkt tot de stijgleidingen kan niet worden gegarandeerd dat het gehele leidingnetwerk wordt doorstroomd omdat het drinkwater in ongebruikte badkamers in de leidingen kan blijven staan. De spoelvolumes veroorzaakt door de geautomatiseerde spoelingen zijn uit de meetgegevens verwijderd, zodat de validatie hierdoor niet wordt beïnvloed.

Meetperiode

De volumestromen werden gemeten van 8 mei tot en met 22 mei 2025 met vier ultrasone watermeters met clamp-on technologie, waarmee 15 meetpunten werden geregistreerd. De volumestroom van het drinkwater is gemeten nabij de watermeter en het warmtapwater nabij de warmtapwaterbereider. Bij de watermeter zijn ook de drinkwatertemperatuur en ruimtetemperatuur gemeten. Tevens werd separaat de volumestroom naar de keuken gemeten. Gedurende de meetperiode is de kamer- en bedbezetting geregistreerd. De gemiddelde bezetting was 1,08 personen per kamer.

Simulatie met Simdeum

Voor de simulatiesoftware van SIMDEUM is gebruik gemaakt van de MATLAB®-versie van SIMDEUM. Deze software is niet beschikbaar voor commerciële doeleinden. Echter, voor wetenschappelijk

onderzoek stelt het Nederlandse onderzoeksinstituut KWR de software op verzoek ter beschikking. SIMDEUM is voor onderzoek aan dit hotel vrijgegeven en kon daardoor worden gebruikt voor de simulatie van het drinkwaterverbruik.
Met SIMDEUM kan het watergebruik van woon- en niet-woongebouwen worden gesimuleerd. Het parametriseren van gebouwen, met name van niet-woongebouwen, vergt veel werk en gebeurt zonder grafische interface, via scripts, in de MATLAB-code. In het kader van haar proefschrift heeft M. Blokker verschillende simulatiebestanden met uiteenlopende, geparametriseerde hotelcategorieën opgesteld. Deze vormen de basis voor de simulatie van hotels en kunnen naar behoefte worden aangepast aan de eigenschappen van elk willekeurig hotel. Voor niet-woongebouwen, zoals kantoorgebouwen of verzorgingstehuizen, bestaan overeenkomstige sjablonen.
Om het drinkwatergebruik af te stemmen op het hotel zijn binnen SIMDEUM het watergebruik van hotelreiniging, hotelkamers, keuken (ontbijtbereiding en afwassen) en douches van het hotelpersoneel separaat beschreven. In overeenstemming met de aanbevelingen van SIMDEUM werden 100 onafhankelijke dagelijkse verbruikscurves gesimuleerd om de statistische betrouwbaarheid te verhogen.
De parametrisering van een hotel in SIMDEUM is complex en omvat zowel gebouwspecifieke als gebruiksgerelateerde factoren. Eerst wordt het type hotel geselecteerd (bijv. zaken-, toeristen-, theater- of conferentiehotel). Vervolgens worden operationele opties gedefinieerd, zoals het cateringaanbod van de keuken (ontbijt, lunch of diner) en aanvullende gebruikseenheden zoals hotelkamers, reiniging, verbruik door medewerkers of vergaderruimtes. Deze parameters sturen de generatie van stochastische gebruiksprofielen aan en bepalen daarmee de dynamiek van het drinkwaterverbruik.
Voor dit onderzoek is een zakenhotel met 150 kamers gemodelleerd. Om het onderzochte hotel zo goed mogelijk in SIMDEUM na te bootsen, zijn enige parameters van de hotelkamers aangepast.

Aangepaste parameters:

- Watertemperaturen: koud 10 °C en warm 60 °C
- Douchetemperatuur: 38 °C
- Tijdsinterval: één seconde
- Keuken: ontbijtbereiding en afwassen
- Overige toepassingen: schoonmaak van het hotel, waterverbruik van het personeel en de gasten in hotelkamers
- Vergaderruimtes: niet aanwezig

Door het aanpassen van de parameters zijn de uitgangspunten van het onderzochte hotel in de simulatie verwerkt en is de basis gelegd voor een betrouwbare validatie van de simulatiesoftware.

