

Kom
verder



Regeltechnische aspecten van warmtenetten

Een overzicht van conventionele en geavanceerde regeltechnische systemen voor warmtenetten



Colofon

Datum 25 januari 2019

Referentie

Versie 0.3

Afdeling Lectoraat Duurzame Energievoorziening

Auteur Dr. Ir. R.P. van Leeuwen, Ir. S.I. Wijnant-Timmerman, Ir. T.J.G. Papa

© Saxion. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Datum 25 januari 2019

Titel Regeltechnische aspecten van warmtenetten

Pagina 3 / 30

Inhoudsopgave

Inleiding.....	4
1 Opbouw warmtenet	4
2 Het regelsysteem van een warmtenet	5
2.1 Warmtevraag regeling	6
2.2 Flow regeling	6
2.3 Verschildruk regeling.....	8
2.4 Regeling aanvoertemperatuur	8
2.5 Regeling van de warmtebronnen en warmteopslag	8
2.6 Regeling van frequentie gestuurde pompen.....	9
2.7 Monitor- en besturingssysteem	10
3 Regeltechnische bedrijfsvoering van het warmtenet	12
3.1 Centrale maximum aanvoertemperatuur regeling	12
3.2 Locale minimum aanvoertemperatuur	14
3.3 Centrale en locale maximum drukregeling	14
3.4 Centrale en locale minimum verschildruk regeling.....	14
4 Regeltechnische maatregelen voor efficiency verbetering	16
4.1 Gevolgen lagere aanvoertemperatuur	16
4.2 Temperatuurverloop in een warmtenet.....	17
4.3 Verbetering afstemming warmtecentrale op koudste punten in het net.....	18
4.4 Lerend en voorspellend regelen: tijdelijke temperatuuronderschreiding toestaan.....	18
4.5 Naar een lagere aanvoer- én retourtemperatuur van warmtenetten.....	19
5 4 ^e generatie warmtenetten en smart thermal grids	21
5.1 Laag temperatuur warmtenetten van de 4 ^e generatie	21
5.2 Smart thermal grids	25
5.3 Voorkomen van warmtevraagpieken.....	25
5.4 Efficiënte inzet van duurzame warmtebronnen en thermische opslag.....	27
5.5 Systeemintegratie binnen een decentraal, duurzaam energiesysteem.....	28
6 Referenties	30

Inleiding

Het regelen van warmtenetten gebeurt vanuit twee plaatsen:

- bij de centrale warmtevoorzieningsunit
- bij de warmtevragers ter plaatse van de substations

Allereerst wordt gedefinieerd wat er onder een substation wordt verstaan. Vervolgens aangegeven op welke manier een warmtenet wordt geregeld en wordt ingegaan op de instelwaarden (modus) die mogelijk zijn bij de bedrijfsvoering. Als laatste wordt uiteen gezet hoe warmtenetten meer geavanceerd kunnen worden geregeld om pomp- en warmteverliezen zo veel mogelijk te beperken en hoe een warmtenet onderdeel kan uitmaken van een smart energy systeem.

1 Opbouw warmtenet

Warmtenetten bestaan veelal uit een primair netdeel en één of meerdere secundaire netdelen. Op de scheiding tussen primair en secundair netdeel bevindt zich een substation. In een substation wordt de temperatuur en de druk verlaagd, meestal via een scheiding van het primaire en secundaire net. Het secundaire net heeft dan zijn eigen pompcircuit met een lagere netdruk. Reden hiervan is dat er goedkopere apparatuur kan worden toegepast als de druk en temperatuur verlaagd worden. Bovendien is het veiliger om binnenshuis een lagere druk en temperatuur toe te passen. Een substation bestaat uit warmtewisselaars, regelkleppen en een pomp voor het secundaire circuit.

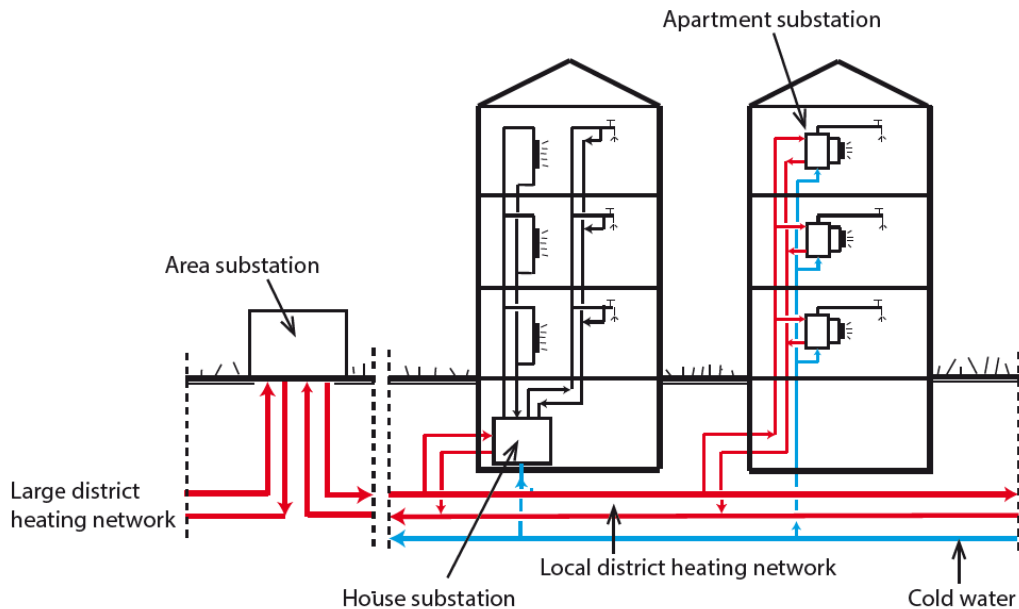
In geval van kleine, locale warmtenetten is er vaak geen secundair distributienet en zijn afnemers via een eigen substation of afleverset aangesloten op het primaire net. Wanneer de statische druk in het primaire net niet te hoog is (2–3 bar) dan past dit bij een woning verwarmingsstelsel, anders moet ofwel de druk worden verlaagd in de afleverset, of de warmte wordt via een warmtewisselaar overgedragen op een separaat pompcircuit voor de woning. In dat laatste geval heeft de woning zelf een secundair net.

In warmtenetten kan er sprake zijn van meerdere substations, zie Figuur 1. De substations worden liefst zo dicht mogelijk bij de afnemer geplaatst, over het algemeen in het betreffende pand, maar bij grote warmtenetten bedient een enkel substation een secundair net voor een straat met woningen of zelfs een hele wijk. Het secundaire net kan dan op zichzelf worden gezien als een kleinschalig warmtenet met warmtevoeding ter plaatse van het substation.

Het substation kan dus op verschillende plekken gesitueerd zijn en bestrijkt een bepaald onderdeel van een netwerk bijvoorbeeld: een wijk, een appartementencomplex of een woning. In een appartementencomplex scheidt het substation een blokverwarmingsnet voor de appartementen van het primaire net. In dat geval en in geval van een afleverset voor een woning is het substation ook de plek waar de afrekening plaats vindt. In Nederland is het verplicht om het warmteverbruik op klantniveau te meten, dus voor woningen t.p.v. de afleversets, voor een appartementencomplex is per appartement een warmtemeter nodig.

Regeltechnische aspecten van warmtenetten

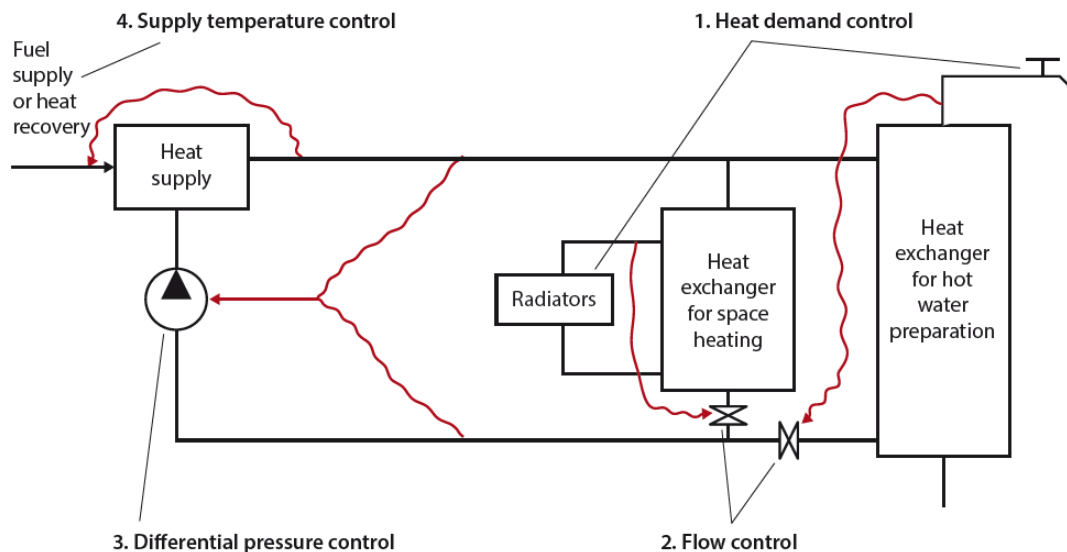
Pagina 5 / 30



figuur 1: Diverse type substations in een warmtenetwerk [1].

2 Het regelsysteem van een warmtenet

Het regelsysteem van een warmtenetwerk kan bestaan uit de volgende vier onafhankelijke regelsystemen, zie Figuur 2. T.p.v. het substation van de warmtevraager zijn dit: (1) warmtevraag regeling en (2) flow regeling. T.p.v. de warmteleverancier zijn dit: (3) verschildruk regeling en (4) aanvoertemperatuur regeling.



figuur 2: Regelsystemen in een warmtenetwerk [1].

2.1 Warmtevraag regeling

Een warmtevraag in een gebouw ontstaat b.v. door het openen van een kraan voor warm tapwater. Dit is een ongeregelde warmtevraag. Een geregelde warmtevraag ontstaat via een thermostaat die de ruimtetemperatuur wil regelen binnen een bepaalde bandbreedte. Dit kan een kamerthermostaat zijn die een signaal overbrengt naar de afleverset, waardoor daar een klep wordt geopend zodat warm water b.v. de vloerverwarming in kan stromen. Het kan ook een thermostaatkraan zijn op een radiator in een gebouw die de geïntegreerde afsluiter opent, waardoor warm water de radiator in kan stromen.



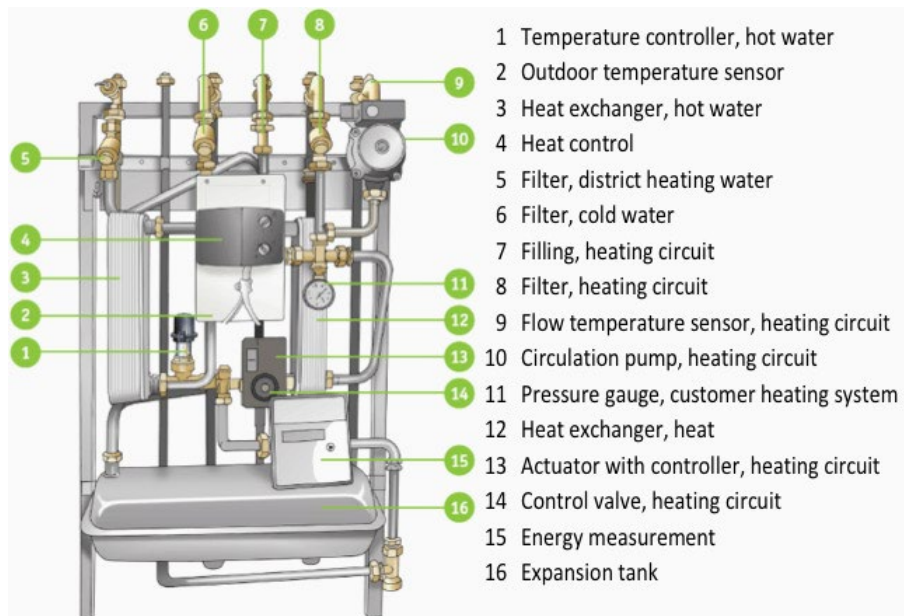
Figuur 3: kamerthermostaat en radiatorthermostaat (Danfoss)

2.2 Flow regeling

De flowregeling is onderdeel van de afleverset (zie figuur 4) of het substation en bestaat uit een thermostatische regelklep die zich bevindt na de warmtewisselaars in het circuit waar de radiatoren / vloerverwarming op zijn aangesloten. Er wordt geregeld op een gewenste toevoertemperatuur voor het radiator/vloerverwarming systeem, die afhankelijk is van de buitentemperatuur. Kouder water vanuit de retour van de radiator/vloerverwarming wordt bijgemengd met warm water uit de warmtewisselaar. Voor de levering van warm tapwater is er ook een dergelijke regelklep om te voorkomen dat te warm water wordt geleverd. In dat geval wordt koud leidingwater bijgemengd. De klep zit na de warmtewisselaar voor het tapwater.

