

TNO-rapport**TNO 2020 R10228****TKI Optimaal – Predicting domestic hot water
flow using only temperature measurements****Building, Infrastructures &
Maritime**Leeghwaterstraat 44
2628 CA Delft
Postbus 6012
2600 JA Delftwww.tno.nl

T +31 88 866 22 00

Datum	18 maart 2020
Auteur(s)	F.G.H. Koene
Aantal pagina's	29
Aantal bijlagen	--
Opdrachtgever	
Projectnaam	
Projectnummer	060.19794

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2020 TNO

Samenvatting

Binnen dit deel van het project is er gekeken of het mogelijk is om op basis van een temperatuursensor op de warm tapwaterleiding een voorspelling te kunnen maken van het warm waterverbruik. Dit om het gebruik van een veel duurdere flowmeter of het gebruik van gegevens over gebruiksgedrag overbodig te maken.

Voor het uitvoeren van deze onderzoeksvraag is er meetdata beschikbaar van in totaal negen woningen. De meetperiode beslaat ongeveer één jaar. In de meetdata zijn zowel waarden beschikbaar van de temperatuursensor op de warm tapwaterleiding als van een flowmeter die in deze leiding is geplaatst. Die laatste is bedoeld om de methode tijdens de ontwikkeling te toetsen.

Om een voorspelling te maken van het warm waterverbruik is er eerst een model gemaakt over het gedrag van de temperatuursensor ten gevolge van de flow van warm water en de omgeving. Daarna is er een algoritme ontwikkeld op basis van een aantal criteria en het model. Dit algoritme heeft een aantal parameters die nog bepaald moeten worden.

In de rapport zijn de “optimale” (per woning) parameters berekend alsmede “generieke” parameters, die ongeveer de gemiddelde waarde hebben van alle parameters in de 9 woningen. Deze parameters gaan over het gemiddeld debiet, de kleinste tappingen en over de detectiegrens. Bij gebruik van optimale parameters kan het gebruikte algoritme het totale warm tapwaterverbruik, gemeten met een waterverbruiksmeter, goed reproduceren. Echter voor het bepalen van die parameters is gebruik gemaakt van de flowmeter. Bij gebruik van generieke parameters ligt het verschil tussen berekend en gemeten warm tapwaterverbruik in de range van -20% tot +30%, met een enkele uitschieter van -50%. Los van de vraag of deze spreiding acceptabel is, is het vraag of de generieke parameters echt generiek toepasbaar zijn.

Waarschijnlijk wordt een aantal parameters in het algoritme mede bepaald door de fysieke inrichting van de tapwatervoorziening, zoals:

- 1 de lengte van de leiding tussen boiler en (meest gebruikte) tappunt en
- 2 de doorstroom capaciteit van het warm tapwatersysteem (leiding lengte en diameter en het type douchekop).

Dit verband is in deze studie niet onderzocht, maar zou mogelijk tot een reproduceerbare voorspelling voor individuele woningen data kunnen leiden. Daarbij zou dan het gebruik van flowmeter data of andere gedragsdata niet meer nodig zijn. Daarbij zal een kortere meetinterval (1 minuut of minder) van de metingen naar verwachting de inschatting van kleine tappingen ten goede komen en heeft naar alle waarschijnlijkheid een positief effect op het resultaat. Mogelijk moet het algoritme hierop worden aangepast.

Kortom, op dit moment lukt het nog onvoldoende om het warm tapwatergebruik in te schatten op basis van uitsluitend een temperatuursensor op de warm

waterleiding. We verwachten dat het mogelijk moet zijn om de parameters uit de algoritmen te koppelen aan de fysieke inrichting van de tapwatervoorziening en zo met uitsluitend de temperatuursensor, maar zonder verdere gedragsinformatie het warm tapwatergebruik voldoende nauwkeurig te voorspellen.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	5
2	Ondertekening	6
3	Metingen	7
4	Model	8
4.1	Bepaling modelparameters uit de metingen	9
5	Algoritme voor bepaling tapduur uit T_s.....	10
5.1	Verandering van de sensor temperatuur $\Delta T_s/\Delta t$	10
5.2	Wel of geen warmwaterflow	10
5.3	Tapduur	11
6	Vergelijking tapwatergebruik uit T_s en gemeten met watermeter.....	12
6.1	Bepaling van de fractie f , de gemiddelde warm tapwaterflow en de korte tapduur.	13
6.2	Afwijkend watergebruik.....	17
7	Resultaten	18
7.1	Stap 1. Tapvolume en aantal taps bij 'optimale' parameters	18
7.2	Stap 2. Tapvolume en aantal taps bij 'generieke' parameters	22
7.3	Voorkomen tapduren en bijbehorend tapvolume.	23
8	Conclusies.....	29

1 Inleiding

Binnen dit deel van het TKI Toeslag project Optimaal wordt gekeken naar de mogelijkheid om op basis van temperatuurmetingen op de warm waterleiding een voorspelling te doen over de afgenomen hoeveelheid warm tapwater. Het grotere doel zou zijn om de flow te bepalen met een relatief goedkope temperatuursensor in plaats van met een veel duurdere flowmeter.

Voor dit deelproject is meetdata beschikbaar van in totaal negen woningen verdeeld over 2 locaties in Nederland, Emmen en Ermelo. De ene locatie betreft nieuwbouw woningen, de andere locatie gerenoveerde woningen. De meetperiode beslaat ongeveer één jaar.

In de meetdata zijn zowel waarden beschikbaar van de temperatuursensor op de warm tapwaterleiding als van een flowmeter die in deze leiding is geplaatst.

Binnen dit deelproject is er een model gemaakt voor de respons van de temperatuursensor ten gevolge van de flow van warm water alsmede de temperatuur van de omgeving.

Vervolgens is er een algoritme ontwikkeld op basis van dit model in combinatie met een aantal criteria. Voor het algoritme moeten nog een aantal parameters worden afgeleid, dit is per woning gedaan, maar er zijn ook generieke parameters afgeleid voor de gehele set om de methode ook generiek toepasbaar te maken.

Het algoritme in combinatie met de gevonden parameters is gebruikt om de tap volumes uit te rekenen. Deze zijn vergeleken met de gemeten waarde op basis van de flowmeter.

2 Ondertekening

Delft, 18 maart 2020

TNO



Ir. A.C. Westerlaken
Research Manager



F.G.H. Koene
Auteur

3 Metingen

Voor deze studie is er meetdata beschikbaar vanuit het project TKI Optimaal. In de meetset van die project is er bewust voor gekozen om zowel een flowmeter te installeren in de leiding van het warme tapwater als mede een temperatuur sensor op de leiding. De meetdata is beschikbaar voor 9 woningen, 4 in Emmen en 5 in Ermelo.

De metingen van de temperatuur en het waterverbruik in Emmen zijn gedaan tussen september 2017 en juni 2018, met een meetinterval van 2-6 minuten. Af en toe is de afstand tussen de datapunten groter (10-15 minuten) dit komt door verstoringen in de communicatie tussen de sensor en de uiteindelijke locatie waar de data word opgeslagen.

De metingen in Ermelo hebben tussen november 2017 en december 2018 plaatsgevonden. Deze metingen zijn gedaan met een interval van 2-5 minuten. Vanwege de lengte van de databestanden zijn de metingen van de woningen in Ermelo gesplitst in twee bestanden, één van november 2017 t/m mei 2018 en één van juni 2018 t/m dec 2018. Op die manier zijn er 4 databestanden van Emmen en 2x5 =10 databestanden van Ermelo geanalyseerd.

De temperatuurmetingen hebben een resolutie van 0,04°C, de watermetingen een resolutie van 1 liter. De resolutie zegt overigens niets over de nauwkeurigheid van de meting.

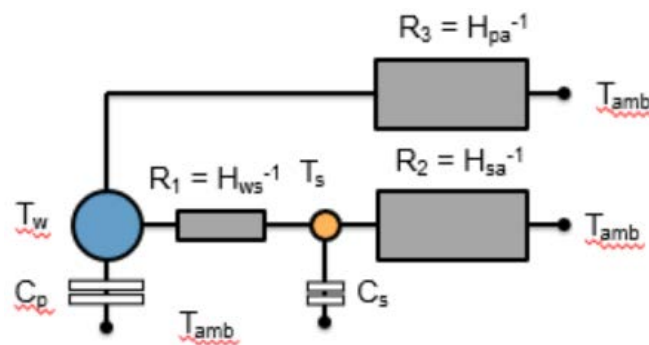
Het voorschrift aan de installateur was om de temperatuursensor met tie-raps op de warm waterleiding te bevestigen, en over een lengte van ca. 5 cm te omgeven met een stuk isolatieschuim, zoals geïllustreerd in Figuur 1. Door de isolatie wordt de warmte die via de warm waterleiding naar de sensor stroomt, niet te snel aan de omgeving afgestaan. In het begin van het volgende hoofdstuk wordt hier verder op in gegaan.



Figuur 1 Sensor op de warm waterleiding omgeven door een stuk isolatieschuim.