Validatie van de simulatie door meetresultaten

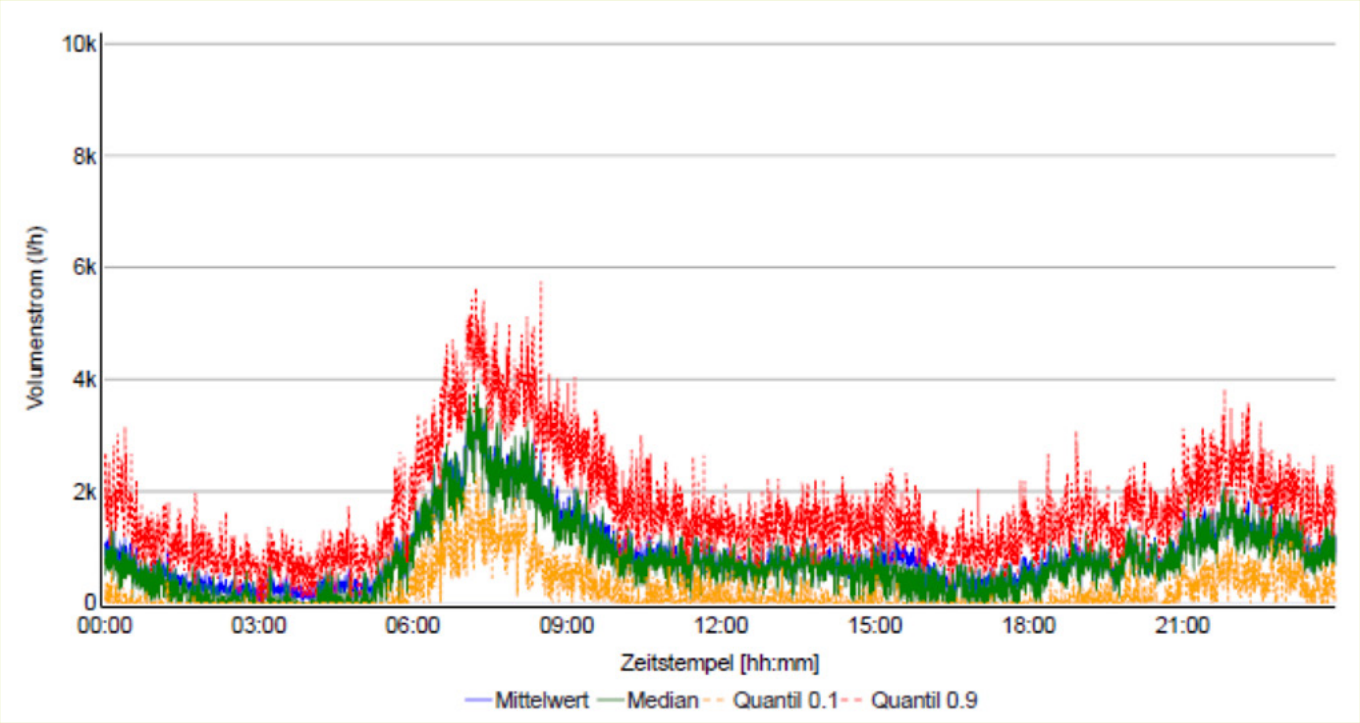
Het doel van de validatie is om te controleren of de in SIMDEUM geïmplementeerde stochastische processen geschikt zijn om het gebruikersgedrag in hotels realistisch weer te geven. Hiervoor worden de gemeten vraagprofielen vergeleken met de gesimuleerde dagelijkse belastingscurves. Daarnaast worden de gekozen parameters en gebruiksstatistieken onder de loep genomen.
Er wordt onderscheid gemaakt tussen de begrippen „dagelijkse verbruikscurve/dagelijkse verbruikscurves“ en „behoefteprofiel“. Dagelijkse verbruikscurves geven het drinkwaterverbruik weer van een afzonderlijke dag. Behoefteprofielen geven daarentegen het tijdsverloop weer van meerdere opeenvolgende dagelijkse verbruikscurves, waarbij het drinkwaterverbruik elkaar kan beïnvloeden. Behoefteprofielen maken het dus mogelijk om onderscheid te maken tussen weekdagen en weekenddagen.

Vergelijking van het waterverbruik

Voor een eerste beoordeling worden de gemeten volumestromen vergeleken met de gesimuleerde volumestromen, zie tabel 1. De gesimuleerde waarden komen sterk overeen met de gemeten waarden.