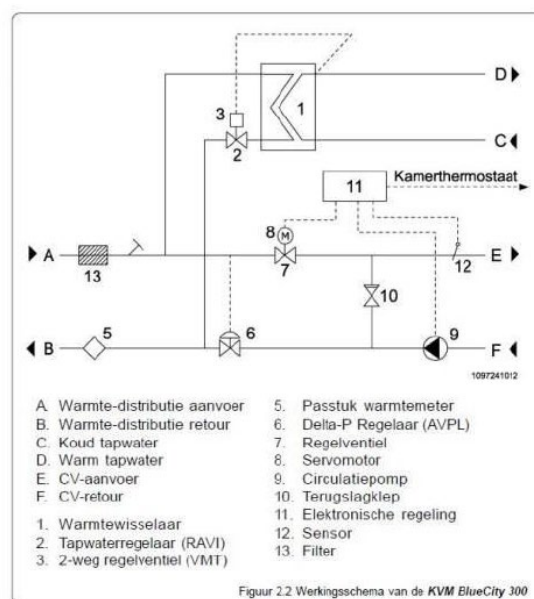
Regeltechnische aspecten van warmtenetten

Pagina 7 / 30



Figuur 4a: afleverset stadsverwarming met dubbele warmtewisselaar [10]

De afleverset in figuur 4 bevat twee warmtewisselaars, namelijk voor het tapwater circuit en voor de ruimteverwarming. Ook veel toegepast worden afleversets met slechts één warmtewisselaar, voor het tapwater. Voor de ruimteverwarming is er dan geen warmtewisselaar, het water uit het warmtenet stroomt, na te zijn bijgemengd tot de gewenste temperatuur, door de radiatoren/vloerverwarming. Een belangrijk voordeel hiervan is de veel lagere kostprijs van de afleverset. Een P&ID van een afleverset met één warmtewisselaar is gegeven in figuur 4b.

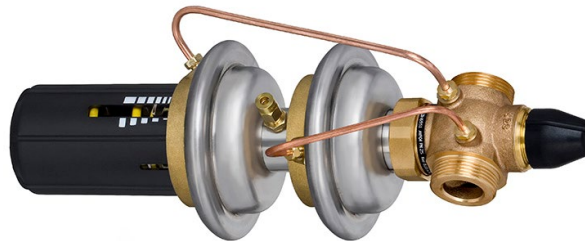


Figuur 4b: P&ID van een afleverset met enkele warmtewisselaar [11]

Voor meer informatie over afleversets zoals een nadere toelichting op de werkingsprincipes, varianten en te hanteren normen wordt verwezen naar [11].

2.3 Verschildruk regeling

De druk en flow in een warmtenet wordt o.a. geregeld door het aansturen van de circulatiepomp en door een verschildruk regelaar (differential pressure control valve) die het drukverschil tussen aanvoer en retour regelt, zie figuur 5. De druk (en debiet) in de aanvoerleiding kan worden opgevoerd via de pomp, de verschildruk via de regelklep. Beiden worden geregeld op een vooraf ingesteld drukverschil. Hierdoor wordt er gezorgd dat het netwerk voldoende flow krijgt en er voldoende druk is in het gehele warmtenet. In grotere warmtenetten wordt het drukverschil niet alleen centraal maar ook lokaal geregeld.



Figuur 5: gemotoriseerde verschildruk regelaar (differential pressure control valve) (Danfoss)

2.4 Regeling aanvoertemperatuur

De regeling van de aanvoertemperatuur zorgt ervoor dat de terugkerende stroom vanuit het net weer op de gewenste aanvoertemperatuur wordt gebracht. De totale warmtevraag en de regeling is een samenspel van warmteleverancier en warmtevragers. De warmtevraag en volumeregeling wordt geregeld in de substations van het net. De retourtemperatuur wordt bepaald door de warmtevragers. De hoeveelheid afgenomen warmte wordt dus bepaald door de klant.

De warmteleverancier zorgt ervoor dat de condities van de geleverde warmte goed is, wat inhoudt dat de drukverschillen (flow) over het net voldoende zijn, en dat er warmte wordt geleverd van de juiste temperatuur. Voor de regeling van de aanvoertemperatuur worden dezelfde verschildruk regelaars toegepast (zie figuur 5) die tevens zijn uitgerust met een temperatuursensor en motorbediening voor het regelen van de klepstanden. Deze units zijn verbonden met het monitoringsysteem waar op basis van de informatie van de kleppen en de temperatuur sensoren, besluiten worden genomen m.b.t. de opwekking van warmte door b.v. een warmtepomp of ketel en voor de pompsturing.

2.5 Regeling van de warmtebronnen en warmteopslag

De regeling van de warmtebronnen moet ervoor zorgen dat er voldoende warmte van de juiste temperatuur wordt geleverd voor het warmtenet. Dit regelsysteem werkt in principe op basis van temperatuurmetingen, zie figuur 6 waarin drie punten in het schema zijn aangegeven.

Punt 1.

Deze regelaar bevat een temperatuursensor en een regelklep. De regelklep stuurt de koude retourstroming naar de ketels en regelt de flow zodanig dat bij punt 2 de gewenste aanvoertemperatuur

Regeltechnische aspecten van warmtenetten

Pagina 9 / 30

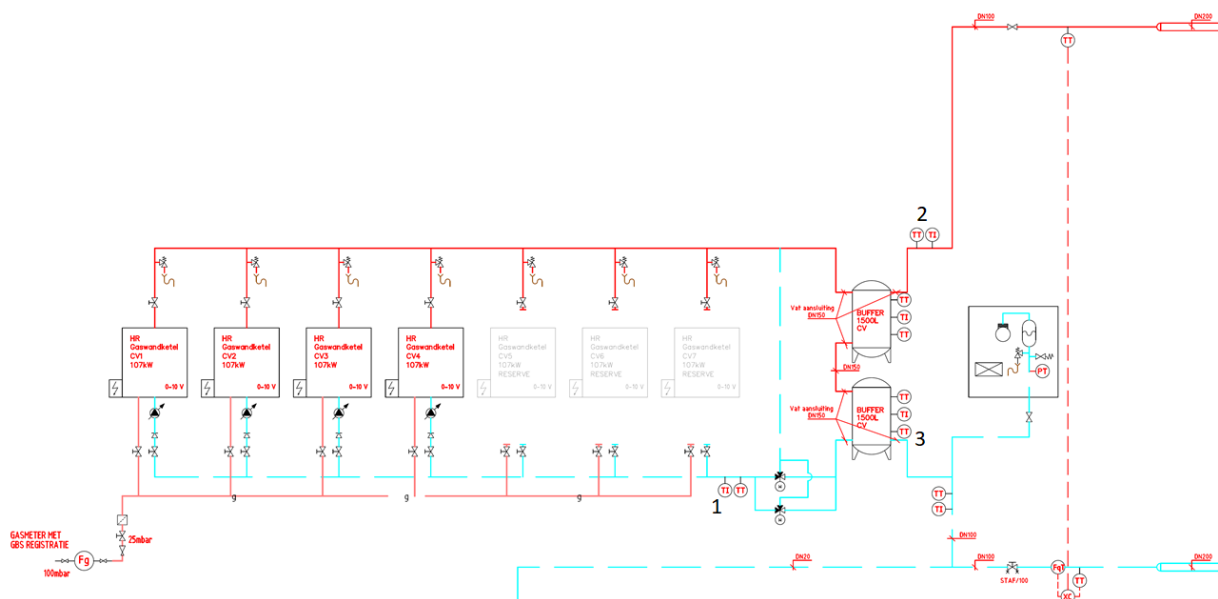
wordt bereikt. De ketels worden apart bestuurd binnen een cascaderегeling. Het aantal ketels en de vermogensregeling van de ketels wordt afgestemd op de actuele warmtevraag. De ketels kunnen worden opgestart in twee bedrijfsmodi: (1) laden van de thermische opslagbuffers en (2) warmte leveren aan het warmtenet. De selectie van de bedrijfsmodi hangt af van de warmtevraag in het warmtenet en de actuele toestand van de thermische buffers, welke reageert op de sensor van punt 3.

Punt 2.

Deze flowmeter en temperatuursensor registreren de aanvoer flow en temperatuur voor het warmtenet. Samen met de temperatuursensor in de retourleiding bepaalt het regelsysteem het benodigde thermisch vermogen waarop de ketelsturing plaatsvindt.

Punt 3.

Er zijn twee buffervaten die in serie staan, er zitten meerdere temperatuur sensoren in. De onderste temperatuursensor in het eerste vat registreert de laagste temperatuur van de thermische buffers en stuurt daarmee bedrijfsmodus 1 (laden van de buffers) voor de ketelsturing aan. In het tweede buffervat bovenin bevindt zich de temperatuursensor die registreert of de buffers volledig zijn geladen, waarmee de ketels worden uitgeschakeld.



Figuur 6: regeltechnisch schema warmtecentrale (Meppelenergie)

2.6 Regeling van frequentie gestuurde pompen

In Figuur 6 zijn t.p.v. de ketels enkele pompen weergegeven waarmee het laden van de buffers onafhankelijk van de warmtevraag van het warmtenet mogelijk is. Daarnaast zijn er pompen voor het primaire warmtenet (niet zichtbaar in Figuur 6). In Figuur 7 is een vereenvoudigd schema weergegeven van een warmtenet bestaande uit een primair net en een aantal substations waar secundaire warmtenetten aan zijn verbonden. Elke secundair net heeft een eigen pomp. In de regel zijn alle pompen tegenwoordig frequentiegestuurd om de flow binnen bepaalde grenzen te kunnen regelen en

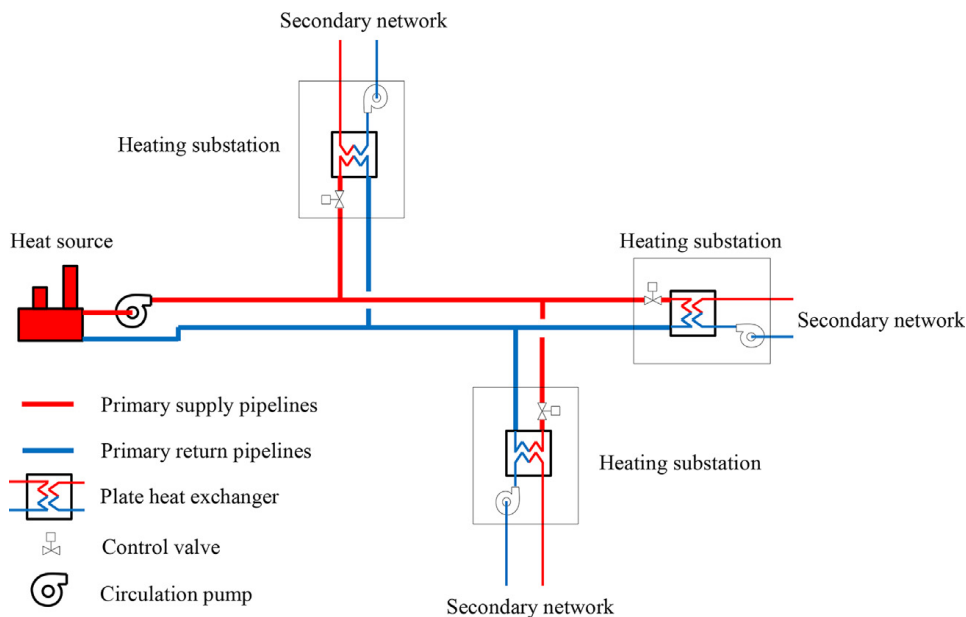
Regeltechnische aspecten van warmtenetten

Pagina 10 / 30

zo min mogelijk pompenergie te gebruiken. De flow die moet worden geleverd is direct afhankelijk van de warmtevraag. Het regelsysteem stuurt de pompen aan op basis van de informatie van de temperatuur sensoren en de verschildruk regelkleppen. Uit de combinatie van Figuur 6 en 7 valt op te maken dat er drie soorten pompregelingen zijn, voor het sturen van pompen voor:

1. de warmtebron(nen)
2. het primaire warmtenet
3. de secundaire warmtenetten

De warmtebron zoals in Figuur 6 getekend is een ketel, wat de meest eenvoudige situatie is en bijvoorbeeld ook voorkomt bij gebruik van een biomassa ketel. Wanneer een warmtepomp wordt toegepast dan zijn er twee pompcircuits t.p.v. de warmtebron: een pompcircuit voor de warmtetoever van de warmtepomp (meestal een bodemwarmte circuit) én een pompcircuit voor de warmteafgifte van de warmtepomp. Bij gebruik van meerdere bronnen (b.v. een warmtepomp en een biomassa ketel) neemt het aantal pompcircuits toe, alsmede de complexiteit van de sturing in relatie tot een thermische buffer.