4 Model

De sensor met de leiding is voorgesteld door een model zoals weergegeven in Figuur 2. De thermische massa van de waterleiding is aangegeven als C_p , deze verliest warmte aan de omgeving via de buiswand door middelen van convectie en straling. De warmteweerstand voor het warmteverlies wordt weergegeven als een weerstand (R_3). De sensor met thermische massa C_s wordt geplaatst direct op de buitenkant van de buis. En ontvangt warmte via transmissie met warmteweerstand R_1 . Vervolgens staat de sensor de warmte weer af aan de omgeving. Door de warmteweerstand tussen de sensor en omgeving R_2 zo hoog mogelijk te maken zal de temperatuur van de sensor zo dicht mogelijk bij de temperatuur van het water komen. Daarom is er voor gekozen de sensor goed te isoleren door middel van isolatieschuim. Middels het model wordt de tijdsconstante van opwarming en afkoeling bepaald. Welke in het algoritme (zie hoofdstuk 5) wordt toegepast.



Figuur 2 Model van de leiding met daarop bevestigd de sensor.

Hierin zijn de volgende variabelen gebruikt.

Watertemperatuur T_w

Er is verondersteld dat de watertemperatuur T_w ter plekke van de sensor instantaan de boiler temperatuur aanneemt zodra de warm waterkraan wordt geopend. Als de warm waterkraan wordt gesloten, staat de gehele leiding met thermische massa C_p warmte af aan de omgeving met temperatuur T_{amb} via de warmteweerstanden R_1 en R_2 en via R_3 . De vervangingsweerstand van deze drie weerstanden wordt aangeduid met R_v . De mate van afkoeling wordt bepaald door de RC-waarde $R_v \cdot C_p$ (of de tijdsconstante of $1/(R_v \cdot C_p)$ in sec).

Sensortemperatuur T_s

Via de warmteweerstand R_1 wisselt de sensor met thermische massa C_s , warmte uit met de met water gevulde leiding waar hij op is bevestigd. Via de warmteweerstand van de isolatie R_2 staat de sensor warmte af aan de omgeving met temperatuur T_{amb} .

Boilertemperatuur

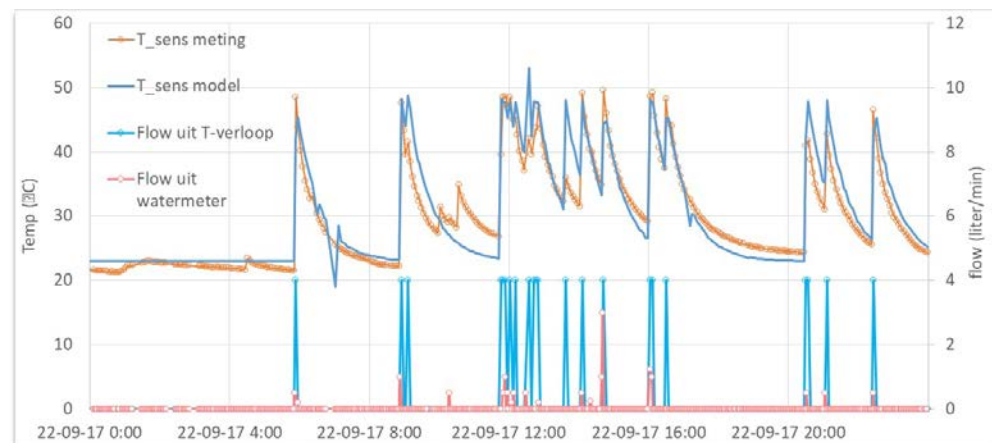
De temperatuur van het water in het boiler vat hangt af van de instellingen van de boiler en verschilt van woning tot woning. Om het model algemeen toepasbaar te maken, wordt boilertemperatuur bepaald uit de meetdata en wel als het maximum van de sensortemperatuur van de afgelopen 24 uur, plus een vaste waarde (typisch 4 °C). De reden daarvoor is dat er – ook bij constante warm waterflow - een temperatuurverschil zal bestaan tussen water en sensor en de sensor dus altijd een lagere waarde zal meten dan de boilertemperatuur.

Omgevingstemperatuur T_{amb}

De omgevingstemperatuur hangt o.m. af van de opstelling van de warmteopwekker (ketel, warmtepomp of anders) en van het seizoen. Om het model algemeen toepasbaar te maken, wordt omgevingstemperatuur bepaald uit het minimum van de sensortemperatuur van de laatste 24 uur. Daarbij wordt aangenomen dat er in die 24 uur een periode was dat er geen warmtevraag was en de sensor naar de omgevingstemperatuur is afgekoeld.

4.1 Bepaling modelparameters uit de metingen

Een belangrijke modelparameter is R_v : de vervangingsweerstand van R_1 , R_2 en R_3 in Figuur 2. Deze bepaalt (samen met de capaciteit van de waterleiding C_p) de afkoeling van de sensor en daarmee het moment dat de warm waterflow stopt (zoals in paragraaf 5 zal worden bediscussieerd). De waarde van R_v is handmatig gevarieerd om een zo goed mogelijke overeenstemming te bereiken tussen gemeten en met het model berekende afkoeling van de sensor, zoals in Figuur 3 geïllustreerd.



Figuur 3 Gemeten en met het model berekende temperatuur van de sensor. De waarde van R_v C_p is handmatig gevarieerd om een zo goed mogelijke overeenstemming tussen gemeten en berekende afkoeling te verkrijgen. Eveneens weergegeven de met het algoritme uit hoofdstuk 5 berekende momenten van waterflow en gemeten waterflow (resp. lichtblauwe en roze lijn).

5 Algoritme voor bepaling tapduur uit T_s

In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op het algoritme dat gebruikt is om op basis van de gemeten temperatuur de tapduur vast te stellen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de tijdsconstante welke met het model uit het vorige hoofdstuk is afgeleid. Het algoritme voor het vaststellen van de tapduur omvat een aantal stappen.

- Bepalen van de verandering van de sensor temperatuur $\Delta T_s/\Delta t$
- Bepalen of er wel of niet flow van warm tapwater is aan de hand van de verandering van de sensortemperatuur en de tijdsconstante.
- Bepaling van de tapduur.

5.1 Verandering van de sensor temperatuur $\Delta T_s/\Delta t$

De meting van de sensortemperatuur is altijd behept met een zekere mate van ruis. Die ruis wordt uitvergroet bij het berekenen van de afgeleide van de sensortemperatuur $\Delta T/\Delta t$. In eerste versies van het algoritme was de ruis verminderd door het toepassen van een 'smoothing' functie. Echter, door het vrij lange meetinterval (2-6 min) verstoorde deze functie met name het profiel van de (relatief snelle) opwarming bij opening van de warm waterkraan. Daarom is uiteindelijk toch de afgeleide $\Delta T/\Delta t$ van de niet-gladgestreken sensortemperatuur gebruikt.

5.2 Wel of geen warmwaterflow

Er wordt flow van warm tapwater verondersteld als aan twee criteria is voldaan:

- 1 de sensortemperatuur stijgt, is constant is of daalt licht EN
- 2 de sensor temperatuur ligt boven een drempelwaarde.

Voor de toegestane waarden van de stijging en daling van de sensortemperatuur is niet een vaste waarde (in K/s) genomen, maar een percentage van de daling die we zouden verwachten als de flow van warm tapwater wordt afgesloten. Zoals we in hoofdstuk 4 zagen, wordt de daling vooral bepaald door de waarde van de tijdsconstante $R_v \cdot C_p$. Het criterium voor flow als volgt genomen.

$$\text{Flow als } \Delta T_s/\Delta t > f \cdot (T_{\text{amb}} - T_s) / (R_v \cdot C_p) \quad ^1$$

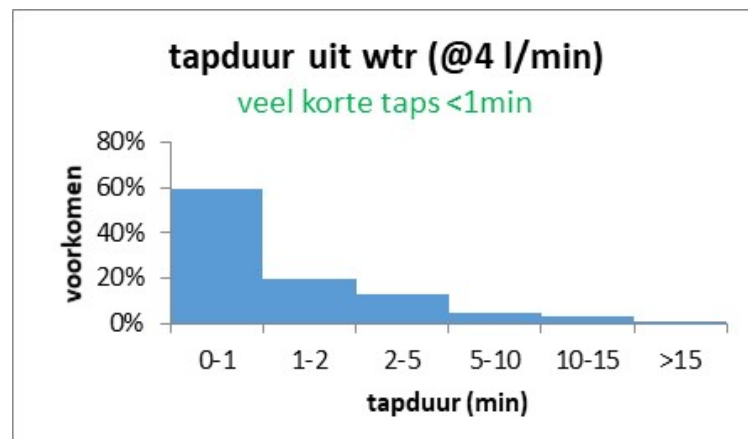
Met f een nog te bepalen fractie in de range van 10-30%. De sensor kan – bij afwezigheid van een warm water flow – langzaam opwarmen doordat de omgevingstemperatuur oploopt.

¹ $(T_{\text{amb}} - T_s) / (R_v \cdot C_p)$ is doorgaans een negatieve waarde. Stijging van de sensortemperatuur geeft positieve waarden voor $\Delta T_s/\Delta t$, voldoet dus aan het criterium en duidt op flow. Geringe dalingen van de sensortemperatuur geven geringe negatieve waarden voor $\Delta T_s/\Delta t$ en duiden eveneens op flow. Grotere dalingen van de sensortemperatuur geven grotere negatieve waarden voor $\Delta T_s/\Delta t$, en voldoen daarmee niet meer aan het criterium voor flow.