Maximum volume-stroom (l/h)		Verbruik per dag (l/dag)		Maximum uurverbruik (l/h)	
Bij watermeter					
Simulatie	Gemeten	Simulatie	Gemeten	Simulatie	Gemeten
5.949	5.793	19.924	21.094	2.264	2.732
Warmtapwater					
1.978	2.023	5.491	4.694	646	773

Tabel 1: *Vergelijking van de gemeten en gesimuleerde waarden van het hotel.*



Figuur 1. *Tijdsverdeling van de gemeten volumestroom bij de watermeter in intervallen van 10 seconden (gemiddelde, mediaan, 10-percentiel en 90-percentiel).*

Analyse van de gesimuleerde dagelijkse verbruikscurves

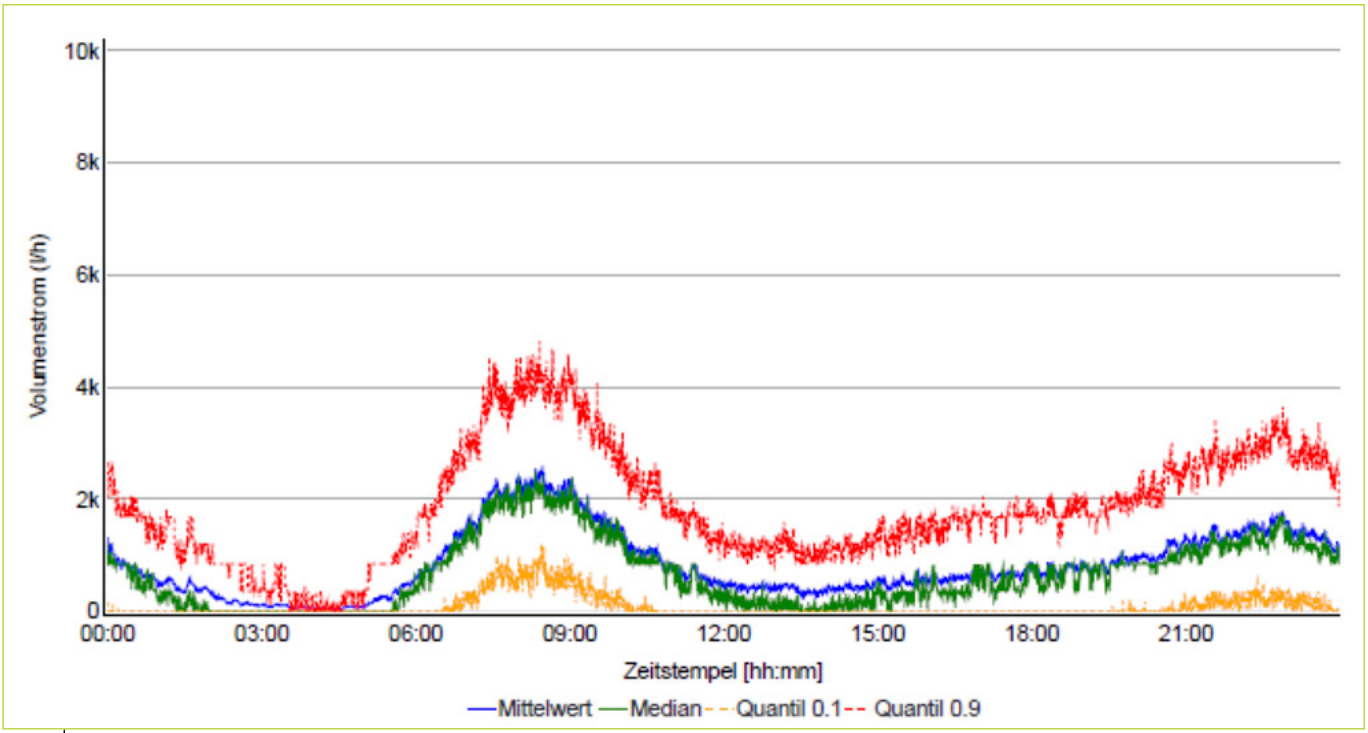
De dagelijkse verbruikscurves geven inzicht in de dynamiek van het drinkwaterverbruik. Om hier antwoord op te geven worden de gemeten verbruiksprofielen vergeleken met de gesimuleerde dagelijkse verbruikscurves. Figuur 1 toont de gemeten volumestroom bij de watermeter.