Figuur 7: vereenvoudigd regeltechnisch schema van pompcircuits in een warmtenet [24]

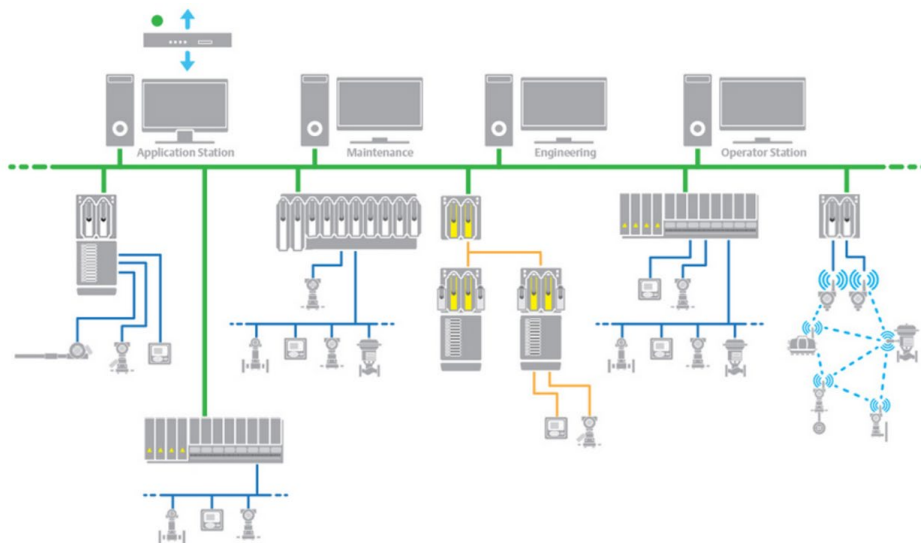
2.7 Monitor- en besturingssysteem

In het regeltechnische systeem van een warmtenet worden besluiten en regelacties genomen op basis van een grote hoeveelheid signalen, afkomstig van sensoren. Regeltechnische units, b.v. PLC's sturen vervolgens signalen naar actuatoren om de regelacties uit te voeren. In het verleden functioneerden veel regelsystemen op zichzelf. Tegenwoordig wordt gebruik gemaakt van SCADA wat staat voor "Supervisory Control And Data Acquisition", ofwel het verzamelen, doorsturen, verwerken en visualiseren van meet- en regelsignalen. SCADA wordt overal ter wereld toegepast binnen industriële

Regeltechnische aspecten van warmtenetten

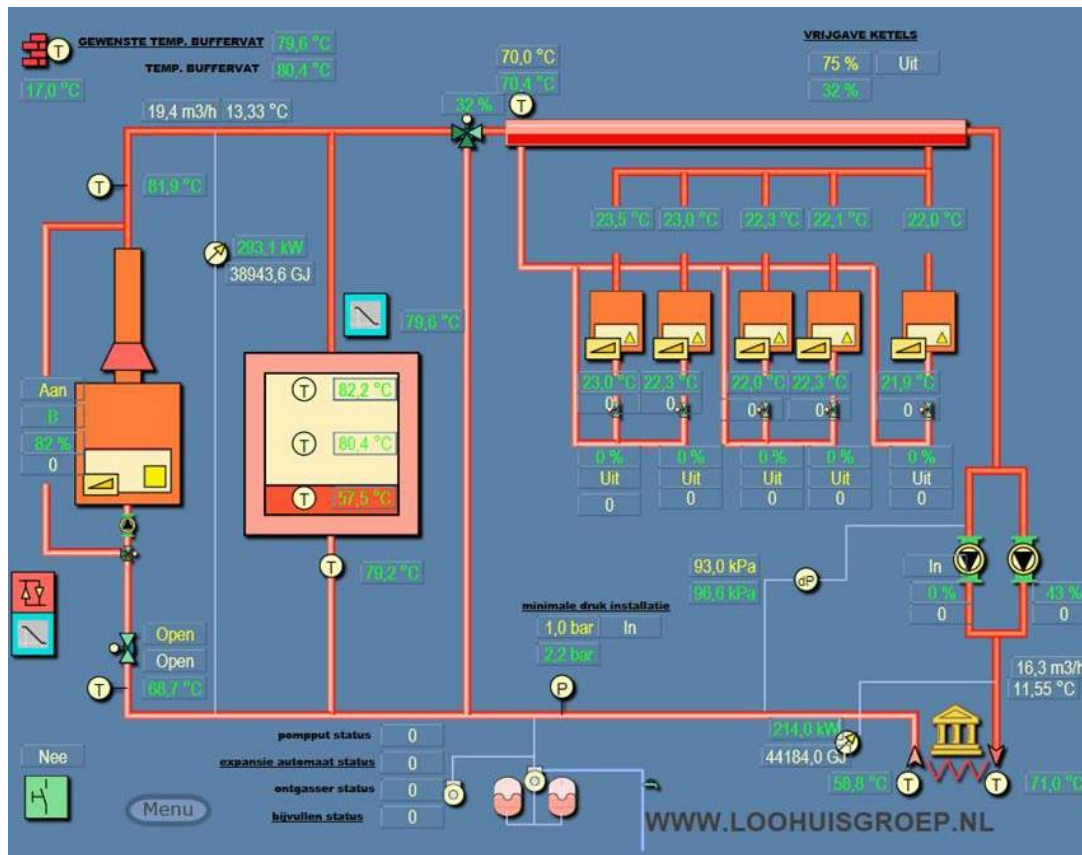
Pagina 11 / 30

automatisering. Een voorbeeld van een SCADA systeem architectuur voor een warmtenet is weergegeven in Figuur 8. Hierin zijn verschillende lagen te zien: signalen van/naar sensoren/actuators komen samen in regelkasten waarin veelal lokale PLC's werkzaam zijn. De PLC's zijn via ethernet verbonden met het centrale niveau. Dit kan een computer zijn in een warmtehuis voor de warmtebron, het kan ook een computer op afstand zijn, ver weg van het warmtenet die is verbonden via internet communicatie.



Figuur 8: communicatie architectuur van een warmtenet (DeltaV).

In Figuur 9 is een voorbeeld gegeven van een monitoring scherm waarop actuele waarden (temperatuur, energie, flow) voor de gehele warmteproductie unit van een warmtenet zijn te zien. Links is de hoofdketel te zien, die wordt gestookt op houtpellets, verder is er een buffer, en rechtsbovenin een vijftal gasgestookte ketels als backup en voor eventueel piekvermogen. De twee circulatiepompen zijn toerengeregeld en ze zijn ombeurten in bedrijf (redundantie). Rechts onderin de aansluiting op het warmtenet.



Figuur 9: voorbeeld van een monitoringsscherm (muziekwijk Zwolle, Cogas)

3 Regeltechnische bedrijfsvoering van het warmtenet

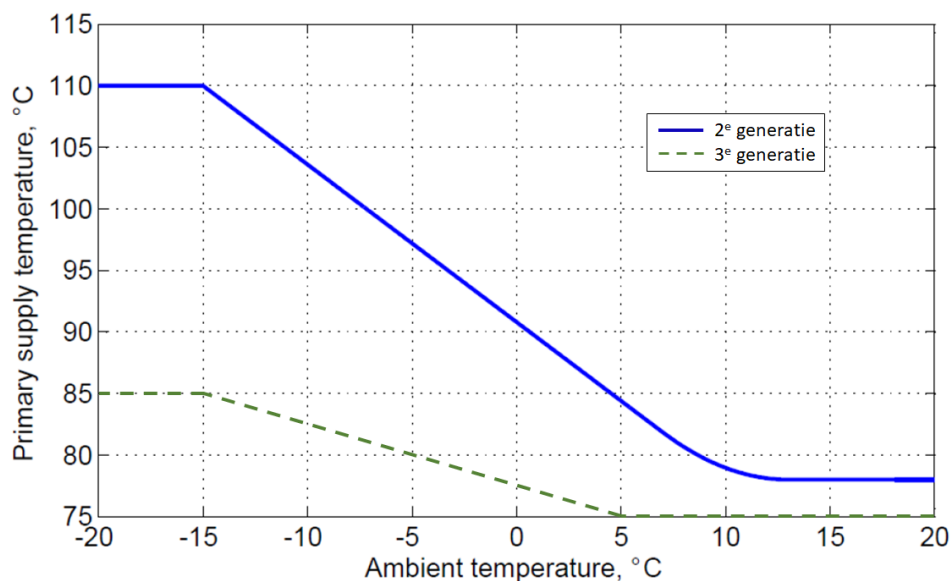
3.1 Centrale maximum aanvoertemperatuur regeling

Om de energieverliezen te reduceren is het wenselijk om de toevoer temperaturen van het net niet hoger te maken dan noodzakelijk en de retourtemperatuur zo laag mogelijk te houden. Als het temperatuurverschil tussen toe- en afvoer hoog is, dan is er minder massastroom nodig om dezelfde hoeveelheid energie aan te voeren, wat reductie van energie voor circulatiepompen tot gevolg heeft. Ook zorgt dit voor kleinere pijpdiameters. Over het algemeen wordt de toevoertemperatuur in een net bepaald door de leverancier, en wordt de retourtemperatuur bepaald door de regelingen in het substation en uiteindelijk bepaald de warmtevragers de retourtemperatuur.

Uit oogpunt van lage warmteverliezen is het gunstig de toevoertemperatuur van een netwerk niet hoger te maken dan noodzakelijk en de retour temperaturen zo laag mogelijk te houden. Echter, lage toevoertemperaturen vereisen ook een groter warmtewisselend oppervlak van radiatoren in de gebouwen om de benodigde warmte te kunnen overdragen. Als de diverse afnemers gekoppeld zijn aan het zelfde primaire net, dan bepaalt de afnemer die de hoogste temperatuur nodig heeft de minimaal benodigde aanvoertemperatuur. Optimaliseren/ verlagen van de temperatuur in een gebouw met als doel de toevoertemperatuur vanuit het primaire net te verlagen heeft daarom alleen zin als dit bij alle afnemers gebeurt.

Vanuit de warmtebronnen is het soms ook gewenst dat er geleverd kan worden bij een lage temperatuur, zoals bijvoorbeeld bij een WKK installatie met een tegendrukstoomturbine (hogere elektrische rendement) of bij terugwinnen van warmte uit een rookgascondensor (hogere warmteterugwinning). Het kan echter zijn dat door de lagere temperaturen het verschil tussen toe en afvoer afneemt, waardoor de volumestroom in het systeem toe moet nemen om dezelfde hoeveelheid warmte over te dragen. Hierdoor nemen de circulatie verliezen toe. Het vraagt om netoptimalisatie om tot de meest gunstige situatie te komen.

De aanvoertemperatuur wordt geregeld in de centrale waar de units staan die voor de warmtetoevoer zorgen. De temperatuur wordt geregeld op een bepaalde setpoint temperatuur. Deze ligt op een lijn (de stooklijn) tussen een minimum en een maximum temperatuur, waarbij de maximumtemperatuur correspondeert met laagste buitentemperatuur (dus wintercondities), zie Figuur 10. In deze figuur is met blauw een stooklijn weergegeven voor een 2^e generatie warmtenet dat op hoge temperatuur wordt bedreven. Met groen is een stooklijn voor een 3^e generatie warmtenet aangegeven.



Figuur 10: Weersafhankelijke, primaire aanvoertemperatuur [9].

Er wordt gewerkt met 4 bedrijfsvoeringsmodi voor de installatie, zie figuur 11 (*vier mogelijke bedrijfsvoeringsmodi voor een warmtenetwerk*). De modus hangt af van de buitentemperatuur. Modus A treedt op bij zeer lage buitentemperatuur (winter). Modus D bij zeer hoge buitentemperatuur (zomer). Modus B en C liggen daar tussen in. De onderstaande temperatuurranges zijn indicatief en afkomstig van praktijkgegevens. Dit kan per installatie verschillen.

- A. $T < -15^{\circ}\text{C}$: hoge variabele aanvoertemperatuur (toenemend bij afnemende buiten temperatuur) en hoge constante massastroom
- B. $-15 < T < -3^{\circ}\text{C}$: variabele aanvoer temperatuur en variabele massastroom (beiden afnemend bij toenemende buitentemperatuur)
- C. $-3 < T < 15^{\circ}\text{C}$ lage constante aanvoertemperatuur en variabele massastroom (afnemend bij toenemende buitentemperatuur)

- D. $T > 15^\circ\text{C}$ lage constante temperatuur en lage constante massastroom. Dit moet net voldoende zijn voor de tapwater voorziening.

