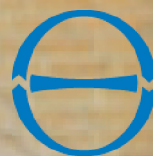




Miljøministeriet  
Naturstyrelsen



DANVA  
Dansk Vand- og  
Spildevandsforening

# Central blødgøring af drikkevand

Maj 2011

# Kolofon

**Titel:**

Central blødgøring af drikkevand

**Emneord:**

Vandforsyning, drikkevand, blødgøring, blødgøringsteknologier, miljøeffekter, sundhedseffekter, samfundsøkonomi

**Udgiver:**

Miljøministeriet, Naturstyrelsen

**Redaktion:**

COWI A/S

**Illustrationer:**

COWI A/S

**Kort:**

GEUS

**Grafisk tilrettelæggelse:**

COWI A/S

**Andre bidragsydere:**

Naturstyrelsen, DANVA, Århus Vand, Vandcenter Syd, Nordvand og Københavns Energi

**Sprog:**

Dansk

**År:**

2011

**URL:**

[www.nst.dk](http://www.nst.dk)

**ISBN nr. elektronisk version:**

978-87-7279-030-5

**Versionsdato:**

Maj 2011

**Udgiverkategori:**

Statslig

**Resume:**

Nærværende analyse omfatter en gennemgang af en række teknologier, der potentielt kan være relevante ved central blødgøring af vand hos vandforsyningerne, som leverer ca. 65 % af vandforbruget i Danmark. Central blødgøring antages kun at være relevant ved hårdheder over ca. 15 °dH, hvilket udgør godt 60 % af vandmængden. Analysen beskriver følgende teknologier: Kalkfældning, ionbytning, nanofiltrering, omvendt osmose, magnetiske metoder, ultralyd og pulserende strøm, og sammenligner de tre væsentligste (de tre førstnævnte) med hensyn til økonomi, ressourceforbrug, miljøeffekter og resulterende kemisk vandkvalitet. Derudover foretages en screening af de samfundsøkonomiske konsekvenser beregnet for 1 m<sup>3</sup> vand ved indførelse af de tre teknologier.

Må citeres med kildeangivelse.

**Ansvarsfraskrivelse:**

Naturstyrelsen offentliggør rapporter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøministeriet. Offentliggørelsen betyder, at Naturstyrelsen finder indholdet af væsentlig betydning for en bredere kreds. Naturstyrelsen deler dog ikke nødvendigvis de synspunkter, der kommer til udtryk i rapporterne

## Indholdsfortegnelse

|          |                                      |           |
|----------|--------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Indledning</b>                    | <b>5</b>  |
| 1.1      | Læsevejledning                       | 6         |
| <b>2</b> | <b>Sammenfatning</b>                 | <b>7</b>  |
| <b>3</b> | <b>Grundlag for evalueringen</b>     | <b>15</b> |
| 3.1      | Vandforbrug og hårdhed               | 15        |
| 3.2      | Systemforståelse og afgrænsning      | 18        |
| 3.3      | Generelle konsekvenser af blødgøring | 21        |
| 3.4      | Referencer                           | 29        |
| <b>4</b> | <b>Teknologibeskrivelser</b>         | <b>33</b> |
| 4.1      | Kalkfældning (pellet-metoden)        | 33        |
| 4.2      | Ionbytning                           | 36        |
| 4.3      | Nanofiltrering                       | 37        |
| 4.4      | Omvendt osmose                       | 40        |
| 4.5      | Magnetiske metoder                   | 41        |
| 4.6      | Ultralyd og pulserende strøm         | 42        |
| 4.7      | Referencer                           | 42        |
| <b>5</b> | <b>Sammenligning af metoderne</b>    | <b>45</b> |
| 5.1      | Økonomi                              | 46        |
| 5.2      | Ressourceforbrug                     | 47        |
| 5.3      | Miljøeffekter                        | 48        |
| 5.4      | Kemisk vandkvalitet                  | 49        |
| 5.5      | Sammenligning af nøgleparametre.     | 50        |
| 5.6      | Referencer                           | 50        |
| <b>6</b> | <b>Samfundsøkonomisk screening</b>   | <b>52</b> |
| 6.1      | Samfundsøkonomisk metode             | 52        |
| 6.2      | Scenarier og resultatopgørelse       | 53        |

## Central blødgøring af drikkevand

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 6.3      | Centrale forudsætninger og antagelser                 | 54        |
| 6.4      | Beregningsmæssige forudsætninger og data              | 57        |
| 6.5      | Resultater  | 65        |
| 6.6      | Følsomhedsanalyser og ikke værdisatte effekter        | 67        |
| 6.7      | Referencer  | 71        |
| <b>7</b> | <b>Eksempler på effekter for erhvervsvirksomheder</b> | <b>73</b> |
| 7.1      | Vaskeribranchen                                       | 73        |
| 7.2      | Fjernvarmanlæg  | 74        |
| 7.3      | Hotelbranchen   | 75        |
| 7.4      | Referencer  | 76        |
| <b>8</b> | <b>Konklusioner</b>                                   | <b>78</b> |
| 8.1      | Teknologi og miljø                                    | 78        |
| 8.2      | Samfundsøkonomi                                       | 79        |

## Bilagsfortegnelse

Bilag A. Gevinster for rensningsanlæg

Bilag B: Investerings- og driftsomkostninger for teknologierne

## 1 Indledning

Hårdt drikkevand medfører gener for forbrugerne i form af tilkalkning og øget forbrug af vaske- og rengøringsmidler. Derfor har Naturstyrelsen (tidligere By- og Landskabsstyrelsen) og DANVA (Dansk Vand- og Spildevandsforening) ønsket at undersøge de økonomiske, tekniske og miljømæssige aspekter ved at blødgøre drikkevandet centralt på vandforsyningsanlæggene i de områder, hvor hårdheden medfører størst gener for forbrugerne. I samarbejde med Københavns Energi har man bedt COWI om at udarbejde en redegørelse, der tager udgangspunkt i de mest kendte, afprøvede og dokumenterede metoder for central fjernelse af kalk fra drikkevandet. Opgaven følges af en arbejdsgruppe og en styregruppe bestående af de ovennævnte samt en følgegruppe, hvor også Århus Vand, VandCenter Syd, Nordvand og Sundhedsstyrelsen er repræsenteret.

Det er ønsket, at redegørelsen omfatter tekniske muligheder for repræsentative danske vandforsyninger, både større og mindre, samt inddrager variation i vandets hårdhed mellem vandforsyninger. De budgetøkonomiske konsekvenser for forskellige repræsentative vandforsyninger og forbrugere ved central blødgøring af drikkevand er ønsket belyst i form af en samfundsøkonomisk opgørelse ud fra de tekniske potentialer.

Nærværende rapport indeholder således en beskrivelse af de mest kendte, afprøvede og dokumenterede metoder for central fjernelse af kalk fra drikkevandet, samt en beskrivelse af konsekvenserne ved at anvende disse teknologier med hensyn til:

- Økonomi for vandforsyninger og forbrugere (investering, arealbehov, drift og vedligehold, levetid, resulterende vandpris)
- Ressourceforbrug for vandforsyninger og forbrugere (energi, kemikalier, vandspild, ændret levetid af apparater, andet)
- Resulterende vandkvalitet
- Miljø- og sundhedseffekter hos vandforsyninger og forbrugere (CO<sub>2</sub>, affaldsprodukter, sundhedsmæssige konsekvenser)

På basis af ovenstående er der foretaget en samfundsmæssig screeningsanalyse ud fra en række opstillede scenarier, hvor den samfundsmæssige konsekvens per leveret kubikmeter vand sammenlignes mellem 3 udvalgte hovedteknologier og med udgangspunkt i 2 forskellige hårdheder. Denne sammenligning foretages alene for vand leveret til husholdningerne.

Effekterne for erhverv, der modtager vand fra de centrale vandforsyninger, belyses via nogle eksempler for forskellige erhvervstyper.

### 1.1 Læsevejledning

Rapportens kapitel 3 indeholder en beskrivelse af grundlaget for evalueringen omfattende først en række baggrundstal med hensyn til vandmængder og hårdhed, som har udgjort grundlaget for de foretagne beregninger. Dernæst gennemgås den systembeskrivelse, der har ligget til grund for redegørelsen og ikke mindst den samfundsmæssige screening, og de anvendte scenarier opstilles. Endelig følger en beskrivelse af de generelle (teknologiuafhængige) konsekvenser af at blødgøre vand centralt.

Kapitel 4 indeholder en teknisk beskrivelse af de betragtede teknologier til central blødgøring af vand, mens kapitel 5 indeholder den teknologiske og miljømæssige sammenligning af metoderne. Kapitel 4 er således rettet mod vandforsyningerne og andre som har interesse i det tekniske grundlag for metoderne, mens kapitel 5 (sammen med kapitel 3) er rettet mod beslutningstagere og andre, som er mest interesseret i konsekvenserne af at anvende metoderne.

Den samfundsøkonomiske screening findes i kapitel 6, hvor både metode, datagrundlag og resultater er beskrevet. I kapitel 7 er givet nogle eksempler på, hvilken betydning det kan have for forskellige erhvervssektorer, såfremt der foretages en blødgøring af vandet centralt på vandforsyningsanlæggene.

Endeligt indeholder kapitel 8 de konklusioner, redegørelsen lægger op til, ligesom kapitel 2 indeholder en relativt kort sammenfatning af hele evalueringen.

I nogle tilfælde (dette gælder især teknologibeskrivelserne) er beskrivelserne baseret på sammenfatning af en række referencer samt personlig kommunikation og COWIs generelle erfaring, og det kan derfor være vanskeligt at henviser oplysninger til en specifik reference i selve teksten. Det er derfor valgt generelt at placere referenceafsnit i tilknytning til de enkelte kapitler, hvortil de er knyttet.

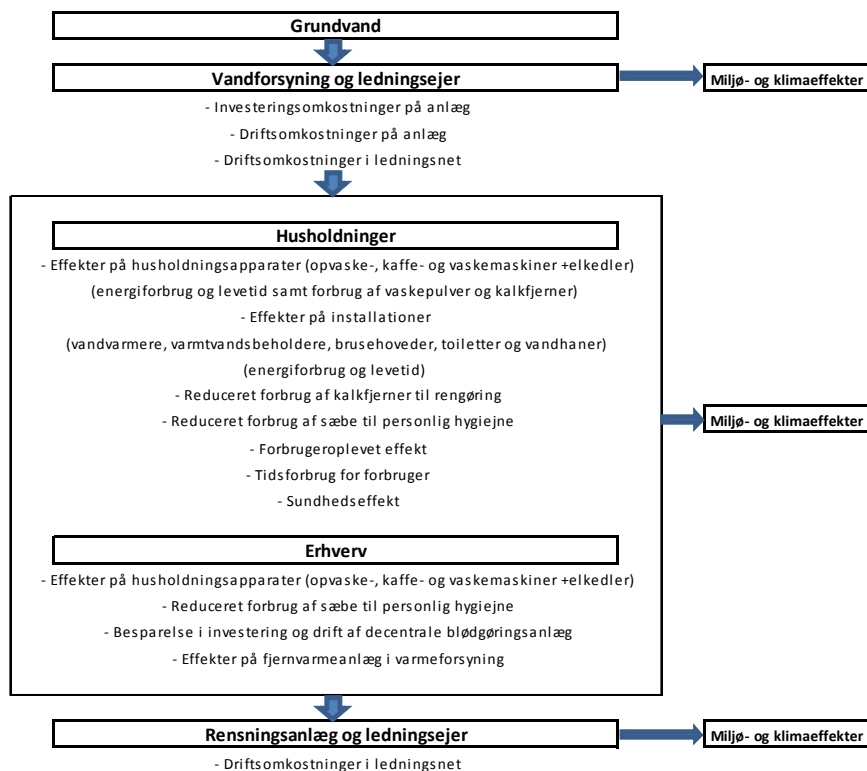
## 2 Sammenfatning

Nærværende analyse har omfattet en gennemgang af en række teknologier, der potentielt kan være relevante ved central blødgøring af vand hos vandforsyningerne, som leverer ca. 65 % af vandforbruget i Danmark. Central blødgøring antages kun at være relevant ved hårdheder over ca. 15 °dH, hvilket udgør godt 60 % af vandmængden leveret af vandforsyningerne. Det har været en forudsætning i evalueringen, at vandet blev blødgjort til 8 °dH uafhængigt af den oprindelige hårdhed (>15 °dH). En resulterende hårdhed på 8 °dH er valgt, da det vurderes at være et niveau, hvor der er en tilstrækkelig effekt af blødgøring. Konsekvenserne af en central blødgøring er primært vurderet for de private husholdninger, som den største og mest homogene forbrugergruppe. Konsekvenserne for erhvervslivet er belyst via vurdering af betydningen for henholdsvis vaskerier, fjernvarmeforsyninger samt hoteller.

Rammen for analysen fremgår af Figur 2.1, se en uddybning i afsnit 3.2.

*Figur 2.1 Systemforståelse og -effekter*

## Central blødgøring af drikkevand



Generelt vil blødgøring af vand have en række konsekvenser, se nærmere i afsnit 3.3, dels hos forsyningsselskaberne, dels hos de private forbrugere (og erhvervsvirksomheder). Indførelsen af nye mere avancerede teknologier vil betyde både mere arbejdstid til drift og et større behov for efteruddannelse for forsyningsselskaberne. Derudover vil det kunne betyde mindre kalkbelægning i forsyningsnettet, hvilket det dog er meget vanskeligt at kvantificere. Det er f.eks. ikke alle forsyningsselskaber med hårdt vand, der oplever kalkbelægnings ved høje vandhårdheder. Det er vurderet, at blødgøring ikke vil have betydning korrosionsmæssigt i forsyningsnettet, da der selv ved 8 °dH i princippet vil dannes basiske belægnings, som vil beskytte mod korrosion. På rensningsanlæggene vil der kunne spares 10 til 20 % af udgifterne til fosforfældningskemikalier. Til gengæld vil blødgøringsprocesser på vandværket medføre et øget energiforbrug - afhængigt af den valgte teknologi - og dermed en øget CO<sub>2</sub>-emission.

Forbrugerne vil omvendt opleve et mindre energiforbrug<sup>1</sup> i en række husholdningsapparater og ikke mindst en længere levetid for disse apparater. Afhængigt af fjernvarmesystemet vil nogle forbrugere have haft en for høj tilbageløbs-temperatur for fjernvarmevandet, hvilket man ofte betaler en afgift for, og den vil kunne forsvinde med en bedre varmeudnyttelse på grund af mindre kalkbelægnings. Endelig vil forbrugerne bruge mindre rengøringsmidler, vaskepulver, shampoo og sæbe samt mindre tid på rengøring m.m.

<sup>1</sup> Med en dertil knyttet mindre CO<sub>2</sub>-emission



## Central blødgøring af drikkevand

Der er påvist nogle potentielle sundhedseffekter af at anvende blødt vand, men der er stor usikkerhed om det konkrete omfang. En reduktion af magnesiumindholdet synes at kunne medføre flere hjerte-kar relaterede sygdomme, mens en reduktion af calciumindholdet synes at kunne medføre flere cariestilfælde. Da blødgøring ikke vurderes at medføre øget korrosion, vil der ikke herved frigives mere metal fra ledningssystemet med de dertil hørende potentielle sundhedseffekter.

Endelig er der subjektive effekter såsom vandets smag, oplevelsen af hårvask m.m. samt den visuelle ændring af færre kalkrande m.m. Især de første effekter vil være meget individuelt betinget.

Analysen har set på seks potentielle teknologier, se kapitel 4:

- Kalkfældning (pelletmetoden)
- Ionbytning
- Nanofiltrering
- Omvendt osmose
- Magnetiske metoder
- Ultralyd og pulserende strøm.

Omvendt osmose er en endnu finere filtrering end nanofiltrering, som fjerner stort set alle ioner og er betydeligt dyrere end nanofiltrering. Af disse grunde er denne teknik ikke medtaget i den egentlige analyse.

De magnetiske metoder samt metoderne baseret på ultralyd og pulserende strøm er kun dokumenteret i begrænset omfang med hensyn til de processer, der betinger metodernes virkemåde ved forskellige vandkvaliteter. Det er derfor besluttet heller ikke at medtage dem i den egentlige analyse.

Som redskab i analysen er opstillet i alt 6 scenarier, 2 hovedscenarier:

- Scenarium I: Blødgøring fra hårdhed ca. 22 °dH til hårdhed ca. 8 °dH.
- Scenarium II: Blødgøring fra hårdhed ca. 17 °dH til hårdhed ca. 8 °dH,

hver med 3 underscenarier:

- A: Anvendelse af kalkfældning (pellet-metoden) på vandværk med kapacitet på 1.500.000 m<sup>3</sup>/år. Dvs. udfældning af CaCO<sub>3</sub> ved dosering af NaOH.
- B: Anvendelse af nanofiltrering på vandværk med kapacitet på 160.000 m<sup>3</sup>/år. Dvs. fjernelse af divalente ioner - herunder Ca<sup>+2</sup> og Mg<sup>+2</sup>.
- C: Anvendelse af ionbytning på vandværk med kapacitet på 160.000 m<sup>3</sup>/år. Dvs. fjernelse af Ca<sup>+2</sup> og Mg<sup>+2</sup> ved ionbytning med Na<sup>+</sup>.