De X-as geeft het tijdstip over de dag weer en de Y-as de volumestroom in l/h. De weergave omvat het gemiddelde, de mediaan en het 10%- en 90%-percentiel. Vanaf deze percentielen worden uitschieters door minimale of maximale waarden afgebroken en dus geëlimineerd. Zo dienen de percentielen als bereikgrenzen om typische verbruikspatronen te identificeren en het typische bereik aan te geven waarin de volumestroom over de tijd is verdeeld.

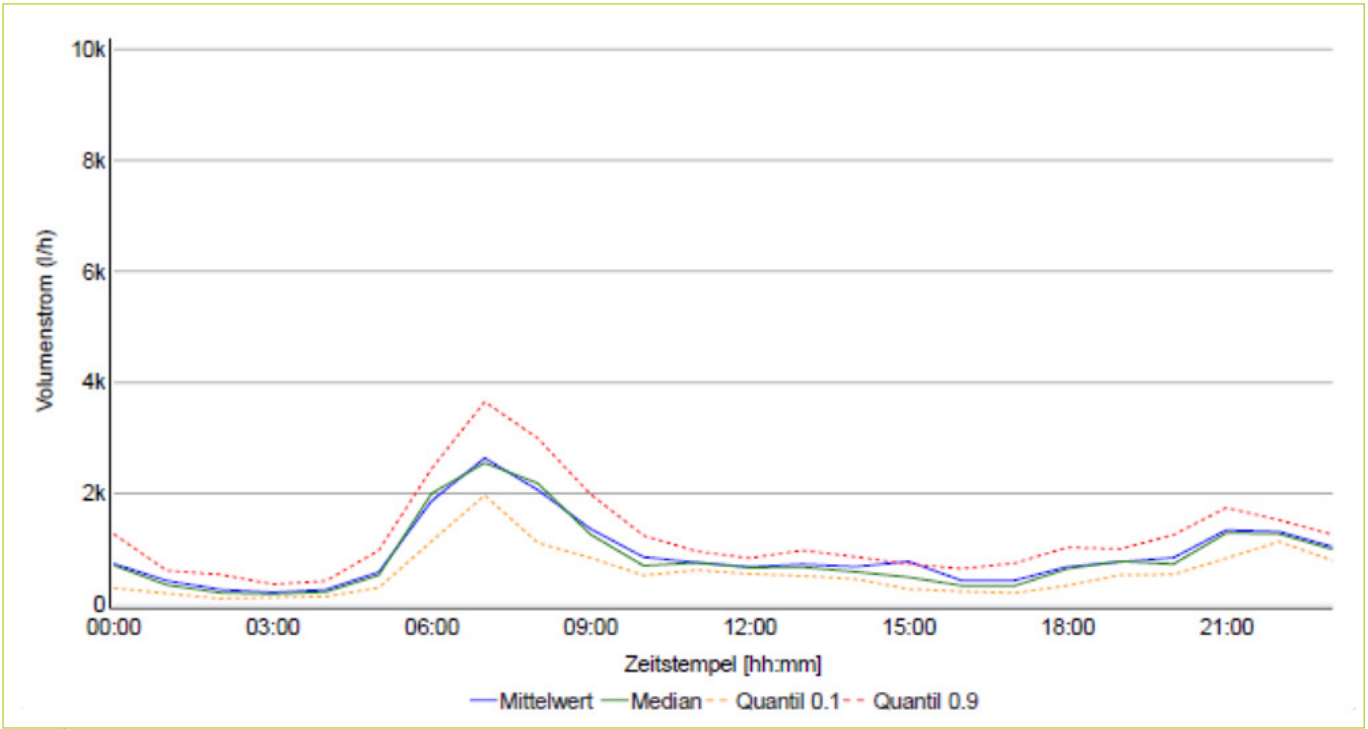
De analyse laat zien dat piekvolumestromen 's ochtends en 's avonds optreden – op momenten dat de meeste gasten in het hotel verblijven. Het 10%-percentiel bereikt op deze momenten gedurende meerdere uren een niveau dat duidelijk boven nul ligt. Dit wijst op een algemeen verhoogd drinkwaterverbruik op deze tijdstippen van de dag.

Stagnaties treden vooral 's nachts (1 - 5 uur) en 's middags (15 - 18 uur) op – herkenbaar aan het lage niveau van het 10%-kwantiel en de mediaanwaarden. Het feit dat de mediaan en het gemiddelde over de dag dicht bij elkaar liggen, duidt op een symmetrische verdeling van de volumestroom.
Figuur 2 toont het typische bereik van de volumestroom bij de watermeter voor de 100 dagen die in SIMDEUM zijn gesimuleerd.

