



Literatuurstudie naar vorming van urinesteen & preventief en correctief reinigen

Urinesteen vormen, preventie en correctie

22 december 2022

Kenmerk R007-12888399RFL-V01-kzo-NL

Verantwoording

Titel	Literatuurstudie naar vorming van urinesteen & preventief en correctief reinigen
Opdrachtgever	STOWA/Stichting RIONED
Projectleider	Paul Telkamp
Auteur(s)	Fleur Rempe
Tweede lezer	Paul Telkamp
Projectnummer	1280999
Aantal pagina's	23
Datum	22 december 2022
Handtekening	Ontbreekt in verband met digitale verwerking. Dit rapport is aantoonbaar vrijgegeven.

Colofon

TAUW bv
Handelskade 37
Postbus 133
7400 AC Deventer
T +31 57 06 99 91 1
E info.deventer@tauw.com

Inhoud

1	Inleiding	4
2	Ontstaan en samenstelling van urinesteen	4
2.1	Ontstaan van urinesteen	4
2.2	Factoren die urinesteenvorming beïnvloeden	9
3	Voorkomen van urinesteen vorming (Preventie)	10
3.1	Ontwerp en operationele maatregelen	10
3.1.1	Leidingmateriaal	11
3.1.2	Helling van de leiding	11
3.1.3	Horizontale leidingen	11
3.1.4	Leiding diameter	12
3.1.5	Faciliteren van preventief reinigen	12
3.1.6	Operationele factoren	12
3.2	Chemisch reinigen	12
3.2.1	Dagelijks doseren van zwak zuur	13
3.2.2	Wekelijks tot jaarlijks doseren van sterk zuur	14
3.2.3	Doseren van urease-remmers	15
3.3	Mechanisch reinigen	15
3.3.1	Hogedrukreiniging	15
4	Correctief verwijderen van urinesteen	16
4.1	Chemisch reinigen	16
4.2	Mechanisch reinigen	17
4.2.1	Hogedrukreiniging	17
4.2.2	'Crushed ice'	18
4.2.3	Staalborstel en rioolveer	18
4.3	Vervangen van leidingen	19
5	Conclusie	19
6	Nader onderzoek	20
7	Literatuurlijst	21

1 Inleiding

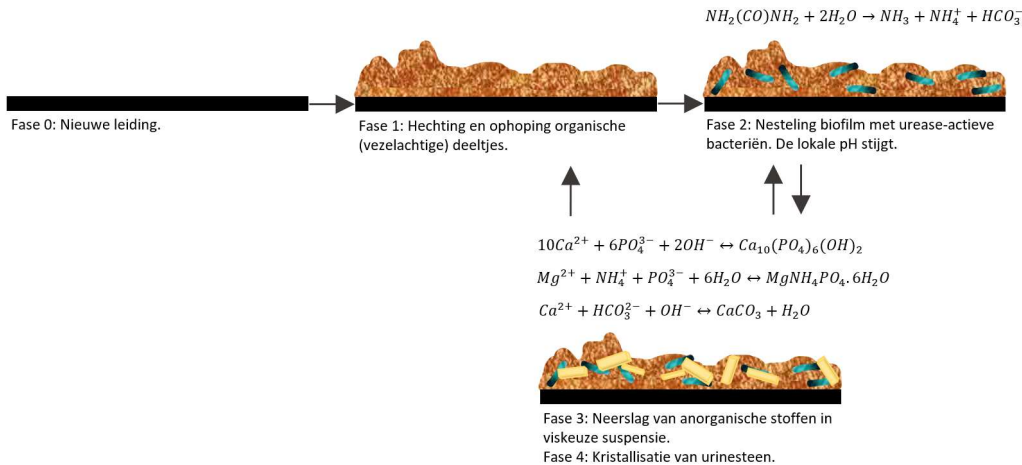
Vacuümtoiletsystemen worden al decennia toegepast om toiletwater geconcentreerd in te zamelen. Van oorsprong vooral in de lucht- en scheepvaart, maar de afgelopen circa 15 jaar ook steeds meer bij gebouwen en woonwijken. Door het kleine spoelvolume van circa 0,5 tot 1,5 liter per spoelbeurt wordt aanzienlijk op drinkwater bespaard en leent de geconcentreerde toiletwaterstroom (ook wel zwartwater genoemd) zich voor een efficiënte terugwinning van energie en nutriënten uit de stroom. Uit diverse (pilot-) praktijkervaringen met vacuümtoiletsystemen, variërend van woonwijken tot passagiersschepen, is gebleken dat verstoppingen van de leidingen door vorming van urinesteen afzettingen op het leidingoppervlak een veelvoorkomend probleem is (Oldenburg et al., 2008; Rohde, 2016). Desondanks is onderzoek naar en kennis over concrete oplossingen om vorming van urinesteen te voorkomen en bestaande afzettingen in vacuümtoiletsystemen te verwijderen beperkt tot een paar literatuurbronnen. Met name literatuur over urinescheidingssystemen rapporteert over deze problematiek (Yan et al., 2021), terwijl over urinesteen vorming in vacuümtoiletsystemen slechts weinig is gepubliceerd.

Dit rapport omvat een literatuurreview naar de problematiek rondom urinesteen afzettingen in vacuümtoiletsystemen en mogelijke preventieve en correctieve maatregelen. Wegens gebrek aan onderzoek naar vacuümtoiletsystemen wordt ook informatie met betrekking tot urinescheidingstoiletten geanalyseerd in deze review. De compositie en de vormingsmechanismen van urinesteen worden besproken in hoofdstuk 2. Op basis van ervaringen in bestaande (pilot-) projecten zijn verschillende technieken om urinesteen neerslagproblemen in vacuümleidingen te beheersen geëvalueerd en samengevat. Preventieve maatregelen om urinesteen vorming in vacuümleidingen te voorkomen en zachte afzettingen te verwijderen worden gepresenteerd in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 gaat in op correctieve maatregelen om reeds gevormde harde afzettingen te verwijderen. In hoofdstuk 5 wordt de conclusie van de literatuurreview gepresenteerd en hoofdstuk 6 geeft aanbevelingen voor nader onderzoek.

2 Ontstaan en samenstelling van urinesteen

2.1 Ontstaan van urinesteen

Op basis van onderzoek naar bestaande vacuümtoiletsystemen, onderzoek op laboratoriumschaal en thermodynamische modellering heeft Rohde (2016) de belangrijkste vormingsmechanismen van urinesteen in vacuümtoiletsystemen geïdentificeerd. Hieruit bleek dat de samenstelling van aanslag in leidingen van vacuümtoiletsystemen bestaat uit zowel organische als anorganische componenten. De vormingsmechanismen kunnen in vier fasen worden onderverdeeld en zijn navolgend nader toegelicht.



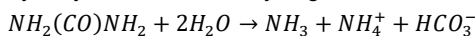
Figuur 2.1 Vorming van urinesteen in vacuümtoiletsystemen (aangepast van Rohde, 2016)

Fase 1: Hechting en ophoping organische deeltjes

Wanneer het vacuümtoilet wordt doorgespoeld wordt de binnenwand van de vacuümleiding bevochtigd met zwartwater. Hierdoor hechten organische stoffen die aanwezig zijn in zwartwater, waaronder vezels uit toiletpapier, aan het oppervlak van de leiding. Dit vormt een primaire organische laag die het oppervlak van de leiding vergroot. De hoge lucht:water verhouding zorgt voor dunne-filmverdamping, waardoor het watergehalte in de organische laag afneemt en de binding tussen de deeltjes wordt versterkt.

Fase 2: Nestelen biofilm met urease-actieve bacteriën

Urease-actieve bacteriën, van nature aanwezig in urine, nestelen zich op de gevormde organische laag. Een biofilm ontstaat, waarin microbiële hydrolyse van ureum (aanwezig in zwartwater) door het enzym urease plaatsvindt. Ook vrije urease kan ureum hydrolyseren. Tijdens ureum hydrolyse, ook wel ureolyse genoemd, worden ammonia, ammonium en bicarbonaat gevormd:



Deze omzetting van ureum leidt tot een lokale verhoging van de pH (Rohde, 2016; Udert et al., 2003a; Udert et al., 2003c). De pH stijging gaat erg snel. Uit onderzoek bij waterloze urinoirs is gebleken dat in 2 uur tijd de pH van 6 naar >8 steeg (Saetta et al., 2019). Uit laboratoriumproeven met zwartwater resulteerde ureumhydrolyse op bestaande afzettingen in een pH van 9 in 5 uur tijd (Rohde, 2016).

Fase 3: Neerslag van anorganische stoffen in viskeuze suspensie

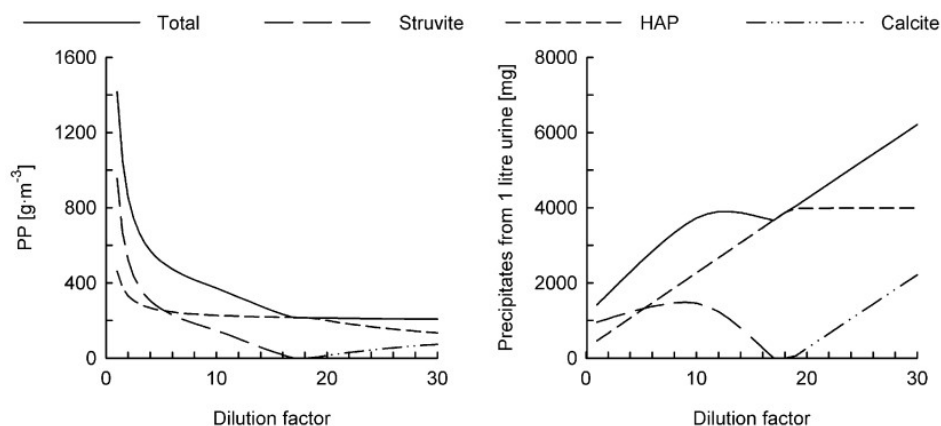
Door de verhoogde pH in de organische laag wordt het oplosbaarheidsproduct van calciumfosfaten, carbonaatverbindingen en magnesium-ammoniumfosfaat overschreden. Deze stoffen komen van nature voor in urine en fecaliën en slaan neer, voornamelijk als een anorganische viskeuze suspensie. Dit wordt deels getransporteerd met het zwartwater en blijft deels achter op de leidingen.

Rohde (2016) heeft de samenstelling van urinesteen afzettingen in vacuümleidingen van verschillende vacuümtoiletsystemen geanalyseerd en vond dat het grootste aandeel bestond uit

struviet ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) en hydroxyapatiet (HAP, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$). Daarnaast werd een klein percentage siliciumoxide (SiO_2), calciëet (CaCO_3), en koolstofapatiet ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) gedetecteerd. De samenstelling van de minerale afzettingen verschilde sterk per locatie in hetzelfde vacuümtoiletsysteem, wat betekent dat lokale omstandigheden de vormingsmechanismen beïnvloeden. Het amorphe deel in de geanalyseerde afzettingen was gemiddeld 28 %, wat kan worden verklaard door aanwezigheid van organische stoffen in de afzettingen.