3.2 Locale minimum aanvoertemperatuur

In de zomer als er geen warm water getapt wordt dan is er in het geheel geen warmte vraag. De flow in het net zou dan tot stilstand kunnen komen waardoor de temperatuur sterk afneemt vanwege warmteverliezen. Om dit te voorkomen is er een minimum temperatuur van de aanvoer op alle afgiftepunten nodig. Om hiervoor te zorgen bevat elke afleverset of substation een zogenaamde “bypass” (warmhoudfunctie). Dit is een thermostatisch geregelde klep die enige flow laat stromen tussen de aanvoer- en retourleiding. Op die manier blijft er altijd enige flow in het netwerk, net voldoende om de minimum aanvoertemperatuur in het net en op de afleverpunten te waarborgen. Een andere mogelijkheid is een warmtenet met aparte leidingen voor tapwater en voor ruimteverwarming. Als de buitentemperatuur hoog genoeg is, kan het netwerk voor ruimteverwarming worden stilgezet of worden benut voor koeling.

3.3 Centrale en locale maximum drukregeling

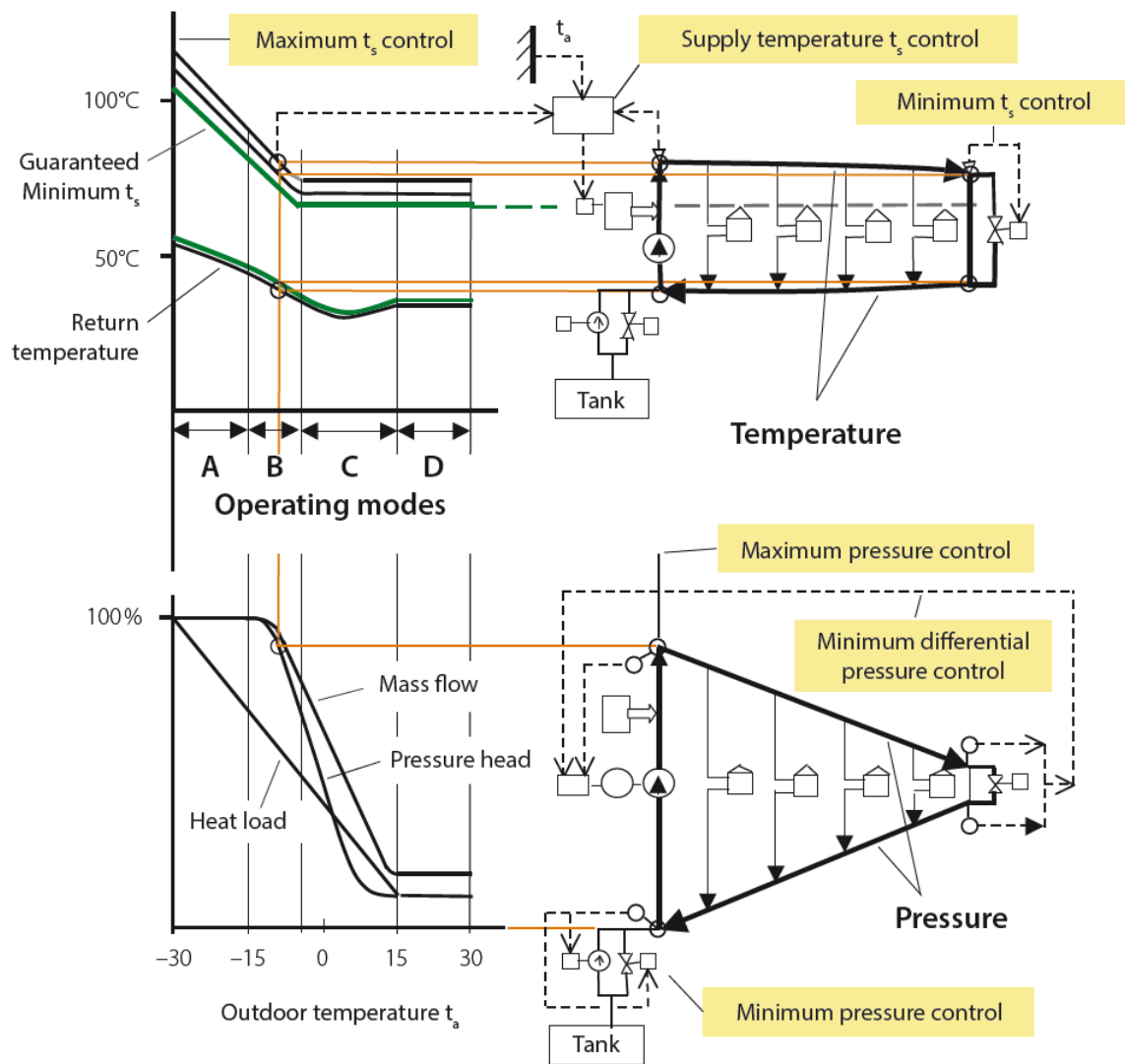
De druk in het leidingnet mag niet boven een maximum uitkomen. Vooral in gebieden met hoogte verschillen is dit van belang. De maximum statische druk treedt namelijk op ter plaatse van een laag punt in het netwerk. In Nederland levert dit door de geringe hoogteverschillen meestal geen problemen op.

3.4 Centrale en locale minimum verschilddruk regeling

Het drukverschil in een warmtenet mag ook niet te laag worden en de minimum druk moet ruim boven de dampspanning van water blijven. Dit kan worden beïnvloed door het systeem onder hogere druk te zetten. Bij grotere netten is veelal een splitsing nodig via een substation vanwaar de druk weer opnieuw wordt opgebouwd en geregeld met een differential pressure valve en de flow met een geregelde pomp. In Figuur 11 is het temperatuur en drukverloop voor de vier bedrijfsmodi weergegeven. Met name het drukverloop tussen aanvoer en retour rechtsonder is een belangrijk regeltechnisch aspect voor het warmtenet. Bij grote warmtevraag is dit drukverloop namelijk groter dan bij lage warmtevraag.

Regeltechnische aspecten van warmtenetten

Pagina 15 / 30



Figuur 11: vier mogelijke bedrijfsvoeringsmodi voor een warmtenetwerk [1]

4 Regeltechnische maatregelen voor efficiency verbetering

In de Nederlandse praktijk worden recent aangelegde warmtenetten (o.a. Meppelenergie, Zwolle-muziekwijk) gedurende het gehele jaar veelal op een constante aanvoertemperatuur van 70–80°C bedreven en vallen daarmee onder de zogenaamde 3^e generatie warmtenetten. De retourtemperatuur t.p.v. de warmtecentrale is afhankelijk van grootte en soort warmtevraag (zomer: tapwater, winter: voornamelijk gebouwverwarming) en wisselt van ca. 10 graden lager dan de aanvoertemperatuur bij geringe belasting, tot ca. 20–25°C bij volle belasting voor de tapwatervraag.

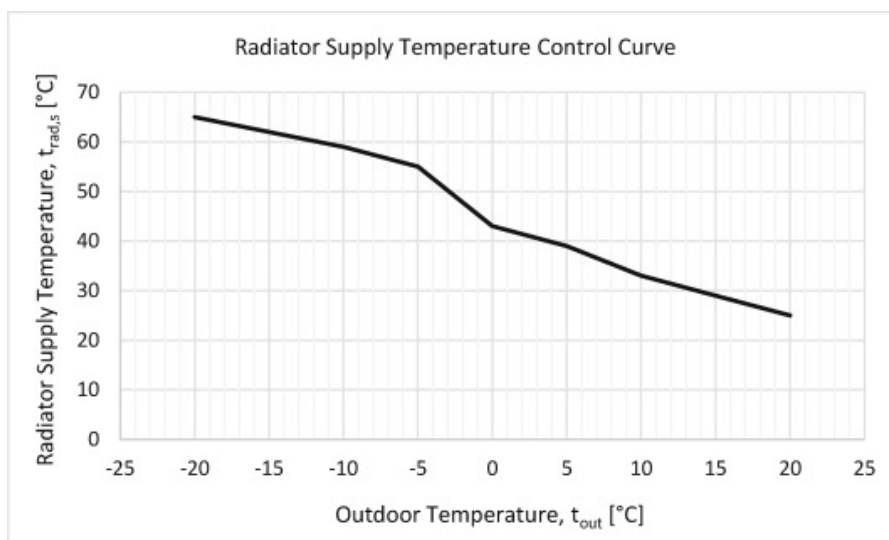
Voor het bereiken van zo laag mogelijke verliezen van een warmtenet, gelden de volgende algemene uitgangspunten:

1. Omdat het warmteverlies van een warmtenet bij benadering een functie is van de gemiddelde temperatuur van de aanvoer en retour, dienen beiden zo laag mogelijk te zijn.
2. Om zoveel mogelijk warmte aan de gebruikers te kunnen overdragen met zo min mogelijk pompenergie, dient het temperatuurverschil tussen aanvoer en retour zo groot mogelijk te zijn.

Om de warmteverliezen in een bestaand warmtenet zo laag mogelijk te krijgen, is een zo laag mogelijke retour temperatuur daarom de eerste stap om op te focussen. De tweede stap is om de aanvoer temperatuur te verlagen maar dit vergt vergaande maatregelen bij de warmtevragers.

4.1 Gevolgen lagere aanvoertemperatuur

Voor een gegeven warmtenet met een aanvoertemperatuur van 80°C is het de vraag of de aanvoertemperatuur naar beneden kan. Dit heeft een samenhang met de gebouwinstallaties. Wanneer traditioneel hoog temperatuur radiatoren gebruikt worden dan zijn de mogelijkheden beperkt, maar er kan wel slimmer geregeld worden, afhankelijk van de buitentemperatuur, zie Figuur 10 (Weersafhankelijke, primaire aanvoertemperatuur) en Figuur 12 (benodigde radiator aanvoertemperatuur). Hierin is te zien dat voor veel radiatoren in gebouwen geldt dat alleen bij zeer lage buitentemperatuur een relatief hoge toevoertemperatuur benodigd is.

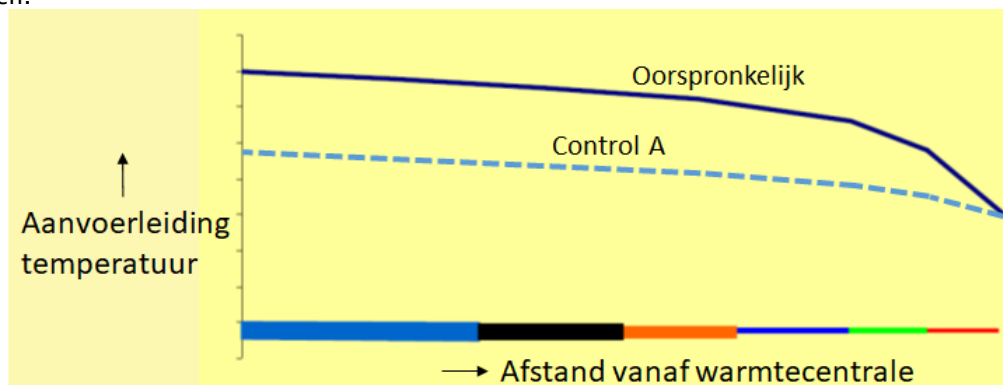


Figuur 12: Benodigde radiator aanvoertemperatuur t.o.v. buitentemperatuur [8]

Het verlagen van de aanvoertemperatuur dient dus weersafhankelijk te gebeuren zoals in Figuur 10 weergegeven. De retourtemperatuur is dan afhankelijk van (a) de warmtevraag en (b) hoe de binneninstallatie is ingeregeld. Indien de binneninstallatie is ingeregeld met te hoge flows door de radiatoren, dan is het temperatuurverschil tussen aanvoer en retour te gering. Dan is ook een hoge flow benodigd vanuit het warmtenet en dit resulteert voor het warmtenet in relatief veel warmteverlies en pompverlies. Een hoog pompverlies kan men voorkomen door een grotere buisdiameter, maar een grotere buisdiameter geeft een groter verliesoppervlak van de buizen en daardoor weer meer warmteverlies. Het zal duidelijk zijn dat een warmtenet gebaat is bij goed ingeregelde gebouwinstallaties en dat verdere optimalisatie nodig is om de meest gunstige aanvoertemperatuur en flow te bepalen in relatie tot de belasting en het ontwerp van het warmtenet.

4.2 Temperatuurverloop in een warmtenet

In een warmtenet verloopt de aanvoertemperatuur van een relatief hoge waarde bij de warmtecentrale, naar lagere waarden hoe verder men van de warmtecentrale af beweegt in de vertakkingen van het net. In figuur 13 is dit temperatuurverloop aangegeven voor een bepaalde tak van een warmtenet. Te zien is dat de temperatuur door warmteverliezen sneller daalt richting de uiteinden van het net, met name doordat daar de volumestroom laag is, ook al heeft men daar een kleinere diameter van het net ontworpen.