Som det ses, er kalkfældningsmetoden anvendt ved en forholdsvis stor kapacitet og ionbytning og nanofiltrering med en forholdsvis lille kapacitet, svarende

## Central blødgøring af drikkevand

til hvad teknologierne umiddelbart er mest egnede til. I den samfundsøkonomiske screening er der så siden foretaget følsomhedsanalyser af betydningen af dette.

Analysen omfatter en teknisk- og miljømæssig sammenligning af de tre teknologier, se kapitel 5, og en samfundsøkonomisk screening, hvor de samfundsøkonomiske konsekvenser af scenarierne er beregnet, se kapitel 6.

Resultatet af den samfundsøkonomiske screening udtrykker summen af fordele og ulemper ved tiltaget opgjort i kr./m<sup>3</sup>. I den samfundsøkonomiske analyse medregnes såvel de direkte økonomiske konsekvenser samt en række af de miljømæssige og øvrige eksterne effekter udtrykt i kr. Vurderingen af et tiltags samlede lønsomhed baseres på værdien af det samfundsøkonomiske overskud i forhold til en referencesituation uden tiltaget. En positiv samlet værdi indikerer, at det vil være fordelagtigt for samfundet samlet set at gennemføre projektet. En negativ værdi indikerer det modsatte.

For en del af de effekter, der medtages i screeningsanalysen, er både kvantificeringen af effekten og værdisætningen usikker. Følsomhedsanalyser er derfor en meget væsentlig del af den samfundsøkonomiske screeningsanalyse, idet de sikrer, at betydningen af sådanne usikkerheder afdækkes. Følsomhedsanalyserne fremgår af afsnit 6.6. De i screeningsanalysen anvendte forudsætninger fremgår af afsnit 6.3 og 6.4.

De centrale samfundsøkonomiske resultater fremgår af tabel 2.1..

## Central blødgøring af drikkevand

*Tabel 2.1 Centrale samfundsøkonomiske resultater, kr./m<sup>3</sup> vand. A - C henviser til blødgøringsteknologierne kalkfældningsmetoden, nanofiltrering og ionbytning og I - II henviser til blødgøringsintervallerne fra 22 - 8 og 17 - 8 °dH.*

|  |                          | Scenarie IA | Scenarie IB | Scenarie IC | Scenarie IIA | Scenarie IIB | Scenarie IIC |
|--|--------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Vandforsyning/ledningsejer</b>                    |                          |             |             |             |              |              |              |
| Investeringsomkostninger                             | Kr./m <sup>3</sup>       | -0,5        | -0,8        | -0,2        | -0,5         | -0,8         | -0,2         |
| Driftsomkostninger, ekskl. spildevand                | Kr./m <sup>3</sup>       | -2,0        | -0,8        | -1,2        | -1,4         | -0,7         | -0,8         |
| Rensning af processpildevand                         | Kr./m <sup>3</sup>       | -0,6        | -3,6        | -0,6        | -0,6         | -3,1         | -0,5         |
| <b>I alt</b>   | <b>Kr./m<sup>3</sup></b> | <b>-3,1</b> | <b>-5,3</b> | <b>-1,9</b> | <b>-2,4</b>  | <b>-4,6</b>  | <b>-1,5</b>  |
| <b>Husholdninger</b>                                 |                          |             |             |             |              |              |              |
| Levetid, husholdningsapparater + installationer      | Kr./m <sup>3</sup>       | 3,2         | 3,2         | 3,2         | 1,7          | 1,7          | 1,7          |
| Energiforbrug, husholdningsapparater                 | Kr./m <sup>3</sup>       | 0,4         | 0,4         | 0,4         | 0,3          | 0,3          | 0,3          |
| Forbrug af vaskepulver til vaskemaskine              | Kr./m <sup>3</sup>       | 1,0         | 1,0         | 1,0         | 0,7          | 0,7          | 0,7          |
| Vedligehold af husholdningsapparater                 | Kr./m <sup>3</sup>       | 0,5         | 0,5         | 0,5         | 0,3          | 0,3          | 0,3          |
| Forbrugertid på vedligehold af husholdningsapparater | Kr./m <sup>3</sup>       | 1,1         | 1,1         | 1,1         | 0,8          | 0,8          | 0,8          |
| Rengøring af baderum mm.                             | Kr./m <sup>3</sup>       | 0,3         | 0,3         | 0,3         | 0,2          | 0,2          | 0,2          |
| Forbrug af sæbe til personlig hygiejne               | Kr./m <sup>3</sup>       | 0,5         | 0,5         | 0,5         | 0,3          | 0,3          | 0,3          |
| <b>I alt</b>   | <b>Kr./m<sup>3</sup></b> | <b>6,9</b>  | <b>6,9</b>  | <b>6,9</b>  | <b>4,1</b>   | <b>4,1</b>   | <b>4,1</b>   |
| <b>Rensningsanlæg/ledningsejer, i alt</b>            | <b>Kr./m<sup>3</sup></b> | <b>0,1</b>  | <b>0,1</b>  | <b>0,1</b>  | <b>0,1</b>   | <b>0,1</b>   | <b>0,1</b>   |
| <b>Eksternaliteter</b>                               |                          |             |             |             |              |              |              |
| - Hjerter-karsygdomme                                | Kr./m <sup>3</sup>       | 0,0         | -2,7        | -2,7        | 0,0          | -1,2         | -1,2         |
| - Huller i tænderne                                  | Kr./m <sup>3</sup>       | -1,9        | -1,5        | -1,5        | -1,2         | -0,8         | -0,8         |
| - Vandforsyning, emissionsfaktorer                   | Kr./m <sup>3</sup>       | -0,01       | -0,06       | -0,01       | -0,01        | -0,05        | -0,01        |
| - Husholdninger, emissionsfaktorer                   | Kr./m <sup>3</sup>       | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01         | 0,01         | 0,01         |
| <b>I alt</b>   | <b>Kr./m<sup>3</sup></b> | <b>-1,9</b> | <b>-4,3</b> | <b>-4,2</b> | <b>-1,2</b>  | <b>-2,1</b>  | <b>-2,1</b>  |
| <b>Skatteforvridning</b>                             | <b>Kr./m<sup>3</sup></b> | <b>0,0</b>  | <b>0,0</b>  | <b>0,0</b>  | <b>0,0</b>   | <b>0,0</b>   | <b>0,0</b>   |
| <b>Direkte afgiftsændring</b>                        | <b>Kr./m<sup>3</sup></b> | <b>-1,4</b> | <b>-1,4</b> | <b>-1,4</b> | <b>-0,8</b>  | <b>-0,8</b>  | <b>-0,8</b>  |
| <b>Afgiftskorrektion</b>                             | <b>Kr./m<sup>3</sup></b> | <b>0,9</b>  | <b>0,9</b>  | <b>0,9</b>  | <b>0,5</b>   | <b>0,5</b>   | <b>0,5</b>   |
| <b>I alt</b>   | <b>Kr./m<sup>3</sup></b> | <b>1,5</b>  | <b>-3,0</b> | <b>0,4</b>  | <b>0,3</b>   | <b>-2,9</b>  | <b>0,3</b>   |

Screeningsanalysen indikerer, at blødgøring af vand kan være samfundsøkonomisk fordelagtig ved anvendelse af kalkfældningsmetoden eller ionbytning. Det er således muligt at opnå gevinster ved blødgøring af vand ved disse teknologier, som overstiger eller svarer til omkostningerne. Om nanofiltrering er en samfundsmæssig gevinst eller omkostning, afhænger helt af, hvorvidt der skal betales for rensning af procesvandet på et spildevandsrensingsanlæg, eller om vandet eventuelt kan udledes direkte til havet.

## Central blødgøring af drikkevand

I det første tilfælde vil omkostningerne til spildevandsrensning være så store (grundet de væsentligt større spildevandsmængder ved denne metode), at der bliver tale om en samlet set samfundsmæssig omkostning<sup>2</sup>.

De vigtigste gevinster omfatter forøget levetid af husholdningsapparater og installationer. Reduceret energiforbrug ved husholdningsapparater og forbrug af vaskepulver samt sparet tid til afkalkning af husholdningsapparater.

De vigtigste samfundsmæssige omkostninger er - udover vandværkernes omkostninger til blødgøring - forøgelse af hjerte-karsygdomme og øget antal huller i tænderne. En ændring af kvaliteten af drikkevandet kan som tidligere nævnt potentielt have nogle sundhedseffekter, som der dog er væsentlig usikkerhed om omfanget af. En reduktion af magnesium indholdet i vandet (hvilket er en konsekvens af både ionbytning og nanofiltrering) synes at kunne øge antallet af hjerte-kar relaterede sygdomstilfælde. I princippet kan dette modvirkes ved en remineralisering af vandet, hvilket dog ikke er nærmere vurderet i nærværende redegørelse. En reduktion af calciumindholdet synes at kunne øge antallet af cariestilfælde. Her vil kalkfældningsmetoden reducere calciumindholdet mere, end hvad der er tilfældet for ionbytning og nanofiltrering.

Kalkfældningsmetoden fremstår som den mest fordelagtige for store reduktioner i hårdheden. For alle tre metoder gælder, at de er forbundet med stordriftsfordele, som gør det mere fordelagtigt samfundsøkonomisk jo større blødgøringsanlæg, der etableres<sup>3</sup>. Det er derfor muligt, at valg af blødgøring på vandforsyningsanlæggene kan føre til en øget centralisering af vandforsyningerne, men dette er ikke undersøgt i nærværende redegørelse. Endelig giver blødgøring af vand anledning til gevinster for en række typer af erhvervsvirksomheder (se kapitel 7).

Kalkfældningsmetoden og nanofiltrering er klart de mest investeringstunge teknologier. Desuden kræver kalkfældningsmetoden også mest i drift og vedligehold, hvilket også vil medføre større behov for efteruddannelse for denne metode. Endvidere er kalkfældningsmetoden den mest arealkrævende

Energiforbruget - og dermed CO<sub>2</sub>-emissionen - er størst ved nanofiltrering og mindst ved kalkfældningsmetoden.

Kemikalieforbruget er mindst ved nanofiltrering og i samme størrelsesorden ved ionbytning og kalkfældningsmetoden. Da de arbejdsmiljømæssige konsekvenser hænger tæt sammen med dette, vil forholdet mellem metoderne på denne front være tilsvarende.

Nanofiltrering medfører den største mængde overskydende vand, hvilket har betydning både i kraft af den større oppumpede vandmængde i forhold til

---

<sup>2</sup> Det skal dog bemærkes, at nanofiltrering af vand kan muliggøre anvendelse af vand fra lettere forurenede kildepladser, hvilket ikke er vurderet nærmere i nærværende redegørelse.

<sup>3</sup> En nærmere uddybning fremgår af følsomhedsanalysen i afsnit 6.6.

vandmængden udledt til forbrugerne og med hensyn til behovet for evt. spildevandsrensning afhængigt af den potentielt påvirkede recipient.

Den vurderede spildevandsmængde er således af betydning for resultatet. De anslåede mængder er baseret på en konservativ vurdering af leverandøroplysninger. Spildevandsmængderne vil principielt kunne optimeres ved forskellige tiltag, der dog typisk også vil have en omkostning. Endelig vil kalkfældningsmetoden medføre et restprodukt, som enten skal håndteres som affald eller transporteres til et område, hvor det kan have en nytte. Ved de økonomiske beregninger er forudsat, at restproduktet fra kalkfældningsmetoden deponeres på en kontrolleret losseplads, hvor prisen er sat til 900 kr. pr. ton. Hvis pelletaffaldet kan anvendes på landbrugsjord, vil denne udgiftspost reduceres.

Der er en række effekter og parametre i den samfundsøkonomiske screeningsanalyse, som er behæftet med væsentlig usikkerhed. Der er derfor gennemført følsomhedsanalyser, som belyser resultaternes afhængighed af variation i disse effekter (se nærmere i afsnit 6.6).

Følsomhedsanalysen viser, at anvendelse af kalkfældningsmetoden giver anledning til nettogevinster for samfundet i alle følsomhedsanalyser for den høje hårdhedsgrad. Det gælder også for mindre anlæg end det centrale store anlæg, som indgår i basisforudsætningerne. Ved reduktion af hårdhed 17 °dH til 8 °dH (IIA) fås mindre eller ingen nettogevinster for samfundet afhængigt af den varierede parameter. For disse hårdhedsgrader vil en samfundsmæssig gevinst især være afhængig af, om de skønnede levetider på opvaske- og vaskemaskiner opnås, og om driftsomkostningerne er vurderet for lavt<sup>4</sup> (samt om skatteforvridningen medtages i regnestykket). Endvidere vil der ikke være en samfundsmæssig gevinst, hvis der bygges et relativt lille anlæg.

Anvendelse af ionbytning ser ligeledes generelt ud til at være fordelagtigt for samfundet, omend gevinsten i nogle tilfælde er begrænset. Blandt andet vil dette afhænge af, om de forudsatte levetider på vaske- og opvaskemaskiner opnås. Det fremgår, at effekten for hjertetilfælde er afgørende for, om ionbytning er mere eller mindre attraktivt end kalkfældningsmetoden. Hvis der ikke er nogen effekt på hjertetilfælde, er ionbytning mere fordelagtigt end kalkfældningsmetoden<sup>5</sup>.

Nanofiltrering er ugunstig for samfundet i stort set alle følsomhedsanalyserne. Dog viser følsomhedsanalysen, at der vil være en nettogevinst for samfundet, når man ikke indregner håndtering af spildevand.

Endelig viser de vurderede eksempler på effekter for erhvervsvirksomheder, at det i hvert tilfælde for de pågældende erhvervstyper (vaskerier, fjernvarmeanlæg og hoteller) kan forventes at være fordelagtigt, at der foretages en central

---

<sup>4</sup> Hvilket ikke burde være tilfældet baseret på de svenske erfaringer, hvor driftsomkostningerne synes at være væsentligt lavere end hvad der er fundet i denne redegørelse.

<sup>5</sup> Bemærk at der ved sammenligningen, hvor der ikke er effekt på hjertetilfælde sammenlignes anlæg med forskellig størrelse

## Central blødgøring af drikkevand

blødgøring på vandforsyningsanlæggene inden levering af vandet til de pågældende virksomhedstyper.

I den foretagne gennemgang af fordelene for erhvervsvirksomhederne er den øgede pris som følge af blødgøringen ikke medtaget. Den vil blandt andet afhænge af, om den leverede vandmængde til erhvervene vil øges, såfremt det vand, vandforsyningerne leverer, er blødgjort.

### 3 Grundlag for evalueringen

I nærværende kapitel er givet en beskrivelse for grundlaget for den foretagne evaluering af effekterne af at blødgøre vand centralt på vandforsyningsanlæg - primært de almene vandforsyningsanlæg. Først gennemgås den foreliggende viden om indvundne vandmængder og deres fordeling på brugertyper samt på vandets hårdhed. Dette udgør basis for de opstillede scenarier, der danner en del af grundlaget for evalueringen, samt for den samlede betydning af potentialet for at indføre blødgøring på den del af den almene vandforsyning, hvor det kan være relevant. Dernæst beskrives den systemforståelse, der er taget udgangspunkt i, inkl. de afgrænsninger der er foretaget i beskrivelsen af systemet, og de anvendte scenarier opstilles. Til slut i kapitlet beskrives de generelle konsekvenser af at blødgøre vand på vandforsyningsanlæggene.

#### 3.1 Vandforbrug og hårdhed

I dette afsnit er givet en kort oversigt over det samlede vandforbrug i Danmark, dets fordeling på forskellige indvindingstyper og dets hårdhed. Dette er gjort for at belyse, hvor stort et potentiale der er for central blødgøring på vandværkerne. Derudover for at vise, hvor stor en del af vandforsyningen, de i analysen anvendte forbrugsmængder, hårdheder og fordelinger på husholdninger og erhverv dækker.

Den samlede grundvandsindvinding ligger ifølge GEUS (2010) på et relativt stabilt niveau på 600-700 mio. m<sup>3</sup> pr. år efter en periode med et fald på omkring 37 % over de seneste ca. 15 år. Den totale grundvandsindvinding er for 2000<sup>6</sup> opgjort til 653 mio. m<sup>3</sup>, og indvindingen af overfladevand til 12 mio. m<sup>3</sup>. Indvinding af grundvand til markvanding, gartneri og dambrug tegner sig for 34 % af den samlede grundvandsindvinding i 2006.

Indvindingen fra vandværker, den almene vandforsyning, udgør knapt to tredjedele af den samlede indvinding. Vandforbruget for virksomheder med egen indvinding er faldet fra 55 til 41 mio. m<sup>3</sup> (GEUS, 2010).

Ifølge By- og Landskabsstyrelsen (2010 & 2009) samt GEUS (2010) er der ca. 2500 almene vandforsyningsanlæg i Danmark, hvoraf ca. 215 er store indvindingsanlæg, dvs. anlæg der indvinder over 350.000 m<sup>3</sup> per år. De store anlæg indvinder ca. 225 mio. m<sup>3</sup> årligt.

---

<sup>6</sup> Seneste opgørelsesår i GEUS' statistik.

## Central blødgøring af drikkevand

Indvindingen på disse store anlæg (for 2006) fordelt på størrelsen af anlæg fremgår af Tabel 3.1 som grundlag for vurdering af de anvendte anlægsstørrelser i den samfundsøkonomiske screeningsanalyse.