Ook bij Sneek is de samenstelling van urinesteen afkomstig uit een horizontaal leidingdeel van het zorgcomplex recent bepaald. De urinesteen afkomstig uit het vacuümtoiletsysteem in Sneek had een overeenkomstig amorf deel van 27 % (kristalliniteit van 83 %), bleek uit XRD en XRF analyses. Daarnaast was struviet het hoofdbestanddeel (circa 80 %), overeenkomstig met de analyses door Rohde (2016). Een verschil met de resultaten gepresenteerd in Rohde (2016) is het relatief grote aandeel calciëet (circa 20 %) in de urinesteen afzetting uit Sneek.

Vergelijkbare resultaten bleken uit onderzoek naar neerslagproblematiek in urinescheidingstoiletten en (waterloze) urinoirs. Ook hier bestonden de afzettingen aan de binnenwand van leidingen voornamelijk uit struviet en hydroxyapatiet (Udert et al., 2003c). De exacte compositie van de afzettingen bleek onder andere afhankelijk van de verdunning van urine met spoelwater (Udert et al., 2003c). Wanneer urine sterk wordt verdund met spoelwater ($>18\times$, >2 liter spoelwater), dat veel Ca^{2+} bevat, zal ook calciëet (CaCO_3) vormen (figuur 2.2). Over het algemeen geldt dat bij lage verdunning magnesium wordt vastgelegd in de afzettingen (struviet), terwijl calcium over de gehele range aan verdunningsfactoren wordt vastgelegd (in verschillende vormen). Hydroxyapatiet (HAP) wordt altijd gevormd (Udert et al., 2003b). Omdat fosfaat ruimschoots aanwezig is in urine vormen magnesium en calcium de limiterende factoren voor de hoeveelheid neerslag (Udert et al., 2003c; Udert et al., 2006). Door met meer water te spoelen neemt de totale hoeveelheid neerslag toe door extra aanvoer van magnesium en calcium, maar de concentratie van de neerslag neemt af door verdunning, wat het risico van verstoppingen reduceert (Udert et al., 2003b).



Figuur 2.2 Urinesteen neerslag bij verschillende verdunningsfactoren door spoelwater in urinescheidingstoiletten.

Links: neerslagpotentieel (PP) per volume urine. Rechts: totale hoeveelheid neerslag in 1 liter urine. Uit Udert et al. (2003b)

Kenmerk R007-1288399RFL-V01-kzo-NL

Fase 4: Kristallisatie naar urinesteen

De anorganische neerslagen op en in de organische laag zijn over tijd onderhevig aan veranderingen in het atoomrooster: ze kristalliseren en vormen harde afzettingen (urinesteen) op de leidingwand waardoor de structurele stabiliteit verhoogt. Dit stabiliserende effect op de afzettingen zorgt ervoor dat ze minder gevoelig zijn voor slijtende werking van het getransporteerde zwartwater. Dit vergroot de risico's op leidingverstopping (Rohde, 2016).

Zonder preventieve inspecties en reiniging houdt het neerslagproces zichzelf in stand en versterkt zichzelf. Vorming van de harde afzettingen vergroot namelijk het oppervlak van de leidingwand waardoor meer bindplaatsen ontstaan voor bacteriën. Uit laboratoriumschaal proeven met zwartwater is gebleken dat de omzettingssnelheid van ureum op bestaande afzettingen significant hoger is dan in vrije oplossing. In aanwezigheid van afzettingen werd na 5 uur een pH van 9 bereikt, terwijl dit in afwezigheid van afzettingen pas na 50 uur plaatsvond (Rohde, 2016). Hieruit kon worden geconcludeerd dat microbiële ureumhydrolyse in vacuümtoiletsystemencuümsystemen voornamelijk plaatsvindt in de biofilm op het leidingoppervlak en niet in het zwartwater zelf. Harde kristallijne anorganische neerslagproducten (urinesteen) konden alleen worden gedetecteerd op met biofilm bedekte oppervlakken en bestaande organische en anorganische afzettingen (Rohde, 2016). Daarnaast is uit verschillende onderzoeken, zowel naar een vacuümtoiletsysteem als urinescheidingssystemen, gebleken dat anorganische neerslag makkelijker hecht aan het oppervlak van verschillende soorten organisch materiaal (door bacterieel metabolisme) dan aan het gladde oppervlak van de binnenwand van de leiding (Rohde, 2016; Yan et al., 2021).

Rohde (2016) heeft vijf vacuümtoiletsystemen met verschillende bedrijfstijden (jaren van in bedrijf name) onderzocht door monsters te nemen uit gedemonteerde leidingdelen en uit inspectieopeningen. De hoeveelheid urinesteen varieerde van lichte afzettingen op het leidingoppervlak tot zeer ernstige afzettingen die de doorsnede significant verminderden. De structuur van de afzettingen varieerde van een schilferige, papierachtige substantie tot uiterst stabiele en homogene anorganische structuren (figuur 2.3).



Materiaal: RVS
Diameter: DN 70
Bedrijfstijd: 1 jaar



Materiaal: Gietijzer
Diameter: DN 100
Bedrijfstijd: 5 jaar

Kenmerk

R007-1288399RFL-V01-kzo-NL



Materiaal: HDPE
Diameter: DN 50
Bedrijfstijd: 7 jaar



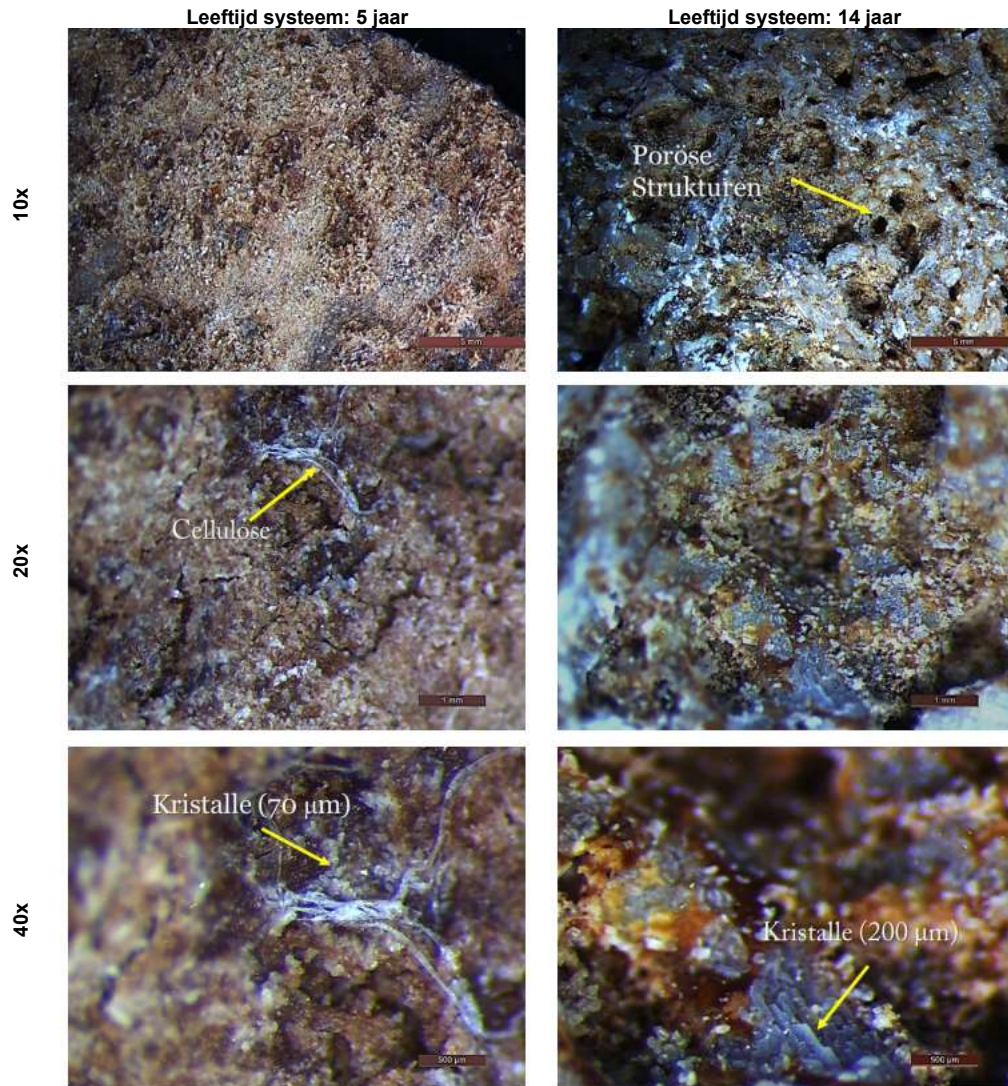
Materiaal: HDPE
Diameter: DN 50
Bedrijfstijd: 12 jaar



Materiaal: RVS
Diameter: DN 50
Bedrijfstijd: 8 jaar

Figuur 2.3 Vacuümleidingen van vacuümtoiletsystemen met urinesteen afzettingen (aangepast van Rohde, 2016)

De kristalmorfologie van de afzettingen uit oude en nieuwe systemen werd microscopisch onderzocht en met elkaar vergeleken (figuur 2.4). Kristallijne structuren in en op het organisch materiaal (onder andere cellulose) konden worden geïdentificeerd. Uit de microscopische beelden blijkt dat de morfologie varieert: naaldachtige, staafachtige en ruitvormige structuren zijn te zien. De kristalgrootte neemt toe met toenemende bedrijfstijd van het systeem. Ook hebben de afzettingen in oudere systemen een poreuzere structuur die bijna volledig bedekt is met kristallijne afzettingen. Onderzoek naar afzettingen in systemen met een bedrijfstijd van meer dan 8 jaar liet zien dat de organische fractie over tijd afneemt en uiteindelijk minder dan 20 % bedroeg.