Om te voorkomen dat dit wordt geïnterpreteerd als flow van warm tapwater is een drempelwaarde van de sensortemperatuur als tweede criterium voor warm waterflow genomen (typisch 35°C).

5.3 Tapduur

Zoals we in hoofdstuk 7 zullen zien duidt een analyse van het gemeten warm watergebruik (Figuur 4) er op dat er relatief vele korte taps zijn. Uitgaande van een constante flow van warm tapwater van 4 liter/min laat de analyse zien dat er veel korte taps van 1 minuut of korter zijn, zoals voor kort handen wassen.



Figuur 4 Gemeten tapduur uit Ermelo1 tussen nov 2017 en mei 2018, berekend uit het gemeten tapvolume en een constante flow van 4 l/min.

Het meetinterval van de temperatuurmetingen is 2-6 minuten en af en toe langer als er een of meerdere metingen wegvallen. Aangezien de korte tappingen korter duren dan één meetinterval, moet hiervoor worden gecorrigeerd.

Het algoritme neemt daarom aan dat, als er in één enkel meetinterval aan de criteria voor flow is voldaan, er sprake was van een korte tap, met een vast aangenomen lengte van typisch 0,4 minuten. De duur van de korte tap wordt achteraf gefit aan de hoeveelheid warm tapwater over de gehele meetduur van typisch ½ -1 jaar, zie verder paragraaf 6.1.

Als aan het criterium van flow in twee of meer opeenvolgende meetintervallen wordt voldaan, wordt verondersteld dat het om een langere tapduur gaat (zoals douchen). De tapduur wordt in dat geval berekend uit de som van de meetintervallen waarin aan de criteria voor flow is voldaan, maar met de vaste korte duurduur van 0,4 minuten in plaats van de duur van het laatste meetinterval met flow. In pseudocode:

```

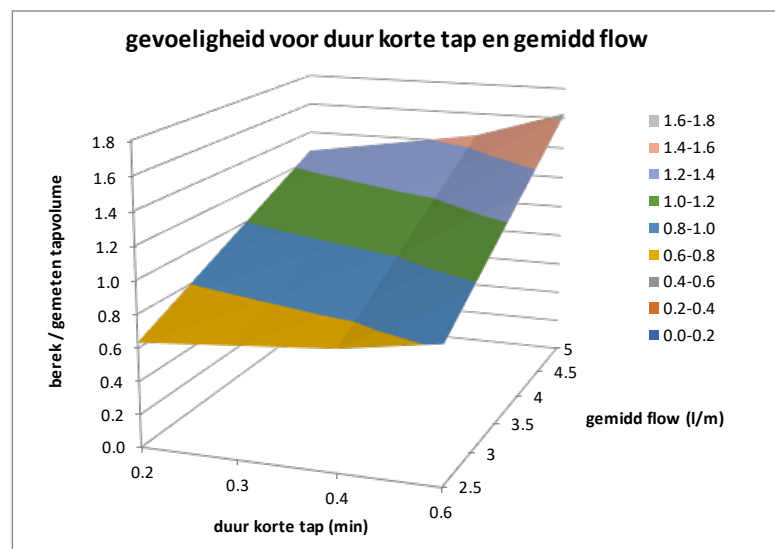
If flow then
  If flow in volgend interval then
    tapduur = tapduur+meetinterval
  else
    tapduur = tapduur+0,4min
  
```

6 Vergelijking tapwatergebruik uit T_s en gemeten met watermeter

Het algoritme beschreven in hoofdstuk 5 bepaalt de tapduur, uitgaande van -een nog te bepalen – fractie f en duur van een 'korte tap'. Om de zo bepaalde totale tapduur te vertalen naar een totaal tapvolume, moet de tapduur worden vermenigvuldigd met een – eveneens nog te bepalen – gemiddelde flow.

Er blijven dus nog drie parameters ² te bepalen: de fractie f , de korte tapduur en de gemiddelde flow. De waarden van deze parameters bepalen gezamenlijk het totale tapvolume.

Bij gegeven f bepalen de korte tapduur en de gemiddelde flow het totale tapvolume. Ter illustratie is in Figuur 5 de verhouding weergegeven tussen berekend en gemeten tapvolume (idealiter 1,0) voor Ermelo 1 voor verschillende waarden van de korte tapduur en de gemiddelde flow.



Figuur 5 Verhouding tussen berekend en gemeten tapvolume (idealiter 1,0) voor verschillende waarden van de duur van de korte tap en de gemiddelde flow (Ermelo 1).

Het blijkt dat er meerdere combinaties van korte tap en de gemiddelde flow zijn waarbij de verhouding tussen berekend en gemeten tapvolume gelijk aan 1,0 is. Er is daarom nog een procedure nodig om de fractie f , de korte tapduur en de gemiddelde flow het totale tapvolume te kunnen bepalen.

² Strikt genomen is er nog een parameter, namelijk de drempelwaarde voor de temperatuur in het tweede criterium voor flow. Dit is echter geen kritische parameter. In alle analyses is een vaste waarde van 35°C aangehouden. Dat zou nog veralgemeend kunnen worden door de drempelwaarde af te laten hangen van de omgevingstemperatuur, bv $T_{drempel} = T_{amb} + 10$ (zie hoofdstuk 4).

6.1 Bepaling van de fractie f , de gemiddelde warm tapwaterflow en de korte tapduur

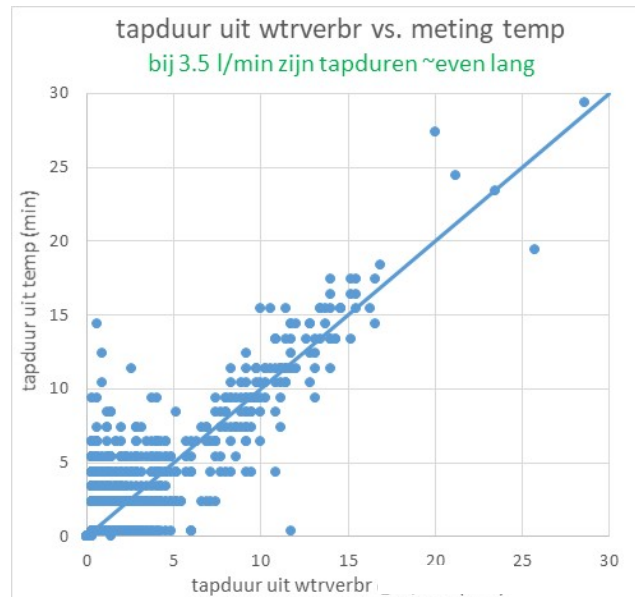
De gevolgde procedure houdt in het vergelijken van de tapduur van elke tap op basis van het temperatuurverloop en de tapduur op basis van het waterverbruik. Daarbij is in eerste instantie een fractie f aangenomen van 20% en een korte tapduur van 0,4 minuten.

De tapduur uit het temperatuurverloop is afgeschat zoals in hoofdstuk 5 besproken: flow geconstateerd in één enkel meetinterval duurt 0,4 minuten, de flow gemeten in meerdere aanéénsluitende meetintervallen duurt de tijdsduur van de betreffende meetintervallen en 0,4 min in plaats van het laatste meetinterval.

Het waterverbruik wordt gemeten met een meetinterval van typisch 2-5 minuten en met een resolutie van 1 liter. Indien in een bepaald meetinterval de watermeter een verbruik van 1 liter aangeeft (een korte tap), dan is de gemiddelde flow in dat interval 1 liter per 2 min tot 1 liter per 5 min (afhankelijk van de lengte van het betreffende meetinterval). Deze $1/5$ - $1/2$ l/min is veel lager is dan de actuele flow.

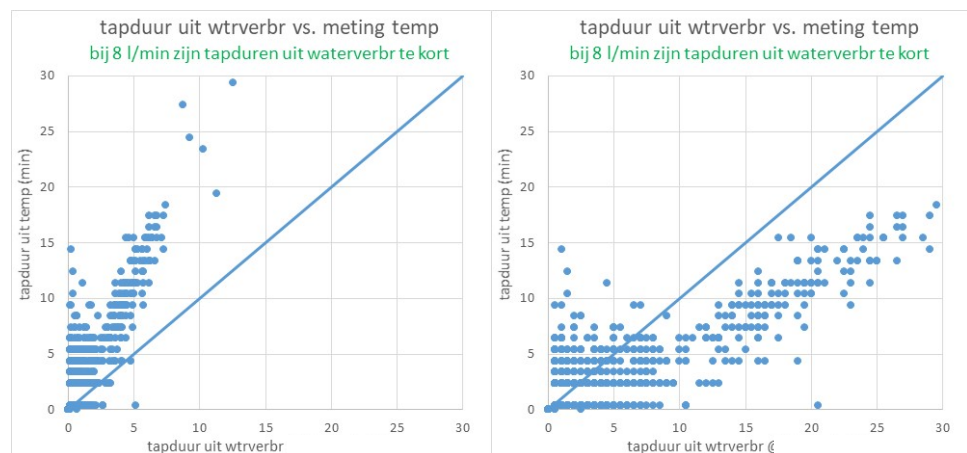
Daarom nemen we een hogere flow aan van (bijvoorbeeld) 4 l/min, en is de tapduur in dat interval gelijk aan 1 liter (het gemeten watervolume in het meetinterval) / 4 l/min = $1/4$ min. Op die manier is het gemeten watervolume van alle taps omgerekend naar een tapduur.