Tabel 3.1 Indvundne vandmængder per år på de store anlæg (By- og Landskabsstyrelsen, 2009)

| Anlægsstørrelse     | År 2006     |                |
|---------------------|-------------|----------------|
|                     | Antal anlæg | m <sup>3</sup> |
| 350.000-700.000     | 107         | 51.559.808     |
| 700.000-1.400.000   | 61          | 61.306.833     |
| 1.400.000-2.800.000 | 36          | 72.021.524     |
| 2.800.000-3.500.000 | 3           | 9.104.833      |
| > 3.500.000         | 7           | 32.993.364     |
| Alle anlæg          | 214         | 226.986.362    |

Frem til 2005 foreligger der fra Danmarks Statistik opgørelser af de indvundne vandmængders fordeling på brugergrupper, samt om der er tale om vand fra et vandværk eller fra egen boring. Disse tal fremgår af Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Indvundne vandmængder fordelt på brugergruppe og på indvinding fra vandværk eller egen boring (Danmarks Statistik, 2010)

| Danmark totalt i mio. m <sup>3</sup> | 2002  | 2003  | 2004  | 2005       |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|------------|
| Vandværksvand, husholdninger         | 247,7 | 245,5 | 250   | 259,3      |
| Vandværksvand, industri*             | 140,2 | 137,1 | 132,9 | 122        |
| Vandværksvand, tab m.v.              | 25    | 28,2  | 28    | 27,8       |
| VANDFORSYNING I ALT                  | 412,9 | 410,8 | 411,9 | 409,1      |
| Filterskylning m.v.                  | 8,2   | 7,5   | 5,9   | 5,6        |
| VANDVÆRKSVAND I ALT                  | 421,1 | 418,3 | 416,8 | 414,7      |
| Egenindvinding, industri             | 75,2  | 56,2  | 58,7  | ingen data |
| Egenindvinding, vanding              | 157,6 | 162,8 | 189,2 | ingen data |
| EGENINDVINDING I ALT                 | 232,8 | 219   | 247,9 | ingen data |
| DRIKKEVAND I ALT                     | 653,9 | 637,3 | 664,7 | -          |

\* Det vurderes, at kategorien "Vandværksvand, industri" dækker over erhverv mere bredt.

En sammenligning af Tabel 3.1 og Tabel 3.2 viser, at der fra de mindre almene vandforsyninger leveres knap 130 mio. m<sup>3</sup> (2005 - tal). Ud over de ca. 2500 almene vandforsyningsanlæg er der ca. 50.000 ikke-almene vandforsyningsanlæg, dvs. vandforsyninger som forsyner mindre end 10 ejendomme. Hvis det antages, at et menneske bruger ca. 120 liter vand per dag (DANVA, 2009), og at en enkeltindvinding forsyner i gennemsnit 4-5 personer, kan det skønnes, at der samlet set produceres eller distribueres vand til ca. 0,23 mio. mennesker i Danmark, via de ikke-almene vandforsyningsanlæg, svarende til knapt 10 mio. m<sup>3</sup> om året. Denne mængde indgår så vidt vides ikke i Tabel 3.2.



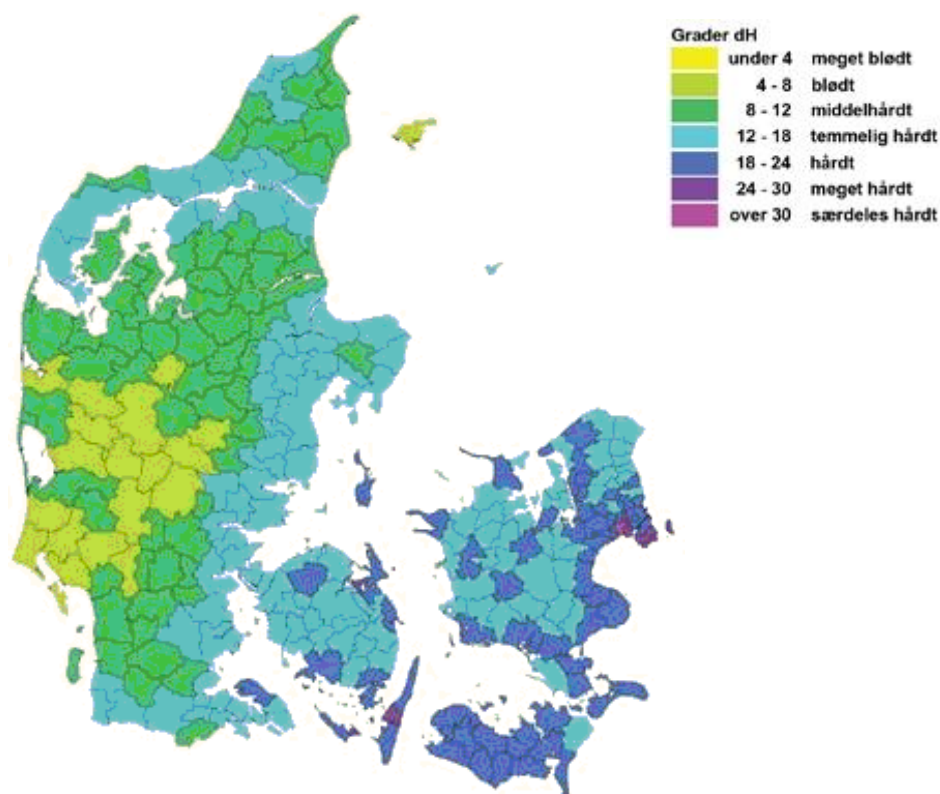
## Central blødgøring af drikkevand

Det ses af Tabel 3.2, at egenindvinding til industri udgør en stor mængde i forhold til vandmængden leveret af vandværkerne. Det må forventes, at denne indvinding samt indvindingen til vanding kun vil blive berørt i mindre grad af en evt. ændring af hårdhedsgraden af det leverede vand, da virksomhederne dels kan have andre grunde til at foretage egen indvinding, samt at vandværkerne ikke nødvendigvis vil kunne levere disse vandmængder til erhvervslivet.

Tilsvarende vil vandmængden fra de ikke-almene vandforsyningsanlæg næppe blive berørt af en central blødgøring af vand.

Vandforbruget i industrien omfatter især procesvand og kølevand. Derudover er der et større vandforbrug knyttet til fjernvarmeforsyningen. En undersøgelse foretaget af COWI i 2009 har vist, at især producenter af fødevarer m.m. er storforbrugere af vand. Deres vandforbrug udgør ca. 2/3 af vandmængden leveret fra vandværkerne til industrien og ca. halvdelen af vandmængden indvundet fra egne borer. Udover grundvand anvender industrien overfladevand (især papirindustrien) og havvand (mineralolie- og kemisk industri samt fødevarerindustrien). Der er ikke i denne analyse set på betydningen af en evt. central blødgøring for fødevarerens virkninger, hvorimod fjernvarmeforsyningerne er ét af de vurderede eksempler i kapitel 7.

Vandets hårdhedsgrad varierer meget i Danmark. Figur 3.1 viser et kort fra 2004 over hårdhedsgrader i landets forskellige kommuner hentet fra GEUS.



Figur 3.1. Hårdhedens fordeling i Danmark

## Central blødgøring af drikkevand

På baggrund af indberetningerne til DANVA kan fordelingen af mængder på hårdhedsgrad opgøres for de vandværker, der har indberettet dette, se Tabel 3.3. Der skal gøres opmærksom på, at det er et estimat, da vandmængder kun er opgjort for forsyningselskaberne som helhed, mens hårdhedsgraden er oplyst for de enkelte indvindingsanlæg.

Mængden, for hvilken der er indberettet hårdhed, udgør 76 % af den samlede mængde indberettet til DANVAs vandstatistik (i alt ca. 206 mio. m<sup>3</sup> per år). DANVAs vandstatistik dækker ca. 2,6 mio. personer, altså ca. halvdelen af Danmarks befolkning. Vandforbrug til husholdninger udgør ca. 65 % af det samlede forbrug opgjort af DANVA, mens forbrug til erhverv og institutioner samt tab i ledninger og filterskylninger udgør resten.

*Tabel 3.3 Opgørelse af vandets fordeling på hårdhedsgrader hos 76 % af DANVAs medlemmer, vandstatistik 2008.*

| Hårdhed, °dH | 1000 m <sup>3</sup> | % af sum |
|--------------|---------------------|----------|
| 5 - 10       | 30.896              | 19,7     |
| 10 - 15      | 29.159              | 18,5     |
| 15 - 20      | 37.347              | 23,8     |
| 20 - 25      | 59.148              | 37,6     |
| > 25         | 674                 | 0,04     |

### 3.2 Systemforståelse og afgrænsning

Figur 3.2 viser den systemforståelse, der danner grundlag for vurderingen af centrale blødgøringsteknologier. Vandets forløb fra det pumpes op til det uledes til rensningsanlægget er illustreret med pile startende fra toppen af figuren. Endvidere er figuren opdelt på aktører i form af vandforsyning og ledningsejer, husholdninger, erhverv samt rensningsanlæg og ledningsejer. Dertil kommer miljø- og klimaeffekter fra hver enkelt aktør i processen, som påhviler samfundet som helhed. For hver aktør er nævnt de effekter, der inddrages i analysen.

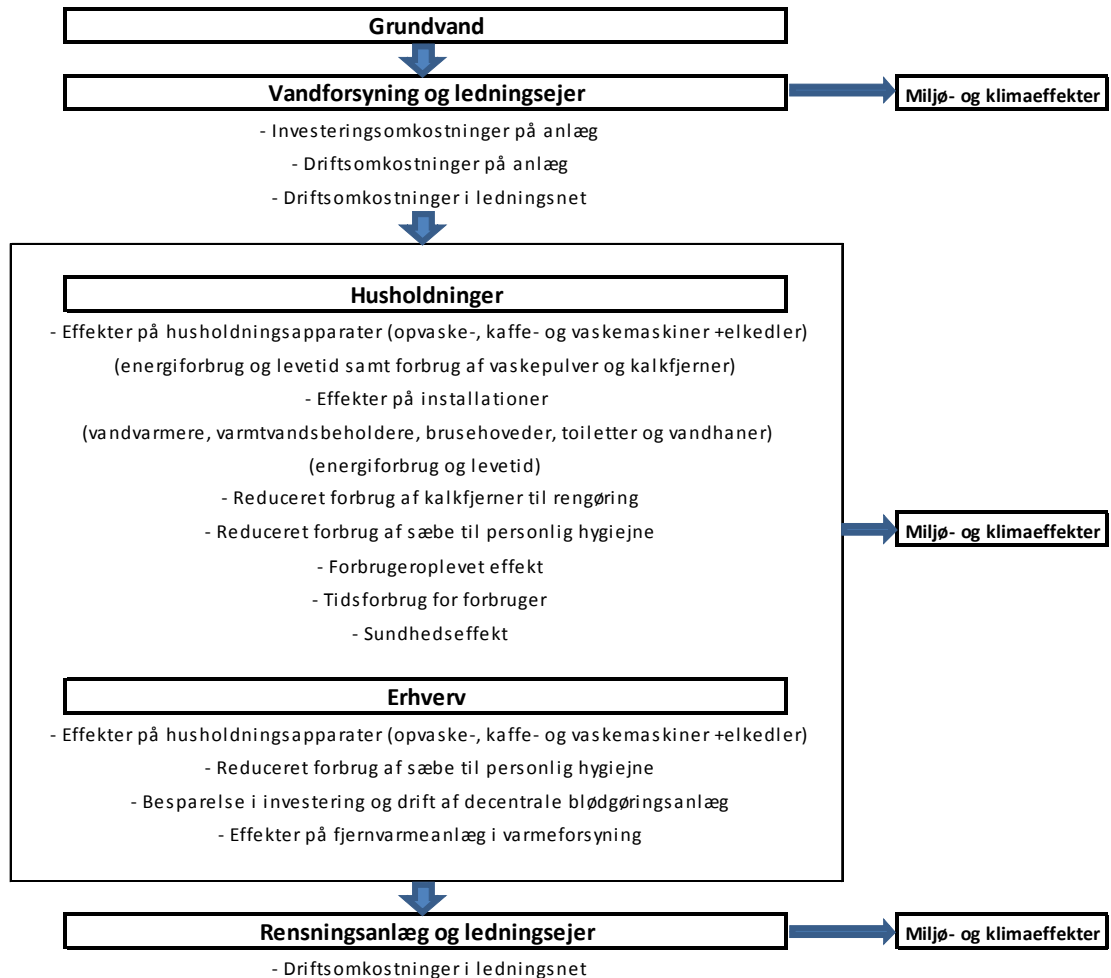
I analysen opgøres de nævnte effekter så vidt muligt kvantitativt, men hvis der ikke er datagrundlag til en kvantitativ opgørelse, beskrives effekterne kvalitativt.

Forbrugergruppen "husholdninger" er en relativt homogen gruppe, mens forbrugergruppen "erhverv" dækker over en lang række forskellige vandforbrugere, som har meget forskellige effekter af tiltaget. Derfor omfatter analysen en (så vidt muligt) komplet opgørelse af effekterne for forbrugerne. Effekterne for forskellige erhvervsvirksomheder fremgår af kapitel 7, og de indgår ikke i den centrale samfundsøkonomiske analyse med effekterne for husholdningerne.

Husholdningerne forbruger ca. 65 % (DANVA, 2009) af den vandmængde, der leveres fra almene vandforsyningsanlæg, mens erhverv aftager de resterende ca. 35 %. Hertil kommer som tidligere nævnt ledningstab og filterskylninger.

## Central blødgøring af drikkevand

Idet den centrale analyse kun omfatter husholdningerne, er effekterne i husholdningerne kun medregnet med 65 % i opgørelsen af den resulterende gevinst / omkostning per m<sup>3</sup> vand, idet det jo kun er 65 % af den leverede mængde, der potentielt medfører disse effekter. Effekten for forskellige erhvervstyper er eksemplificeret i kapitel 7.



Figur 3.2 Systemforståelse og -effekter

### 3.2.1 Scenarier

Ud fra den beskrevne systemopfattelse er der opstillet nogle scenarier for at systematisere evalueringen af central blødgøring af vand. Scenarierne fastlægger nogle grundlæggende forudsætninger for evalueringen og danner samtidigt baggrund for den samfundsøkonomiske screening, som beskrives nærmere i kapitel 6.

## Central blødgøring af drikkevand

De to hovedscenarier (I og II) omfatter blødgøring af vand fra hvert deres udgangssituation målt på vandets hårdhed. Udgangssituationerne er valgt som repræsenterende områder med hårdt vand, som er typisk forekommende (se Tabel 3.3). Hovedscenarierne er således relevante for forskellige geografiske områder. Undersøgelsen er udført således at der blødgøres fra de to ”typiske” høje hårdhedsgrader til samme resulterende relativt lave hårdhed (8 °dH). En resulterende hårdhed på 8 °dH er valgt, da det er et niveau, hvor der forventes en tilstrækkelig effekt af blødgøring. Mere konkret er hovedscenarierne defineret som følger:

- Scenarium I: Blødgøring fra hårdhed ca. 22 °dH til hårdhed ca. 8 °dH.
- Scenarium II: Blødgøring fra hårdhed ca. 17 °dH til hårdhed ca. 8 °dH.

For hvert hovedscenarium vurderes forskellen i konsekvenser ved at anvende forskellige blødgøringsteknologi. Da egnetheden af disse vil være afhængig af vandværksstørrelse (se nærmere i kapitel 4), er der i hovedanalysen i den samfundsøkonomiske screening foretaget en kobling mellem teknologi og vandværksstørrelse. Betydningen af denne kobling er siden vurderet i forbindelse med følsomhedsanalysen. Underscenarierne indeholder således 3 forskellige blødgøringsteknologier (omtalt i kapitel 4)<sup>7</sup> og to forskellige vandværksstørrelser. Dermed vil screeningsanalysen være opdelt på følgende underscenarier.

- A: Anvendelse af kalkfældning (pellet-metoden) på vandværk med kapacitet på 1.500.000 m<sup>3</sup>/år. Dvs. udfældning af CaCO<sub>3</sub> ved dosering af NaOH.
- B: Anvendelse af nanofiltrering på vandværk med kapacitet på 160.000 m<sup>3</sup>/år. Dvs. fjernelse af divalente ioner - heriblandt Ca<sup>+2</sup> og Mg<sup>+2</sup>.
- C: Anvendelse af ionbytning på vandværk med kapacitet på 160.000 m<sup>3</sup>/år. Dvs. fjernelse af Ca<sup>+2</sup> og Mg<sup>+2</sup> ved ionbytning med Na<sup>+</sup>.

I alt giver dette 6 alternative scenarier som vist i Tabel 6.1.

Tabel 3.4      *Oversigt over scenarier*

| Hovedscenarium:          | Underscenarium: Teknologi og vandværksstørrelse   |   |   |
|--------------------------|---|---|---|
|                          | A: Pellet-metoden<br>1.500.000 m <sup>3</sup> /år | B: Nanofiltrering<br>160.000 m <sup>3</sup> /år | C: Ionbytning<br>160.000 m <sup>3</sup> /år |
| I: Fra 22 odH til 8 odH  | Scenarium IA                                      | Scenarium IB                                    | Scenarium IC                                |
| II: Fra 17 odH til 8 odH | Scenarium IIA                                     | Scenarium IIB                                   | Scenarium IIC                               |

<sup>7</sup> idet ikke alle teknologier indgår i den samfundsøkonomiske screening

### 3.3 Generelle konsekvenser af blødgøring

I dette afsnit gennemgås de forskellige generelle konsekvenser af central blødgøring af drikkevand. Som beskrevet i afsnit 3.2 er det evalueringens forudsætning, at vandet blødgøres til en resulterende hårdhed på 8 °dH.