Uurgemiddelden geven geen inzicht in de hoogfrequente volumestroomveranderingen of piekvolumestromen. De uurgemiddelden geven wel informatie over de verdeling over de dag en de voorspellingskwaliteit van het drinkwaterverbruik (zie figuur 3). Ook kunnen optimalisatiemogelijkheden in de simulatie van het dagverloop worden herkend.
Het uurgemiddelde van de volumestroom vermindert de spreiding van de uurverdeling van de volumestroom aanzienlijk. Het 10%- en 90%-percentiel komen dichter bij de mediaan en het gemiddelde te liggen. In periodes met een kleine spreiding is de voorspellingsnauwkeurigheid voor het uurverbruik van drinkwater hoog, terwijl grotere variaties wijzen op een lagere voorspellingskwaliteit. Vooral 's ochtends is de spreiding het grootst, wat de voorspelling van het uurverbruik van drinkwater bemoeilijkt. 's Nachts en 's middags daarentegen neemt de voorspellingskwaliteit voor het drinkwaterverbruik toe en kunnen nauwkeurigere voorspellingen worden gedaan. Dit wordt veroorzaakt door de lagere variatie en spreiding van de verdeling op deze tijdstippen. Tot in de middaguren komen de gesimuleerde en gemeten gebruiksprofielen goed overeen. In de avonduren overschat de simulatie het waterverbruik ten opzichte van de gemeten waarden, deze periode biedt potentieel voor optimalisatie.



Figuur 2. *Verdeling van de gesimuleerde volumestroom over een dag in intervallen van 10 seconden (gemiddelde, mediaan, 10-percentiel en 90-percentiel).*



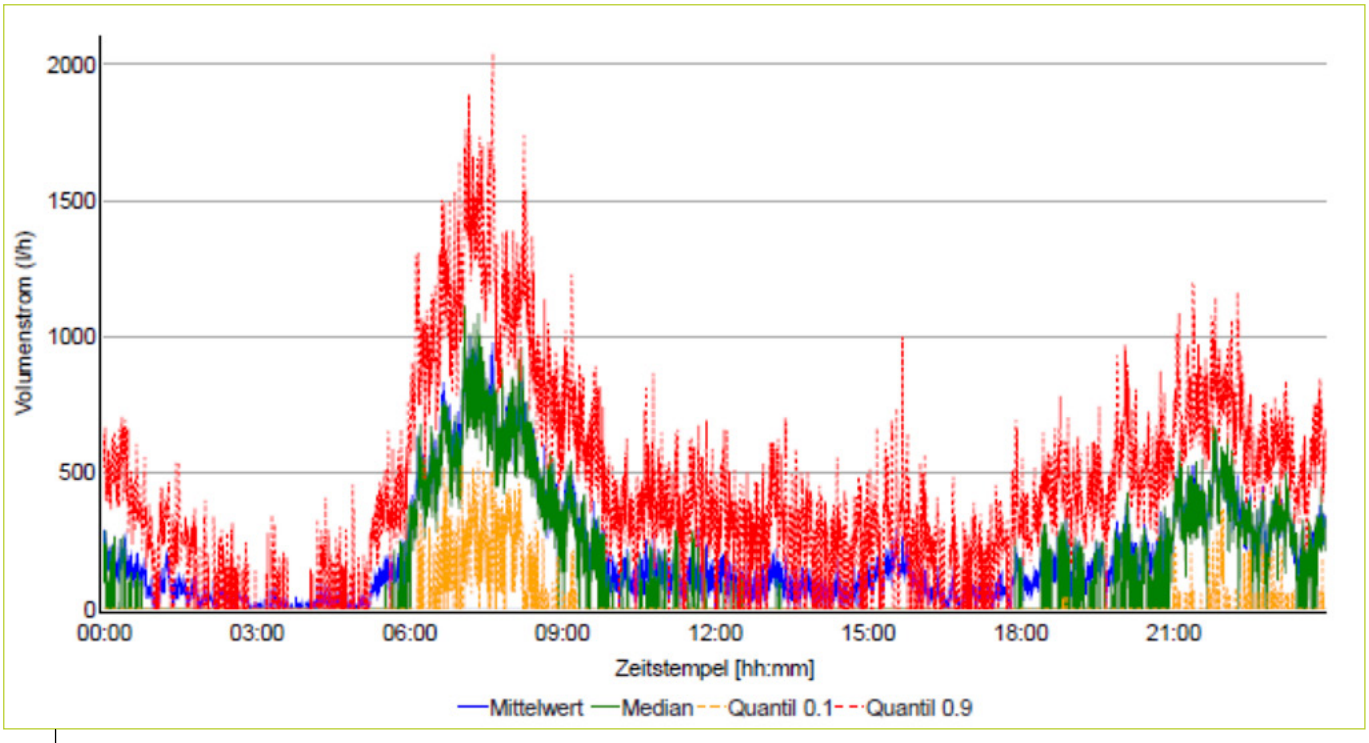
Figuur 3. *Verdeling van de gemeten gebruiksprofielen (l/h) over een dag in intervallen van een uur.*