Vervolgens zijn die tapduren vergeleken met de tapduren uit het temperatuurverloop. In Figuur 6 zijn de tapduren uit het temperatuurverloop uitgezet tegen de tapduren uit het waterverbruik voor één van de woningen. In deze figuur is een gemiddelde flow aangenomen van 3,5 l/min. Zoals te zien komen de tapduren goed overeen.



Figuur 6 Vergelijking tussen tapduur berekend uit de temperatuurmeting en uit het waterverbruik voor Ermelo1 bij $f = 20\%$, korte tapduur = 0,4 min en gemiddelde flow = 3,5 l/min.

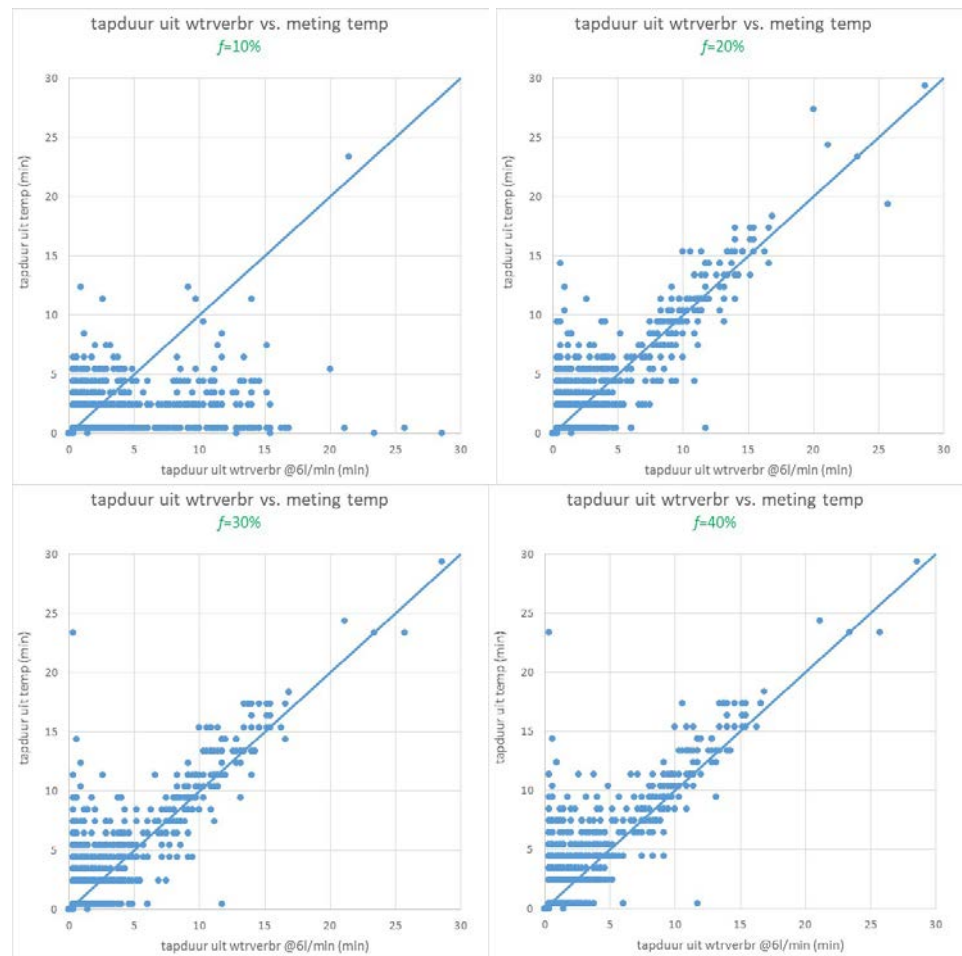
De exercitie is herhaald voor respectievelijk 8 l/min en 2 l/min (zie Figuur 7).



Figuur 7 Vergelijking tussen tapduur berekend uit de temperatuurmeting en uit het waterverbruik voor Ermelo1 bij $f = 20\%$, korte tapduur = 0,4 min en gemiddelde flow = 8 l/min (links) resp. 2 l/min (rechts).

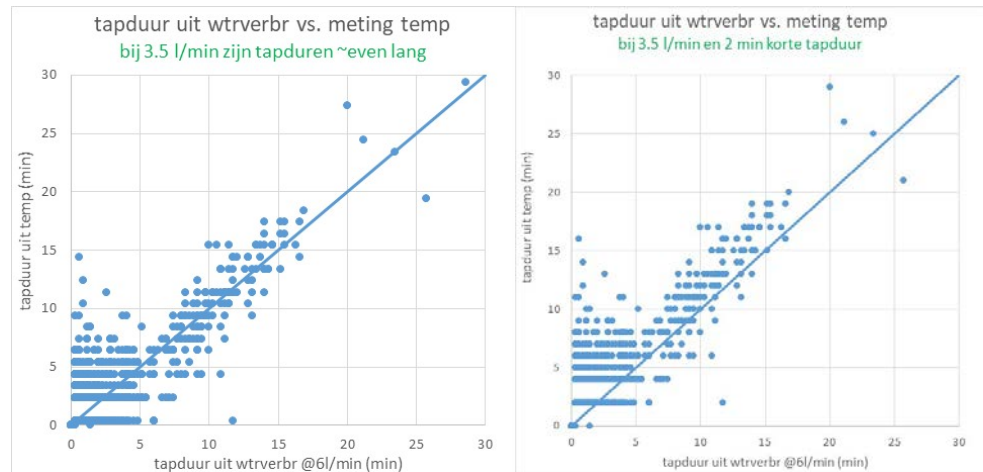
Zoals te zien komen bij deze gemiddelde flows de tapduren niet meer overeen met de tapduren uit het temperatuurverloop.

Voor de fractie f , typisch 10%, wordt vrij snel niet meer wordt voldaan aan het criterium voor flow en berekent het algoritme veel taps in een enkel meetinterval (die dus 0,4 min duren). Voor hogere waarden van f (20-40%) duren de taps vaker meerdere intervallen. Zoals Figuur 8 laat zien, berekent het algoritme uit het temperatuurverloop voor $f=10\%$ te korte tapduren. Vanaf 20% is de waarde van f niet meer kritisch.



Figuur 8 Vergelijking tussen tapduur berekend uit de temperatuurmeting en uit het waterverbruik voor Ermelo1 bij korte tapduur = 0,4 min en gemiddelde flow = 3,5 l/min. De fractie f varieert van 10% tot 40%

De gevoeligheid van de berekende tapduren voor een verandering van de korte tapduur is eveneens veel kleiner. Alleen de tapduur uit het temperatuurverloop wordt (enigszins) hoger bij een langere 'korte tapduur', zoals hierboven beschreven. Ter illustratie is in Figuur 9 de vergelijking gemaakt voor een korte tapduur van 2 minuten in plaats van 0,4 minuten.



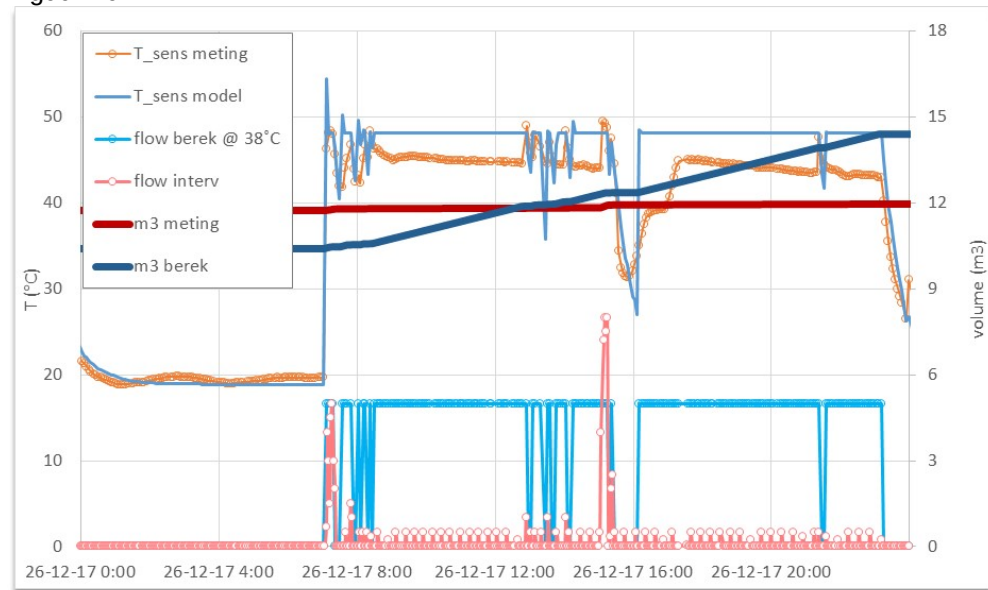
Figuur 9 Vergelijking tussen tapduur berekend uit de temperatuurmeting en uit het waterverbruik voor Ermelo1 bij $f = 20\%$, gemiddelde flow = 3,5 l/min en een korte tapduur van 0,4 min (links) en 2 min (rechts).