#### 3.3.1 Konsekvenser for forsyningselskaberne

Blødgjort vand (med 8 °dH) vil danne mindre kalk i ledningssystemet. Det kan betyde længere holdbarhed af ledninger samt lavere energiforbrug til udpumpning af vand til forbrugerne. Det er fordele, som kan være vanskelig at kvantificere i detaljer. Det er således ikke alle vandværker, der oplever kalkbelægninger i rørene.

Korrosionsmæssigt giver blødgjort vand ingen ændringer i forhold til hårdt vand, når det gælder plast-, kobber-, støbejern og stålør (Harrison, 1997). De vigtigste korrosionsparametre i drikkevand er vandflow, temperatur, pH, ledningsevne, kloridkoncentration, biofilm, suspenderet stof samt galvanisk tæring, og når der ikke ændres væsentligt på disse parametre, vil korrosionsforholdene heller ikke ændres væsentligt (WQA, 2010).

I Miljøstyrelsen (2005) er der givet en grundig gennemgang af metalafgivelse og korrosionsforhold for de mest almindelige materialer til vandør og fittings. Tabel 3.5 er taget fra denne rapport.

Tabel 3.5 *Krav til vandkemi for materialer, der anvendes i vandinstallationer. Skemaet er fra Miljøstyrelsens arbejdsrapport nr. 12/2005.*

| Materiale                                   | Krav til vandkemi  | Andre krav   |
|---|--|--|
| Varmforzinket stål                          | 100 mg/l < [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] < 300 mg/l<br>([Cl <sup>-</sup> ] + 2[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]) / [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] < 1 *<br>[Ca <sup>2+</sup> ] > 20 mg/l<br>pH > 7 | Elektrolyse på anlæg for varmt brugsvand.<br>Materialet er uegnet, når vandforbruget er lavt                       |
| Kobber                                      | 100 mg/l < [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] < 240 mg/l<br>7,5 < pH < 9   | Krav til vandhastighed, se DS 439.   |
| Fortinnet kobber                            | 7,5 < pH < 9   | Krav til vandhastighed som for kobberrør   |
| Rustfrit stål med fittings af rustfrit stål | [Cl <sup>-</sup> ] < 150 mg/l (250 mg/l) **  | Ikke-udskiftelige rør for varmt brugsvand beskyttes mod udvendig fugt  |
| Rustfrit stål med fittings af rødgods       | [Cl <sup>-</sup> ] < 250 mg/l ***  | Ikke-udskiftelige rør for varmt brugsvand beskyttes mod udvendig fugt. Bør ikke kombineres med varmforzinket stål. |
| PEX, PEX-aluminium, PVC-C                   | Ingen krav   |  |

\* koncentrationen angives i mmol/l.

\*\* enkelte fabrikater er godkendt op til 250 mg/l, som er grænseværdien for klorid i drikkevand.

\*\*\* Det anbefales at kontakte leverandøren for vurdering af holdbarheden i et givet område.

Miljøstyrelsen (2005) konkluderer, at plast og rustfri stål er de eneste materialer, som kan anvendes til alle forekomme vandkvaliteter i Danmark. Rapporten siger, at kobber korroderer mere i hårdt vand med høj koncentration af hydrogenkarbonat og salte end i blødere vand med lavere koncentration af hydrogenkarbonat. Det stemmer godt overens med, at man både i Holland og Sverige får opløst mindre kobber og bly fra vandinstallationerne, når vandet er blødgjort efter kalkfældningsmetoden, hvor både hårdheden og hydrogenkarbonat er blevet reduceret (Mons, et al., 2007).

Kobberproblematikken er ikke belyst nærmere i denne redegørelse, men det kan forventes, at slammet på renseanlægget vil have et lavere kobberindhold.

I galvaniserede stålør dannes et beskyttende lag basisk zinkkarbonat indvendigt, når rørene anvendes til hårdt vand, men selv for vand med 8 °H vil der dannes belægninger - om end i mindre grad end ved meget hårdt vand. I Miljøstyrelsen (2005) anbefales det, at calciumhårdheden er større end 20 mg/l (2,8 °dH), samt af hydrogenkarbonat skal ligge mellem 100 og 300 mg/l (se Tabel 3.5 i nærværende rapport). Begge disse krav vil normalt være opfyldt, når drikkevandet fremstilles med 8 °dH efter de tre hovedmetoder, som er nærmere vurderet i denne rapport.

Når der anvendes 8 °dH blødt vand til vask, er der mindre behov for vaskemidler med kemikalier, der binder kalken. Fosfat er et hyppigt anvendt middel til at binde kalk i vandet, men de seneste år, er fosfaterne dog gradvist blevet erstattet med andre stoffer<sup>8</sup>. De renseanlæg, der har kemisk fosforfældning, vil formentligt kunne spare 10 - 20 % af udgifterne til fosforfældningskemikalier, såfremt vandet blødgøres. Såfremt fosfor også fremover af andre årsager alligevel substitueres med andre stoffer, vil den relative besparelse selvfølgelig blive tilsvarende mindre. Det vurderes, at der ikke er yderligere, væsentlige fordele for renseanlæggene.

Forskellige livscyklusvurderingsstudier (LCA) (f.eks. Garcia, et al., 2009; Københavns Energi, 2009; Rygaard, 2010) har vist, at der er en tæt sammenhæng mellem energiforbrug, dels til drift af anlæggene, dels til fremstilling af de nødvendige materialer til processen, og den resulterende klimaeffekt. Afhængigt af om det resulterende energiforbrug ved central blødgøring bliver større eller mindre, vil klimaeffekten tilsvarende blive større eller mindre.

Arbejdsmiljøforholdene vil ændres noget med de nye blødgøringsprocesser. I alle processer skal der håndteres og doseres kemikalier. Ved ionbytning anvendes salt til regenerering. Ved nanofiltrering anvendes antiscalings- og rensningsmidler<sup>9</sup>. Ved pelletmetoden anvendes natronlud og saltsyre, som både skal oplagres og håndteres.

---

<sup>8</sup> I dag udgør fosfor fra vaskemidlerne kun 30 % af det fosfor, som ledes til de kommunale renseanlæg.

<sup>9</sup> De anvendte midler er godkendt til brug i forbindelse med fødevarer, hvilket må antages at reducere arbejdsmiljørisikoen.

I det daglige er der næppe de store arbejdsmiljøbelastninger, men ved kemikaliehåndteringen og rengøring af udstyr og anlæg, er der dog en risiko for påvirkning med kemikalier. Det kan man gardere sig imod med passende værnemidler, og der skal laves arbejdspladsbrugervejledninger, APB, der beskriver, hvordan der skal arbejdes med de nye anlæg.

### 3.3.2 Konsekvenser hos forbrugerne

I dette afsnit ses der på de forskellige konsekvenser i husholdningerne. De specifikke konsekvenser anvendt i den samfundsøkonomiske screening fremgår af kapitel 6.

#### Energiforbrug

Ved tilkalkning af husholdningsmaskiner (vaskemaskiner, opvaskemaskiner, kaffemaskiner og el-kedler) vil opvarmning gå langsommere, fordi der dannes kalkbelægninger på varmelegemer og andre udsatte steder. Det betyder, at procestiden i den pågældende maskine er længere, og at varmeafgivelsen til omgivelserne derved forøges. Samtidig efterlades der en unødvendig varmerest i kalklaget, som efterfølgende afgives til skyllevand eller omgivelserne.

For varmevekslere og varmtvandsbeholdere vil kalkbelægningerne også betyde et større energiforbrug. Husstande med fjernvarme anvender en varmeveksler samt eventuelt også en varmtvandsbeholder til fremstilling og opbevaring af varmt vand. Når varmeveksleren kalker til, nedsættes varmeovergangen, og der skal sendes mere fjernvarmevand igennem for at producere tilstrækkelig varmt vand med den rette temperatur. Herved stiger temperaturen på returvandet til fjernvarmeværket, hvilket er uøkonomisk. Mange fjernvarmeværker tager bl.a. hensyn til returvandstemperaturen i afregningen med forbrugerne, og derfor vil en tilkalket varmeveksler være en ekstra udgift for forbrugeren. KE har beregnet, at der årligt vil kunne spares 4000 MWh (3 mio. kr.) på denne konto hos deres forbrugere, hvis hårdheden på postevand nedsættes fra 20 til 10 °dH. Besparelsen vil øges til 8000 MWh (6 mio. kr.) i 2025, når KE har konverteret hele deres fjernvarmesystem fra damp til vand. Denne besparelse er ikke medtaget i den samfundsøkonomiske screening. Da dette vil kræve en landsdækkende opgørelse af fjernvarmeandelen hos forbrugerne i hårdtvandsområderne og en opgørelse af i hvilket omfang der opkræves den omtalte ekstraafgift.

Tilkalkning af en varmtvandsbeholder betyder ikke direkte dårlig varmeøkonomi. Når kalklaget bliver tilstrækkelig stort, bliver der imidlertid mindre lagervolumen i beholderen, og man kan ikke levere varmt vand nok til at fylde et badekar eller tage flere brusebade i træk. Ofte løses problemet ved at skrue op for varmvandstemperaturen, men det er en kortvarig løsning. Temperaturen af det varme vand bør være mindst 55 °C for at undgå legionella, og den bør ikke overstige 60 °C, da det vil medføre af kraftig forøgelse af kalkudfældningen. Med øget kalkdannelse i varmtvandsbeholderen formindskes beholderens effektive rumfang yderligere, og problemet bliver større end før.

## Central blødgøring af drikkevand

Reduktion af kalkindholdet i det anvendte vand vil således kunne medføre et mindre energiforbrug i husholdningerne både til husholdningsmaskiner og til varmt vand. Dette giver både en direkte reduceret omkostning til energi, og principielt også en mulighed for at undgå en eventuel "strafafgift" ved for højt returvand til fjernvarmeforsyningen.

### **Kemikalieforbrug**

Blødt vand betyder mindre forbrug af sæbe og rengøringsmidler samt afkalknings- og afsyringsmidler. Tilkalkning af kaffemaskiner og el-kedler antages at være proportional med hårdhedsgraden, og forbrug af afkalkningsmidler til disse apparater vil falde proportionalt med den reducerede hårdhed i vandet. Forbruget af vaskepulver i vaskemaskiner vil ligeledes falde. Såfremt der generelt foretages en omlægning til blødt vand i Danmark, må det forventes, at sammensætningen af det anvendte vaskepulver vil blive ændret på sigt.

Tilkalkning af fliser og sanitetsudstyr vil reduceres proportionalt med den reducerede hårdhed i vandet. Derved vil der spares på de rengøringsmidler, som bruges til fjernelse af kalkbelægninger.

I opvaskemaskiner er situationen lidt anderledes, da de fleste opvaskemaskiner har indbygget et ionbytningsfilter, der skal regenereres med salt (NaCl), når filteret er mættet med calcium og magnesium. Hyppigheden for regenerering vil nedsættes proportional med den reducerede hårdhed i vandet, og derfor vil saltforbruget også reduceres proportionalt.

Afsyringskemikalier til varmevekslere og varmtvandsbeholdere anvendes kun i beskedent omfang i dag. I stedet anvendes disse installationer, indtil tilkalkningen er blevet helt uacceptabel, hvorefter de kasseres. Ved brug af blødgjort vand vil disse installationer stadigt kalke til, men med stærk reduceret hastighed proportionalt med den reducerede hårdhed i vandet.

### **Ændret levetid på apparater**

En reduktion af tilkalkningen vil forøge levetiden på mange husholdningsapparater og sanitetsartikler i husholdningen. Mange andre forhold spiller dog ind på, hvornår disse apparater og dele udskiftes. Moden er en afgørende faktor, der er årsag til, at apparater og dele ofte udskiftes, før de er slidt ned. I denne undersøgelse er det forsøgt at tage højde for dette i vurderingen af den faktiske gennemsnitlige levetidsforlængelse, selv om den teoretiske levetid godt kan være betydeligt længere. Udgangspunktet for størrelsesordenerne i det følgende er en hårdhed på 22 °dH, svarende til det højeste hårdhedsniveau anvendt i den samfundsøkonomiske screening.

Kaffemaskiner og el-kedler har typisk en maksimal levetid på 7 år, og den vil skønsmæssigt kunne forøges med 50 % - 75 %, hvis der kun anvendes blødgjort vand. Dette er begrundet i, at levetiden normalt er lav på grund af den kraftige tilkalkning og den jævnlige rensning med afsyringsmidler (eddikesyre, citronsyre, o.l.).



## Central blødgøring af drikkevand

Tilkalkning af varmelegemer i vaskemaskiner og opvaskemaskiner har stor betydning for maskinens effektivitet. Vaskemaskinerne er mest udsat, da de ikke har indbygget et decentralt blødgøringsfilter, som findes i opvaskemaskinerne. Som udgangspunkt kan der regnes med en levetid på ca. 10 år, når der anvendes hårdt vand, og den forventes at kunne forlænges med ca. 50 % ved at gå over til 8 °dH vand. Der er mange andre ting, der er afgørende for maskinens levetid (pumpe, ventiler, slanger, programværk), og mange gange vælger forbrugeren at skifte maskinen, når den er i stykker, fordi en reparation ofte er uforholdsmæssig dyr sammenlignet med prisen på en ny maskine.

Varmtvandsbeholdere og varmevekslere har typisk 20 års levetid ved brug af hårdt vand - ofte endda mere. Ved brug af 8 °dH vand vil levetiden af disse apparater blive markant forlænget - forventeligt op til 50 %.

WC-kummer er nok de mest udsatte sanitetsprodukter med hensyn til kalkudfældning. I løbet af nogle få år kan et toilet begynde at løbe, fordi der udfældes kalk i cisternen, hvilket forhindrer den automatiske flyderlukning eller afspærring til selve kummen. Det kan i starten ofte klares med lidt manuel rensning inde i cisternen, men efterhånden kan disse smårensninger ikke løse problemet. Man kan nu enten indsætte nye reservedele eller købe ny cisterne, men disse reparationer er ofte lige så dyre som et nyt toilet, så mange vælger at udskifte hele toilettet. VVS-ingeniører regner typisk med 20 års levetid for en ny WC-kumme, men så lang tid er gennemsnitslevetiden sandsynligvis ikke i dag. Det anses for realistisk, at den faktiske levetid kan øges fra 15 til 25 år, hvis man har 8 °dH vand i stedet for vand med 22 °dH.

Vandhaner er mindre udsat for kalkbelægningen indeni. Det er som regel pellatoren, der kalker til og skal afkalkes 2-4 gange årligt, når man har hårdt vand. Efter nogle år er pellatoren så slidt, at den skal skiftes - typisk hver 5. år. Selve vandhanen får udvendige kalkbelægninger, som kan fjernes med syre eller specielt kalkfjerningsmiddel. Denne behandling giver efterhånden vandhanen en kedelig gullig overflade, og mange forbrugere vælger at skifte hanen. Med 8 °dH vand vil selve vandhanen holde det pæne udseende i længere tid, og levetiden kan måske forøges fra 20 til 25 år, men mange forbrugere vil formentligt skifte vandhanen ud oftere, fordi man ønsker nye og smartere modeller.

Brusehoveder kalker hurtigt til, men det gælder først og fremmest den gammeldags type med metal hulplade. Den nye type med indlagt plastmembran kalker stor set ikke til, da hullerne i plastmembranen hele tiden arbejder i takt med, at der skrues op og ned for vandet. Derfor bliver der ikke ro til, at der kan udfældes kalkpartikler, som kan sidde fast i hullerne. Brug af 8 °dH vand vil formentligt øge levetiden af de gammeldags brusehoveder med 50 - 100 %, men det har sandsynligvis ingen væsentlig indflydelse på levetiden af moderne brusehoveder med plastmembraner.

Omkostningerne relateret til bortskaffelse af husholdningsapparater og installationer er ikke medtaget i den samfundsøkonomiske screening, men vil selvfølgelig afhænge af hyppigheden, hvormed disse udskiftes, som vil være stigende med vandets hårdhed.

### Mindre vedligeholdelse

Når man har blødt vand (8 °dH) i husholdningen i modsætning til hårdt vand (22 °dH) spares en hel del tid til vedligeholdelse:

- Kaffemaskinen og el-kedlen skal kun afkalkes halvt så ofte eller endnu mindre.
- Behov for afkalkning af vaske- og opvaskemaskiner reduceres betydeligt.
- Der er mindre rengøringsarbejde med at fjerne kalkbelægninger på fliser, håndvask, badekar, WC-kumme, vandhaner samt brusehoveder og bruse-slanger.
- Varmtvandsbeholdere og varmevekslere skal kun afsyres halvt så ofte eller endnu mindre (såfremt man gør dette).

### Sundhedseffekter

WHO har haft et ekspertpanel til at gennemgå foreliggende viden om effekterne af hårdt vand på helbredet i forhold til blødt vand og har sammenfattet den viden, som der er enighed om (WHO, 2009 a & b). Det følgende resumé er primært baseret på disse opgørelser, suppleret med specifikke referencer til en række væsentlige undersøgelser. I afsnit 6.4.9 er beskrevet, hvilke sundhedseffekter, det er muligt at estimere omkostninger ved, og som derfor er medtaget i den samfundsøkonomiske screening.<sup>10</sup>

De potentielle sundhedsproblemer relaterer sig til ændringerne i vandets indhold af calcium, magnesium og natrium. Både calcium og magnesium er essentielle for menneskers sundhed. Fødevarer (herunder vand) er den væsentligste kilde for indtag af både calcium og magnesium (typisk mere end 80 %, resten dækkes af kosttilskud). Det typiske bidrag af calcium og magnesium fra vand ligger på 5 til 20 % af det samlede indtag (WHO, 1973; National Research Council, 1977; Neri & Johansen, 1978).