Figuur 2.4 Microscopische beelden van afzettingen in een relatief nieuw (5 jaar) en oud (14 jaar) vacuümtoiletsysteem (aangepast van Rohde, 2016)

2.2 Factoren die urinesteenvorming beïnvloeden

Verschillende factoren zijn van invloed op de mechanismen betrokken bij urinesteenvorming in vacuümtoiletsystemen (Rohde, 2016). Uit experimenten met een vacuümtoiletsysteem testopstelling met twee leidingen, waarbij de ene continu werd blootgesteld aan zwartwater en de andere periodiek werd blootgesteld aan zwartwater, bleek dat hoeveelheid en vormingssnelheid van afzettingen hoger lag bij afwisseling tussen blootstelling aan lucht en water. In de leiding die continu in contact was met zwartwater waren de vorming van afzettingen op het oppervlak en de erosie van afzettingen door de stroming in evenwicht. Hieruit kon worden geconcludeerd dat een verhoogde luchtinlaat in de vacuümleidingen, bijvoorbeeld door **lekkages**, sterk bijdraagt aan de vorming van afzettingen. Ook aanwezigheid van **bestaande afzettingen** dragen sterk bij aan de vorming van urinesteen, wat kan worden toegeschreven aan een toename van de

deeltjesafzetting en een toename van het specifieke leidingoppervlak en daarmee de mogelijkheid voor urease-actieve bacteriën om zich te vestigen (zie paragraaf 2.1). Erosie van afzettingen vindt plaats door **hoge stroomsnelheden**. Uit de laboratoriumtesten bleek echter dat deze effecten enkel lokaal plaatsvinden. Afzettingen worden alleen verminderd op plekken met hoge stroomsnelheden zoals bochten of T-stukken (Rohde, 2016). Andersom geldt dat plekken met een relatief lage stroomsnelheid en dus langere verblijftijd, zoals horizontale leidingen, gevoeliger zijn voor de vorming van afzettingen (Rohde, 2016; Udert et al., 2003a). Vergelijkbaar bleek uit testen met waterloze urinoirs dat de **gebruikersfrequentie** van de toiletten effect heeft op de vorming van urinesteen. Lage frequentie (elke 10-20 min) creëerde ideale omstandigheden in de leidingen voor urea hydrolyse, terwijl hoge gebruikersfrequentie (elke 1-10 min) juist pseudo-remmende condities creëerde door korte reactietijd in de leidingen (Saetta et al., 2019:). Ook hoge **oppervlakteruwheid** van het leidingmateriaal bevordert de binding van zwevende stoffen (organisch materiaal), wat resulteert in verhoogde afzettingen. Bij verandering van de **systeemtemperatuur** werden slechts geringe invloeden op de afzettingen waargenomen.

Ook de **hardheid van het spoelwater** heeft een gering effect op de vorming van urinesteen, gezien de hoge invoer van Ca^{2+} en Mg^{2+} ionen via de uitscheidingen (Rohde, 2016, zie bijlage 1 voor nadere toelichting). Uit onderzoek naar urinesteenvorming in urinescheidingstoiletten en de invloed van spoelwater bleek dat door het spoelen met kraanwater de hoeveelheid calcium en magnesium ionen toeneemt, terwijl fosfaat gelijk blijft, wat resulteert in hogere fosfaatfixatie (neerslag). Echter resulteert het verdunnen met spoelwater in minder verstoppingen doordat er minder neerslag vormt per volume. In weinig-verdunde urine (zoals in vacuümtoiletten en -leidingen) hoeft maar weinig urea te hydrolyseren om de maximaal mogelijke neerslag te behalen (95 %) (Udert et al., 2003b). Aangezien urine alle benodigde stoffen bevat om urinesteen te vormen zijn systemen waar geen of zeer weinig spoelwater wordt gebruikt zeer gevoelig voor de vorming van urinesteen (zie ook figuur 2.2). Door de hoge concentratie kristalliseert de urine makkelijker uit tot urinesteen (Larsen & Lienert, 2007; von Münch, 2009; Randall & Naidoo, 2018).

3 Voorkomen van urinesteen vorming (Preventie)

Bestaande (organische en anorganische) afzettingen in de leidingen van vacuümtoiletsystemen hebben een sterk katalyserend effect op de vorming van nieuwe afzettingen. Vroegtijdige verwijdering is daarom van groot belang voor gemakkelijker verwijderen van nog viskeuze afzettingen en als preventieve maatregel tegen in toenemende mate uitgeharde afzettingen. In de literatuur, waarin onder andere praktijkervaringen worden gepresenteerd, worden meerdere oplossingen aangedragen om de vorming van urinesteen te voorkomen en/of lichte afzettingen te verwijderen. Gezien de kennis over dit onderwerp beperkt is wordt informatie over preventief reinigen van zowel vacuümtoiletsystemen als urinescheidingssystemen besproken. Preventieve maatregelen kunnen worden onderverdeeld in ontwerp en operationele maatregelen, mechanisch reinigen en chemisch reinigen.

3.1 Ontwerp en operationele maatregelen

Relevante ontwerp- en dimensioneringsrichtlijnen om urinesteenvorming in vacuümtoiletsystemen te voorkomen en referentiesystemen ontbreken, waardoor implementatie van deze systemen

primair gebaseerd is op de ervaring van de installatiebedrijven. In tegenstelling tot conventionele systemen hebben een onjuist uitgevoerde pijpaanleg en installatie evenals een gebrek aan onderhoud een ernstige impact op het totale vacuümtoiletsysteem. Zo blijkt uit onderzoek van Rohde (2016) dat in bestaande vacuümtoiletsystemen circa 50 % van de totale luchtintrede te herleiden is naar lekkages van overgangs- en aansluitpunten van verschillende materialen. Dit katalyseert de vorming van afzettingen en leidt daarnaast tot extra pompkosten voor het in stand houden van het vacuüm. Het is daarom van belang om zowel tijdens aanleg als bedrijfsfase te testen op lekkages. Ook uit de factoren die van invloed zijn op urinesteenvorming (zie hoofdstuk 2.2) blijkt dat nauwkeurig ontwerp en constructie van het vacuümtoiletsysteem van belang is voor voorkomen en/of reduceren van de vorming van urinesteen afzettingen in de leidingen. Deze preventieve maatregel is uiteraard alleen van toepassing op nieuw te ontwerpen systemen en/of te vervangen onderdelen in bestaande systemen.

3.1.1 Leidingmateriaal

Gezien ruwheid van het leidingoppervlak een belangrijke factor vormt is het van belang een glad hydrofoob leidingmateriaal toe te passen. Uit onderzoek naar urinescheidingstoiletten bleek dat polyethyleen (PE) of polyvinylchloride (PVC) goed toepasbaar zijn, omdat deze materialen stabiel zijn bij kamertemperatuur en niet direct bijdragen aan neerslagvorming (von Münch & Winker, 2011; Yan et al., 2021). Roestvrijstaal en koolstofstaal daarentegen hebben een ruwer oppervlak en daardoor een hogere neiging naar chemische reacties (Yan et al., 2021). Ook in vacuümleidingen blijkt de toepassing van kunststof, zoals HDPE (hoge dichtheid polyethyleen) en polypropyleen (PP), een betere keuze dan roestvrijstalen leidingmaterialen met hogere oppervlakteruwheid (Rohde, 2016). Er is nog weinig bekend over de impact van andere leidingmaterialen, zoals rubber, op vorming van urinesteen afzettingen (Yan et al., 2021).

3.1.2 Helling van de leiding

Naast leidingmateriaal is ook de helling van de leidingen van belang omdat is gebleken dat de stroomsnelheid, en daarmee de verblijftijd, effect heeft op de vorming van afzettingen (von Münch & Winker, 2011; Rohde, 2016; Yan et al., 2021). Neerslag vindt met name plaats op locaties met relatief lange retentietijd, zoals de pockets in het zaagtandprofiel in horizontale leidingen (Rohde, 2016; von Münch, 2009). Bij een hogere stroomsnelheid en kortere verblijftijd kunnen de nog zachte viskeuze afzettingen makkelijker wegspoelen, waardoor kristallisatie wordt gelimiteerd.

Voor zover bekend zijn ontwerp- en dimensioneringsrichtlijnen om vorming van afzettingen te verminderen, zoals minimale leidinghelling, niet gerapporteerd voor vacuümtoiletsystemen. Uiteenlopende (algemene) richtlijnen voor de minimale helling van de leidingen zijn gerapporteerd, variërend van 0,2 % (Evac, vacuümtoiletsystemen leverancier), 0,5 % (Hamburg water cycle handboek) of 1 % (Jets, vacuümtoiletsystemen leverancier). Voor urinescheidingstoiletten zijn verschillende richtlijnen gedefinieerd voor de minimale helling van de leiding om zelfreinigende condities te creëren en urinesteen opbouw te limiteren. Deze lopen uiteen van 1 % (von Münch & Winker, 2011), 1,5 % (Abeyasuriya et al., 2013) en 2 % (Austin, 2006).

3.1.3 Horizontale leidingen

Gezien horizontale leidingen met relatief lange verblijftijd meestal onvermijdelijk zijn, wordt aangeraden om in het ontwerp rekening te houden met de toegankelijkheid van deze leidingen

Kenmerk R007-1288399RFL-V01-kzo-NL

zodat deze makkelijk geïnspecteerd, gereinigd en/of eventueel (deels) vervangen kunnen worden (Yan et al., 2021). Daarnaast kunnen lange verblijftijden mogelijk worden vermeden door spoelstations te installeren om de leidingen periodiek (bijvoorbeeld in de nacht) te spoelen met water en/of zuur (Rohde, 2016). Dit is echter nog weinig onderzocht en toegepast.

3.1.4 Leiding diameter

Voor urinescheidingstoiletten wordt een relatief grote diameter van de leidingen aangeraden om verstopping te voorkomen (>38 mm volgens Austin (2006); >50 mm en 75-110 mm is optimaal volgens von Münch & Winker (2011)). Dit is echter lastig toepasbaar in vacuümtoiletsystemen, gezien een grotere diameter leidt tot een verhoogde benodigde druk. Leveranciers van vacuümtoiletsystemen adviseren een diameter van ten minste 50 mm voor kunststofleidingen vlak achter het toilet. De diameter van de leidingen neemt toe richting het vacuümstation.

3.1.5 Faciliteren van preventief reinigen

Het wordt verstandig geacht om tijdens de ontwerpfase al rekening te houden met feit dat periodiek preventief reinigen van de leidingen nodig zal zijn zodra het system in bedrijf is. Zo dienen voldoende en gemakkelijk toegankelijke inspectiepunten te worden voorzien om bijvoorbeeld de leidingen te kunnen spoelen met water onder druk. Ook kan worden gedacht aan het installeren van automatische doseerunits op de leidingen voor het doseren van een zuur. Meer hierover in paragraaf 3.2 en 3.2.

3.1.6 Operationele factoren

Voor zover bekend is er geen ervaring met operationele maatregelen zoals het aanpassen van de lucht:water verhouding, het wijzigen van het vacuüm of de hoeveelheid spoelwater.

3.2 Chemisch reinigen

Chemisch reinigen wordt in het merendeel van de literatuur genoemd als maatregel om vorming van harde urinesteen te voorkomen door lichte afzettingen op tijd te verwijderen. De werking van zuurdosering in de leidingen is tweeledig: de pH wordt verlaagd waardoor neerslag van anorganische stoffen wordt geminimaliseerd; en de anorganische stoffen die reeds zijn neergeslagen lossen op. Zuurdosering komt in principe neer op twee opties: spoelen met een licht zuur (bijvoorbeeld huishoudazijn, 10 %) na elk toiletbezoek; of periodiek spoelen van de leidingen met een sterker zuur (bijvoorbeeld >24 % citroenzuur), beginnend met een frequentie van 2x per jaar. Deze twee opties, beiden gebaseerd op adviezen voor urinescheidingstoiletten en waterloze urinoirs, zijn hieronder nader uitgewerkt. Over chemisch reinigen van vacuümtoiletsystemen als preventieve maatregel is tot op heden weinig bekend.