Analyse van de warmwaterbehoefte

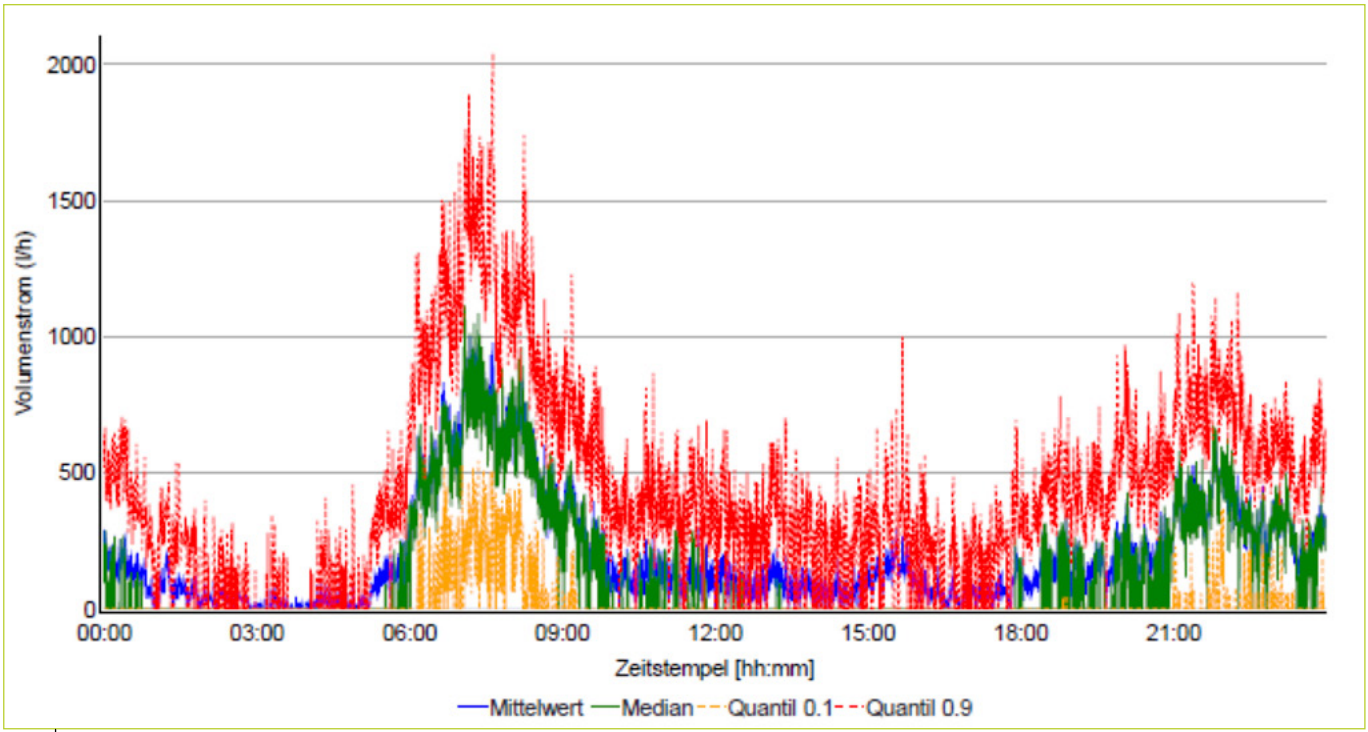
Het warmwaterverbruik is apart geanalyseerd, omdat de gebruikstemperatuur een aanzienlijke invloed heeft op de totale drinkwaterbehoefte en de verdeling daarvan in warm- en drinkwaterverbruik. Figuur 4 toont de gemeten verbruikscurve van het warmwaterverbruik over een dag.