Man skal her være opmærksom på, at der er store variationer i forskellige individers behov for og indtag af disse stoffer. Biotilgængeligheden af calcium og magnesium ligger på ca. 50 % for både mælk og vand. WHO's ekspertpanel konkluderer, at de fleste voksne i de industrialiserede lande (således også i Danmark) ikke får de anbefalede mængder af calcium og/eller magnesium. Hårdt vand kan udgøre en væsentlig kilde til indtaget af calcium og magnesium, hvorfor ændringer af vandets hårdhed i forbindelse med vandbehandlingen kan have betydning for især udsatte gruppers indtag af calcium og magnesium.

---

<sup>10</sup> Det drejer sig om hjerte-karsygdomme relateret til magnesiumindtag samt caries som funktion af vandets calciumindhold.

### *Calcium*

Mere en 99 % af den totale mængde af calcium i kroppen findes i knogler og tænder. Resten af det tilstedeværende calcium bruges i metabolismen som signalgiver for sammentrækning af blodsystemet, blodstørkning, sammentrækning af muskler og transmissioner i nervesystemet.

Calciummangel er tæt knyttet til knogleskørhed. Det er godt underbygget, at et øget indtag af calcium for især dem, der har haft et lavt indtag tidligere, øger knoglemassen for unge under vækst og reducerer knogleskørhed og risiko for brud hos ældre.

Sammenhængen mellem nyresten og indtag af calcium afhænger af, om calcium indtages alene (som kosttilskud) eller sammen med fødevarer, herunder vand. I det første tilfælde viser en meget stor undersøgelse, at calcium indtaget i forbindelse med kosttilskud kan øge risikoen for nyresten, mens indtaget med føde og vand beskytter mod nyresten.

Forhøjet blodtryk afhænger af mange faktorer, men det er vist i nogle - men ikke alle studier, at et tilstrækkeligt indtag af calcium giver lavere risiko for højt blodtryk. Det er snarere for indtaget af mælkeprodukter end indtaget af calcium, der er vist sammenhæng med lavere blodtryk og risiko for slagtilfælde.

Sammenhængen mellem calciumindtag og sukkersyge (type 2), og dermed overvægt, er et område, der forskes i, men der findes endnu ikke resultater, som kan danne grundlag for en mere præcis vurdering.

Endelig har et ganske nyt dansk studie påvist sammenhæng mellem huller i tænderne og indholdet af calcium og fluor i drikkevand (Buvo, et al., 2008 og Arvin, et al., 2010). Reduktion af calcium i drikkevandet vil ifølge dette studie medføre en stigning i antallet af huller i tænderne<sup>11</sup>.

### *Magnesium*

Magnesium er den fjerde mest hyppigt forekommende kation i kroppen og den anden mest forekommende kation i cellevæske. Magnesium er involveret i kroppens energiomsætning og i syntesen af proteiner m.m. Desuden er magnesium nødvendig for regulering af insulinfølsomhed og hjerte- og kredsløbsfunktionerne.

Flere studier har vist, at et tilstrækkeligt indtag af magnesium beskytter imod sukkersyge (type 2).

Tilsvarende har flere studier vist, at et tilstrækkeligt indtag af magnesium beskytter mod hjerteslag. Ligeledes er en sammenhæng påvist mellem for lavt magnesiumindtag og hjerteflimmer, samt at et tilstrækkeligt magnesium indtag beskytter mod åreforkalkning.

---

<sup>11</sup> Se nærmere i afsnit 6.4.9

## Central blødgøring af drikkevand

Forhøjet blodtryk hos gravide er i årevis blevet behandlet med indtag af magnesiumsalte. Et nyligt studie viste, at et tilstrækkeligt indtag af magnesiumsulfat reducerer risikoen for forhøjet blodtryk med 50 %. Visse generelle studier har antydnet en sammenhæng mellem mangel på magnesium og forhøjet blodtryk, men der er ikke påvist en entydig sammenhæng i kliniske studier.

Sammenhængende studier af større befolkningsgrupper har vist en vis sammenhæng mellem tilstrækkeligt indtag af magnesium (over 10 mg/l) og formindsket dødelighed p.g.a. hjerte- karsygdomme (hvilket ikke i sig selv dokumenterer kausalitet). Et af de større studier er udført i Sverige (Rubinowits, et al., 1999), hvor forfatterne påviser en sammenhæng mellem vandets indhold af magnesium og calcium og akutte blodpropper hos kvinder. Et andet svensk studie fra 2005 (Rosenlund, et al.) viste dog ingen sammenhæng, men havde en begrænset spændvidde i koncentrationsniveauerne.<sup>12</sup>

Et studie (Marque, et al., 2003) har vist en væsentlig sammenhæng mellem vandets indhold af calcium og magnesium og ældre menneskers død af hjertesygdomme som et eksempel på potentiel påvirkning af en særligt udsat gruppe. Argumentet er her, at vandets indhold af disse stoffer udgør en større andel af det samlede indtag, idet ældre mennesker typisk drikker mindre mælk og spiser mindre mængder af mælkeprodukter.

En sikker sammenhæng mellem vandets hårdhed og dødelighed p.g.a. hjerte-karsygdomme er dog ikke påvist, selvom et engelsk studie (Pocock, et al., 1981) viste 10 - 15 % større dødelighed med baggrund i hjerte- karsygdomme i områder med blødt vand (0,25 mmol/l). Blandt andet af denne grund har WHO ikke fastsat specifikke grænser (hverken nedre eller øvre) for drikkevands indhold af calcium og magnesium, hvilket var tilfældet i tidligere udgaver af WHO's retningslinjer for drikkevandskvalitet (WHO, 1996 m.fl.). WHO anbefaler dog, at vandet sikres et tilstrækkeligt (sædvanligt) indhold af calcium og magnesium, hvis der foretages central blødgøring af vandet, som væsentligt reducerer indholdet af calcium og magnesium. Samtidigt har WHO anbefalet, at der foretages yderligere studier af sammenhængen mellem vandets indhold af især calcium og magnesium og sundhed. WHO har desuden igennem de seneste år udarbejdet flere opgørelser af eksisterende viden om sundhedseffekter af at drikke demineraliseret vand m.m.

### *Børneeksem*

Nogle studier (McNally et al., 1998; Miyake et al., 2004) har påpeget en mulig sammenhæng mellem børneeksem og vands hårdhed. Årsagssammenhængen kunne være en større brug af sæbe, når vandet er hårdt.

### *Natrium*

I forbindelse med blødgøring af vand ved kalkfældningsmetoden og ved ionbytning øges natrium koncentrationen (se kapitel 4). Generelt udgør indtaget af

---

<sup>12</sup> I Rosborg, et al. (2006) findes en sammenfatning af resultaterne af en række af de væsentligste studier.

natrium med vand en ret lille del af det samlede natriumindtag. Nogle studier har vist sammenhæng mellem højt indtag af natrium og højt blodtryk.

Ifølge WHO (2003) er sammenhængen dog ikke entydig. De har således ikke fastsat et krav til et maksimalt indhold af natrium i drikkevand.

### *Fluorid*

Hvis blødgøringsteknologien reducerer indholdet af fluorid i vandet, anbefaler WHO tilsætning af fluorid til et indhold på 0,5 til 1 mg /l. De siger dog, at dette ikke er relevant, hvis der generelt er en god viden om tandhygiejne i samfundet, og at køb af fluorholdig tandpasta er en mulighed.

### *Metaller*

En potentielt større frigivelse af metaller som følge af øget korrosion resulterende fra blødgøringen kan potentielt have sundhedsmæssige effekter. Spørgsmålet om korrosion er behandlet i afsnit 3.3.1, hvor det konkluderes, at der generelt ikke kan forventes større korrosion som følge af blødgøring. Der kan endvidere henvises til Mons, et al. (2007), hvor der argumenteres for blødgøring som en måde at reducere frigivelse af metaller fra rørsystemet.

### **Klimaeffekter**

Der kan forventes en mindre klimaeffekt ved anvendelse af blødt vand, idet energiforbruget i husholdninger og erhverv vil blive mindre som følge af de beskrevne effekter.

### **Forbrugeroplevede effekter**

For forbrugerne vil der udover de ovenfor beskrevne effekter være en positiv oplevelse ved blødt vand i stedet for hårdt alene p.g.a. den æstetiske oplevelse af at være fri for kalkrande og -pletter. Smagen af vandet vil også ændres, men om dette opleves positivt eller negativt vil være meget individuelt. Tilsvarende vil oplevelsen af at bade og vaske hår i blødt vand frem for hårdt være individuel.

## **3.4 Referencer**

- Andersen, A., Fortenay, F. og Nielsen, K. (2005): Vejledning om metalliske materialer til vandinstallationer. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen, nr. 12/2005.
- Andreassen, P. & Stubsgaard, A.E. (2002): Reduktion af miljøbelastningen fra tøjvask. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen, nr. 37.
- Bruggen, B. van der, Goosens, H., Everard, P.A., Stengée, K. & Rogge, W. (2009): Cost-benefit analysis of central softening for production of drinking water. *Journal of Environmental Management*, 91, pp 541-549.
- Buhl, L. (2007): Legionella og varmt brugsvandsinstallationer. Dansk Fjernvarmes regionalmøder 2007. Teknologisk Institut.

## Central blødgøring af drikkevand

- By- og Landskabsstyrelsen (2010): Handlingsplan til sikring af drikkevandskvaliteten 2010-2012, UDKAST, 12. juli 2010.
- By- og Landskabsstyrelsen (2009): Kvaliteten af det danske drikkevand for perioden 2005-2007
- DANVA (2010): Vandstatistik 2008:2.
- DANVA (2009): Vand i tal. DANVAs benchmarking og vandstatistik 2009
- Garcia, A.L.T, Godskesen, B., Nielsen, K.D., Wind, E. & Rothuizen, E.D. (2009): Life Cycle Assessment on Central Softening of Drinking Water in Copenhagen. DTU Management in co-operation with Københavns Energi A/S.
- GEUS (2010): Grundvand. Status og udvikling 1989 – 2008
- Harrison, J. (1997): Softened water does not cause corrosion, *Water Technology*, 20, 7.  
<http://www.watertechonline.com/articleprint.asp?print=1&IndexID=5200702>
- Københavns Energi & Hvidovre Forsyning (2009): LCA af vandforsyningsalternativer. Studie udført af COWI A/S.
- Miljøstyrelsen (2005): Vejledning om metalliske materialer til vandinstallationer, arbejdsrapport nr. 12/2005 fra Miljøstyrelsen.
- Mons, M.; van Duk, H.; Gatel, D. Hesse, S. & Nguyen, M.-L. (2007): Softening, conditioning and the optimal composition of drinking water, *Water*, 21, pp 19 - 21.
- Poulsen, O. & Buhl, L. (2010): Personlig kommunikation vedr. tilkalkning af rørsystemer og installationer. Teknologisk Institut
- Rygaard, M. (2010): Desalinated water in urban water supplies – a systems approach to identify optimal drinking water composition. PhD Thesis.
- Rygaard, M.; Arvin, E. & Binning, P.J. (2010): Indirect economic impact in water supplies augmented with desalinated water. *Water Science & Technology: Water Supply*, 10.4, pp 664-671.
- Water Quality Association(2010): Teknisk information om korrosionsforhold i vand mm. <http://www.wqa.org/>
- Winther, L., Hentze, M., Linde, J.J. & Jensen, H.T. (2009): Spildevandsteknik, Polyteknisk Forlag.

## Sundhed

- Arvin, E., Bardow, A., Bruvo, M., Rygaard, M. & Spliid, H. (2010): Dental Caries affected by water quality and water treatment. IWA Montreal, 19-24 September 2010.
- Bruvo, M., Ekstrand, K., Arvin, E., Spliid, H., Moe, D., Kirkeby, S. & Bardow, A. (2008): Optimal drinking water composition for caries control in populations. *J. Dent. Res.* 87(4), 340–343.
- Marque, S., Jacqmin-Gadda, H., Dartigues, J.-F. & Commenges, D. (2003): Cardiovascular mortality and calcium and magnesium in drinking water: An ecological study in elderly people. *European Journal of Epidemiology*, Volume 18, Number 4, 305-309.
- McNally, N. J., Williams, H. C., Phillips, D. R., Smallman-Raynor, M., Lewis, S., Venn, A. & Britton, J. (1998): Atopic eczema and domestic water hardness. *Lancet.* 352 (9127), 527–531.
- Miyake, Y., Yokoyama, T., Yura, A., Iki, M. & Shimizu, T. (2004): Ecological association of water hardness with prevalence of childhood atopic dermatitis in a Japanese urban area. *Environ. Res.* 94(1), 33–37.
- National Research Council (1977): Drinking water and health. Washington, DC, National Academy of Sciences.
- Neri, L.C. & Johansen, H.L. (1978): Water hardness and cardiovascular mortality. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 304:203–221.
- Pocock, S.J.; Shaper, A.G. & Packham, R.F. (1981): Studies of water quality and cardiovascular disease in the United Kingdom, *The Science of the Total Environment*, 18, 25 - 34.
- Rosborg, I.; Nihlgård, B.; Gerhardsson, L. & Sverdrup, H. (2006): Concentrations of inorganic elements in 20 municipal waters in Sweden before and after treatment – links to human health. *Environmental Geochemistry and Health*, 28:215–229
- Rosenlund, M., Berglind, N; Hallqvist, J.; Bellander, T. & Bluhm, G. (2005): Daily intake of magnesium and calcium from drinking water in relation to myocardial infarction, *Epidemiology.* 16(4): 570 - 576.
- Rubenowitz E, Axelsson G, Rylander R. (1999): Magnesium and calcium in drinking water and death from acute myocardial infarction in women. *Epidemiology.* 10(1):31-6.

## Central blødgøring af drikkevand

- WHO (1973): Trace elements in human nutrition: report of a WHO Expert Committee. Geneva, World Health Organization (WHO Technical Report Series, No. 532).
- WHO (1996): Guidelines for Drinking-water Quality. 2nd edition, vol. 2, Health Criteria and Other Supporting Information. World Health Organization, Geneva.
- WHO (2003): Sodium in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. WHO/SDE/WSH/03.04/15
- WHO (2009a): Calcium and magnesium in drinking-water: public health significance. Geneva, World Health Organization.
- WHO (2009b): Hardness in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. WHO/HSE/WSH/09.01/10.

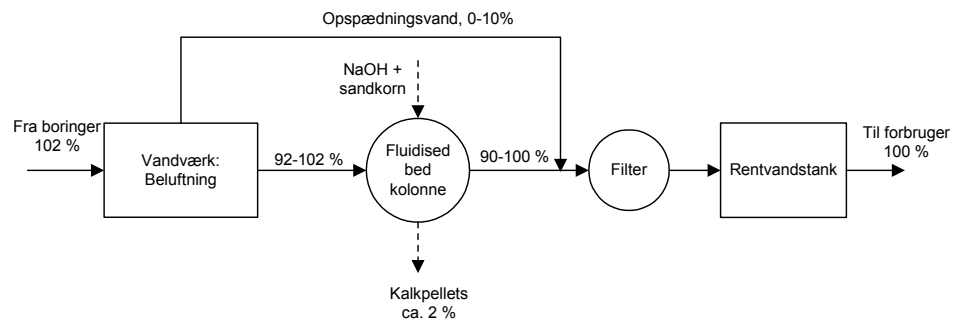


## 4 Teknologibeskrivelser

I dette kapitel gennemgås de mest kendte, afprøvede og dokumenterede teknologier for central fjernelse af kalk fra drikkevandet: kalkfældning, ionbytning, nanofiltrering, omvendt osmose, magnetiske metoder samt ultralyd og pulserende strøm. I kapitel 5 foretages en teknisk og miljømæssig sammenligning af teknologierne, ligesom de resulterende vandkvaliteter sammenholdes.

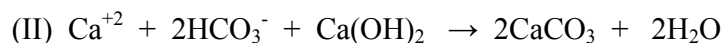
### 4.1 Kalkfældning (pellet-metoden)

Kalkfældningsmetoderne omfatter reduktion af hårdheden ved udfældning af  $\text{CaCO}_3$  ved dosering af  $\text{NaOH}$  eller  $\text{Ca(OH)}_2$  samt eventuelt  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Den mest anvendte metode er pelletmetoden, hvor der foretages en hurtig udkrystallisation af calcit ( $\text{CaCO}_3$ ) i en speciel "fluidised bed" kolonne. I Figur 4.1 er vist et princip flow-sheet for et blødgøringsanlæg efter kalkfældningsmetoden.