De oorzaak van urinesteenvorming, namelijk urea hydrolyse en daarmee een toenemende pH, kan worden voorkomen/ geminimaliseerd door verzuring. Gezien spontane neerslag van struviet plaatsvindt bij een pH tussen de 7-8 en HAP neerslag volgt bij iets hogere pH, is verzuring belangrijk (Chipako & Randall, 2020). Wanneer de pH wordt verlaagd <5,2 worden bepaalde ureases (enzymen) onomkeerbaar gedeactiveerd. Dit voorkomt de hydrolyse van urea in ammonia, waardoor geen pH toename plaatsvindt. Zolang de pH van de urine laag blijft wordt de vorming van urinesteen door neerslag van calcium en magnesiumzouten geremd (Udert et al., 2003b&c). Bij zuurdosering om microbiële urea hydrolyse te remmen moet er echter wel rekening

worden gehouden met temperatuur en pH waarden, omdat onder bepaalde omstandigheden chemische urea hydrolyse kan plaatsvinden (Randall et al., 2016; Yan et al., 2021).

3.2.1 Dagelijks doseren van zwak zuur

Uit batch experimenten is gebleken dat **azijnzuur, citroenzuur en azijn** urea hydrolyse effectief kunnen remmen bij concentraties van 32 tot 160 meq/l (onverdund) urine (Ray et al., 2018). Uit twee vervolgonderzoeken in waterloze urinoirs is gebleken dat de directe dosering van 2,5 ml van 2500 meq/l (=15 %) azijnzuur na elk toiletbezoek voldoende was de vorming van minerale neerslag in de leidingen te minimaliseren. Door deze dosering werd de pH verlaagd van 6 (pH van urine) naar 3,9-5,1 (Saetta & Boyer; 2017; Saetta et al., 2019). De vacuümtoiletten verbruiken echter circa één liter spoelwater. Om dezelfde zuurconcentratie te behouden is een hogere dosering benodigd. Daarnaast is de azijnzuurconcentratie van huishoudazijn of schoonmaakazijn gemiddeld 10 % (RIVM, 2019). Uitgaande van een totaal volume van 1,3 liter (1 liter spoelwater en 0,3 liter urine) en een azijnzuurconcentratie van 10 % is een dosering van 20 ml huishoudazijn (10 %) benodigd per spoelbeurt (zie berekeningen in bijlage 2). In deze berekening wordt het potentiële bufferende vermogen door aanwezigheid van fecaliën in zwartwater niet meegenomen. Om deze reden is mogelijk een hogere dosering benodigd bij zwartwater.

Een *cyber-physical system*, dat een fysiek systeem integreert met communicatie- en informatietechnologieën, is op pilot-schaal ontwikkeld om urea hydrolyse in waterloze urinoirs te monitoren en te beheersen. Real-time pH en geleidbaarheid data van de urine in de leiding direct achter het urinoir werden gebruikt om urea hydrolyse te remmen door automatische zuurdosering. Uit testen met dit systeem bleek dat in urinoirs met lage gebruikersfrequentie vaker 2,5 ml van 2500 meq/l (15 %) azijnzuur gedoseerd moest worden, namelijk 1x per uur (dus 20 ml van 10 % azijnzuur per uur). Bij een lage gebruikersfrequentie verblijft de urine langer in de leidingen, wat ideale condities creëert voor urea hydrolyse. In systemen met hoge gebruikersfrequentie (elke 1-10 min), zoals een schoolgebouw of kantoor, is de reactietijd in de leidingen kort en zal zuurdosering minder vaak moeten worden toegepast (Saetta et al., 2019).

Een mogelijkheid om dagelijkse zuurdosering gebruiksvriendelijker, en wellicht ook effectiever, te maken is toepassing van automatische doseerunits. Dit wordt momenteel beperkt toegepast. Voorbeelden van projecten waar automatisch doseren van zuur wordt toegepast zijn het project H+ in Helsingborg, Zweden; het Rijkskantoor aan de Rijnstraat in Den Haag en Casa Vita in Deventer. Automatische dosering van zuur op de leidingen kan de pH continu laaghouden. Dit kan eventueel worden gecombineerd met periodiek spoelen van water door de leidingen, zodat (viskeuze) neerslag op locaties met lange verblijftijden kan worden weggespoeld. Voor toekomstige projecten kan hiermee rekening worden gehouden in het ontwerp van het systeem. Ook in bestaande projecten is het wellicht mogelijk om op tactische punten automatische doseerunits te installeren. Het effect van continue zuurdosering op de materialen in het vacuümtoiletsysteem, onder andere leidingmateriaal, lijm en metaal, dient nader onderzocht te worden.

Een andere mogelijkheid is het aanleggen van een aparte leiding met zuur spoelwater om het toilet door te spoelen. Hiervan zijn echter geen praktijkervaringen bekend.

3.2.2 Wekelijks tot jaarlijks doseren van sterk zuur

Gezien dagelijks doseren van zuur lastig toepasbaar is in bestaande systemen kan periodiek spoelen van de leidingen met een relatief sterk zuur een goed alternatief vormen. In de praktijk wordt onder andere mierenzuur (concentratie onbekend), citroenzuur (>24 %) of azijnzuur (>24 %) gedoseerd in urinescheidingsystemen. Hierbij wordt gestart met een frequentie van tweemaal per jaar (Kvarnström et al., 2006; STOWA 2008-03; TVVL, 2010). Het uitvoeren van camera-inspecties voor en na reiniging kan uitwijzen of deze frequentie voldoende is om urinesteen afzettingen te voorkomen. Aan de hand van de resultaten kan worden besloten om vaker zuur te doseren.

De frequentie van preventieve zuurdosering verschilt sterk per project en varieert van wekelijks tot jaarlijks:

- Van projecten met vacuümtoiletsystemen in Deventer (Casa Vita), Kaja in Ås (Noorwegen) en Torvetua in Bergen (Noorwegen) is bekend dat hier problemen werden ondervonden door vorming van urinesteen in de leidingen. Een commercieel **microbieel reinigingsproduct** werd gedoseerd door de huishoudens om neerslag in de leidingen te reduceren en/of voorkomen. De hoeveelheid verschilde van circa 0,6 tot 8,3 liter per huishouden per jaar. Het is niet bekend in hoeverre deze doseringen verstoppingen konden voorkomen, gezien problemen met het vacuümtoiletsysteem en verstoppingen van leidingen, onder andere door urinesteen, in alle drie de projecten jaarlijks voorkwamen (van den Bulk, 2008; Telkamp, 2006, bijlage 3)
- In verschillende pilot projecten binnen het Zwitserse Novaquatis onderzoeksproject werden de urinescheidingsstoiletten (Roediger en NoMix) regelmatig gespoeld met 1 dl 10 % **citroenzuur** om scaling en verstopping van urinetransportleidingen te voorkomen (Lienert & Larsen, 2007). Ook werden de urinetransportleidingen van toiletten in sommige projecten elke 1-3 weken gespoeld met 1 liter **zoutzuur** (7 %), gevolgd door 2-3 liter koud water. Ook dit bleek effectief om verstoppingen, die zich voorheen regelmatig voordeden, te voorkomen (Lienert & Larsen, 2007)
- In het GTZ hoofdkwartier Duitsland wordt 1x per maand 200 ml **citroenzuur of organisch zuur** 24h lang ingetrokken in de urinescheidingsstoiletten (Blume & Winker, 2011; bijlage 3)
- In Linz, Oostenrijk kregen bewoners elk jaar 1 liter 20 % **citroenzuur** om neerslag in de urinescheidingsstoiletten te beperken door middel van maandelijkse dosering en laten intrekken in de nacht (Ulrich, 2009; bijlage 3)

Omdat de zuurdosis en -frequentie verschillen per casus en vanwege het ontbreken van ervaring met en kennis over preventief chemisch reinigen van vacuümtoiletsystemen is het van belang om de effectiviteit van bovengenoemde processen en producten te verifiëren in de praktijk. Voor preventie van urinesteenvorming in vacuümtoiletsystemen is het daarom van belang om periodieke zuurdosering te combineren met camera-inspecties van de leidingen. Er kan bijvoorbeeld worden gestart met tweemaal per jaar zuurdosering. Wanneer blijkt dat bij deze frequentie de leidingen relatief snel vervuilen en afzettingen ophopen kan de frequentie van preventief reinigen worden opgeschroefd en vice versa. Zo kan een casus-specifiek onderhouds- en preventieplan worden opgesteld.

3.2.3 Dosereren van urease-remmers

Er is ook (gelimiteerd) onderzoek gedaan naar urease-remmers. *Allium* (bijvoorbeeld knoflook, ui en prei) en *Brassica* (bijvoorbeeld kool en spruitjes) plantensappen blijken een remmend effect te hebben op de urease activiteit (getest op urease uit jack bonen). De thiosulfinaat concentratie was verantwoordelijk voor deze remming (Olech et al., 2014). Een ander onderzoek heeft geconcludeerd dat hout as (pH>12,5) het urease enzym kan remmen, waardoor katalyse van ureolyse wordt gelimiteerd (Senecal & Vinneras, 2017). Over toepassing van deze stoffen in urinescheidingstoiletten of vacuümtoiletsystemen is echter niets bekend tot op heden.

3.3 Mechanisch reinigen

3.3.1 Hogedrukreiniging

Specifiek voor vacuümtoiletsystemen wordt gerapporteerd dat vroegtijdige verwijdering van afzettingen door middel van hogedrukspoeling een hoog reinigingspotentieel levert. Om een dergelijke maatregel eventueel in het vacuümnetwerk te kunnen uitvoeren, moeten bij het ontwerp van ondergrondse vacuümleidingen om de 30 tot 50 meter geschikte inspectieopeningen worden voorzien. Door jaarlijks de leidingen onder hoge druk te spoelen worden de zachte organische en anorganische afzettingen weggespoeld, voordat deze de kans krijgen om te kristalliseren tot een harde, moeilijk verwijderbare aanslag (Rohde, 2016).