Figuur 9 laat zien dat de vergelijking veel minder gevoelig voor een verandering van de 'korte tapduur'. De punten liggen nog steeds redelijk rond de 45 graden lijn.

Voor alle 14 meetbestanden van de 9 woningen is daarom een waarde van f gekozen van 20-30%. Vervolgens is de gemiddelde flow bepaald waarbij de tapduren uit de watermeting en het temperatuurverloop zo goed mogelijk overeenkwamen. Tenslotte is de lengte van de korte tapduur zo genomen dat het totale berekende tapvolume overeenkomt met het met de watermeter gemeten volume.

6.2 Afwijkend watergebruik

In een aantal gevallen is afwijkend watergebruik geconstateerd zoals te zien in Figuur 10.



Figuur 10 Meetgegevens en afgeleide flow in 1 van de woningen op 26 december 2017.

Op 26 dec 2018 om ca. 7 uur en ca. 15 uur is er een groot waterverbruik geweest, zoals de hoge pieken in waterverbruik, gemeten met de watermeter, aangeven (roze symbolen in Figuur 10). Daarnaast is er vanaf 7 uur s ochtends tot 23 uur 's avonds met regelmatig een verhoging gemeten van het tapwaterverbruik, mogelijk door een lekkende kraan. De temperatuursensor (oranje symbolen) geeft dan ook continu een temperatuur van ca. 45°C. Hiermee is aan beide criteria voor flow voldaan (geringe daling temperatuur EN temperatuur >35°C). Het algoritme berekent dan ook voor die periode een vrijwel onafgebroken flow, met als gevolg dat het berekende tapvolume (blauwe dikke lijn) op die dag 4,0 m³ bedraagt. Daarentegen stijgt het gemeten tapvolume in die periode slechts met 0,3 m³.

Omdat de precieze oorzaak van het verschijnsel niet is achterhaald, is er nog geen 'vangnet' in het algoritme gebouwd om dit soort watergebruik op correcte wijze te berekenen.

7 Resultaten

Het tapvolume van de woningen in Emmen en Ermelo is in twee stappen berekend. In de eerste stap zijn met het in hoofdstuk 5 besproken algoritme de parameters bepaald die de beste overeenstemming geven tussen tapvolume berekend op basis van het temperatuurverloop van de sensor op de waterleiding en het met de watermeter gemeten tapvolume. Ook is gestreefd naar een zo goed mogelijke overeenstemming van het aantal taps.

Uit deze 'optimale' parameters van de 14 beschouwde meetperioden (4 in Emmen en 5x2 in Ermelo) zijn gemiddelde (generieke) waarden voor de parameters bepaald. In de tweede stap zijn met die generieke parameters nogmaals het totale tapvolume en het aantal taps berekend.

7.1 Stap 1. Tapvolume en aantal taps bij 'optimale' parameters

De optimale parameters voor de 14 beschouwde meetperioden zijn weergegeven in Tabel 1. De bovenste twee (oranje gearceerde) rijen geven de parameters weer die de criteria voor flow bepalen (zie hoofdstuk 5). De waarde van de fractie f ligt, zoals eerder besproken tussen 20% en 30%. Deze parameter blijkt niet kritisch, zolang die boven 20% wordt gekozen.

De tweede rij geeft de drempelwaarde voor de temperatuur in het tweede criterium. Bij de Emmen woningen bleek die redelijk kritisch met een kritische waarde van ca. 38 °C. De 'optimale waarde voor de Emmen woningen is zo gekozen dat het aantal berekende taps gelijk is aan het aantal gemeten taps. Voor de Ermelo woningen bleek deze parameter niet kritisch. Bij deze woningen bleek het ook niet mogelijk om parameters te vinden waarbij het aantal berekende taps gelijk is aan het aantal gemeten taps. Hierop wordt later teruggekomen.

De volgende (groen gearceerde) rijen geven de parameters in het model (Figuur 2) weer. De parameter $1/R_vC$, die de afkoeling beschrijft, blijkt te variëren tussen 30 en 40 minuten. Het verschil heeft vermoedelijk te maken met de uitvoering van de isolatie rond de sensor. Hiervan zijn geen foto's beschikbaar. De waarden van de twee meetperioden van dezelfde woning blijken doorgaans weinig te verschillen. De temperatuur van de boiler en van de omgeving worden automatisch bepaald uit resp. de maximale sensortemperatuur (+4°C) en de minimale sensortemperatuur in de voorgaande 24 uur. Alleen op de eerste dag is een vaste waarde van 20°C gebruikt.

De gemiddelde flow varieert voor de Emmen woningen tussen 4,2 en 6,0 l/min, voor de Ermelo woningen tussen 3,5 en 4,5 l/min. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door een verschil in doorstroomcapaciteit van het warm tapwatersysteem, leiding lengte en diameter en het gebruik van andere (waterbesparende) douchekoppen.

De duur van de korte tap varieert voor de Emmen woningen tussen 0,3 en 1,4 minuut, voor de Ermelo woningen tussen 0,1 en 0,4 minuten. Mogelijk is de leidinglengte tussen boiler en tappunt voor de Emmen-woningen groter, zodat het langer duurt vóór er warm water uit de kraan komt.

De blauw gearceerde rijen geven de resultaten, waarbij het berekende waterverbruik over de gehele meetperiode (in blauwe tekst) is vergeleken met het met de watermeter gemeten verbruik (in rode tekst). Het blijkt dat het algoritme in staat is om met goed gekozen parameters in alle gevallen het gemeten tapvolume te reproduceren.

Daarbij moet worden opgemerkt dat in een aantal gevallen het afwijkende gedrag zoals beschreven in hoofdstuk 6.2 is geconstateerd. Voor Emmen 28 was dat zelfs ca. 4 keer, met een tapvolume van 11,7 m³ (ca. 30% van het totale tapvolume). Er is voor de berekende sprongsgewijze verhogingen gecorrigeerd. Zoals eerder opgemerkt, wordt dit gedrag (nog) niet automatisch afgevangen door het algoritme.

Tabel 1: Optimale parameters gebruikt in de berekeningen van het tapvolume en aantal taps en de vergelijking met het gemeten tapvolume en aantal taps

optim parameters	EM14 sept'17- jun'18	EM24 sept'17- jun'18	EM26 sept'17- jun'18	EM28 sept'17- jun'18	ER1 nov'17- mei'18	ER1 jun'18- dec'18	ER3 nov'17- mei'18	ER3 jun'18- dec'18	ER4 nov'17- mei'18	ER4 jun'18- dec'18	ER5 nov'17- mei'18	ER5 jun'18- dec'18	ER7 feb'18- mei'18	ER7 jun'18- dec'18
condities voor flow														
afkoel < f * (lek->omg) &	25%	25%	25%	30%	20%	20%	30%	30%	20%	20%	30%	30%	20%	25%
Twtr (°C) >	37.3	37.4	38	37.1	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
parameters														
1/R _v C _{afk} (min)	36	36	38	41	32	32	38	36	38	32	38	36	29	34
gemidd debiet (l/min)	6	4.5	4.2	5	3.5	3.5	4	4	3.8	3.5	3.7	3.5	4.5	4
gemidd tijd korte tap (min)	0.3	0.8	0.9	1.4	0.4	0.3	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
resultaten														
waterverbr (m3 gemeten)	24.0	56.6	86.0	37.9	13.7	15.01	16.7	15.2	26.1	17.2	9.6	10.0	13.3	18.6
correctie berek waterverbr	-	-11.3	-	-11.7	-	-	-	-	-	-	-	-	0.6	-0.8
waterverbr (m3 berekend)	24	56.6	86	37.9	13.7	15	16.7	15.2	26.1	17.2	9.6	10	13.3	18.6
aantal taps (gemeten)	3008	4464	9394	2847	2117	2424	2568	2002	2766	1950	1361	1291	1741	2538
aantal taps (berekend)	3010	4464	8370	2849	2484	2983	3788	2912	3404	2517	1929	1763	2361	3458
	(+0%)	(+0%)	(-11%)	(+0%)	(+17%)	(+23%)	(+47%)	(+45%)	(+23%)	(+29%)	(+42%)	(+37%)	(+36%)	(+36%)
gemeten taps/dag	10	14	30	9	11	12	14	10	15	10	7	6	16	13

Tabel 2: Generieke parameters gebruikt in de berekeningen van het tapvolume en aantal taps en de vergelijking met het gemeten tapvolume en aantal taps.

generieke parameters	EM14 sept'17- jun'18	EM24 sept'17- jun'18	EM26 sept'17- jun'18	EM28 sept'17- jun'18	ER1 nov'17- mei'18	ER1 jun'18- dec'18	ER3 nov'17- mei'18	ER3 jun'18- dec'18	ER4 nov'17- mei'18	ER4 jun'18- dec'18	ER5 nov'17- mei'18	ER5 jun'18- dec'18	ER7 feb'18- mei'18	ER7 jun'18- dec'18
condities voor flow														
afkoel < f * (lek->omg) &	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
Twtr (°C) >	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
parameters														
1/R _v C _{afk} (min)	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
gemidd debiet (l/min)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
gemidd tijd korte tap (min)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
resultaten														
waterverbr (m3 gemeten)	24.0	56.6	86.0	37.9	13.7	15.01	16.7	15.2	26.1	17.2	9.6	10.0	13.3	18.6
waterverbr (m3 berekend)	20.6	49	74	20	16.2	19.1	20.33	16.9	33	22.5	11.3	12.1	15	22.6
	(-14%)	(-13%)	(-14%)	(-47%)	(+19%)	(+27%)	(+22%)	(+11%)	(+26%)	(+31%)	(+17%)	(+20%)	(+13%)	(+21%)
aantal taps (gemeten)	3008	4464	9394	2847	2117	2424	2568	2002	2766	1950	1361	1291	1741	2538
aantal taps (berekend)	3229	4652	8624	2936	2482	2986	3787	2915	3397	2516	1925	1761	2360	3458
	(+7%)	(+4%)	(-8%)	(+3%)	(+17%)	(+23%)	(+47%)	(+46%)	(+23%)	(+29%)	(+41%)	(+36%)	(+36%)	(+36%)

Naast het tapvolume is ook het aantal taps berekend uit het temperatuurverloop en gemeten met de watermeter. De onderste rijen geven een vergelijking tussen beiden.