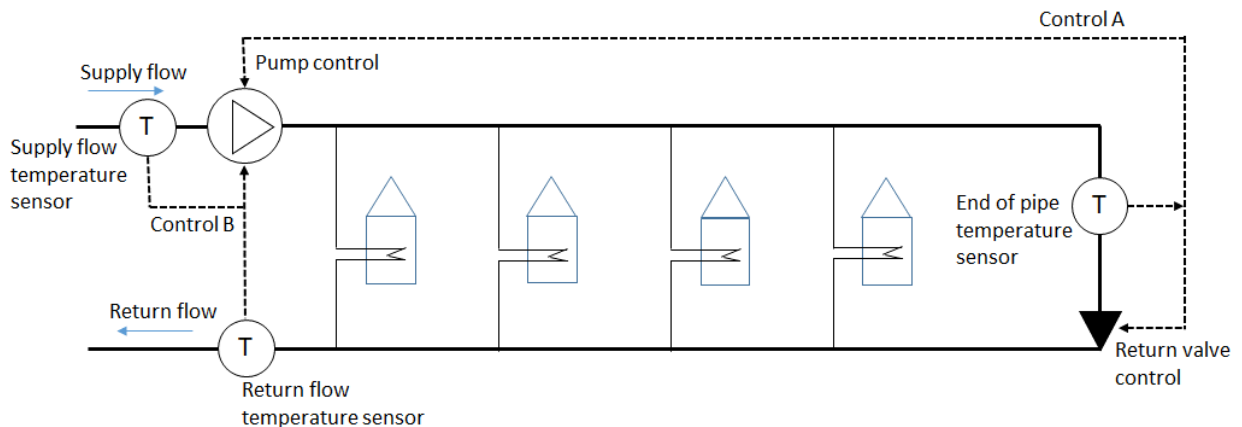


Figuur 13: temperatuurverloop in de aanvoerleiding van een warmtenet [2]

De hoogte van de aanvoertemperatuur die de warmtecentrale moet leveren heeft een relatie met het af te leggen traject tot het verst gelegen en koudste punt van het net. Op dat punt moet de temperatuur nog net gegarandeerd kunnen worden. Bij kleinere warmtenetten (enkele honderden woningen) is het verschil tussen de hoogste en laagste temperatuur veelal beperkt tot ca. 5–10°C. Bij grotere warmtenetten kan dit op sommige momenten oplopen tot 10–20°C. Wanneer een warmtenet in omvang groeit, nemen dit soort temperatuurverschillen toe en is een steeds hogere temperatuur bij de warmtecentrale nodig om de koudste punten in het net te kunnen voorzien van voldoende hoge temperatuur. In [1] is uiteen gezet welke maatregelen genomen kunnen worden vanuit de opbouw van het warmtenet en die bedoeld zijn om de temperatuurverschillen niet te hoog op te laten lopen, b.v. de realisatie van een ringleiding of een tweede warmtecentrale op een ander punt in het warmtenet.

4.3 Verbetering afstemming warmtecentrale op koudste punten in het net

Regeltechnisch kan de afstemming van de warmtecentrale op de koudste punten in een warmtenet worden verbeterd door b.v. op het uiteinde van een tak de temperatuur te monitoren en de flow in de tak hierop af te stemmen. Deze temperatuur is namelijk te verhogen of te verlagen door een hogere of lagere flow in de betreffende tak, of door een hogere of lagere temperatuur vanuit de warmtecentrale. De flow in een tak kan worden beïnvloed door het sturen van een bypass klep aan de uiteinden van de takken, of een pomp in het warmtenet t.p.v. substations. Het regelsysteem zal dan naast een centrale sturing, ook decentrale stuurmogelijkheden moeten bevatten om de flow in verschillende takken van het warmtenet adequaat te regelen. In figuur 14 is voor één tak van een warmtenet schematisch een overzicht gegeven van deze decentrale stuurmogelijkheden (Control A). Het doel van “Control A” is aangegeven in Figuur 13: proberen een zo gelijkmatig mogelijke temperatuur te bereiken in het warmtenet en daarmee de temperatuur in het net als geheel te verlagen.



Figuur 14: schematische weergave van decentrale stuurmogelijkheden.

4.4 Lerend en voorspellend regelen: tijdelijke temperatuuronderschreiding toestaan

Bovenstaande maatregelen zijn bedoeld om de stuurmogelijkheden te vergroten om met zo min mogelijk energie de temperatuur op alle plekken in het warmtenet op alle momenten te kunnen garanderen. Echter, de temperaturen van de koudste punten in een warmtenet hebben ook een relatie met de warmtevraag. Indien er nauwelijks tot geen warmtevraag is in een bepaalde tak, b.v. tijdens een zomernacht dan is de flow in die tak laag en het warmteverlies hoog. Interessante vraag is hoe ernstig een bepaalde onderschreiding van de aanvoer temperatuur op dat moment is. Indien men beschikt over monitoring informatie van de warmtevraag, dan is men in staat om in een “lerende regeling” deze vraag te voorspellen, maar bovendien om de relatie tussen de vraag en de temperatuur in het warmtenet ter plaatse te voorspellen en adequaat te regelen. Onderschreidingen van de temperatuur kunnen daarbij optreden maar passen bij een situatie waarin er gedurende enkele uren tot dagdelen geen warmtevraag is rondom de uiteinden van een bepaalde tak. Deze “slimme regeling” kan worden toegevoegd op de decentrale stuurmogelijkheden die bovenstaand zijn genoemd. Een eenvoudige manier om dit te realiseren is weergegeven met “Control B” in Figuur 14. Door het plaatsen van twee aanvullende temperatuursensoren in de aanvoer- en retourleiding is het mogelijk om de warmtevraag in de betreffende tak te monitoren. Dit kan ook via de warmtemeters in de woningen maar in de regel worden deze niet continu gemonitord maar slechts periodiek (b.v. maandelijks) uitgelezen.

Het idee om tijdelijke onderschreiding van de laagste temperaturen in een warmtenet toe te staan op basis van “geleerd” gedrag van de warmtevraag, kan nog verder worden doorgevoerd door gedurende enkele uren de flow in een tak stop te zetten, wanneer blijkt dat een tak gedurende langere tijd (meerdere uren) en vrijwel dagelijks geen warmtevraag laat zien. In Figuur 14 betekent dit dat men de pomp op die momenten kan uitschakelen en de kleppen van de bypasses kan sluiten. Op dat moment zal het aanwezige water in met name de aanvoerleiding langzaam afkoelen. Bij goed geïsoleerde warmteleidingen is de temperatuurdaling die in enkele uren wordt bereikt echter niet groot. Bovendien is een temperatuurstijging terug naar het normale niveau relatief snel voor elkaar te krijgen door de bypasskleppen te openen en de pomp te starten. Uiteraard dient het inschakelen enige tijd vóór de verwachte warmtevraag in de tak plaats te vinden, anders kan men niet op tijd de juiste warmte leveren. Het doel van “Control B” is om in Figuur 13 de temperatuurcurve van “Control A” nog iets verder te laten dalen.

Bij de warmtenetten in Oost-Nederland en op internet is onderzocht of bovenstaande ideeën worden toegepast. De bestaande en nieuwe warmtenetten passen op dit moment nog niet dit soort meer geavanceerde regeltechnische functies toe. In de praktijk houdt men de monitoring en regeltechniek het liefst zo eenvoudig en robuust mogelijk. Wel zien we sinds kort enkele nieuwe ontwikkelingen op de markt zoals het decentrale sturingssysteem van Grundfos waarmee een warmtenet in meerdere secties kan worden opgedeeld om de pompdruk te verlagen en aanvoertemperaturen per sectie te kunnen regelen.

4.5 Naar een lagere aanvoer- én retourtemperatuur van warmtenetten

Bij moderne, 3^e generatie warmtenetten die worden bedreven op een aanvoertemperatuur van 70–80°C is er veelal een adaptieve sturing van de pompen (frequentiesturing) die reageert op de momentane warmtevraag. Dit zorgt voor een zo laag mogelijke pompenergie, maar ook dat het warmtenet op alle tijdstippen hydraulisch in balans is binnen de grenzen van het toegestane drukverschil tussen aanvoer en retour.

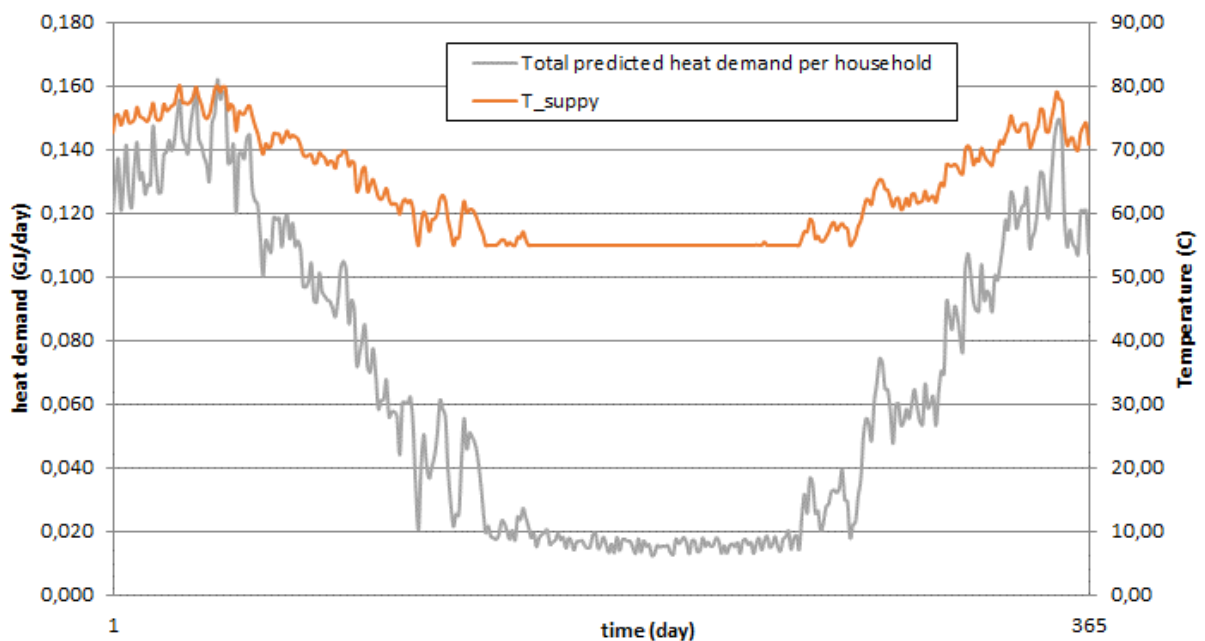
Zoals gesteld kan een belangrijke efficiencywinst bereikt worden door de temperatuur van de aanvoerleiding zo laag mogelijk te regelen. Wanneer er woningen zijn aangesloten met een gelijksoortige, relatief lage temperatuurvraag voor ruimteverwarming dan is een weersafhankelijke regeling van de aanvoertemperatuur voldoende. Indien de woningen beschikken over vloerverwarming of over radiatoren met voldoende groot oppervlak dan kan de aanvoertemperatuur wel tot ca. 45 à 50 graden (weersafhankelijk) teruggebracht worden. Echter, op die momenten wordt de minimum temperatuur van de aanvoer bepaald door de benodigde temperatuur voor de tapwatervraag. Voor tapwater is een afgiftetemperatuur van 50°C vaak meer dan voldoende, voor douchen zelfs lager. Het warmtenet levert deze temperatuur vanuit een warmtewisselaar in de afleverset van de woning. Hierbij is er ca. 5°C temperatuur verschil nodig tussen aanvoer en tapwaterlevering. Dit betekent dat het warmtenet in principe terug kan naar een aanvoertemperatuur van 55°C. Er resteert dan in de afleverset wel enig risico op legionellagroei. Vanuit de tapwater normering worden aanbevelingen gedaan om leidinglengtes binnen afleversets zo kort mogelijk te houden, een spoelprogramma voor de leidingen te introduceren of om periodiek, b.v. wekelijks de temperatuur een uur boven 60°C te houden. Dit hoeft in principe niet door het warmtenet bereikt te worden, maar kan ook door een elektrisch verwarmingselement in de afleverset te implementeren. Dit zou een innovatie zijn voor dergelijke installaties.

Regeltechnische aspecten van warmtenetten

Pagina 20 / 30

Wanneer de warmtevraag stijgt en de woninginstallaties een hogere verwarmingstemperatuur nodig hebben, dan kan de aanvoertemperatuur omhoog worden geregeld tot het maximum van 70–80°C. Het is zelden het geval dat woningen onveranderd blijven in een warmtenet, zeker niet in de komende jaren waarin renovatie aan de orde is. Een warmtenet weet echter niet “uit zichzelf” dat de situatie van woningen verandert en dat zij wellicht met een lagere temperatuur verwarmd kunnen worden. Men kan dit ook beïnvloeden door bewoners te proberen te “verleiden” om laag temperatuur radiatoren of vloerverwarming te installeren. Het beste kan men hiermee beginnen bij bewoners die aan de uiteinden van een warmtenet wonen, zie Figuur 13 want daar is het het meest interessant.