Ook in urinescheidingstoiletten wordt hogedrukreiniging toegepast als preventieve maatregel. Zo werd op de luchthaven Schiphol, waar weleens verstoppingen optraden door slibvormig urinesteen in de Keramag en Sphinx urinoirs, de leidingen preventief (en correctief) gereinigd met een rioolveer en water onder druk. Achter de urinoirs loopt een servicegang, van waaruit de ontstoppingsstukken goed bereikbaar zijn (TVVL, 2010)

4 Correctief verwijderen van urinesteen

Het correctief verwijderen van (harde) urinesteen afzettingen in leidingen van vacuümtoiletsystemen vormt de laatste optie in de voorkeursroute: voorkomen, verminderen, verwijderen. Zodra harde afzettingen eenmaal zijn gevormd is het van belang om deze te zo spoedig mogelijk te verwijderen om verdere vorming van urinesteen, met als gevolg verstoppingen van de leidingen, te voorkomen. Er is weinig gepubliceerd over praktijkervaringen met correctief reinigen van urinesteen afzettingen in vacuümtoiletsystemen. Om deze reden wordt relevante informatie met betrekking tot zowel vacuümtoiletsystemen als urinescheidingssystemen gerapporteerd. De maatregelen benoemd in de literatuur kunnen worden opgesplitst in drie categorieën: mechanisch reinigen, chemisch reinigen en vervangen van leidingen. Deze maatregelen zullen hieronder nader worden toegelicht.

4.1 Chemisch reinigen

Chemisch reinigen door doseren van zuur is gebaseerd op het principe dat het zuur de anorganische aanslag zal oplossen. Dit is in de praktijk getest in vacuümtoiletsystemen (hier is echter weinig over gepubliceerd) en voornamelijk in urinescheidingssystemen.

Rohde (2016) heeft de effectiviteit van het chemisch verwijderen van harde urinesteen afzettingen in vacuümtoiletsystemen onderzocht. Een in de handel verkrijgbaar (commercieel) reinigingsproduct voor vacuümtoiletsystemen op basis van **oxaalzuur** met viscositeit verhogende additieven werd gedoseerd volgens de instructies van de fabrikant via het toilet. De inwerktijd in het vacuümtoiletsysteem was 18 uur. Inspectiebeelden voor en na chemische reiniging toonden afzettingen op de gehele binnenwand van de leiding. Een potentiële vermindering van de dikte van de urinesteenlaag kon niet worden waargenomen. De lage reinigingsprestaties werden door de fabrikant verklaard met een te lage blootstellingstijd en dosering. Daarnaast is een mogelijke oorzaak van de lage effectiviteit het optreden van een nevenreactie van het oxaalzuur: calciumoxalaat (CaC_2O_4) kan als vaste stof neerslaan (Cao et al., 2007) en heeft dus een averechts effect.

Ook voor andere praktijksituaties werd een laag reinigingseffect gerapporteerd bij dosering van (op de markt verkrijgbare) chemische reinigingsmiddelen via het toilet. Zo was wekelijks 12 uur lang spoelen van **fosforzuur** (30 %) door de vacuümleidingen van een systeem toegepast op een passagiersschip met 210 toiletten niet voldoende om urinesteen afzettingen te verwijderen. Na circa 8 jaar in bedrijf moesten diverse delen van het systeem worden vervangen (Rohde, 2016). Bij een vacuümtoiletsysteem in de woonwijk Flintenbreite, Duitsland (circa 350 bewoners in 117 wooneenheden) vormden na een periode van 7-8 jaar steeds meer afzettingen op de leidingwanden (Oldenburg et al., 2008; bijlage 3). Doseren van verschillende **commerciële chemische reinigingsmiddelen** bleek niet effectief wegens een te korte contacttijd. Ook **zwakke zuren als citroenzuur of azijnzuur** (concentraties onbekend) bleken niet effectief gezien een (te) lange inwerktijd benodigd is, waardoor het systeem lang stilgelegd zal moeten worden.

Toepassing van het sterkere **zoutzuur** (concentratie onbekend) was daarentegen wel effectief en resulteerde binnen 1-2 uur tijd deels in het afbreken van de structuur van de afzettingen en deels in het oplossen van urinesteen. Verwacht werd dat een herhalingsfrequentie van 4-5 jaar benodigd is als preventieve maatregel om verstoppingen te voorkomen (Oldenburg et al., 2008).

In Linz, Oostenrijk werd **ontkalker voor de waterkoker** gebruikt voor correctief verwijderen van de afzettingen (Ulrich, 2009).

In tegenstelling tot vacuümtoiletsystemen wordt voor urinescheidingstoiletten en waterloze urinoirs chemische reiniging met zuur wel vaak benoemd als effectieve correctieve maatregel tegen harde urinesteen afzettingen. **Azijnzuur en citroenzuur (>24 %)** worden vaak toegepast om minerale afzettingen op te lossen (Kvarnström et al., 2006; Lienert & Larsen; 2007; TVVL, 2010). Ook spoelen van de leidingen met **7 % zoutzuur** bleek effectief om afzettingen te verwijderen, waarna periodiek werd gespoeld (elke 1-3 weken) om verdere verstoppingen te voorkomen (Lienert & Larsen, 2007).

Een mogelijke oorzaak van lagere effectiviteit van chemisch reinigen in vacuümtoiletsystemen is dat de afzettingen naast anorganische ook voor een groot deel organische componenten bevatten. Deze organische componenten, zoals vezels, hebben een stabiliserende werking binnen de afzettingen en worden nauwelijks beïnvloed door het gebruik van zuur (Rohde, 2016; Yan et al., 2021). Verder is het aannemelijk dat extracellulaire polymere stoffen die worden uitgescheiden door de biofilm op het oppervlak van de afzettingen een beschermend effect hebben op pH-veranderingen (Syring, 2011). Anorganische afzettingen onder de biofilm worden hierdoor slechts in geringe mate aangetast en de organische componenten worden helemaal niet beïnvloed door de gebruikte zuren.

In diverse urinescheidingssystemen, zoals Understenshöjden en Palsternacken, werd **natronloog (soda)** (2 delen warm water en 1 deel natronloog) gedoseerd om haren, vezels en ander organisch materiaal op te lossen, zodat de anorganische afzettingen loskomen en kunnen worden weggespoeld (Jönsson, 2001; Kvarnström et al., 2006; Lienert & Larsen, 2007; TVVL, 2010). Of dit ook effectief is voor het destabiliseren van de organische laag in de afzettingen in leidingen van vacuümtoiletsystemen is niet bekend en zal nader moeten worden onderzocht. Daarnaast zou een combinatie van zuurdosering gevolgd door mechanische reiniging mogelijk een effectieve correctieve maatregel kunnen bieden. Ook experimenten met een gecombineerde opeenvolging van oxiderende stoffen (bijvoorbeeld natriumhypochloriet) voor de vernietiging van organische structuren en daaropvolgende verzuring zijn hier denkbaar.

4.2 Mechanisch reinigen

Naast chemisch reinigen wordt mechanisch reinigen benoemd in de literatuur als methode om urinesteen afzettingen correctief te verwijderen. Deze reinigingsmethode is gebaseerd op het losbreken en/of wegspoelen van de afzettingen. Mechanisch reinigen kan op verschillende manieren worden toegepast, zoals hieronder wordt toegelicht.

4.2.1 Hogedrukreiniging

Het reinigen van leidingen in vacuümtoiletsystemen met een hogedrukspuit is in staat om urinesteen afzettingen te verwijderen. Bij een praktijktest om huisaansluitingen te reinigen werd een spuitkop (Wiesel van IBG Hydro-Tech) met 8 openingen van 19 mm elk toegepast bij een druk van 18.000 kPa (180 bar) en 60 liter per minuut. De reiniging vond plaats over een afstand van circa 40 meter en hoogteverschil van 30 cm (door het zaagtandprofiel). Goede tot zeer goede reductie van de afzettingen (tot 80 %) werd behaald. Zeer goede reductie werd echter alleen

Kenmerk R007-1288399RFL-V01-kzo-NL

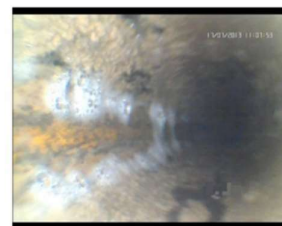
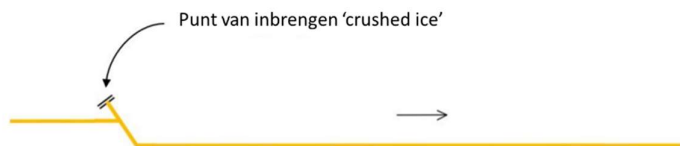
waargenomen dichtbij de spoelstraal. Verwacht wordt dat toepassing van een hogedrukspuit met roterende spoelkop, eventueel met kettingen, zal leiden tot een nog effectiever reinigingsresultaat (Rohde, 2016).

Ook in urinescheidingsystemen is hogedrukreiniging toegepast in praktijk. Hierover wordt voorgeschreven dat de te gebruiken druk en watercapaciteit bij het reinigen van kunststofleidingen met een kleine diameter (<110 mm) ten minste 50 bar en 15 L/min bedragen (ISSO-publicatie 'Montage- en verwerkingsrichtlijn kunststof leidingssystemen sanitair', uit TVVL, 2010).

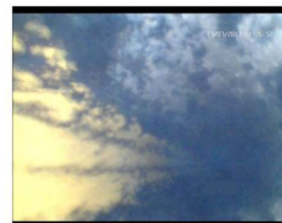
4.2.2 'Crushed ice'

De effectiviteit van mechanisch reinigen van leidingen van een vacuümtoiletsysteem in een gebouw middels invoeren van 'crushed ice' is onderzocht door Rohde (2016). Zes kg 'crushed ice' werd via een inspectieopening in het systeem gebracht. De hoge transportsnelheid van het ijs onder de vacuümdruk veroorzaakte mechanische slijtage van de afzettingen. Uit onderstaande inspectiebeelden voor en na het inbrengen van 'crushed ice' bleek deze methode zeer effectief om urinesteen te verwijderen over het gehele leidingoppervlak. De afzettingen op de binnenwand van de leiding konden worden teruggebracht van circa 80 - 90 % tot minder dan 50 %. Op basis van onderstaande afbeelding is niet duidelijk of het om harde of zachte afzettingen gaat, maar vermoedelijk waren dit zachte afzettingen.

Voor het reinigen



Na het reinigen



Figuur 4.1 Resultaten van mechanisch reinigen van urinesteen afzettingen in een vacuümtoiletsysteem (in pandig) met 'crushed ice' (Rohde, 2016)

4.2.3 Staalborstel en rioolveer

Voor correctief verwijderen van urinesteen in de urinetransportleidingen van urinescheidingsystemen (bijvoorbeeld scheidingstoiletten of waterloze urinoirs) wordt mechanisch reinigen ook toegepast in de praktijk. Verschillende methoden worden benoemd, zoals staalborstels en rioolveer (Jöhnsson, 2001; Kvarnström et al., 2006; Lienert & Larsen; 2007; TVVL, 2010). De effectiviteit van deze methoden wordt niet gerapporteerd. Wel wordt gewaarschuwd dat mechanisch reinigen met een rioolveer of staalborstels de leidingen kan

beschadigen en opruwen (TVVL, 2010; von Münch, 2009). Dit vergroot het oppervlak van de binnenwand, wat extra aanhechtingsplaatsen biedt voor (an)organisch materiaal en bacteriën, waardoor vorming van nieuw urinesteen wordt gekatalyseerd.