Figur 4.1. Princip flow-sheet for blødgøringsanlæg baseret på kalkfældningsmetoden

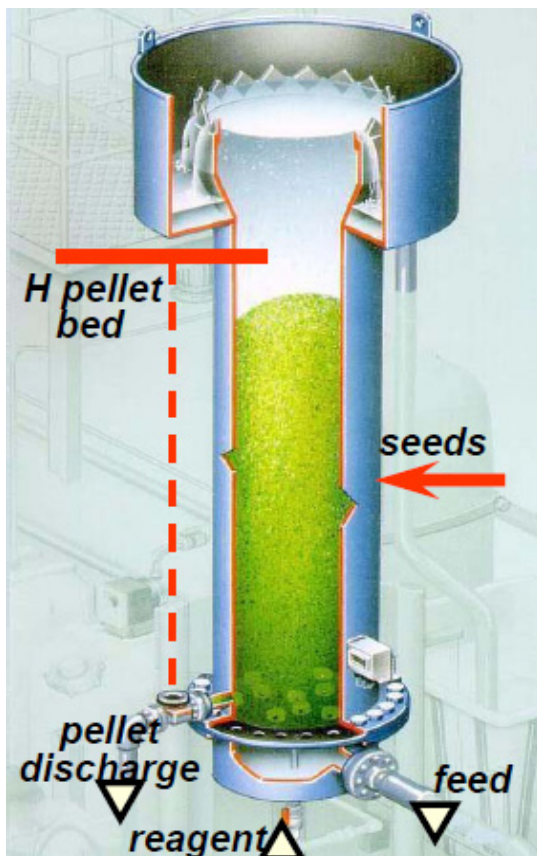
Udfældning af  $\text{CaCO}_3$  ved tilsætning af  $\text{NaOH}$  (I) eller  $\text{Ca(OH)}_2$  (II) samt evt.  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  er en kendt metode til fjernelse af calcium i vand. Når der tilsættes en base til vandet, stiger pH, hvilket forrykker ligevægten i karbonatsystemet, og der dannes mere karbonat, som udfældes med det tilstedeværende  $\text{Ca}^{+2}$  i vandet. Følgende reaktionsskemaer viser de kemiske reaktioner i vandet:



## Central blødgøring af drikkevand

Anvendes NaOH, forsvinder der 1 molekyle bikarbonat ved fældning af 1 calcium-ion. Anvendes  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , forsvinder 2 molekyler bikarbonat pr. calcium-ion, der udfældes i vandet. Det skyldes, at man også udfælder de "nye" calcium-ioner, som tilføres med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Derfor dannes der mere calciumkarbonat (biprodukt), når der anvendes calciumhydroxid i stedet for natronlud. Hvis vandet kun har et lille indhold af bikarbonat, er der behov for at tilsætte  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  for at få mere karbonat til rådighed for fældningen.

Pelletmetoden har efterhånden vundet betydelig udbredelse, da den har flere fordele sammenlignet med en traditionel fældning af calciumkarbonat. Pelletmetoden er en specifik udkrystallisation af calcit (calciumkarbonat). Udkrystallisationen starter på nogle meget fine sandkorn (podning), der tilsættes i en høj reaktor, hvor der føres vand til i bunden, mens sandkorn føres til i midten af reaktoren. Efterhånden udkrystalliseres mere og mere calcit på sandkornene, så de vokser i størrelse og vægt og synker til bunden, hvor der regelmæssigt aftappes kalkpartikler på ca. 1 mm i diameter. Hastigheden af den opadgående vandstrøm er afpasset efter partiklernes bundfældningshastighed, så man på denne måde har sandkornene opslæmmet i vandstrømmen (en såkaldt "fluidised bed"). Figur 4.2 viser en skematisk oversigt af et pelletanlæg.



Figur 4.2. Skematisk oversigt af et blødgøringsanlæg baseret på pelletmetoden

## Central blødgøring af drikkevand

Når calcit udkrystalliseres, opnås nogle meget rene calciumkarbonat krystaller, hvorimod der ved en mere traditionel fældning af  $\text{CaCO}_3$  kan ske medudfældning af andre ioner (f.eks. jern). Magnesium forbliver opløst i vandet, når det blødgøres efter pelletmetoden.

Ved blødgøring med kalkfældningsmetoden stiger vandets pH til 8,5-8,8. Det vil derfor være nødvendigt at neutralisere med syre, før vandet kan afleveres til forbrugerne. Det bør overvejes, at foretage en løbende kontrol af pH i det producerede vand, så udpumpningen kan stoppes, hvis ikke pH ligger i det ønskede område.

Der er også behov for en efterfiltrering af vandet for at fjerne små kalkpartikler, som ikke er blevet udskilt i reaktoren. I de økonomioverslag, der danner grundlag for den samfundsøkonomiske screening, er det forudsat, at pelletreaktoren anvendes mellem beluftning og filteret, så man kan benytte det eksisterende filter på vandværket, hvilket også er den mest almindelige måde i udlandet.

Pelletreaktoren kan dog også anbringes før beluftningen eller efter filteret, men anbringes den efter filteret, skal der etableres separat slutfiltrering for at fjerne små kalkpartikler. Ved at placere en pelletreaktor mellem beluftningen og slutfiltreringen på et eksisterende vandværk undgår man en ekstra slutfiltrering. Til gengæld vil en eventuel jernudfældning fra beluftningen fjernes sammen med de dannede calcitkrystaller, som derved bliver forurenede med jern (okker). Dette kan have betydning for den mulige håndtering af restproduktet.

I Holland anvendes metoden også for at reducere opløsning af bly og kobber i vandrørsystemet. Metoden har der ført til en reduktion på 50 - 75 % i indholdet af bly og kobber i vandet og dermed også i en reduktion af disse stoffer i spildevandsslammet. I Holland anvendes det jernforurenede calcit ved smeltning af stål.

Metoden kan anvendes på både store og små vandværker, men den forekommer noget kompliceret for de små værker, hvis processen skal styres optimalt, fordi doseringen er afhængig af råvandets sammensætning, temperaturen og tryktabet i reaktoren. Ændring af doseringen kan være nødvendig for at få den rette væksthastighed og alder af partiklerne. Den enkleste styring er baseret på trykfaldet i reaktoren, og det kunne give nogenlunde gode resultater på små anlæg, som ikke har ressourcer til en mere omfattende overvågning af processen.

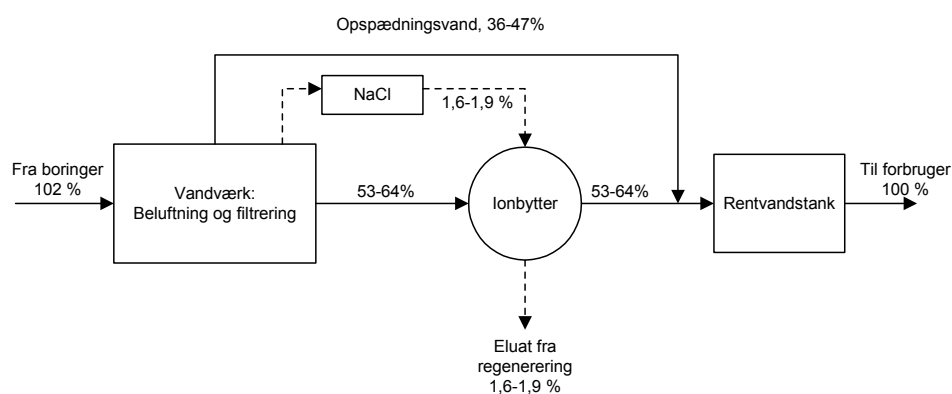
Ved pelletmetoden kan man udfælde calcium ned til 20 mg/l svarende til 2,8 °dH. Resthårdheden fra magnesium vil i Danmark typisk være 3-4 °dH, således at den samlede resthårdhed i vandet vil ligge på 6-7 °dH. I den samfundsøkonomiske screening er det forudsat, at vandet blødgøres til 8 °dH. Derfor kan der blive behov for at opspæde med op til 10 % andet vand, som ikke er blødgjort ved pelletmetoden.

Ved lavt bikarbonatindhold i det oppumpede vand skal vandsammensætningen justeres yderligere, idet drikkevand ifølge drikkevandsbekendtgørelsen bør indeholde mindst 100 mg/l bikarbonat.

Ved lav bicarbonatkoncentration i vandet bør anvendes NaOH i stedet for  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  til pH-justering, og der kan eventuelt tilsættes  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , hvis der er behov for mere bikarbonat i vandet.

## 4.2 Ionbytning

Fjernelse af  $\text{Ca}^{+2}$  og  $\text{Mg}^{+2}$  kan ske ved ionbytning, typisk med  $\text{Na}^+$  (regenerering af harpiks med NaCl). Metoden kan suppleres med en afcarbonisering, hvor en stor del af karbonatindholdet fjernes som  $\text{CO}_2$ <sup>13</sup>. Ionbytermassen kan regenereres med  $\text{CO}_2$ .



Figur 4.3. Princip flow-sheet for blødgøringsanlæg baseret på ionbytningsmetoden

Ved blødgøring med ionbytter udbyttes vandets  $\text{Ca}^{2+}$  og  $\text{Mg}^{2+}$  med  $\text{Na}^+$  fra ionbytermassen (resinen). Vandets hårdhed fjernes herved fuldstændigt. Ionbytermassen er normalt anbragt i en stål- eller plastkolonne, hvor vandet strømmer igennem med en passende hastighed (typisk 20 - 60  $\text{m}^3/\text{h}$ ).

Når ionbytermassen er mættet med calcium og magnesium, skal den regenereres med en stærk opløsning af NaCl i vand. Ved store anlæg, der har et stort saltforbrug, fremstilles saltopløsningen i en såkaldt "brine-maker". Ved mindre anlæg fremstilles saltopløsningen ved at lede vandet gennem en beholder med saltklumper. Til regeneration anvendes typisk ca. 2 % af den ved ionbytningen producerede mængde vand. Vandet fra regenereringen kaldes eluat, og det indeholder forholdsvis store koncentrationer af calcium, magnesium, natrium og klorid. Eluatet skal bortskaffes og er som sådan gået til spilde. Til regenerationen anvendes typisk 30 - 38 g NaCl pr. °dH pr.  $\text{m}^3$  vand.

Der findes forskellige regenereringsmetoder. Ved den traditionelle metode skylles ionbytermassen først med en stærk saltopløsning (medstrøms), hvorefter der skylles efter med en nøje fastlagt mængde rent vand. Der kan spares både vand og kemikalier ved at anvende modstrøms regenereringsmetoder, og det

<sup>13</sup> eller den kan køres efter CARIX metoden, som dog endnu ikke er bredt anvendt. Denne metode kan fjerne calciumioner og sulfationer fra vandet og aflevere brintioner og bicarbonationer til vandet i stedet for.

kan godt betale sig ved store ionbytningsanlæg. Regenereringen foregår normalt fuldautomatisk, idet starttidspunktet styres fra et kontaktvandur, der giver signal, når en bestemt vandmængde har passeret. Vandkapaciteten pr. regeneration afhænger af vandets hårdhedsgrad.

Det blødgjorte vand indeholder hverken calcium eller magnesium, men disse ioner er blevet erstattet af en tilsvarende mængde natrium i stedet ( $2 \text{ Na}^+$  pr.  $\text{Ca}^{+2}$ ). Ønskes en veldefineret lav hårdhed i det producerede drikkevand, kan det opnås ved at blande blødgjort vand med ikke blødgjort vand. Har råvandet f.eks.  $16 \text{ }^\circ\text{dH}$ , og der ønskes  $8 \text{ }^\circ\text{dH}$  i det producerede vand, kan det opnås ved at blande det blødgjorte vand med råvand i forholdet 1:1. Det blandede vand vil indeholde 50 % calcium og 50 % magnesium i forhold til råvandet. Natrium er steget tilsvarende, hvilket er 1,15 mg natrium pr. mg calcium og 1,89 mg natrium pr. mg magnesium. Koncentrationen af de øvrige ioner i det blandede vand vil være uændret.

Ionbytning bør anvendes som en efterrensningsproces på vandværket, hvor man først har fjernet jern, mangan og ammonium, som kan give driftsproblemer i ionbytningsanlægget.

Et komplet anlæg består af flere ionbytterkolonner i parallel drift. Med tre kolonner vil de to normalt være i drift, mens den tredje er under regenerering eller på standby. Med denne løsning skal hver kolonne have en flow-kapacitet på mindst 50 % af den fulde kapacitet. Det er også muligt med andre varianter med flere kolonner og/eller flere sæt kolonner.

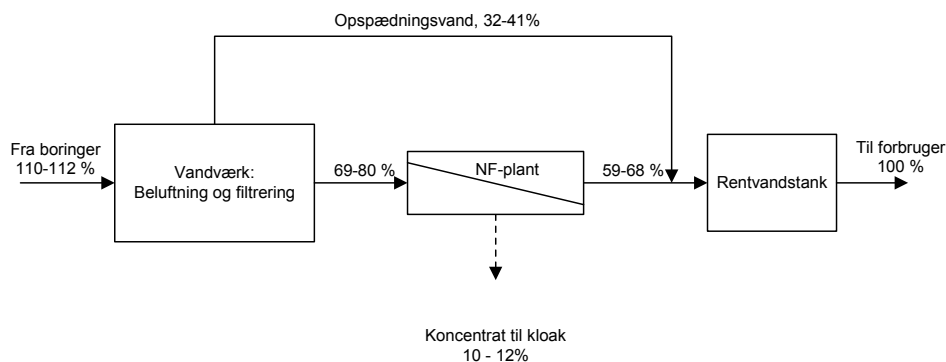
Metoden kan anvendes på både store og små vandværker, idet standard-anlæggene i størrelse passer godt til både små og mellemstore værker. På meget store værker, vil man typisk anvende flere anlæg parallelt. Metoden kan anvendes til blødgøring af vand både med moderat hårdhed og meget høj hårdhed.

### 4.3 Nanofiltrering

Nanofiltrering kan fjerne divalente ioner - herunder  $\text{Ca}^{+2}$  og  $\text{Mg}^{+2}$ . I Figur 4.4 er vist et princip flow-sheet for, hvorledes nanofiltrering kan anvendes til blødgøring af vandet på et vandværk

Nanofiltrering er en membranproces, som primært tilbageholder divalente ioner og lader monovalente ioner passere membranen. Vandet pumpes igennem nanofiltreringsanlægget med en højtrykspumpe. Tryktabet i et nanofiltreringsanlæg er langt mindre end i en omvendt osmose-membran, hvor alle ioner tilbageholdes. Derfor skal man overvinde et større osmotisk tryk i et omvendt osmose-anlæg end i et nanofiltreringsanlæg.

## Central blødgøring af drikkevand



Figur 4.4. Princip flow-sheet for blødgøringsanlæg baseret på nanofiltreringsmetoden: Procenttallene tager udgangspunkt i den producerede vandmængde (100 %). Med et vandspild på 10 - 12 % er den oppumpede vandmængde på 110 - 112 % af den producerede vandmængde. Spildprocenten er mindre end 15 %, da vand fra nanofiltrering opspædes med ca. 1/3, der ikke er nanofiltreret.

Det filtrerede vand kaldes permeat, og det vil typisk - afhængigt af membran-typen og anlægskonfigurationen - indeholde forholdsvis flere monovalente ioner ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ), fordi de divalente ioner - heriblandt  $\text{Ca}^{+2}$  og  $\text{Mg}^{+2}$  - delvis tilbageholdes af membranen. De tilbageholdte ioner forbliver tilbage i et koncentrat, som typisk udgør 10 - 20 % af den tilledte vandmængde til nanofiltreringsanlægget. Koncentratet kan ikke anvendes til drikkevand og skal udledes til kloak eller recipient.

På grund af den stigende koncentration af calcium og magnesium under filtreringsprocessen kan der dannes kalkbelægninger på membranen. Dette kan forhindres gennem tilsætning af specielle stoffer (antiscalingsmidler), som kompleksbinder calcium og magnesium, så man undgår udfældninger på membranen af disse stoffer. Det vil altid være nødvendigt at bruge antiscalingsmidler for de vandkvaliteter, som indgår i nærværende redegørelse. Antiscalingsmidler er såkaldte kompleksdannere, der kan leveres i kvaliteter, der er godkendt til fødevarer. Antiscalingsmidler vil blive tilbageholdt i nanofilteret og bliver derfor udledt til kloak.

Et særligt problem ved nanofiltrering er, at membranerne ikke tilbageholder kuldioxid, hvorimod en stor del af bicarbonaten tilbageholdes. Derfor vil pH falde i permeatet, og der vil være aggressiv kulsyre til stede. Det vil normalt kræve en neutralisering med natronlud eller endnu bedre med et magnesiumholdigt kalkprodukt<sup>14</sup>.

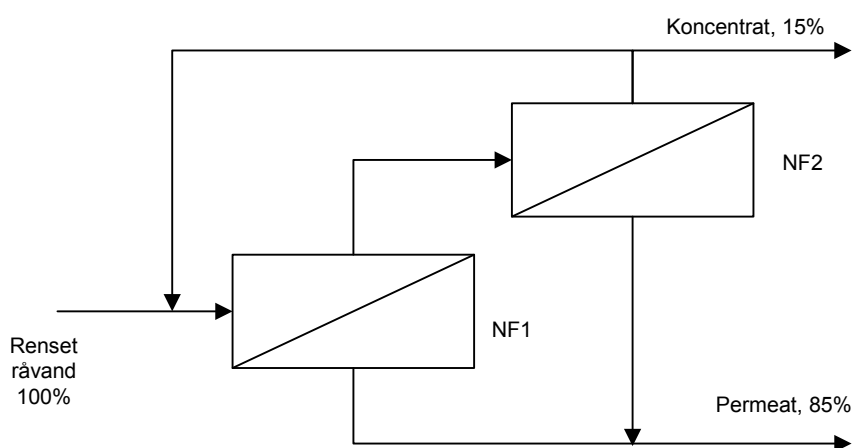
Afhængigt af den valgte membran og kombination af flere nanofiltreringsanlæg kan der opnås vidt forskellig vandsammensætning<sup>15</sup>.