In Figuur 15 is het jaarlijkse verloop van de belasting van een warmtenet te zien (linkeras) en het verloop van de aanvoertemperatuur (rechts) wanneer deze weersafhankelijk wordt geregeld zoals bovenstaand uiteen gezet. Dit moet vergeleken worden met een constante aanvoertemperatuur van 80°C voor het gehele jaar. Het totale warmteverlies van het net kan dus substantieel lager worden wanneer de temperatuur weersafhankelijk wordt geregeld.



Figuur 15: totale warmtevraag en weersafhankelijke aanvoertemperatuur van een warmtenet

5 4^e generatie warmtenetten en smart thermal grids

Warmtenetten lenen zich uitstekend om allerlei vormen van duurzame warmtebronnen en restwarmtebronnen toe te passen. Voor een overzicht hiervoor zie Figuur 16. Een lage temperatuur van het warmtenet en efficiënte sturing van warmtebronnen zijn dan echter van groter belang om de bronnen met een zo hoog mogelijke efficiency te kunnen benutten. Een gasketel kan men namelijk relatief snel in vermogen en afgiftetemperatuur schakelen, maar een warmtepomp en biomassaketel reageren aanzienlijk trager. Daarnaast wil men b.v. een warmtepomp voor een lange levensduur langdurig op een constant toerental in kunnen zetten en wil men een (restwarmte)bron zo goed mogelijk benutten, in combinatie met warmteopslag en dit gaat aanzienlijk gemakkelijker bij een lage temperatuur van het warmtenet. Ook de efficiency van sommige bronnen, zoals de COP van een warmtepomp of inzet van een zonthermisch systeem neemt toe naarmate de afgiftetemperatuur lager is. Veel industriële restwarmtebronnen zijn beschikbaar op een temperatuurniveau van 30–60 graden en kunnen alleen direct worden ingezet in een laag temperatuur warmtenet.

Een warmtenet met duurzame bronnen vraagt dus veelal om een lage aanvoertemperatuur maar daarnaast ook om aanzienlijk meer regeltechnische slimheid om meerdere bronnen optimaal te kunnen inzetten. In Figuur 16 is te zien dat men deze geoptimaliseerde, laag temperatuur en duurzame warmtenetten, 4^e generatie warmtenetten noemt.

5.1 Laag temperatuur warmtenetten van de 4^e generatie

Veel warmtenetten in Nederland functioneren nog op het niveau van 2^e of 3^e generatie warmtenetten. De stap naar een 4^e generatie warmtenet kan alleen worden gemaakt wanneer de aangesloten woningen zijn voorzien van laag temperatuur verwarming. Op dat moment is de gewenste tapwater temperatuur bepalend. Voor het leveren van warm tapwater zijn er echter ondersteunende oplossingen die decentraal kunnen voorzien in de vereiste hoge temperatuur ter plaatse van de leverpunten (vanwege legionella).

Enkele voorbeelden:

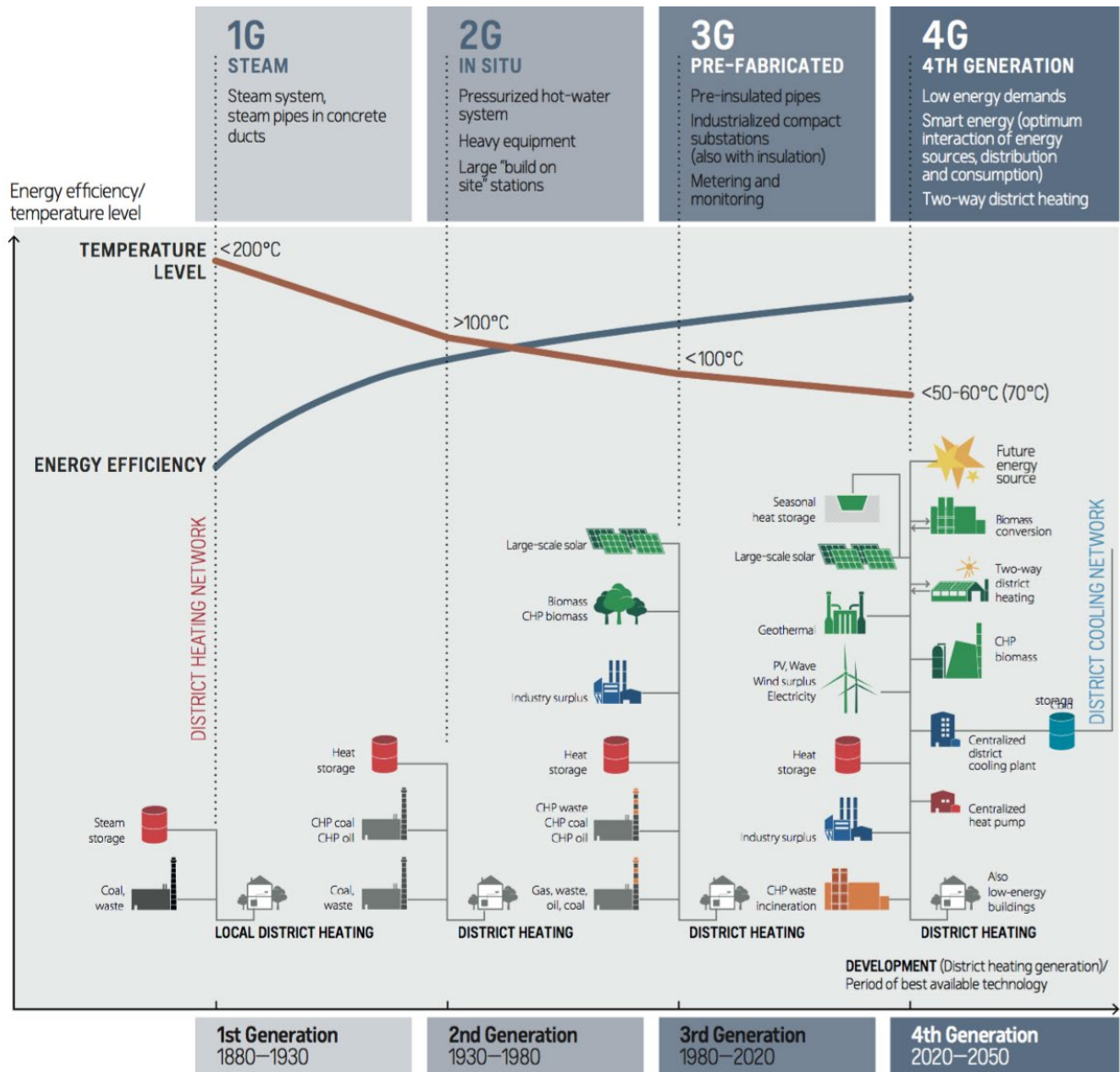
1. Een zonneboiler met elektrische naverwarming toepassen t.p.v. de gebouwen voor de levering van tapwater op zonnige dagen, zie Figuur 17. Eventueel kan de elektrische verwarmers op minder zonnige dagen voorzien in warm tapwater. De warmte uit het warmtenet kan op minder zonnige dagen en in de winterperiode gebruikt worden als voorverwarming voor de boilers.
2. Een warmtepompboiler die het warmtenet het gehele jaar als warmtebron gebruikt. In dat geval kan het warmtenet gedurende de zomermaanden naar een temperatuur van ca. 20 graden aanvoer geregeld worden en in de winter naar ca. 50 graden.
3. Afleversets met een elektrisch verwarmingselement om het tapwater na te verwarmen.

Ad 1.

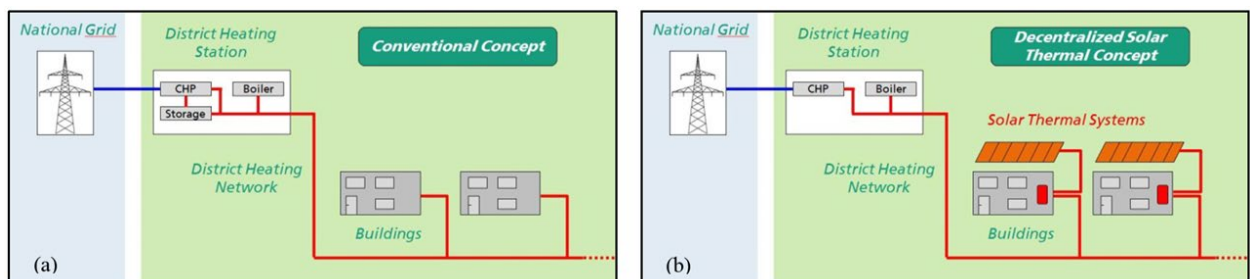
Door deze maatregel kan het warmtenet grotendeels “uit” gedurende de zomermaanden. Aangezien de zomerperiode de grootste bijdrage levert aan het verlies van een warmtenet, zullen de jaarlijkse verliezen aanzienlijk kunnen afnemen. Een jaarlijks warmteverlies van ca. 30% kan b.v. tot 5 à 10% worden teruggebracht. De nadelen van deze optie zijn: de installatiekosten van de zonneboilers, het ruimtebeslag van een zonneboiler in de woningen en het elektriciteitsverbruik van de naverwarming van het tapwater.

Regeltechnische aspecten van warmtenetten

Pagina 22 / 30



Figuur 16: generatieoverzicht van warmtenetten naar toenemende duurzaamheid en lagere temperatuur.



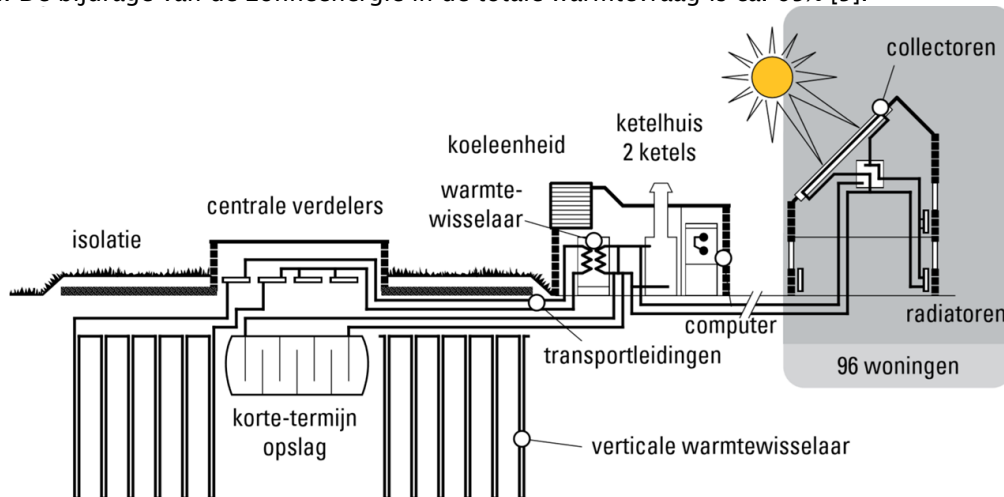
Figuur 17: decentrale zonneboilers binnen een stadsverwarming [4]

Regeltechnische aspecten van warmtenetten

Pagina 23 / 30

Regeltechnisch betekent deze optie dat een uitbreiding nodig is met een systeemfunctie die het moment kan bepalen waarop het warmtenet “aan” en “uit” gaat. Omdat het enige tijd duurt voordat een warmtenet opwarmt of afkoelt, en dit bovendien een vorm van energieverlies is, wil men dit niet te vaak in een jaar doorlopen. Het regelsysteem moet dus “slim” kunnen bepalen wat de best mogelijke momenten zijn. Het beste kan men hiervoor een voorspellend model gebruiken waarin de warmtevraag in relatie tot actuele weervoorspellingen voor 7–14 dagen vooruit wordt bepaald. Voor het “uit” schakelen van het warmtenet moet men er namelijk zeker van zijn dat er niet binnenkort weer een ruimteverwarmingsvraag is, waardoor het warmtenet weer opnieuw opgestart moet worden. Na de zomerperiode wil men er zeker van zijn dat de opkomende warmtevraag op tijd geleverd kan worden in relatie tot de opstarttijd van het warmtenet. Dit is vrij eenvoudig nauwkeurig te bepalen aangezien de weersverwachting voor 1–2 dagen vooruit aanzienlijk nauwkeuriger is dan de weersverwachting voor een groter aantal dagen vooruit.

In Europa worden op enkele plaatsen stadsverwarmingssystemen toegepast die door woninggebonden zonneboilers worden ondersteund, o.a. in Malmö. In Nederland is sinds de jaren '80 een dergelijk systeem in gebruik in Beijum in de provincie Groningen. In Figuur 18 is dit systeem schematisch weergegeven. De warmte van in totaal 2350m² zonnecollectoren op 96 woningen wordt direct in de woningen gebruikt voor tapwater en verwarming via laag temperatuur radiatoren. Warmteoverschotten worden opgeslagen in de bodem. Het systeem wordt in de wintermaanden ondersteund met een gasketel. De bijdrage van de zonneenergie in de totale warmtevraag is ca. 65% [5].