4.3 Vervangen van leidingen

In een aantal artikelen wordt genoemd dat het vervangen van verstopte leidingen de beste oplossing is, gezien zuur nooit alle aanslag kan verwijderen en mechanisch reinigen de leidingen kan beschadigen (Lienert & Larsen; 2007; Schluff; 2013). De leidingen kunnen vervangen worden voor leidingen van een materiaal dat vorming van afzettingen niet stimuleert en een gladdere binnenwand heeft zodat neerslag risico wordt geminimaliseerd.

5 Conclusie

Ondanks dat vorming van urinesteen afzettingen in zowel vacuümtoiletsystemen als urinescheidingstoiletten een bekend probleem is, is onderzoek naar preventieve en correctieve maatregelen beperkt. Deze literatuurreview gaf geen eenduidig beeld van de effectiviteit van de verschillende gerapporteerde maatregelen (zie Bijlage 4 voor een compleet overzicht van preventieve en correctieve maatregelen gerapporteerd in de literatuur).

Vorming van urinesteen kan worden opgesplitst in vier fases: 1) hechten en ophopen van organische deeltjes op de leidingwand; 2) nestelen biofilm met urease-actieve bacteriën, ureolyse verhoogt de lokale pH; 3) anorganische stoffen slaan neer in viskeuze suspensie; 4) anorganische neerslag kristalliseert en vormt harde urinesteen afzettingen in en op de organische laag. De compositie van urinesteen verschilt per locatie, met als hoofdbestanddelen struviet ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), hydroxyapatiet (HAP, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) en calciet (CaCO_3). Verschillende factoren, waaronder de lucht:water verhouding, het leidingmateriaal en stroomsnelheid, beïnvloeden de vorming van urinesteen afzettingen. Om deze reden is nauwkeurig ontwerp en constructie van het vacuümtoiletsysteem van belang ter voorkoming en/of reduceren van de vorming van urinesteen afzettingen in de leidingen.

Zonder preventieve inspecties en reiniging houdt het neerslagproces zichzelf in stand, doordat bestaande afzettingen het oppervlak vergroten wat hechting van bacteriën en nieuwe deeltjes katalyseert. Vroegtijdige verwijdering is daarom van groot belang voor zowel gemakkelijker verwijderen van nog viskeuze afzettingen en als preventieve maatregel tegen in toenemende mate uitgeharde afzettingen. Mechanisch reinigen middels jaarlijkse hogedrukreiniging om zachte organische en anorganische afzettingen af te voeren is effectief gebleken om kristallisatie van anorganische stoffen tot urinesteen te voorkomen. Om een dergelijke maatregel in het vacuümtoiletsysteem te kunnen toepassen dienen ondergrondse vacuümleidingen te worden voorzien van inspectieopeningen om de 30 tot 50 meter. Chemisch reinigen door zuurdosering houdt de pH laag ter voorkoming van neerslag van urinesteen afzettingen in de vacuümleidingen. Dosereren van een licht zuur na elk toiletbezoek of wekelijks tot jaarlijks spoelen van de leidingen met een sterker zuur zoals citroenzuur (>20 %) of zoutzuur (7 %) zijn preventieve maatregelen toegepast op zowel vacuümtoiletsystemen als urinescheidingssystemen. Inpassen van automatische zuurdoseerunits in het ontwerp is een gebruiksvriendelijke en wellicht ook effectievere oplossing.

Correctief reinigen (verwijderen) van harde afzettingen in bestaande vacuümtoiletsystemen middels hogedrukreiniging met een roterende spoelkop, eventueel met kettingen, kan lokaal 80 % reductie realiseren bij 180 bar. Ook 'crushed ice' kan afzettingen in de binnenwand van de vacuümleiding reduceren van 80-90 % naar <50 %. Toepassing van mechanische reinigingsmethoden als een staalborstel of rioolveer dient met zorg te worden uitgevoerd, gezien dit kan leiden tot beschadigen en opruwen van de leidingen, met als gevolg gemakkelijkere hechting van organische deeltjes en biofilm, wat urinesteen vorming katalyseert. Voor chemisch reinigen worden verschillende zuren aangedragen voor vacuümtoiletsystemen en urinescheidingsystemen. Zoutzuur (7 %) is veelbelovend wegens de korte contacttijd (1-2 uur) die benodigd is om effectieve verwijdering te realiseren. Een combinatie van chemisch en mechanisch reinigen kan het reinigingspotentieel mogelijk verhogen.

6 Nader onderzoek

Wegens de kennishiaten met betrekking tot de vorming van urinesteen en de mogelijke preventieve en correctieve maatregelen is nader onderzoek vereist. De volgende onderwerpen konden worden geïdentificeerd als interessante toekomstige onderzoeksrichtingen:

- Preventieve ontwerp- en operationele maatregelen: wegens ontbreken van richtlijnen met betrekking tot optimaal ontwerp van vacuümtoiletsystemen, zoals leidinghelling, dient hier nader onderzoek naar te worden verricht.
- Frequentie en dosis van periodieke zuurdosering of mechanische reiniging ter preventie van harde urinesteen afzettingen. Door regelmatige camera-inspecties om de staat van de leidingen te monitoren kan een locatie-specifiek onderhouds- en preventieplan worden opgesteld.
- Effectiviteit van correctief reinigen met verschillende zuren in de praktijk: in december 2022 is in kader van het onderzoek naar de afzettingen de afbraakefficiëntie van verschillende zuren en reinigingsmiddelen onderzocht door middel van bekerglastesten in een laboratorium. Toepassing van de meest veelbelovende middelen in de praktijk dient nader te worden bestudeerd om de effectiviteit te verifiëren. Hierbij kan ook worden gedacht aan het combineren van chemisch en mechanisch reinigen: een combinatie van zuurdosering gevolgd door mechanische reiniging biedt mogelijk een effectieve correctieve maatregel. Ook experimenten met een gecombineerde opeenvolging van oxiderende stoffen voor afbreken van organische structuren en daaropvolgende verzuring zijn hier denkbaar. Daarnaast wordt in diverse urinescheidingsystemen natronloog gedoseerd om haren, vezels en ander organisch materiaal op te lossen, zodat de anorganische afzettingen loskomen en kunnen worden weggespoeld. Of dit ook effectief is voor het destabiliseren van de organische laag in de afzettingen in leidingen van vacuümtoiletsystemen is niet bekend en zal nader moeten worden onderzocht.
- Invloed zuurdosering op de verschillende materialen in het vacuümtoiletsysteem: mogelijk heeft zuurdosering impact op onder andere rubber en lijm.

7 Literatuurlijst

- Abeyesuriya, K., Fam, D. & Mitchell, C. (2013). Trialling urine diversion in Australia: technical and social learnings. *Water Science and Technology*, 68(10), 2186–2194.
doi:10.2166/wst.2013.473
- Augustin, K., Skambraks, A. K., Li, Z., Giese, T., Rakelmann, U., Meinzinger, F., Schonlau, H. & Günner, C. (2013). Towards sustainable sanitation – the HAMBURG WATER Cycle in the settlement Jenfelder Au. *Water Supply*, 14(1), 13–21. <https://doi.org/10.2166/ws.2013.158>
- Austin, L. M. (2006). *Guidelines for the design, operation and maintenance of urine-diversion sanitation systems - Volume 4, Report to the Water Research Commission, WRC TT 275/06*. Water Research Commission, South Africa
- Blume, S., & Winker, M. (2011). Three years of operation of the urine diversion system at GTZ headquarters in Germany: user opinions and maintenance challenges. *Water Science and Technology*, 64(3), 579-586.
- Cao, X., Harris, W. Josan, M. S. & Nair, V. D. (2007). Inhibition of calcium phosphate precipitation under environmentally relevant conditions. *The Science of the total environment* 383(1-3), 205–215.
- Chipako, T. L., & Randall, D. G. (2020). Urine treatment technologies and the importance of pH. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1), 103622.
- Hashemi, S., Han, M., & Kim, T. (2015). The effect of material and flushing water type on urine scale formation. *Water Science and Technology*, 72(11), 2027-2033.
doi:http://dx.doi.org/10.2166/wst.2015.422
- Jönsson, H. (2001). Urine separation–Swedish experiences. *EcoEng Newsletter*, 1.
- Kvarnström, E., Emilsson, K., Richert Stintzing, A., Johansson, M., Jönsson, H., af Petersens, E., Schönning, C., Christensen, J., Hellström, D., Qvarnström, L., Ridderstolpe, P., Drangert J.-O. (2006). *Urine Diversion - One Step Towards Sustainable Sanitation*. Report 2006-1, EcoSanRes Programme, Stockholm Environment Institute, Stockholm, Sweden.
- Larsen, T. A., & Lienert, J. (2007). *Novaquatis final report. NoMix – a new approach to urban water management*. 8600 Dübendorf, Schweiz: Eawag
- Lienert, J., & Larsen, T. A. (2007). Pilot projects in bathrooms: a new challenge for wastewater professionals. *Water Practice and Technology*, 2(3).
- Lienert, J., & Larsen, T. A. (2010). High acceptance of urine source separation in seven European countries: a review. *Environmental Science and Technology*, 44(2), 556-566.
- Oldenburg, M. (n.d.). *Die ökologische Wohnsiedlung Flintenbreite, Lübeck*. Verkregen van [Microsoft PowerPoint - Projektvorstellung Flintenbreite \[Schreibgesch.tzt1\] \(deutsche-bundestiftung-umwelt.de\)](https://www.microsoft.com/powerpoint/Projectvorstellung-Flintenbreite-Schreibgesch.tzt1)
- Oldenburg, M., Albold, A., Wendland, C., & Otterpohl, R. (2008). Erfahrungen aus dem Betrieb eines neuen Sanitärkonzepts über einen Zeitraum von acht Jahren. *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 10, 1100-1105.
- Olech, Z., Zaborska, W., & Kot, M. (2014). Jack bean urease inhibition by crude juices of Allium and Brassica plants. Determination of thiosulfinates. *Food chemistry*, 145, 154-160.
- Randall, D. G., & Naidoo, V. (2018). Urine: The liquid gold of wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 2627-2635.