<sup>14</sup> f.eks. "Magno Dol", som anvendes på mange vandværker, hvor der er behov for at neutralisere den aggressive kuldioxid i råvandet

<sup>15</sup> Disse sammensætninger kan beregnes ved hjælp af DOW Chemicals' beregningsprogram ROSA 7.2.1.

## Central blødgøring af drikkevand

På basis af drøftelser med en anlægsleverandør med stor erfaring med nanofiltreringsanlæg er der som grundlag for vurdering af økonomi, herunder samfundsøkonomi, foreslået et koncept med et primært nanofiltreringsanlæg (NF1) efterfulgt af et sekundært nanofiltreringsanlæg (NF2), der renser koncentratet fra det primære anlæg. Anlægsconfigurationen fremgår af Figur 4.5. Med denne kombination kan man opnå 85 % rent vand i form af permeat (85 % recovery), mens 15 % går tabt som koncentrat. I Tabel 4.1 er sammenlignet beregningsresultater for fire forskellige membraner/-membrankombinationer.



Figur 4.5. Detaljeret konfiguration for nanofiltreringsanlægget anvendt til beregningerne i Tabel 4.1

Tabel 4.1. Sammenligning af beregnede vandkvaliteter ved anvendelse af forskellige NF-membraner (DOW Chemicals) og NF-konfigurationer. De anførte permeatkoncentrationer gælder for det blandede permeat fra de to NF-anlæg. Alle cases er beregnet med 85 % recovery (15 % vandtab).

| Parameter               | Råvand | Case 1   | Case 2    | Case 3    | Case 4       |
|-------------------------|--------|----------|-----------|-----------|--------------|
| NF1                     |        | NF90-400 | NF90-400  | NF270-400 | NF200-400obs |
| NF2                     |        | NF90-400 | NF270-400 | NF270-400 | NF200-400obs |
| Fødetryk, bar           |        | 8,04     | 6,85      | 5,52      | 9,63         |
| Permeat (% recovery)    |        | 85       | 85        | 85        | 85           |
| pH                      | 7,4    | 6,08     | 7,01      | 7,18      | 7,03         |
| dH                      | 17     | 0,6      | 5,2       | 7,7       | 5,3          |
| Na, mg/l                | 20     | 2,24     | 12,47     | 16,19     | 14,29        |
| Mg, mg/l                | 13     | 0,47     | 2,16      | 3,4       | 2,16         |
| Ca, mg/l                | 100    | 3,5      | 33,78     | 49,65     | 34,43        |
| HCO <sub>3</sub> , mg/l | 260    | 10,71    | 97,44     | 145,85    | 101,3        |
| NO <sub>3</sub> , mg/l  | 2      | 1,05     | 1,55      | 1,82      | 1,62         |
| Cl, mg/l                | 40     | 3,19     | 24,83     | 32,97     | 26,49        |
| SO <sub>4</sub> , mg/l  | 70     | 1,02     | 1,5       | 2,02      | 1,38         |
| F, mg/l                 | 1,5    | 0,16     | 0,96      | 1,26      | 1,02         |
| CO <sub>2</sub> , mg/l  | 17,26  | 18,17    | 17,55     | 17,35     | 17,53        |
| TDS, mg/l               | 507,9  | 22,35    | 174,7     | 253,27    | 182,74       |
| TDS-reduktion, %        |        | 95,6     | 65,6      | 50,1      | 64,0         |

## Central blødgøring af drikkevand

Anvendes fine membraner (NF90-400), er tilbageholdelsen af monovalente ioner forholdsvis stor. Faktisk fjernes 95,6 % af alle salte. Anvendes grovere membraner (NF270-400), fjernes kun 50 % af alle salte. Det gælder også calcium, mens der fjernes forholdsvis mere magnesium og sulfat. Ved nanofiltrering fjernes ikke fri kulsyre. Fjernes meget salt, falder pH (case 1). Fødetrykket holdes nede på 5,5 til 9,6 bar i alle eksempler.

Da vandets hårdhed normalt bliver lavere end 8 °dH i et nanofiltreringsanlæg, skal permeatet blandes op med ikke blødgjort vand for at opnå den ønskede hårdhed.

Hvis man ønsker en hårdhed på 8 °dH, skal der kun blødgøres 50 - 65 % af råvandet afhængigt af den oprindelige hårdhed i vandet, hvis resthårdheden ved nanofiltreringen er nede på 1 °dH. Merforbruget af vand p.g.a. vandtab i form af koncentratet fra nanofiltreringen vil typisk være omkring 10 % af den producerede vandmængde, hvis vandtabet er ca. 15 % ved selve nanofiltreringen. Hvis resthårdheden efter nanofiltreringen er højere en 1 °dH, skal der fortyndes med mindre råvand. Der skal dog altid produceres mere vand ved nanofiltrering, og derfor går der forholdsvis mere vand til spilde.

Nanofiltrering skal helst anvendes til blødgøring af vand, der er iltet og filtreret, da man ellers kan risikere udfældninger af jern og mangan i membranerne.

Metoden er forholdsvis dyr i investering og har endnu ikke fundet bred anvendelse til drikkevandbehandling i Danmark. I Sverige anvendes metoden en del, fordi nanofiltrering også kan fjerne organisk stof (NVOC), som man flere steder i Sverige ønsker at fjerne, hvor man anvender overfladevand fra søer til drikkevand. Nanofiltrering kan således også fjerne forureninger fra grundvand, som er lettere forurenede som følge af nedsivning fra forurenede grunde.

Membranerne skal med mellemrum renses med passende kemikalier, hvilket betyder, at anlægget kortvarigt tages ud af drift. Membranerne skal helt udskiftes med ca. 7 års mellemrum.

Metoden kan anvendes på både store og små vandværker, men standardanlæggene passer i kapacitet bedst til de små vandværker. Der kan som standard leveres nanofiltreringsanlæg med 24 membranmoduler med en kapacitet på 20 m<sup>3</sup>/h. Man kan anvende flere af disse anlæg i paralleldrift, eller man kan få specialbygget større anlæg med flere filtermoduler, så man også kan behandle langt større vandmængder. Et nanofiltreringsanlæg er et kompakt anlæg, der optager forholdsvis lidt plads - men dog mere end et ionbytningsanlæg.

### 4.4 Omvendt osmose

Omvendt osmose fjerner i princippet stort set alle ioner (salte) og kemiske forbindelser fra vandet. Det er således en endnu finere filtrering, end man opnår med et nanofiltreringsanlæg. Normalt kan man dog kun opnå 75 - 85 % recovery med omvendt osmose sammenlignet med 80 - 90 % for nanofiltrering.



Derfor skal et omvendt osmose-anlæg have større membranoverflade, hvis det skal yde den samme mængde permeat som et nanofiltreringsanlæg. Derfor vil prisen for et omvendt osmose-anlæg typisk være 5 - 20 % højere end for et tilsvarende nanofiltreringsanlæg. Driftsudgifterne vil samtidigt være betydeligt højere. Der anvendes ca. 100 % mere energi til pumpning, da fødestrykket ligger meget højere end for nanofiltrering - typisk 18 - 25 bar. Ellers minder de to typer anlæg meget om hinanden.

Da stort set alle salte fjernes fra vandet ved omvendt osmose, og da både investering og driftsudgifter er højere end ved nanofiltrering, anvendes omvendt osmose ikke til blødgøring af drikkevand i Norden. Metoden har derimod vundet stor udbredelse i Mellemøsten til fremstilling af drikkevand ud fra havvand, hvor man netop ønsker at fjerne det meget store saltindhold i havvand.

### 4.5 Magnetiske metoder

Ved magnetisk vandbehandling kan man tilsyneladende ændre på den krystalform, som  $\text{CaCO}_3$  danner ved udfældning. Normalt udfældes calcit, som danner kraftige belægninger. Efter magnetisk vandbehandling vil  $\text{CaCO}_3$  fortrinsvis udkrystallisere som aragonit og vaterit, der ikke er nær så tilbøjelige til at danne belægninger. Magnetisk vandbehandling fjerner altså ikke kalken fra vandet, men den forhindrer eller reducerer i princippet dannelsen af kraftige kalkbelægninger.

Når  $\text{CaCO}_3$  udfælder ved opvarmning af magnetisk behandlet vand, vil kalken i større omfang kunne forblive suspenderet i vandet, hvilket kan være en stor fordel i husholdningsapparater, varmvandsbeholdere, varmevekslere samt ved kontakt med sanitetsprodukter og badeværelsesfliser.

Sydfalster Vandværk har i 20 år anvendt magnetisk vandbehandling, og ifølge producenten af anlægget har man opnået meget gode resultater; flere steder i ledningsnettet er de gamle belægninger endda blevet opløst, efter man er begyndt at bruge magnetisk vandbehandling.

Metoden har været anvendt i mange år med noget forskelligt resultat, og der har været en til tider heftig diskussion om, hvorvidt magnetisk vandbehandling kan hindre eller minimere dannelsen af kalkbelægninger. Der forligger ikke entydig dokumentation, som kan forklare årsagerne til, at metoden virker i nogle tilfælde og ikke i andre. Teknologisk Institut (1999 & 2010) viser, at man kan opnå forskellig krystalstruktur af  $\text{CaCO}_3$ , når der sker udfældning fra magnetisk behandlet vand sammenlignet med udfældning fra ubehandlet vand. Det er dog ikke belyst under hvilke forhold, man opnår den ene eller den anden krystalstruktur.

Af ovennævnte grunde indgår metoden ikke i den samfundsøkonomiske screening.

## 4.6 Ultralyd og pulserende strøm

Andre metoder anvender ultralyd og pulserende strøm, men disse metoder er mindre kendte end magnetisk vandbehandling.

På markedet findes ultralydsanlæg, som skulle kunne reducere udfældning af kalkbelægninger. Ifølge leverandørens hjemmeside er der solgt flere anlæg til vandværker, hvor det har haft en positiv effekt på reduktion af kalkudfældninger. Rønnede vandværk har haft et anlæg på prøve i starten af 2010, men man ønskede dog ikke at købe anlægget efter prøveperioden, da det var vanskeligt at måle effekten. Der var delte meninger hos forbrugerne, om systemet gav mindre kalkudfældning eller ej.

Der sælges også et produkt, der minimerer kalkudfældning ved at tilføre vandet varierende spændings- og strømimpulser, hvilket ifølge beskrivelsen påvirker karbonatligevægten. Apparatet er VA-godkendt og testet på Teknologisk Institut efter den tyske DVGW-norm, hvor godkendelsen kræver mindst 80 % reduktion af kalkbelægninger, når vandet behandles med dette udstyr. leverandøren oplyser, at der er solgt knap 2000 anlæg herhjemme de sidste 10 år. Anlæggene er velegnede til private boliger, ejendomme og fabrikker, men de vil næppe være økonomiske på vandværker.

Af ovennævnte grunde indgår disse metode heller ikke i den samfundsøkonomiske screening.

## 4.7 Referencer

### Kalkfældningsmetoden

- Bosklopper, T.G.J., Rietveld, L.C., Babuska, R., Smaal, B. & Timmer, J. (2004): Integrated operation of drinking water treatment plant at Amsterdam water supply. *Water Science and Technology: Water Supply*, Vol 4, No 5-6, pp 263-270.
- Dijk, J.C. van & Wilms, D.A. (1991): Water treatment without waste material, fundamentals and state of the art of pellet softening. *J Water SRT-Aqua*, Vol. 40, no.5, p 263-280.
- Hofman, J., Kramer, O., Hoek, J.P van der, Nederlof, M. & Groenendijk, M. (2006): Twenty years of experience with central softening in The Netherlands; Water quality, environmental benefits and costs. [http://www.kramersite.nl/onnokramer/publications/hofman\\_2006\\_centralesoftening\\_netherlands.pdf](http://www.kramersite.nl/onnokramer/publications/hofman_2006_centralesoftening_netherlands.pdf)
- Houwelingen, G. van (2010): Personlig kommunikation vedr. teknik priser for pelletreaktor-anlæg til blødgøring af drikkevand. DHV BV, Holland
- Mahvi, A.H., Shafiee, F. & Naddafi, K. (2005): Feasibility study of crystallisation process for water softening in a pellet reactor. *Int. Jour. of Environmental Science & Technology*, Vol. 1, No. 4, pp 301-304.

## Central blødgøring af drikkevand

- Odense Vandselskab A/S (2001): Førstudie avhærdning. Konsekvensbeskrivelse. Udført af VAI VA-projekt AB.
- Rietveld, L.C, Van Schagen, K.M.; Kramer, O.J.I (2005): Optimal Operation of pellet softening process. Paper for PROMICIT project, sponsored by Senter-Novem, Ministry of Economic Affairs, Netherlands.  
[http://www.kramersite.nl/onnokramer/publications/rietveld\\_2005\\_optimal\\_operation\\_pelletsoftening.pdf](http://www.kramersite.nl/onnokramer/publications/rietveld_2005_optimal_operation_pelletsoftening.pdf)
- US EPA (1999): Enhanced Coagulation and Enhanced Precipitative Softening Guidance Manual. 815-R-99-012.
- Yi-Hsuan, Yeh, H.-H. & Tsai, M.-C. (2000): The application of fluidized bed crystallization in drinking water softening. *Jour. of the Chinese Inst. of Environmental Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp 177-184.

### Ionbytning

- Poulsen, P.T. & Johannsen, T.R. (2010): Personlig kommunikation vedr. teknik og priser for ionbytningsanlæg til blødgøring af drikkevand. Silhorko A/S.
- <http://viewer.zmags.com/publication/c55c852f#/c55c852f/4>
- Höll, W.H. (2000): III/Water Treatment, Anion exchangers, pp 4477-4487. Karlsruhe Nuclear Research Centre.

### Nanofiltrering og omvendt osmose

- Poulsen, P.T. & Johannsen, T.R. (2010): Personlig kommunikation vedr. teknik og priser for nanofiltreringsanlæg til blødgøring af drikkevand. Silhorko A/S.
- American Water Works Association (1999): Reverse Osmosis and Nanofiltration. Manual of Water supply practices. M46.

DOW Chemicals (2010): ROSA 7.2.1. Calculation program for design and performance of membrane processes.

[http://www.dowwaterandprocess.com/support\\_training/design\\_tools/rosa.htm](http://www.dowwaterandprocess.com/support_training/design_tools/rosa.htm)

### Magnetisk vandbehandling

- Aqua Unique (2010): Erfaringer i 20 år med magnetisk vandbehandling på Sydfalster. <http://www.aquaunique.dk/Default.aspx?ID=95>
- Teknologisk Institut (1999): Udredning om fysisk vandbehandling for løsning af kalkproblemer i vandinstallationer.

## Central blødgøring af drikkevand

- Teknologisk Institut (2010): Fysisk vandbehandling.  
[http://www.teknologisk.dk/\\_root/media/29218\\_3a%20Fysisk%20vandbehandling.pdf](http://www.teknologisk.dk/_root/media/29218_3a%20Fysisk%20vandbehandling.pdf)

### **Ultralyd og pulserende strøm**

- Notat fra DANVA, november 2010
- Angelsø, T (2010), HOH Vandteknik: Personlig kontakt vedr. Aqua Total.

## 5 Sammenligning af metoderne

I dette kapitel er foretaget en sammenligning af de udvalgte, kendte og veldokumenterede metoder: kalkfældningsmetoden, ionbytning og nanofiltrering. Sammenligningen er opstillet i tabelform i Tabel 5.1, Tabel 5.2 og Tabel 5.3.

Det gælder for alle tre metoder, at de kan producere vand med lavere end 8 °dH, og det rensede vand skal derfor fortyndes med normalt behandlet råvand, som ikke er blødgjort. Det kan måske kræve yderligere pumpning eller blandingssystem at lavet denne sammenblanding i praksis, men udgifter hertil er ikke medtaget i den økonomiske beregning, da den ikke altid vil kræve særlige foranstaltninger. Det afhænger af forholdene på det enkelte vandværk.

Vandkvaliteten af det blandede vand er nærmere beregnet i Tabel 5.1 og Tabel 5.2. Hertil skal nævnes, at det rensede vand fra nanofiltrering vil have lavt pH på grund af indhold af aggressiv kulsyre, hvilket kræver neutralisering af det rensede vand. Dette er ikke medregnet i den samfundsøkonomiske screening, da behov for neutralisering hænger sammen med råvandskvaliteten og de valgte membraner. Det er dog vigtigt at vandværkerne er opmærksomme på om der opstår aggressivt vand ved blødgøring, også hvis det blødgjorte vand blandes med andet vand under distributionen. Det er under alle omstændigheder en meget beskedent omkostning, som ikke vil ændre de økonomiske beregninger mærkbart. Ved kalkfældningsmetoden stiger pH i det rensede vand, fordi der doseres natronlud, men her er den efterfølgende neutralisering med saltsyre medregnet i udgifterne, da den ligger fast i forhold til fældningsmetoden og derfor let kan beregnes med stor sikkerhed.

Ud over de to nævnte ændringer, som kræver behandling, er der ikke andre egenskaber i det producerede blandingsvand, som kræver særlige indgreb. Det skal for god ordens skyld nævnes, at ændringerne af den kemiske sammensætning af det producerede blandingsvand kan udlignes gennem en passende remineralisering, hvilket dog ligger uden for rammerne af dette projekt.