Figuur 18: systeemconcept Beijum [5].

Een gebruikelijker vorm die in Zweden, Denemarken, Duitsland en Oostenrijk vrij veel voorkomt is centrale zonthermie of solar district heating. Dit is een combinatie van stadsverwarming, grootschalige zonnecollectorvelden of collectoren op industriedaken in combinatie met seizoensopslag [6].

Ad 2.

Een warmtepomp tapwaterboiler kan werken met behoorlijk lage brontemperaturen. Voor warmtepompen gelden twee algemene inzichten:

- a. De efficiency (COP) van een warmtepomp is gunstiger bij een kleiner temperatuurverschil tussen bron en afgifte.
- b. Een warmtepomp kan qua ontwerp relatief eenvoudig blijven (enkeltraps compressie) en in de regel met een economisch acceptabele COP een temperatuurverschil van 40–50°C tussen bron en afgifte overbruggen.

Wanneer de warmtepompboiler met een verwaarloosbaar risico op legionella besmetting warm tapwater levert dan is hiervoor minimaal 60°C nodig. Volgens bovenstaande uitgangspunten is dan een brontemperatuur nodig van minimaal 10–20°C. Met zulke lage temperaturen is ruimteverwarming vanuit het warmtenet niet mogelijk, dus in dat geval wordt de minimaal benodigde aanvoer temperatuur voor ruimteverwarming bepalend voor het warmtenet. De temperatuur is dan afhankelijk van het warmteafgiftesysteem en de isolatiewaarde van de gebouwen die zijn aangesloten. Voor oudere gebouwen die worden verwarmd met radiatoren is een aanvoer van 60–80°C nodig. In dat geval wint men dus met de plaatsing van warmtepompboilers in de gebouwen weinig tot niets. Binnen moderne of gerenoveerde gebouwen is vaak vloerverwarming aanwezig of zijn er laag temperatuur radiatoren, waardoor de aanvoertemperatuur kan liggen tussen 30–50°C. In dat laatste geval kan de retourtemperatuur van het warmtenet dicht bij de brontemperatuur van de warmtepompboiler liggen op ca. 20°C. Daarmee kan dus wel een substantiële verlaging van het warmteverlies van het warmtenet worden bereikt. De optie van decentrale warmtepompboilers is dan ook alleen zinvol in combinatie met laag temperatuur warmteafgifte in de aangesloten gebouwen. Een ander voordeel van de toepassing van een warmtepompboiler per woning is dat gedurende de wintermaanden de warmtepompboiler aangesloten kan zijn op de retour van het warmtenet. Hierdoor kan het warmtenet simultaan de woning verwarmen én de warmtepomp voeden. Dit zorgt ervoor dat belastingpieken voor de aanvoerszijde minder hoog kunnen zijn en minder vaak voor zullen komen. Daarnaast neemt hierdoor het temperatuurverschil tussen aanvoer en retour toe wat resulteert in minder pompenergie en minder netverliezen.

Wanneer decentrale warmtepompboilers in een laag temperatuur warmtenet worden toegepast, dan vraagt dit regeltechnisch om een aantal aanpassingen t.o.v. de situatie zonder warmtepompboilers:

- Het werken met lagere aanvoertemperaturen vraagt minimaal om aanpassing van de “stooklijnen” voor de aanvoertemperatuur.
- Gemiddeld zal t.o.v. de situatie van een warmtenet met een hogere aanvoertemperatuur, het temperatuurverschil tussen aanvoer en retour afnemen, wat om aanpassing van de pompsturing vraagt en mogelijk het bijplaatsen van een pomp om een grotere volumestroom door het warmtenet te kunnen sturen op momenten van piekvraag.
- Voor de zomerperiode is in principe geen voorspellende regeling nodig omdat in die periode de stooklijn de minimale aanvoertemperatuur zal aansturen. Het is echter wel heel zinvol om het “laden” van de warmtepompbuffers gedurende enkele uren per dag te laten plaats vinden, zodat het warmtenet de rest van de dag “uit” kan.
- Een dergelijke “slimme” regeling kan ook worden ingezet om in de winterperiode het laden van de warmtepompbuffers zoveel mogelijk overdag te laten plaats vinden, rondom momenten van minimale ruimteverwarmingsvraag, zodat vraagpieken kunnen worden voorkomen. Verder

onderzoek is nodig om te bepalen of dit met een relatief eenvoudige “programmaregel” op centraal niveau al kan worden bereikt, of dat hiervoor een lerend en voorspellend model nodig is (van het warmtenet of van de verschillende secties binnen het net) om tot een optimale aansturing te komen waarin de vraagpieken worden geminimaliseerd.

Referenties: [4], [9], [12], [13], [14] en [15].

5.2 Smart thermal grids

In het voorgaande zijn al enkele aspecten aan de orde geweest van wat een “smart thermal grid” of slim thermisch netwerk kan omvatten, zoals het regelen van het warmtenet op basis van een voorspelling van de warmtevraag met als doel het minimaliseren van de warmte- en pompverliezen. In het algemeen wordt in de literatuur (voor een goede inleiding zie [3]) een smart thermal grid verbonden met de volgende doelstellingen:

1. Voorkomen van hoge warmtevraagpieken in het warmtenet om b.v. pompverliezen te beperken en duurzame warmtebronnen efficiënter te kunnen benutten. Een neveneffect van lagere piekbelastingen is dat de buisdiameters van een warmtenet kleiner kunnen zijn. In het Engelstalige wordt het voorkomen van vraagpieken ook wel “peak shaving” of “demandside management” genoemd. Beide termen zijn afkomstig vanuit elektrische smart grid literatuur.
2. Slimme inzetsturing van duurzame warmtebronnen en warmteopslag om deze met zo laag mogelijke kosten en zo hoog mogelijke efficiency te kunnen inzetten.
3. Integratie van een warmtenet in een decentraal, duurzaam energiesysteem. Een dergelijke integratie omvat o.a. sectorkoppeling, b.v. de koppeling van een warmtenet met het elektriciteitsnet via een warmtepomp.

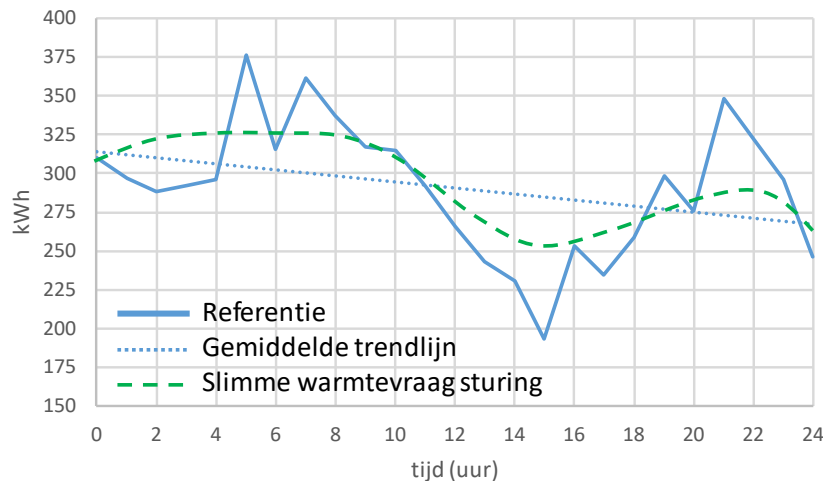
In het hiernavolgende worden deze doelstellingen verder verkend en worden enkele voorbeelden gegeven.

5.3 Voorkomen van warmtevraagpieken

De momentane warmtevraag in een warmtenet komt tot stand door de momentane vraag voor gebouwverwarming en levering van warm tapwater. Ter illustratie, in Figuur 19 is voor een winterdag de warmtevraag in een warmtenet met 200 aangesloten woningen weergegeven. Gegevens hiervoor zijn ontleend aan het warmtenet Meppel Nieuwveenselanden [16].

Regeltechnische aspecten van warmtenetten

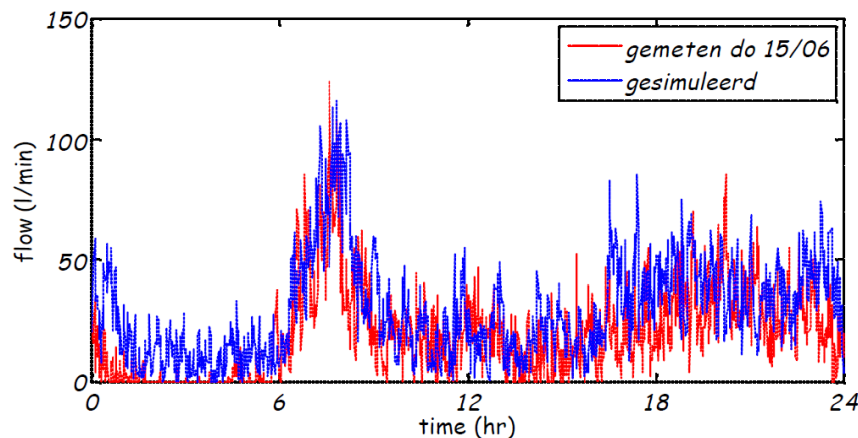
Pagina 26 / 30



Figuur 19: warmtevraag op 1 januari 2015 van 200 woningen

Opvallend hierin is de piekvraag rond 5 uur en 7 uur in de ochtend en rond 21 uur in de avond. De piekvraag rond 5 uur ontstaat in belangrijke mate doordat veel bewoners de kamerthermostaat zodanig instellen dat deze gedurende de nacht een lager setpoint heeft dan gedurende de dag. De pieken rond 5 en 7 uur ontstaan doordat vrij veel thermostaten rond dat tijdstip besluiten de woning weer op temperatuur te brengen na de nachtelijke afkoeling. Tegelijkertijd staan veel mensen rond 7 uur op en dan ontstaat tevens een vraagpiek voor warm tapwater. In Figuur 20 is het verloop van de vraag naar warm tapwater getoond. Het gaat hier om gemeten gegevens voor een woningproject van ca. 350 woningen [17]. Uit het verloop van Figuur 19 en 20 is af te leiden dat de vraagpiek rond 21 uur in de avond ook het gevolg zal zijn van het simultaan optreden van de warmtevraag voor ruimteverwarming (hogere thermostaatsetting voor de avonden) én warm tapwaterverbruik.

Om de totale vraagpiek te reduceren kan getracht worden de warmtevraag te verschuiven in de tijd. Een mogelijkheid daarvoor is om de woningverwarming vroeger in de nacht en/of juist later op de dag te laten aanvangen, daarbij gebruik makend van de thermische massa van de gebouwen om de warmte gedurende langere tijd vast te houden. Voor een vloerverwarmingssysteem is in [18] onderzocht wat de gevolgen zijn wanneer via slimme sturing van de thermostaat in een woning, de verwarming enkele uren eerder in de nacht en enkele uren later overdag wordt ingeschakeld om de woning te verwarmen. Voor een moderne, goed geïsoleerde woning blijkt deze vorm van sturing het comfort in de woning goed te kunnen waarborgen. Daarnaast blijkt het bijkomende warmteverlies dat ontstaat doordat de woning warmer wordt gehouden op momenten dat de bewoners daar minder behoefte aan hebben, verwaarloosbaar.



Figuur 20: verloop van de tapwatervraag voor ca. 350 woningen.

E.e.a. betekent dat deze vorm van slimme sturing ervoor kan zorgen dat de warmtevraag voor het warmtenet meer kan verlopen in de richting van de gemiddelde warmtevraag, welke met een blauwe stippellijn in Figuur 19 is aangegeven. Een realistisch vraagprofiel is met een groene stippellijn aangegeven. De piekreductie die op deze manier wordt bereikt is voor dit voorbeeld ca. 13%. Dit kan oplopen tot ca. 20% voor de koudste dag van het jaar. Dit lijkt niet veel maar het kan in een warmtenet voor lagere investeringen zorgen doordat een kleinere buisdiameter toegepast kan worden, daarnaast een kleinere warmteopslag en kleinere broncapaciteit.