Kenmerk R007-1288399RFL-V01-kzo-NL

- Randall, D. G., Krähenbühl, M., Köpping, I., Larsen, T. A., & Udert, K. M. (2016). A novel approach for stabilizing fresh urine by calcium hydroxide addition. *Water Research*, 95, 361-369.
- Ray, H., Saetta, D., & Boyer, T. H. (2018). Characterization of urea hydrolysis in fresh human urine and inhibition by chemical addition. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 4(1), 87-98.
- RIVM. (2019). *De risico's van azijn bij de bestrijding van onkruid en groene aanslag door particulieren*. RIVM Briefrapport 2019-0198.
- Rohde, R. (2016). *Untersuchungen zur Feststoffbildung in Unterdrucksystemen für den Schwarzwassertransport*. German. Rhombos-Verlag.
- Saetta, D., & Boyer, T. H. (2017). Mimicking and inhibiting urea hydrolysis in nonwater urinals. *Environmental Science & Technology*, 51(23), 13850-13858.
- Saetta, D., Padda, A., Li, X., Leyva, C., Mirchandani, P. B., Boscovic, D., & Boyer, T. H. (2019). Real-time monitoring and control of urea hydrolysis in cyber-enabled nonwater urinal system. *Environmental science & technology*, 53(6), 3187-3197.
- Schluff, R. (2013). *Vacuum sewerage system*, PhD thesis University Politehnica of Bucharest.
- Senecal, J. & Vinnerås, B. (2017). Urea stabilisation and concentration for urine-diverting dry toilets: Urine dehydration in ash. *Science of The Total Environment*, 586, 650–657. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.038>
- Shen, L. (2019). *Drinking Water Softening/Scale Prevention Technology Assessment and Performance of Template Assisted Crystallization* (Master's thesis, University of Waterloo).
- STOWA. (2008). *Anders omgaan met huishoudelijk afvalwater II*, STOWA 2008-03.
- Syring, I. (2011). Experimentelle Untersuchung zur Inkrustationsneigung von unbeschichteten und mit amorphen Kohlenstoffen beschichteten Harnleiterschienen unter Einfluss von Albumin in kunstlichem Urin. Dissertation, Universität Bonn, Bonn.
- Tanskanen, V. (2018). *Sustainability of Sewer Systems for Source Separated Blackwater* (Master's thesis).
- Telkamp, P. (2006). *Separate collection and treatment of domestic wastewater in Norway*. Saniwijzer.
- TVVL. (2010). *Toepassingen, ontwerp en aanleg van gescheiden urineinzameling in gebouwen*.
- Udert, K. M., Larsen, T. A., Biebow, M., & Gujer, W. (2003a). Urea hydrolysis and precipitation dynamics in a urine-collecting system. *Water research*, 37(11), 2571-2582.
- Udert, K. M., Larsen, T. A., & Gujer, W. (2003b). Estimating the precipitation potential in urine-collecting systems. *Water Research*, 37(11), 2667-2677.
- Udert, K. M., Larsen, T. A., & Gujer, W. (2003c). Biologically induced precipitation in urine-collecting systems. *Water Science and Technology: Water Supply*, 3(3), 71-78.
- Udert, K. M., Larsen, T. A., & Gujer, W. (2006). Fate of major compounds in source-separated urine. *Water Science and Technology*, 54(11-12), 413-420.
- Ulrich, L. (2009). Urban Urine diversion & greywater treatment system, Linz, Austria.
- van den Bulk, J. (2008). *New initiatives in sanitation systems: Comparative assessment of the implementation process and actual performance of the Casa Vita project (Deventer) and the Flintenbreite project (Lübeck)*. Saniwijzer.
- von Münch, E. (2009). Basic overview of urine diversion components (waterless urinals, UD toilet bowls and pans, piping and storage).

von Münch, E., Winker, M. (2011). Technology Review of Urine Diversion Components - Overview on urine diversion components such as waterless urinals, urine diversion toilets, urine storage and reuse systems. Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Yan, Z., Cheng, S., Zhang, J., Saroj, D. P., Mang, H. P., Han, Y., ... & Li, Z. (2021). Precipitation in urine source separation systems: Challenges for large-scale practical applications. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105479.

Bijlage 1 Nadere toelichting effect water ontharden op vorming urinesteen

Het spoelwater in vacuümtoiletten levert extra Ca^{2+} en Mg^{2+} dat kan neerslaan met fosfaathoudende mineralen uit urine (Udert et al., 2003b). Een waterontharder die Ca^{2+} en Mg^{2+} verwijdert (bijvoorbeeld Aquacell) zal de hoeveelheid urinesteen (en de vormingssnelheid) verminderen, maar zeker niet wegnemen (zie onderstaande tekst box). In waterloze urinoirs is namelijk gebleken dat in de afwezigheid van spoelwater de hoeveelheid Ca^{2+} en Mg^{2+} in de urine genoeg is om te leiden tot aanzienlijke neerslag binnen 6-12 maanden (Lienert & Larsen, 2007). Op basis van een model om neerslagpotentie in urinescheidings toiletten gespoeld met kraanwater of regenwater te schatten zal, bij een verdunningsfactor van 4 à 5 in vacuümtoiletten, het spoelen met onthard water leiden tot circa 40 % minder neerslag (struviet + HAP) (van circa 550 g/m³ of 2500 mg naar 350 g/m³ of 1400 m) (Udert et al., 2003b).

Echter, uit onderzoek van Rohde (2016) naar vacuümtoiletsystemen is gebleken dat de hardheid van het water waarmee vacuümtoiletten worden doorgespoeld slechts kleine invloed heeft op urinesteenvorming. Hij concludeerde dat de totale hoeveelheid neerslag lineair toeneemt als gevolg van de toenemende toevoer van calcium- en magnesiumionen bij toenemende hardheid van het spoelwater. De compensatie bij een spoelwaterhardheid van 0 °dH van het neerslagpotentieel bedraagt circa 625 mg/l. Hieruit kan worden afgeleid dat zelfs bij een volledige ontharding van spoelwater met een initiële hardheid van 10 °dH het neerslagpotentieel slechts met 20 % wordt verminderd. De reden hiervoor is de hoge toevoer van calcium en magnesium via de menselijke uitwerpselen, vooral de fecaliën. Ook heeft de ontharding van het gebruikte spoelwater invloed op de kinetische effecten van de neerslag. Op deze manier worden naast verharders ook complexvormende stoffen zoals organische zuren verwijderd. Tervahauta et al. (2014) rapporteren een toename van calciumfosfaatprecipitatie tijdens de anaerobe behandeling van zwartwater na het gebruik van een waterontharder en schrijven dit toe aan een gebrek aan complexvormende stoffen in het spoelwater, die normaalgesproken neerslagvorming remmen door complexering van vrije ionen. De beperkte vermindering van neerslag door toepassing van spoelwaterontharding komt overeen met de onderzoeken uitgevoerd door Rohde (2016).

Werking van een 'standaard' waterontharder (bijvoorbeeld Aquacell)

De waterontharder van Aquacell verwijdert calcium en magnesiumionen uit het water door hechting aan harsbolletjes. Het is een kationwisselaar: 2 natriumdeeltjes gehecht aan het oppervlak van de harsbolletjes gaan in oplossing en worden vervangen door 1 calcium of magnesium ion. Dit proces gaat door totdat de harsbolletjes verzadigd zijn met calcium en magnesiumionen; dan wordt het filter gespoeld met een NaCl (zout) oplossing en binden de natriumionen weer aan het oppervlak terwijl calcium- en magnesiumionen weer in oplossing gaan en worden afgevoerd met de zoutoplossing. Carbonaat wordt dus niet verwijderd, waardoor de pH minder vatbaar is voor schommelingen (www.aquacell-waterontharder.nl/werking/ionenwisselaar).

Bijlage 2 Zuurdosering en concentratie berekeningen

Meq = mmol x valentie (lading)

Meq = mg stof * valentie / MW (molecular weight)

Mg = meq*MW / valentie

Mg/l = meq/l * MW / valentie

Zuur % = g/ 100 ml

MW azijnzuur: 60 g/mol

Valentie azijnzuur: 1

MW citroenzuur: 189 g/mol

Valentie citroenzuur: 3

Dosering van 2,5 ml van 2500 meq/ na elk toiletbezoek of per uur (waterloze urinoirs):

2500 meq/l azijnzuur = 2500/1 mmol/l azijnzuur

2500 mmol/l azijnzuur = 2500 * 60 mg/mmol = 150000 mg/l

150000 mg/l = 150 g/l

150 g/l = 15 g/100 ml = 15 % azijnzuur gedoseerd in de literatuur

Dit komt neer op 2,5 ml van **15 % azijnzuur** (= (2500*2.5/1000)meq *60g/mol /1000 = 0,375 g)

Het percentage van huishoudazijn of schoonmaakazijn is circa **10 %** (RIVM, 2019). Er zijn ook oplossingen met hogere percentages azijnzuur (tot 80 %) in de handel. Deze worden niet aangeduid met de term schoonmaakazijn, maar met 'azijnzuur' gevolgd door de concentratie.

- ➔ Van 10 % huishoudazijn zou je: 3,75 ml nodig moeten hebben om dezelfde dosering (0,375g) te hanteren

Deze dosering geldt voor waterloze urinoirs (geen spoelwater), waar werd uitgegaan van een totaal volume van 242 ml (urine+urease+zuur) ➔ de zuurconcentratie na dosering wordt dan 0,375g / 0,242 l = **1,55 g/l** (of **26 meq/l**).

In vacuümtoiletten wordt gespoeld met 1 l water, daardoor zou met dezelfde dosering de zuurconcentratie lager liggen. Om deze reden zal meer zuur moeten worden toegevoegd.

Uitgaande van 300 ml urine en 1 l spoelwater: totaal volume van 1,3 l, dat een azijnzuur concentratie van 1,55 g/l (=26meq/l) moet krijgen door 10 % huishoudazijn (10g/100ml) te doseren per speelbeurt:

- ➔ 1,55 g/l*1,3 l / 100 g/l azijnzuur *1000 ml/l= **20 ml 10 % azijnzuur doseren (1,52 g/l)**

Citroenzuur is een sterker zuur dan azijnzuur, en heb je dus ook minder van nodig. Uitgaande van eenzelfde zuurconcentratie in 1.3 l urine+spoelwater van 26 meq/l is benodigd:

- ➔ Citroenzuur 25 % (beschikbaar bij Brenntag): 26meq/l / 3 (valentie) = 8,67 mmol/l * 189 mg/mmol = 1638 mg/l * 1,3 l = 2129 mg. 2,129g/250 g/l *1000= 8,52 ml
- ➔ Citroenzuur 45 % (beschikbaar bij Brenntag): 4,73 ml

Bijlage 3 Achtergrondinformatie praktijkcasussen

Naast de problematiek in Sneek wordt in de literatuur een aantal casussen omschreven van pilot projecten waar praktijkervaring met de vorming van afzettingen in de leidingen is opgedaan. Deze casussen tonen aan dat vorming van afzettingen, met als gevolg verstoppingen, een veelvoorkomend probleem is bij urinescheidingssystemen. Vacuümtoiletsystemen komen in mindere mate naar voren. Desalniettemin is er weinig bekend over het voorkomen (preventie) en verwijderen van urinesteen in leidingen.