Het blijkt dat het voor drie van de vier Emmen woningen mogelijk is om het aantal tapjes exact te reproduceren met een geschikte keuze van de drempeltemperatuur. Voor de Ermelo woningen bleek dat niet mogelijk. Het aantal taps werd door het algoritme met 17%-47% overschat. Hiervoor zijn twee mogelijke oorzaken:

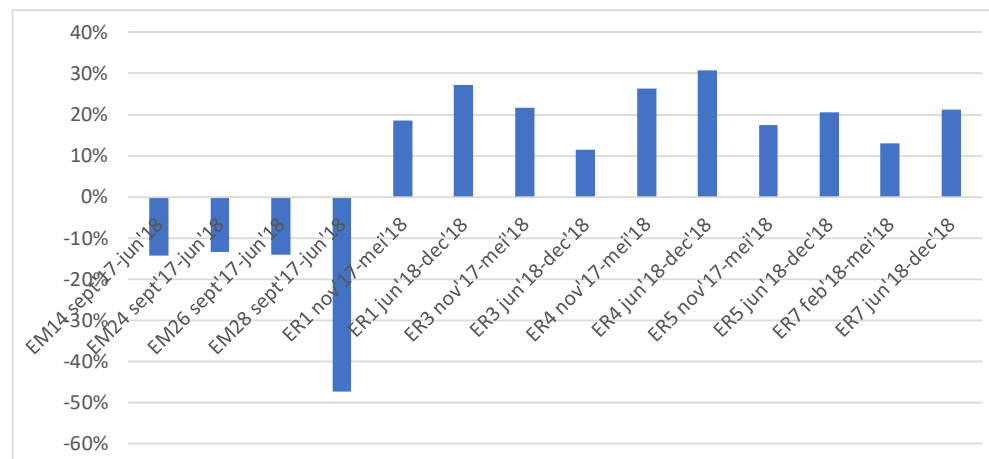
1. Het waterverbruik in een klein tapje bedraagt bij de woningen in Ermelo gemiddeld $0,2 \text{ min} \times 3,5 \text{ l/min} = 0,7 \text{ l}$, minder dan de resolutie van de watermeter (1 l). Blijkbaar is een deel van de tapjes te klein om door de watermeter te worden geregistreerd. Bij de woningen in Emmen zijn de kleine tapjes 2 tot 4 keer zo lang en worden daarom minder vaak 'gemist' door de watermeter.
2. In één enkele lange tapbeurt berekent het algoritme meerdere 'deeltaps' omdat de temperatuur van de sensor tijdelijk meer daalt dan het criterium. Mogelijk zetten de gebruikers de douche in een lange tapbeurt tijdelijk uit (b.v. om haren te wassen).

Dat laatst genoemde effect (deeltaps) kan uiteraard ook bij de Emmen woningen zijn optreden. Dat betekent dat de bij die woningen gevonden drempeltemperatuur (om het aantal taps te reproduceren) niet de juiste waarde is omdat het effect van deeltaps hierin niet is meegenomen.

7.2 Stap 2. Tapvolume en aantal taps bij 'generieke' parameters

In de tweede stap zijn tapvolume en aantal taps nogmaals berekend met gemiddelde of 'generieke' parameters. Deze zijn bepaald als het rekenkundig gemiddelde van de optimale parameters in de 14 databestanden. De resultaten van de tweede stap zijn weergegeven in Tabel 2.

De (relatieve) verschillen tussen berekend en gemeten *tapvolume* bij gebruik van 'generieke' parameters zijn weergegeven in Figuur 11.



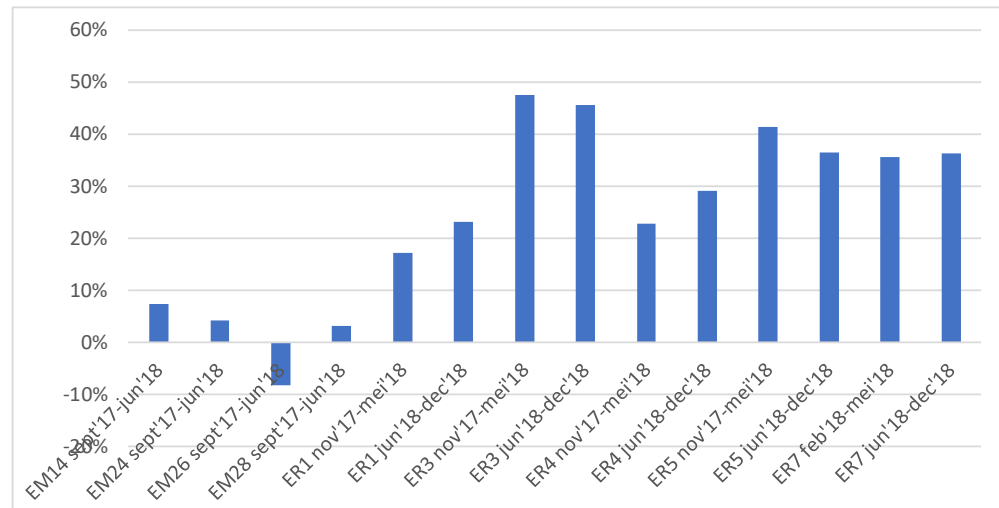
Figuur 11 Verschil tussen berekend en gemeten tapwaterverbruik (in m3) bij 'generieke' parameters

Zoals verwacht wordt met de generieke parameters het tapvolume bij de Emmen woningen (linker 4 staven in Figuur 11) onderschat. Voor 3 van de 4 woningen met ca. 14%, voor Ermelo 28 met 47%. Een belangrijke reden is dat de generieke duur van de korte tap (0,4 min) korter is dan de optimale duur (0,3 – 1,4 min) voor deze woningen.

Zoals al opgemerkt is een mogelijk oorzaak voor die langere tapduur een langere leidinglengte tussen boiler en tappunt. Het is niet ter plekke nagegaan of dit inderdaad het geval is. Als dit inderdaad de oorzaak is, zou het algoritme veralgemeniseerd kunnen worden door invoering van een 'dode tijd' die afhankelijk is van de leidinglengte.

Een andere reden voor de afwijking bij generieke parameters is dat de 'generieke flow' van warm tapwater lager is dan de voor deze woningen 'optimale' waarde. Mogelijk is de capaciteit van het warm watersysteem in Emmen simpelweg groter dan dat in Ermelo.

De (relatieve) verschillen tussen berekend en gemeten *aantal taps* bij gebruik van 'generieke' parameters zijn weergegeven in Figuur 12.