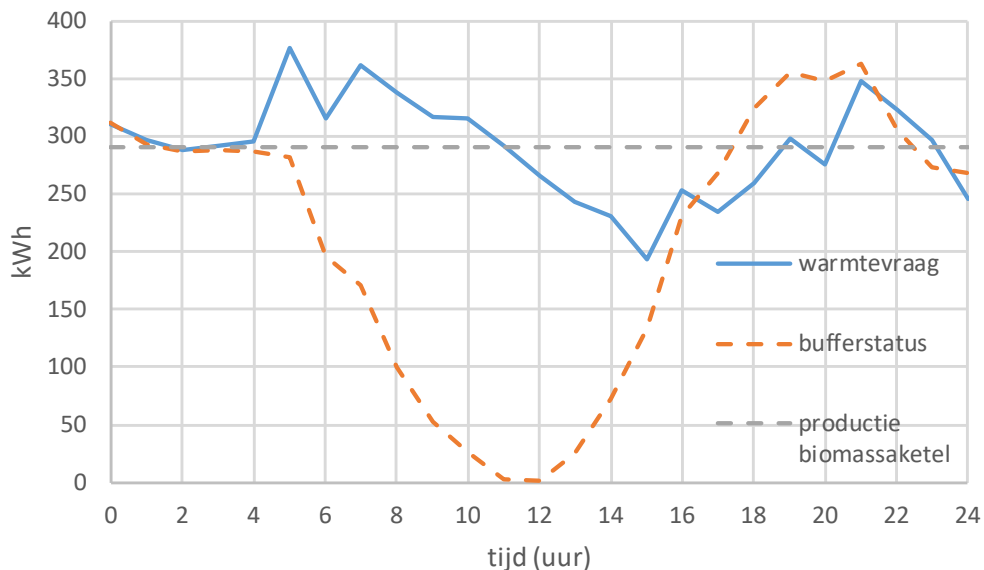
Regeltechnisch is deze mogelijkheid ingrijpend. Er is een vorm van communicatie nodig tussen de centrale controller en de thermostaten van iedere woning. Deze communicatie kan plaats vinden via prijssturing zoals bij elektrische smart grid systemen gangbaar is, maar zou ook via “model predictive control” kunnen plaats vinden. In dat laatste geval moet elke woning een eigen regeldoel meekrijgen vanuit de centrale controller. Zo’n regeldoel wordt vastgesteld op basis van een model voorspelling door de centrale controller. Een model predictive controller kan het gedrag van het warmtenet voorspellen en daaruit regeldoelen afleiden om tot een meer gewenst gedrag van het warmtenet te komen. Daartoe bevat een model predictive controller “machine learning” algoritmen die het thermisch systeemgedrag kunnen leren en die kunnen voorspellen wat de gevolgen zijn van een geoptimaliseerde sturing. Meer hierover is te lezen in [16].

5.4 Efficiënte inzet van duurzame warmtebronnen en thermische opslag

Duurzame warmtebronnen zoals b.v. industriële restwarmte, zonthermische systemen, geothermie en warmtepompen hebben een bepaald systeemgedrag m.b.t. het aanbod van warmte. Restwarmte en geothermie zijn b.v. vaak continu beschikbaar en kunnen zich niet snel aanpassen aan warmtevraagpieken of momenten van geringe warmtevraag, tenzij er een aanbod overschot aan warmte is. Dit is echter meestal niet het geval omdat anders te hoge kosten zijn gemaakt voor het zo goed mogelijk benutten van het bronsysteem. Vaak wordt een combinatie van warmtebronnen gebruikt: dure bronnen worden zo goed mogelijk continu ingezet op hun beschikbare capaciteit, goedkopere bronnen springen bij op momenten van piekvraag.

Om industriële restwarmte, zonthermische systemen, biomassa verbranding en geothermie zo goed mogelijk economisch en continu in te kunnen zetten, is meestal ook warmteopslag nodig om momenten van piek- en dalvraag op te kunnen vangen. Een zonthermisch systeem b.v. wekt de warmte

overdag tijdens zonuren op en er is warmteopslag nodig om de warmte te kunnen leveren buiten de zonuren. In Figuur 21 is de situatie van Figuur 19 weergegeven met warmtelevering door een biomassaketel. Een continu inzet van de ketel is gunstig voor de efficiency van de verbranding. De continu inzet van de biomassaketel is aangegeven met een grijze stippellijn. Zolang de ketel onvoldoende warmte kan leveren, wordt ook warmte uit een buffervat geleverd. De energie in het buffervat neemt daardoor af volgens de oranje gestippelde lijn. Rond 11 uur levert de biomassaketel meer warmte dan de vraag en op dat moment kan het buffervat weer opgeladen worden.



Figuur 21: inzet van warmtebron en warmtebuffer

Om voor deze situatie de biomassaketel dagelijks goed te kunnen sturen en het buffervat zo efficiënt mogelijk in te zetten, is een voorspelling van de warmtevraag voor de komende 24 uur nodig. Een opvallend detail in Figuur 21 is dat de bufferstatus aan het einde van de dag iets lager is dan aan het begin van de dag. In Figuur 19 is te zien dat de trendlijn van de warmtevraag gemiddeld gezien dalend is. Verwacht kan dus worden dat de volgende dag met iets minder initiële warmte in het buffervat en een lagere warmteproductie van de biomassaketel volstaan kan worden. Met een voorspellend model waarin op basis van de weersverwachting een berekening van de warmtevraag wordt uitgevoerd, kan dit geverifieerd worden en kan de regeling de warmteproductie van de biomassaketel in relatie tot de bufferstatus en de warmtevraag adequaat sturen.

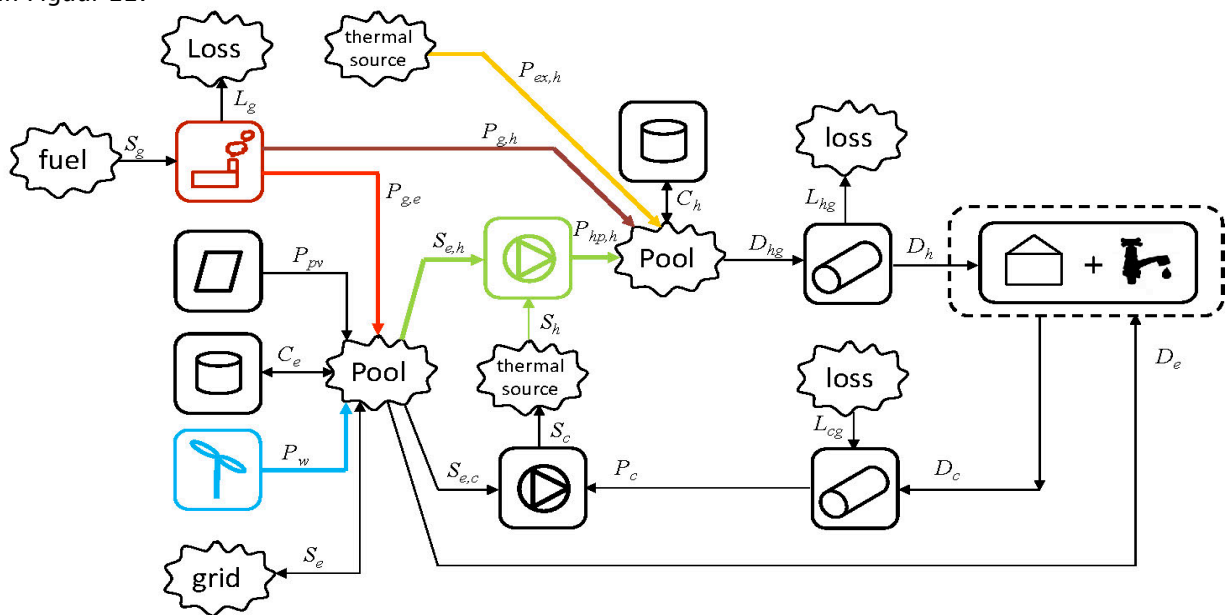
Zo zijn er vele voorbeelden te bedenken en ook onderzocht m.b.t. de meest optimale inzet en samenwerking van meerdere, duurzame warmtebronnen voor warmtenetten, zie o.a. [19], [20], [21] en [22].

5.5 Systeemintegratie binnen een decentraal, duurzaam energiesysteem

Een decentraal energiesysteem met veel duurzame opwekcapaciteit resulteert in een aanzienlijke onbalans tussen vraag en aanbod van energie. De onbalans zorgt voor momenten van hoge en lage energieprijzen. Doordat elektriciteit eenvoudig in warmte kan worden omgezet en warmte eenvoudig kan worden opgeslagen, biedt een warmtenet veel flexibiliteit om onbalans op te kunnen vangen. Door te reageren op de prijs van energie is dit bovendien relatief eenvoudig te regelen en biedt het financiële

voordelen voor het warmtenet. Een warmtenet kan hierdoor in belangrijke mate bijdragen aan de stabiliteit van een decentraal elektriciteitsnet.

Enkele voorbeelden hiervan zijn o.a. uitgewerkt in [16]. Hierin is een model beschreven waarmee een decentraal, duurzaam energiesysteem gesimuleerd kan worden. Schematisch is het model weergegeven in Figuur 22.



Figuur 22: modelschema van een decentraal, duurzaam energiesysteem.

Aan de linkerzijde staan enkele duurzame warmte- en elektriciteitsopweksystemen, van boven naar beneden: biomassa WKK of ketel, zonPV panelen, elektrische opslag en windenergie. Onderin is de verbinding naar het landelijk elektriciteitsnet aangegeven. De opwekkers produceren elektrische energie die richting een “pool” gaat. Warmte wordt geproduceerd door de biomassa WKK of ketel, door een warmtepomp (aangegeven in groen) en verder een externe “thermal source” en warmteopslag. Vanuit de thermische “pool” wordt de warmte gedistribueerd naar woningen. Naast warmte kan ook koeling geleverd worden door het warmtenet. Hiervoor is net als de warmtepomp, elektrische input nodig. Met het model kan de optimale capaciteit van de opwekunits en opslagsystemen bepaald worden, alsmede de optimale inzet in de tijd. Hierbij kan wiskundig geoptimaliseerd worden op minimum CO₂ productie van het systeem, of minimum kosten van de energievoorziening. Voor resultaten van enkele praktijkvoorbeelden wordt verwezen naar [16]. Voor een casus die is uitgewerkt met het Deense model “Energyplan” wordt verwezen naar [23].

6 Referenties

- [1] Frederiksen, S. 'District heating and cooling', studentlitteratuur, 2013
- [2] Lahdelma, R., course District heating and Cooling, Aalto University, Finland, 2018.
- [3] Lund, H. et al, "4th Generation District Heating (4GDH) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems", Energy 68 (2014) 1–11.
- [4] Elci, M. et al, Grid-interactivity of a solar combined heat and power district heating system, Energy procedia 70 (2015), 560–567.
- [5] Agentschap NL, Energievademecum – energiebewust ontwerpen van nieuwbouwwoningen, 2010.
- [6] <https://www.solar-district-heating.eu/> retrieved 3–11–2018.
- [7] <https://store.danfoss.com/en/Heating-and-District-Energy/c/4000> retrieved 3–11–2018.
- [8] Jangsten, M. et al, Survey of radiator temperatures in buildings supplied by district heating, Energy, vol 137, 292–301, 2017.
- [9] Maciej Lukawski, Optimization of the Operation of Space Heating Systems Connected to District Heating for an Improved Cooling of the Primary Water, Thesis, July 2010, Cornell University, DOI: 10.13140/RG.2.1.2906.7760.
- [10] <http://www.carbonsale.ie/district-heating/> , bekeken op 28–11–2018.
- [11] Overzicht afleversets voor warmtelevering, DHC Holland, 2014, <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2014/11/ENG2014-010%20Overzicht%20afleversets%20voor%20warmtelevering%20%281%29.pdf> , bekeken op 28–11–2018.
- [12] Rene, A.S., "Model Predictive Control of District Heating Systems", master thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2016.
- [13] Hilding, O and Nilsson, S., "Analysis and development of control strategies for a district heating central", Chalmers University of Technology, 2009.
- [14] Delangle, A.C.C., "Modelling and optimisation of a district heating network's marginal extension", master thesis, Imperial College London, 2016.
- [15] Sayegh, M.A., "Heat pump placement, connection and operational modes in European district heating", Energy & Buildings 166 (2018) 122–144.
- [16] Leeuwen, R.P. van, "Towards 100% Renewable Energy Systems and the influence of smart control", PhD Thesis, University of Twente, 2017, DOI:
- [17] Quirijnse, tapwaterstudie.
- [18] Leeuwen, R.P. van, "Thermal storage paper", Smartgreens
- [19] Furtado, D., "Modelling of a District Heating System with Decentralized Heat Generators", Master thesis, Technische Universität München, 2015.
- [20] Saarinen, L., "Modelling and control of a district heating system", Master thesis, Uppsala University, 2008.
- [21] Gao, L. et al, "Technologies in Smart District Heating System", Energy Procedia 142 (2017) 1829–1834.
- [22] Shakerin, M., "Analysis of district heating systems integrating distributed sources", Norwegian Institute of Science and Technology, 2017.
- [23] Østergaard, P.A. et al, "A renewable energy scenario for Aalborg Municipality based on low-temperature geothermal heat, wind power and biomass", Energy 35, Issue 12, December 2010, Pages 4892–4901.
- [24] Wang, Y. et al, "Operation stability analysis of district heating substation from the control perspective", Energy and Buildings 154 (2017) 373–390.