GTZ hoofdkantoor in Duitsland

In het hoofdkantoor van German Technical Cooperation (GTZ) GmbH in Eschborn, Duitsland, is in 2006 een urinescheidingssysteem geïnstalleerd. Dit systeem bestaat uit 50 urinescheidingstoiletten (NoMix toilet), 25 waterloze urinoirs en 4x2,5 m³ PE-urineopslagtanks. Het doel van dit systeem was om waterbesparing en urinehergebruik in de landbouw te bestuderen. Na 2,5 jaar is een eerste evaluatie op acceptatie door gebruikers en schoonmaakpersoneel uitgevoerd door Blume & Winker (2011) aan de hand van interviews en surveys. Uit dit onderzoek is onder andere gebleken dat over tijd een anorganische minerale neerslag ontstond in de stankafsluiter en leidingen. In sommige gevallen resulteerde dit in verstoppingen waardoor urine niet langer gescheiden werd ingezameld. In andere gevallen zorgde de urine neerslag ervoor dat de stankafsluiter permanent openstond wat stankoverlast veroorzaakte en verdunning van de urine met spoelwater. Een aantal zeer ernstig vervuilde stankafsluiters is verwijderd en gereinigd door deze een aantal dagen in citroenzuur de weken. Dit bleek effectief. Om deze reden wordt geadviseerd dat het schoonmaakpersoneel **eens per maand 200 ml citroenzuur of organisch zuur in de stankafsluiter doseert en dit 24 uur laat weken**. Wanneer dit op frequente basis wordt gedaan zal dit een goede preventieve maatregel zijn en wordt verwacht dat een 24-uurs contacttijd met het zuur voldoende is. **Zonder preventief onderhoud zullen de stankafsluiters defect raken na ~2 jaar gebruik** (Blume & Winker, 2011). Uit andere praktijkervaringen met NoMix toiletten blijkt zelfs dat de urinetransportleidingen al **na 6-12 maanden gebruik verstopt** raken door neergeslagen stoffen wanneer er geen preventieve reinigingsmaatregelen worden toegepast (Lienert & Larsen, 2010).

Urinescheiding in stedelijk gebied in Linz

In 2006 is er in Linz, Oostenrijk, een medium-schaal ecosan pilot project opgestart in stedelijk gebied. Dit project omvat ~250 inwoners van 88 appartementen en 270 leerlingen op een basisschool (460 i.e. totaal). Het geïnstalleerde systeem bestaat uit urinescheidingstoiletten met spoelwater, waterloze urinoirs, urinetransportleidingen en een verzameltank. Uit de praktijk bleek onderhoud van de toiletten en urinoirs lastig door opbouw van scaling in de stankafsluiter. **Ontkalker voor de waterkoker** werd gebruikt voor correctief verwijderen van de afzettingen. Daarnaast kregen de gebruikers **elk jaar 1 l citroenzuur (20 %) om opbouw van afzettingen in de stankafsluiter van het toilet te voorkomen**. Citroenzuur moet maandelijks gedoseerd worden en over de nacht intrekken (Ulrich, 2009).

Vacuümtoiletsysteem Casa Vita, Deventer

Dit systeem bestaat uit 38 koopappartementen voorzien van vacuümtoiletten. De toiletten zijn met elkaar verbonden via centrale leidingen die weer verbonden zijn aan een centrale vacuümpomp in de kelder van het appartementencomplex. Er worden problemen ondervonden met het systeem en verstopping van de leidingen. Preventief wordt een commercieel reinigingsproduct gedoseerd (Biocompact), 2 l per huishouden per jaar (van den Bulk, 2008).

Vacuümtoiletsysteem Kaja, Ås, Noorwegen

Het project in Kaja in Ås (Noorwegen) betreft 24 studenten appartementen, bewoond door 48 studenten. Het project is opgeleverd in 1997. De appartementen zijn voorzien van vacuümtoiletten en een grijswater systeem (septic tank gevolgd door een aeroob bio-filter en constructed wetland). Er wordt preventief 8,33 l microbieel reinigingsmiddel per appartement per jaar gedoseerd. Desondanks werden regelmatig problemen ondervonden met verstoppingen door vorming van urinesteen (van den Bulk, 2008; Telkamp, 2006).

Vacuümtoiletsysteem Torvetua, Bergen, Noorwegen

Het Torvetua project in Bergen omvat 40 huizen bewoond door circa 130 mensen. Het project is in bedrijf sinds 1999. De huizen zijn voorzien van vacuümtoiletten, een grijswater systeem (septic tank gevolgd door een aeroob bio-filter en constructed wetlands) en een regenwater systeem (regenwater filtreert in de turf daken van de woningen en het overtollige water stroomt de grond in). Ondanks dosering van 0,625 l microbieel reinigingsmiddel per huishouden per jaar (wekelijkse dosering via toilet), werden na 7-8 jaar bedrijven van het systeem regelmatig problemen ondervonden door neerslag van urinesteen in de leidingen (van den Bulk, 2008; Telkamp, 2006).

Flintenbreite, Lübeck, Duitsland

In 1999 is voor de ecologische woonwijk Flintenbreite, Lübeck, een vacuümtoiletsysteem gerealiseerd ten behoeve van circa 350 inwoners. De huizen, opgesplitst in vrijstaande woningen, appartementen en geschakelde woningen, zijn voorzien met vacuümtoiletten. Het zwartwater wordt, samen met organisch afval vergist. Het biogas wordt gebruikt in een warmte-kracht-koppeling voor generatie van warmte en elektriciteit, toegepast in de huishoudens. Grijswater wordt apart ingezameld en behandeld in helofytenfilters (van den Bulk, 2008; Oldenburg, n.d.). Na een periode van 7-8 jaar vormden steeds meer afzettingen op de leidingwanden (Oldenburg et al., 2008).

Kenmerk R007-1288399RFL-V01-kzo-NL

Bijlage 4 Overzicht preventieve en correctieve maatregelen

Project	Type Systeem	Problematiek	Preventief gereinigd	Correctief gereinigd	Maatregel	Opmerkingen	Bron
Flintenbreite, Lübeck, Duitsland	Vacuütoiletsysteem	Harde afzettingen in leidingen		x	Commerciële chemische reinigingsmiddelen Citroenzuur en azijnzuur Zoutzuur	Niet effectief, te korte inwerktijd Niet effectief, te lange inwerktijd nodig Effectief na 1-2 uur inwerken	Oldenburg et al. (2008); Rohde (2016)
Torvetua, Bergen, Noorwegen	Vacuütoiletsysteem	Urinesteen neerslag en verstoppingen van leidingen	x		Reinigingsmiddel doseren 0,625 l per huishouden per jaar	Ondanks preventief reinigen problemen met verstoppingen	van den Bulk (2008); Telkamp (2006)
Casa Vita, Deventer, Nederland	Vacuütoiletsysteem	Urinesteen neerslag en verstoppingen van leidingen	x		Biocompact doseren 2 l per huishouden per jaar	Ondanks preventief reinigen problemen met verstoppingen	van den Bulk (2008)
Kaja, Ås, Noorwegen	Vacuütoiletsysteem	Urinesteen neerslag en verstoppingen van leidingen	x		Reinigingsmiddel doseren 8,33 l per studentappartement per jaar	Ondanks preventief reinigen problemen met verstoppingen	van den Bulk (2008); Telkamp (2006)
GTZ hoofdkantoor, Duitsland	Urinescheidingstoiletten (NoMix) en waterloze urinoirs	Anorganische afzettingen in stankafsluiter en leidingen, resultierend in verstoppingen	x		Maandelijks 200 ml citroenzuur of organisch zuur doseren, 24 uur inwerken		Blume & Winker (2011)

Kenmerk R007-1288399RFL-V01-kzo-NL

Project	Type Systeem	Problematiek	Preventief gereinigd	Correctief gereinigd	Maatregel	Opmerkingen	Bron
Linz, Oostenrijk	Urinescheidingstoiletten en waterloze urinoirs	Afzettingen in de stankafsluiter	x	x	Preventief: 1 l citroenzuur (20 %) per jaar, maandelijks doseren via toilet Correctief: Ontkalker waterkoker		Ulrich (2009)
Schiphol, Nederland	Urinescheidingstoiletten en waterloze urinoirs	Slibvormig urinesteen resulteerde in verstoppingen	x	x	Riolveer en hogedrukreiniging		TVVL, 2010
Laboratorium-schaal testen	Waterloze urinoirs	Minerale neerslag in leidingen	x		2,5 ml azijnzuur (15 %) doseren na elk toiletbezoek Bij lage gebruikersfrequentie 2,5 ml azijnzuur (15 %) per uur doseren	In een vacuümtoilet komt deze dosering neer op 20 ml huishoudazijn (10 %)	Saetta & Boyer (2017); Saetta et al. (2019)
Diverse projecten binnen het EcoSanRes programma	Urinescheidingssystemen	Urinesteen in leidingen en stankafsluiter	x	x	Mierenzuur (concentratie onbekend), citroenzuur (>24 %) of azijnzuur (>24 %) doseren (preventief minimaal 2x per jaar)		Kvarnström et al. (2006); STOWA 2008-03; TVVL (2010)
Novaquatis project, Zwitserland, Zweden en Duitsland	Urinescheidingstoiletten	Scaling en verstoppingen van de leidingen	x	x	1 dl citroenzuur (10 %) (preventief regelmatig doseren) of 1 l zoutzuur (7 %) (preventief elke 1-3 weken doseren)	Effectief	Lienert & Larsen (2007)
Test in onbekend systeem	Vacuümtoiletsysteem	Harde urinesteen afzettingen		x	Commercieel reinigingsproduct op basis van oxaalzuur, inwerktijd 18 uur	Niet effectief: Inwerktijd onvoldoende en mogelijke nevenreactie tot calciumoxalaat neerslag	Rohde (2016)

Kenmerk R007-1288399RFL-V01-kzo-NL

Project	Type Systeem	Problematiek	Preventief gereinigd	Correctief gereinigd	Maatregel	Opmerkingen	Bron
Passagiersschip	Vacuütoiletsysteem	Harde urinesteen afzettingen		x	Wekelijks 12 uur spoelen met fosforzuur (30 %)	Niet effectief, na 8 jaar leidingdelen vervangen	Rohde (2016)
Meerdere projecten	Urinescheidingstoiletten en waterloze urinoirs	Verstopingen door mix van organische en anorganische componenten		x	Natronloog (33 %) om organische componenten op te lossen Mechanisch reinigen met staalborstel of rioolveer	Mechanisch reinigen kan de leiding opruwen, wat nieuwe neerslagvorming katalyseert	Jöhnsson (2001); Kvarnström et al. (2006); Lienert & Larsen (2007); TVVL (2010)
Huisaansluitingen, locatie onbekend	Vacuütoiletsysteem	Harde urinesteen afzettingen		x	Hogedrukreiniging, mogelijk met roterende spoelkop en/of kettingen	Lokaal effectief	Rohde (2016)
Meerdere projecten	Urinescheidingstoiletten en waterloze urinoirs	Harde urinesteen afzettingen		x	Hogedrukreiniging		TVVL (2010)
Vacuümleiding, locatie onbekend	Vacuütoiletsysteem	Urinesteen afzettingen		x	6 kg 'crushed ice' via inspectie-opening	Zeer effectief	Rohde (2016)