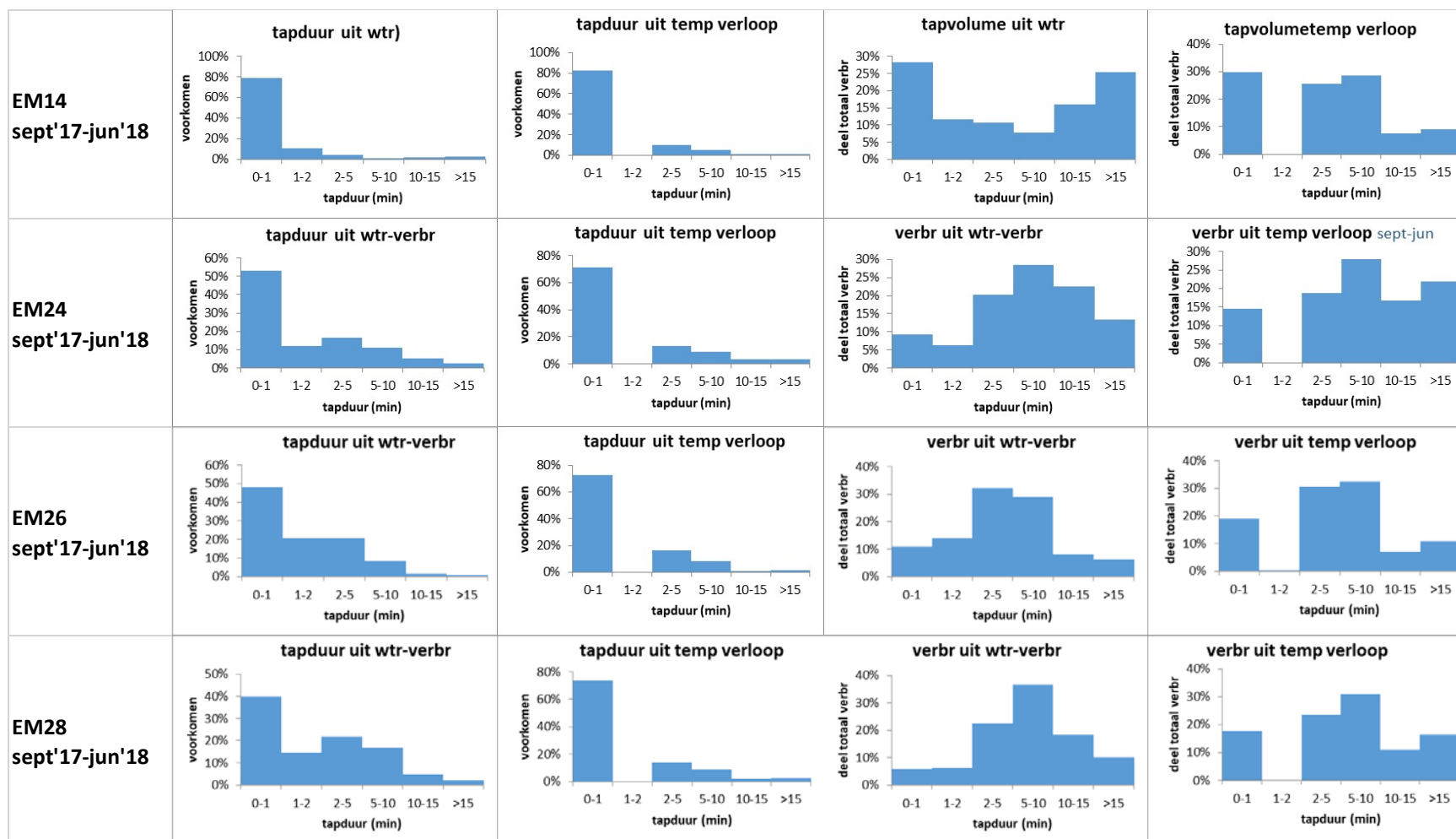
Figuur 12 Verschil tussen berekend en gemeten aantal taps bij 'generieke' parameters

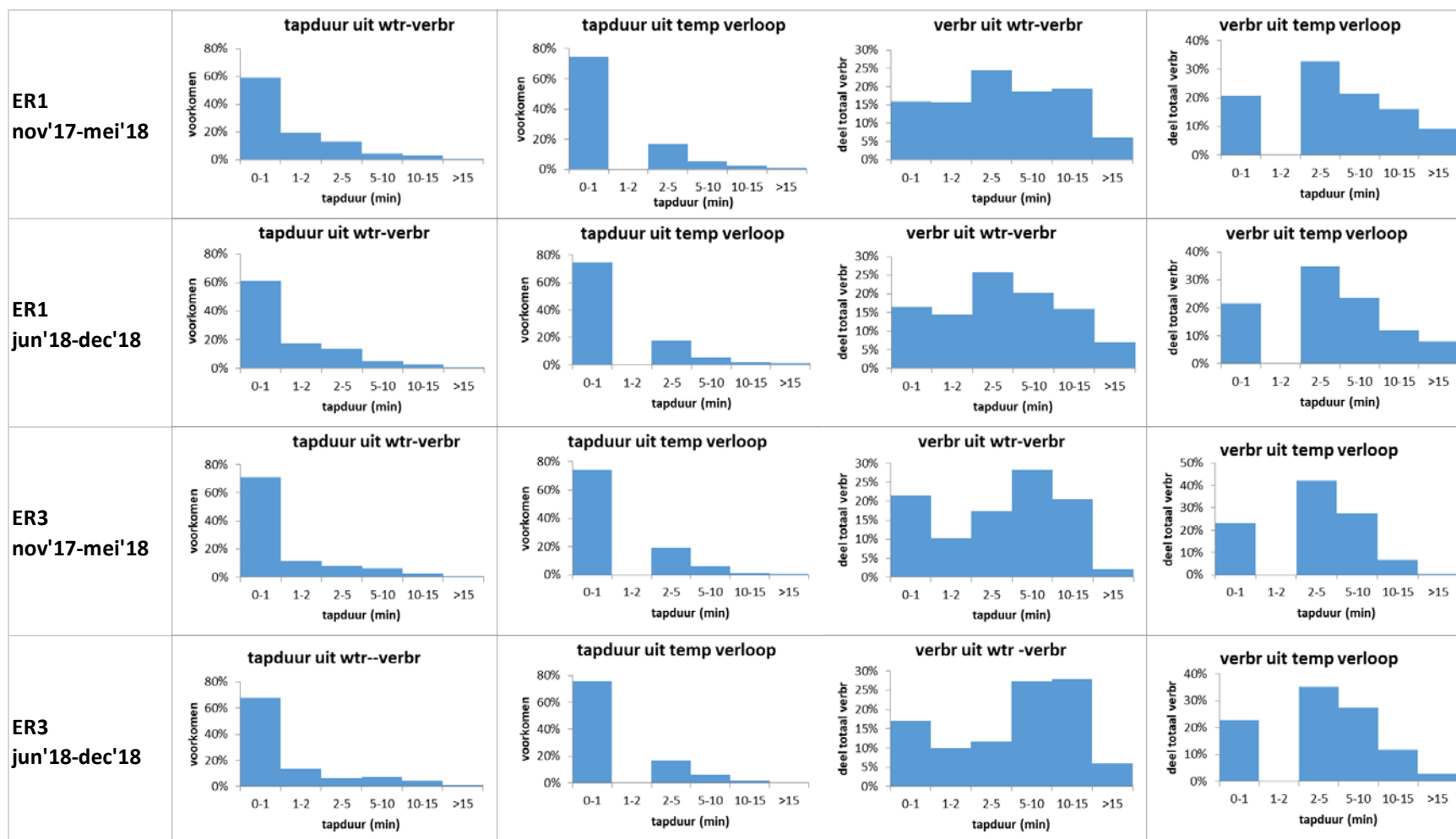
Gebruik van de generieke in plaats van optimale parameters heeft weinig effect op het aantal taps. Bij de Emmen woningen blijkt het aantal berekende tapjes binnen 10% van het aantal gemeten taps te liggen. Belangrijkste oorzaak voor de afwijking is een iets lagere drempelwaarde van de temperatuur als criterium voor de flow.

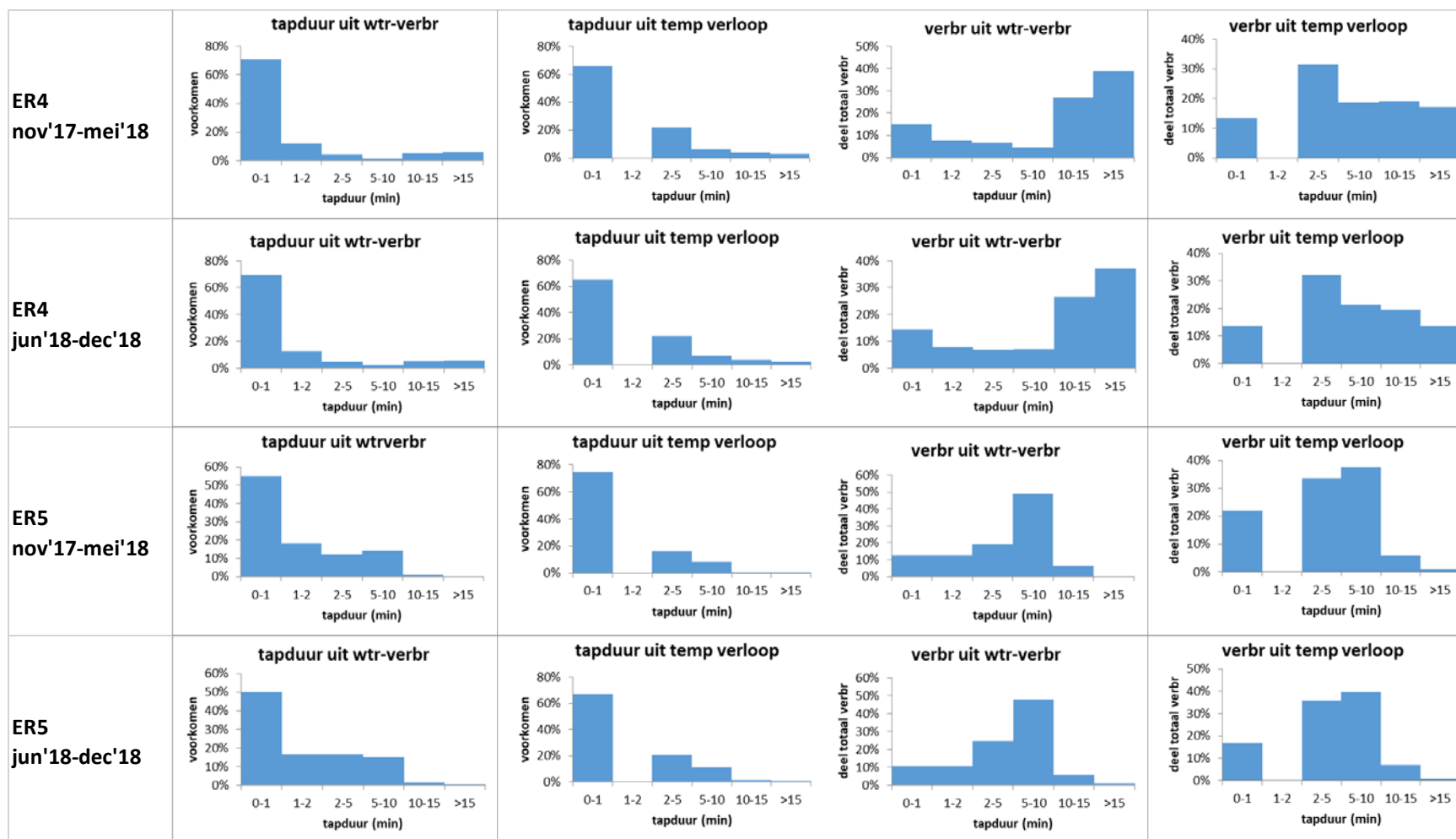
Voor de Ermelo woningen is generieke drempelwaarde van de temperatuur dezelfde als de optimale waarde. Het aantal taps in de berekening wordt, net als bij de 'optimale' parameters, met 17-47% overschat. Mogelijke oorzaken zijn in hoofdstuk 7.1 benoemd (korte taps te klein om te meten, deeltaps bij langere taps).