Het warmwaterverbruik is aanzienlijk minder dan de totale volumestroom bij de watermeter. De mediaan ligt 's nachts en 's middags vaak op nul, terwijl het gemiddelde tussen 100 l/h en 200 l/h ligt. Dit duidt op frequente stagnaties en slechts incidentele verbruikspieken op deze tijdstippen. In deze periode domineert het drinkwaterverbruik, dat stagnatie bij de watermeter voorkomt. 's Ochtends en 's avonds ligt het 10%-percentiel gedurende langere perioden duidelijk boven nul. Dit wijst, analoog aan het totale drinkwater-behoefteprofiel, op een hoge verbruiksactiviteit. In deze periodes bevinden zich ook de piekvolumestromen in het vraagprofiel van het totale drinkwaterverbruik en het warmtapwaterverbruik. Figuur 5 geeft het volumestroombereik van de dagelijkse belastingscurve van de 100 gesimuleerde warmwaterverbruiken weer.

Het gesimuleerde gemiddelde warmtapwaterverbruik ligt onder het gemeten gemiddelde warmtapwaterverbruik. Bovendien zijn de gesimuleerde verbruikspieken in de ochtend en avond over een langere periode verspreid. Dit leidt tot een hoger dagverbruik bij tegelijkertijd lagere piekdebieten – een optimalisatie in de loop van de dag zou bestaan uit smallere verbruikspieken met hogere intensiteiten via het Poisson-proces.
Analoog aan het gesimuleerde drinkwaterprofiel zijn ook in het gesimuleerde warmwaterprofiel constant horizontale debieten in het 90%-percentiel te zien. De mediaan vertoont, afhankelijk van het tijdstip van de dag, constante volumestromen (horizontale lijn na 21.00 u) en nulwaarden. De nulwaarden duiden op frequente stagnatie met lange verblijftijden. Deze zijn ook herkenbaar in het werkelijk gemeten profiel. De aanname die in SIMDEUM is gedaan, is dus zeer treffend. De simulatie gaat uit van een zeer lage activiteit tussen 01.00 en 06.00 uur – een realistisch patroon. Vanaf 15.00 uur stijgt het gesimuleerde verbruik, terwijl de meetgegevens in deze periode tot 18.00 uur een vrijwel constante nulwaarde in de mediaan tonen. Dit wijst op verdere optimalisatiemogelijkheden in de modelleringsaanpak van SIMDEUM.



Figuur 4. *Verdeling van het gemeten warmwaterverbruik over een dag in intervallen van 10 seconden (gemiddelde, mediaan, 10-percentiel en 90-percentiel).*



Figuur 5. *Verdeling van de volumestroom van de gesimuleerde dagelijkse warmwaterverbruikscurves met intervallen van 10 seconden (gemiddelde, mediaan, 10-percentiel en 90-percentiel).*

Conclusie over de validatie

Uit de validatie blijkt dat SIMDEUM in staat is om typische verbruikspatronen van een hotel realistisch weer te geven. Verschillen in de variantie en de tijdsverdeling van de piekdebieten wijzen op kansen voor verdere verbeteringen door te spelen met de aannames van het model, met name bij het modelleren van het warmwaterverbruik en het gebruik in de avonduren.
De resultaten bevestigen dat stochastische processen in principe geschikt zijn voor het simuleren van niet-woongebouwen, maar benadrukken ook het belang van een zorgvuldige parametrisering en kritische bijstelling. ■

Referenties
[1] E.J. Pieterse-Quirijns , H. Beverloo, KWR, Validatie rekenregels voor waterverbruik woontorens, KWR 2013.016, januari 2013
[2] E.J. Pieterse-Quirijns, KWR, ST-27 Rekenregels voor waterverbruik in utiliteitsbouw; Bepalen van maximum volumestroom en warmwaterverbruik met SIMDEUM®, september 2010
[3] J. Brinkmann, Kemper, Duitsland, Masterarbeit 'Konzeptentwicklung eines stochastischen Simulationsmodells für dynamische Betriebszustände und gebäudetypische Bedarfsprofile in Trinkwasserinstallationen', 13 november 2025
[4] M. Blokker, KWR, Nederland, Stochastic water demand modelling for a better understanding of hydraulics in water distribution systems, 2010



Jonas Brinkmann



Walter van der Schee