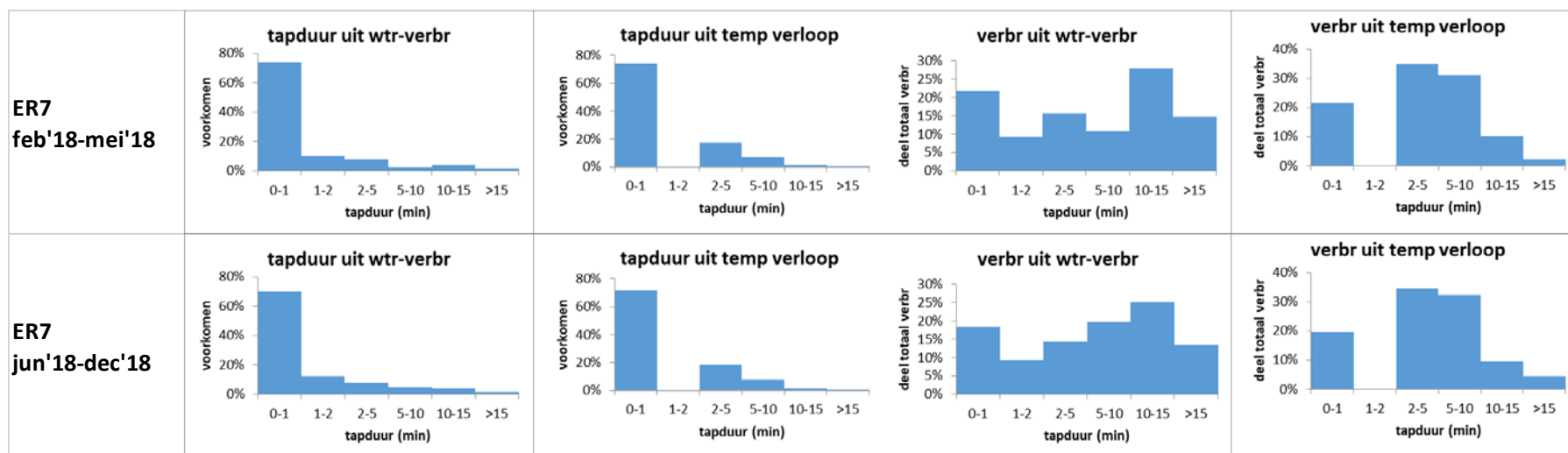
7.3 Voorkomen tapduren en bijbehorend tapvolume.

Van alle woningen zijn histogrammen gemaakt van het voorkomen van verschillende tapduren en het bijbehorende tapvolume, zie Figuur 13.









Figuur 13 Voorkomen van verschillende tapduren (kolom 2 en 3) en bijbehorend tapvolume (kolom 4 en 5). Kolommen 2 en 4 zijn gemaakt op basis van de watermeter, kolommen 3 en 5 op basis van het verloop van de temperatuur van de warm waterleiding.

De tweede kolom toont het relatieve voorkomen van de tapduren, van 0-1 minuut tot >15 min, gebaseerd op het gemeten waterverbruik en een aangenomen gemiddelde flow van 4,0 l/min (zie ook Tabel 1). Het blijkt dat in alle woningen korte taps (<1 min) het vaakst voorkomen (typisch 40-60% van alle taps).

De derde kolom toont het relatieve voorkomen van de tapduren, maar nu berekend met het algoritme uit het verloop van de temperatuur van de warm waterleiding. Het beeld komt grotendeels overeen met dat in de vorige kolom, maar er zijn geen tapduren tussen 1 en 2 minuten. Dat komt omdat het algoritme alle tapduren binnen één meetinterval (van 2 minuten of langer) omzet in een korte tapduur van 0,4 minuten.

De vierde kolom van Figuur 13 toont een schatting van het tapvolume horend bij de tapduren in kolom 2. Het blijkt dat het meeste watergebruik verband houdt met langere taps tussen 2 en 15 minuten. De korte taps (<1 min tapduur) maken typisch 10-20% uit van het totale warm tapwaterverbruik.

Uitzondering zijn de woning EM14 met veel waterverbruik in de korte taps en in de lange taps (>15 min) en ER4 waar langere tapduren (10-15 min en >15 min) het grootste aandeel hebben in het totale verbruik. Het lijkt erop dat hier 'langdouchers' wonen.

Verder valt op dat het waterverbruik in de beide meetperioden in de Ermelo woningen vrijwel hetzelfde is.

De vijfde kolom van Figuur 13 toont een schatting van het tapvolume horend bij de tapduren in kolom 4. Omdat er geen tapduren zijn tussen 1 en 2 minuten, wordt voor deze tapduur ook geen waterverbruik gevonden.

Het beeld van waterverbruik over de tapduren berekend op basis van de temperatuursensor komt redelijk overeen met dat op basis van de watermeter. Belangrijkste oorzaken van de verschillen zijn:

1. de relatief grote meetintervallen (2 minuten of langer) waardoor de korte taps moesten worden geschat
2. langere tapduren gemeten met de watermeter worden door het algoritme nogal eens als meerdere deeltaps gezien omdat de temperatuur van de sensor tijdelijk te veel zakte. Daardoor wordt er aan de midden intervallen meer waterverbruik toegeschreven.

8 Conclusies

In een aantal woningen is een temperatuursensor op de warm tapwaterleiding gemonteerd. Een algoritme bepaalt uit het temperatuurverloop of er flow van warm tapwater is, en bepaalt hieruit het totale tapvolume aan warm tapwater.

Metingen en analyses zijn gedaan gedurende een periode van ca. 1 jaar voor twee woningtypes met in totaal 9 woningen. Deze werden door verschillende gezinnen bewoond.

De parameters in het algoritme zijn bepaald door vergelijking tussen metingen van de temperatuursensor en een flowmeter. Bij gebruik van optimale (dat wil zeggen per woning verschillende) parameters kan het gebruikte algoritme het totale warm tapwaterverbruik, gemeten met een waterverbruiksmeter, goed reproduceren. Bij gebruik van gemiddelde (generieke) parameters ligt het verschil tussen berekend en gemeten warm tapwaterverbruik in de range van -20% tot +30%, met een enkele uitschieter van -50%. Los van de vraag of deze spreiding acceptabel is, is het de vraag of de 'generieke' parameters echt generiek toepasbaar zijn.

Waarschijnlijk wordt een aantal parameters in het algoritme mede bepaald door de fysieke inrichting van de tapwatervoorziening, zoals:

- 1 de lengte van de leiding tussen boiler en (meest gebruikte) tappunt en
- 2 de doorstroomcapaciteit van het warm tapwatersysteem (leiding lengte en diameter en het type douchekop).

Dit verband is in deze studie niet onderzocht, maar zou mogelijk tot een reproduceerbare voorspelling voor individuele woningen data kunnen leiden. Daarbij zou dan het gebruik van flowmeter data of andere gedragsdata niet meer nodig zijn. Daarbij zal naar verwachting een kortere meetinterval (1 minuut of minder) van de metingen de inschatting van kleine tappingen ten goede komen en heeft naar alle waarschijnlijkheid een positief effect op het resultaat. Mogelijk moet wel het algoritme op het kortere meetinterval worden aangepast.

Kortom, op dit moment lukt het nog onvoldoende om het warm tapwatergebruik in te schatten op basis van uitsluitend een temperatuursensor op de warm waterleiding. We verwachten dat het mogelijk moet zijn om de parameters uit de algoritmen te koppelen aan de fysieke inrichting van de tapwatervoorziening en zo met uitsluitend de temperatuursensor, maar zonder verdere gedragsinformatie het warm tapwatergebruik voldoende nauwkeurig te voorspellen.