## 5.1 Økonomi

### *Investering:*

Investeringen pr. kapacitetsenhed ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) falder med øget kapacitet på anlægene, og det gælder alle tre blødgøringsmetoder. Den klassiske ionbytningsmetode og kalkfældningsmetoden er begge noget billigere end et nanofiltreringsanlæg i investering. Til gengæld kan et nanofiltreringsanlæg også samtidig anvendes til fjernelse af NVOC og arsen, som volder problemer i visse områder af landet.

### *Arealbehov:*

Et ionbytningsanlæg optager det mindste areal, og loftshøjden kan være så lav som 4 m. Et nanofiltreringsanlæg kræver lidt mere plads, men har samme krav til loftshøjde som ionbytningsanlægget. Pelletanlægget bruger omtrent samme plads som nanofiltreringsanlægget, men loftshøjden skal være ca. 8 m. Der stilles ingen særlige krav om opvarmning af lokalet, uanset hvilken type anlæg der installeres. Når der løbende er en stor gennemstrømning af vand ved ca.  $10\text{ }^\circ\text{C}$ , vil det uden problemer holde temperaturen over frysepunktet i bygningen/lokalet om vinteren.

### *Drift og vedligehold:*

Ionbytningsanlægget kræver meget lidt pasning i det daglige. COWI har anslået 1 time ugentligt, og hertil kommer et årligt servicebesøg af leverandøren. Også nanofiltreringsanlægget kører næsten fuldautomatisk, men anlægget skal dog ligesom ionbytningsanlægget inspiceres rutinemæssigt. Da anlægget er lidt mere kompliceret, må det påregnes, at driftspersonalet bruger lidt mere tid end til pasning af et ionbytningsanlæg. Pelletanlægget kan også styres automatisk, men flere styringsparametre kræver hyppig opfølgning, kontrol og justering af styreprogrammet. Det vurderes, at dette i alt fald er meget nødvendigt for at drive et større pelletanlæg optimalt. For mindre anlæg kan den løbende overvågning og justering dog næppe betale sig, og derfor kan der slækkes på tidsforbruget til drift og vedligehold.

### *Levetid:*

Levetiden svinger fra 15 - 25 år for de tre forskellige slags anlæg, hvor pelletanlægget har længst levetid og nanofiltreringsanlægget kortest. For alle anlæg gælder det, at man formentlig godt kan opnå endnu længere levetid ved en grundig og omhyggelig pasning af anlægget.

### *Uddannelse af driftspersonale*

De nye blødgøringsprocesser vil stille større krav til driftspersonalets kompetence. Især pelletanlæg kræver viden og indsigt at drive korrekt. Selv om styringen i princippet kan foregå automatisk ud fra en trykfaldsmåling i reaktoren, så skal vandkvaliteten hele tiden kontrolleres, og styringsparametrene ændres ud fra de praktiske observationer, hvilket kræver stor indsigt i processen og proceskemien. Ionbytning og nanofiltrering er to automatiske procesanlæg, der kan køre uden løbende indgreb og justeringer fra driftspersonalets side. De kræver begge kun lejlighedsvis kontrolmålinger og service, og den daglige pasning kræver kun et overfladisk kendskab til udstyret og processen.

## 5.2 Ressourceforbrug

### *Energiforbrug:*

Energiforbruget vil øges ved blødgøringen, men energiforbruget til kalkfældningsmetoden og ionbytning er dog ret begrænset, hvorimod der bruges meget energi til nanofiltrering, se Tabel 5.3.

Energiforbruget er lavest for pelletanlægget, når det anvendes efter beluftning og før slutfiltrering. Hvis det anvendes til decideret efterrensning, skal der anvendes et specielt efterfilter, hvilket kræver ny pumpning og dermed øget energiforbrug. Ionbytningsanlægget kræver kun lidt mere energi end pelletanlægget, mens nanofiltreringsanlægget har et 5 - 7 gange større energiforbrug, da der anvendes en højtrykspumpe på 5 - 9 bar.

### *Kemikalieforbrug:*

De enkelte blødgøringsmetoder har vidt forskellige kemikalieforbrug. Kalkfældningsmetoden bruger base til udfældning af  $\text{CaCO}_3$  og syre til pH-justering samt eventuelt natriumkarbonat til justering af karbonatbalancen. Ionbytning bruger store mængde salt til regenerering af ionbytteren. Membranfiltrering anvender antiscalingsmidler for at forhindre udfældning på membraner samt mindre mængder rensmidler til rengøring af membraner.

Et ionbytningsanlæg anvender fra 0,32 til 0,41 kg salt ( $\text{NaCl}$ ) pr.  $\text{m}^3$  produceret vand med det største saltforbrug til blødgøring af 22 °dH vand. Pelletanlægget anvender 0,43 kg  $\text{NaOH}$  (27,65 %) pr.  $\text{m}^3$  samt meget lidt saltsyre til pH-justering (0,007  $\text{kg/m}^3$ ). Nanofiltreringsanlægget anvender meget lidt kemikalier i form af antiscalingsmiddel (0,005  $\text{kg/m}^3$ ).

### *Andre forbrugsmaterialer:*

De vigtigste andre forbrugsmaterialer er ny ionbytttermasse til ionbytningsanlægget (udskiftes hver 8. år), nye membraner til nanofiltreringsanlægget (udskiftes hver 7. år) samt løbende sandforbrug til pelletreaktoren (8,5 til 14,9  $\text{g/m}^3$  ved henholdsvis 17 og 22 °dH).

### *Vandspild:*

Alle tre metoder bruger ekstra vand, der skal bortskaffes som spildevand.

Ved ionbytningen bruges knap 2 % ekstra vand i forhold til den producerede vandmængde. Vandet bruges til regeneration af ionbytterne og skal udledes til kloak eller recipient. Det indeholder ingen giftige eller miljøfremmede stoffer ud over en ekstraordinær stor koncentration af calcium, magnesium og salt.

Nanofiltrering tilbageholder mange af vandets salte (især divalente ioner), og dette vandige koncentrat skal udledes til kloak eller recipient. Indeholder råvandet meget organisk stof eller miljøfremmede stoffer, vil disse forekomme i ekstra høj koncentration i koncentratet, og rensning kan blive nødvendigt før udledning. Ved nanofiltrering er vandspildet 10 til 12 % af den producerede vandmængde. Vandspildet kan muligvis reduceres lidt ved en anden konfiguration af selve nanofiltersystemet.

Ved pelletmetoden aftappes noget vand fra cyklonen sammen med pelletkrystallerne. Det anslås til højst 2 % af den producerede vandmængde. Vandet kan forholdsvis let udskilles fra det faste stof, hvilket skal gøres før det faste affald bortskaffes til deponering eller udnyttelse. Det fraseparerede vand kan eventuelt genbruges, hvorved vandspildet kan minimeres betydeligt. På Vombværket i Sverige har man således kun et vandspild på 0,07 %.

### 5.3 Miljøeffekter

#### *CO<sub>2</sub>-emissioner*

Som tidligere nævnt er CO<sub>2</sub>-emissionerne tæt forbundet med energiforbrug til fremstilling og især drift af anlæggene. Energiforbruget ved drift er væsentligt større for nanofiltreringsmetoden end for de to andre metoder, hvorfor CO<sub>2</sub>-emissionen (medmindre energien fremstilles CO<sub>2</sub>- neutralt) også vil være væsentlig større for denne metode.

#### *Affaldsprodukt:*

Ved ionbytning og nanofiltrering genereres ingen særlige affaldsprodukter ud over det nævnte spildevand. Ved pelletmetoden genereres derimod pellets bestående af 5 % sand og 95 % calcit. Pelletaffaldsmængden udgør ca. 200 - 300 g/m<sup>3</sup>. Okker og andre urenheder kan være blandet med disse pellets afhængigt af hvor anlægget placeres i den samlede vandbehandlingsproces. Det er i redøgørelsen ikke undersøgt, hvordan dette affald bedst og billigst kan bortskaffes i Danmark. I Holland anvendes jernholdige pellets til omsmelting af jern. Pellets er i Belgien anvendt i landbruget (van der Bruggen, et al., 2009) og kunne muligvis også bruges til at kalke landbrugsjord i Danmark afhængigt af jernindholdet (Garcia, et al., 2009).

#### *Sundhedseffekter*

Som det fremgår af Tabel 5.1, er det ved sammenligningen forudsat, at vandets hårdhed er den samme efter blødgøringen uanset teknologi. Indholdet af calcium reduceres dog lidt mere ved kalkfældningsmetoden end ved både ionbytning og nanofiltrering, mens indholdet af magnesium reduceres mere ved de to sidstnævnte metoder end ved kalkfældningsmetoden. På baggrund af de potentielle sammenhænge med sundhedseffekter, som er beskrevet i afsnit 3.3.2, vil blødgøring med kalkfældningsmetoden således kunne give anledning til 28 - 64 % flere huller i tænderne<sup>16</sup> end blødgøring med ionbytning og nanofiltrering (20 - 50 %). Tilsvarende kan denne metode potentielt give anledning til lidt større risiko for knogleskørhed, hvilket dog ikke har kunnet kvantificeres. Omvendt vil blødgøring med nanofiltrering og ionbytning kunne give anledning til 13 - 29 %<sup>17</sup> større risiko for forhøjet blodtryk og hjerte-karsygdomme end blødgøring med kalkfældningsmetoden (uændret).

---

<sup>16</sup> Se Tabel 6.19.

<sup>17</sup> Se Tabel 6.18.



## 5.4 Kemisk vandkvalitet

I det følgende er der set nærmere på den kemiske sammensætning af det producerede vand efter de forskellige metoder. I Tabel 5.1 er udgangspunktet råvand med 17 °dH, mens udgangspunktet er råvand med 22 °dH i Tabel 5.2.

Ved alle metoder kan uden problemer opnås en hårdhed i det producerede vand på 8 °dH, men sammensætningen af det producerede vand er ret forskelligt, som det ses af Tabel 5.1 og Tabel 5.2.

Ved kalkfældningsmetoden fjernes calcium og bicarbonat, mens koncentrationen af natrium forøges. Ved ionbytningsmetoden reduceres både calcium og magnesium meget, mens natrium forøges. Ved nanofiltrering reduceres alle ioner - især de divalente. Det gælder for alle metoder, at ændringer er større, jo højere hårdhed råvandet har før behandlingen.

Tabel 5.1. Sammenligning af kemiske vandparametre for råvand med 17 °dH og for blødgjort vand fremstillet ved forskellige blødgøringsmetoder.

| Vandparameter              | Råvand  | Pellet (med NaOH) |            | Ionbytning |            | Nanofiltrering |            |
|----------------------------|---------|-------------------|------------|------------|------------|----------------|------------|
|                            |         | Alene             | Opblanding | Alene      | Opblanding | Alene          | Opblanding |
| Råvand/total-vand          |         |                   | 0,250      |            | 0,471      |                | 0,438      |
| Hårdhed, °dH               | 17      | 5                 | 8          | 0          | 8          | 1              | 8          |
| Hårdhed, mmol/l            | 3,03    | 0,89              | 1,43       | 0          | 1,43       | 0,18           | 1,43       |
| Ca, mmol/l                 | 2,50    | 0,36              | 0,90       | 0          | 1,18       | 0,15           | 1,18       |
| Ca, mg/l                   | 100,2   | 14,4              | 35,9       | 0          | 47,2       | 5,9            | 47,2       |
| Mg, mmol/l                 | 0,53    | 0,53              | 0,53       | 0          | 0,25       | 0,03           | 0,25       |
| Mg, mg/l                   | 12,9    | 12,9              | 12,9       | 0          | 6,1        | 0,76           | 6,1        |
| Na, mmol/l                 | 2,17    | 4,31              | 3,78       | 8,24       | 5,38       | 0,24           | 1,09       |
| Na, mg/l                   | 50      | 99,2              | 86,9       | 189,4      | 123,8      | 5,5            | 25,0       |
| -HCO <sub>3</sub> , mmol/l | 4,26    | 2,12              | 2,66       | 4,26       | 4,26       | 0,17           | 1,96       |
| -HCO <sub>3</sub> , mg/l   | 260     | 129,5             | 162,1      | 260        | 260        | 10,7           | 119,7      |
| pH                         | 7,0-8,0 | 8,5-8,8           | 7,5        | 7,0-8,0    | 7,0-8,0    | 6,1            | 7,0-7,5    |

Tabel 5.2. Sammenligning af kemiske vandparametre for råvand med 22 °dH og for blødgjort vand fremstillet ved forskellige blødgøringsmetoder.

| Vandparameter              | Råvand  | Pellet (med NaOH) |            | Ionbytning |            | Nanofiltrering |            |
|----------------------------|---------|-------------------|------------|------------|------------|----------------|------------|
|                            |         | Alene             | Opblanding | Alene      | Opblanding | Alene          | Opblanding |
| Råvand/total-vand          |         |                   | 0,176      |            | 0,364      |                | 0,333      |
| Hårdhed, °dH               | 22      | 5                 | 8          | 0          | 8          | 1              | 8          |
| Hårdhed, mmol/l            | 3,92    | 0,89              | 1,43       | 0          | 1,43       | 0,18           | 1,43       |
| Ca, mmol/l                 | 3,24    | 0,21              | 0,75       | 0          | 1,18       | 0,15           | 1,18       |
| Ca, mg/l                   | 130     | 8,5               | 29,9       | 0          | 47,3       | 5,9            | 47,3       |
| Mg, mmol/l                 | 0,68    | 0,68              | 0,68       | 0          | 0,25       | 0,03           | 0,25       |
| Mg, mg/l                   | 16,5    | 16,5              | 16,5       | 0          | 6,0        | 0,75           | 6,0        |
| Na, mmol/l                 | 2,61    | 5,64              | 4,88       | 10,45      | 7,60       | 0,29           | 1,06       |
| Na, mg/l                   | 60      | 129,7             | 112,3      | 240,5      | 174,8      | 6,6            | 24,4       |
| -HCO <sub>3</sub> , mmol/l | 5,57    | 2,54              | 3,30       | 5,57       | 5,57       | 0,23           | 2,01       |
| -HCO <sub>3</sub> , mg/l   | 340     | 155,1             | 201,3      | 340        | 340        | 13,9           | 122,6      |
| pH                         | 7,0-8,0 | 8,5-8,8           | 7,5        | 7,0-8,0    | 7,0-8,0    | 6,1            | 7,0-7,5    |

## Central blødgøring af drikkevand

Kalkfældningsmetoden er den mest selektive, idet den primært fjerner calcium, der erstattes af natrium. Endvidere fjernes noget bikarbonat, mens de øvrige ioner i vandet ikke ændres. Opblanding med lidt ubehandlet råvand kan være nødvendig for at opnå en præcis hårdhed på 8 °dH.

Ved nanofiltrering renses vandet mere, og det skal derfor fortyndes med betydelige mængder ikke blødgjort vand for at opnå en hårdhed på 8 °dH. Nanofiltrering kan dog give vidt forskellige vandkvaliteter afhængigt af den anvendte membran og nanofiltreringsanlæggets konfiguration. Den totale saltkoncentration i det producerede vand vil dog altid ligge noget lavere end i råvandet. I tabellerne er forudsat, at der opnås en resthårdhed på 1 °dH ved selve nanofiltreringen.

Ved ionbytning forøges natriumkoncentrationen i vandet meget betydeligt. Her tilføres 1,15 mg natrium ved fjernelse af 1 mg calcium, og der tilføres 1,89 mg natrium ved fjernelse af 1 mg magnesium. De øvrige ioner påvirkes ikke ved blødgøringsprocessen. Det ionbyttede vand skal blandes med ikke blødgjort vand for at opnå en hårdhed på 8 °dH. Samlet stiger det totale saltindhold i det producerede vand lidt, fordi der tilføres mere natrium ved ionbytningsprocessen, end der fjernes af calcium og magnesium.

### 5.5 Sammenligning af nøgleparametre.

Nedenfor er i tabelform sammenstillet forskellige nøgleparametre for de tre udvalgte blødgøringsmetoder.

*Table 5.3: Sammenligning af forskellige nøgleparametre for de tre udvalgte blødgøringsmetoder. Ved kalkfældningsmetoden er forudsat anvendelse af fødevareregodkendte kemikalier, hvilket giver næsten dobbelt så stor kemikaliepris i forhold til anvendelse af tekniske kemikalier.*

|  | Ionbytning     | Nanofiltrering | Kalkfældningsmetoden |
|--|----------------|----------------|----------------------|
| Investering, kr. pr. m <sup>3</sup> /h | 5.500-11.800   | 18.300-38.900  | 24.600-29.000        |
| Arealbehov, faktor                     | 1,0            | 1,7-2,7        | 2,0-3,7              |
| Drift og vedligehold, faktor           | 1,0            | 1,5            | 5,0                  |
| Levetid, år                            | 20             | 15             | 20-25                |
| Energiforbrug, kWh/m <sup>3</sup>      | 0,05 - 0,07    | 0,26-0,34      | 0,047                |
| Kemikalieforbrug, kg/m <sup>3</sup>    | 0,32-0,41      | 0,005          | 0,43                 |
| Andre forbrugsmaterialer               | Ionbyttermasse | Membraner      | Sand                 |
| Vandspild, % af råvand                 | 1,5-2,0        | 8-12           | 1-2                  |
| Affaldsprodukt, g/m <sup>3</sup>       | 0              | 0              | 0,18-0,28            |

### 5.6 Referencer

- Bruggen, B. van der, Goosens, H., Everard, P.A., Stengée, K. & Rogge, W. (2009): Cost-benefit analysis of central softening for production of drinking water. *Journal of Environmental Management*, 91, pp 541-549.
- Garcia, A.L.T, Godskesen, B., Nielsen, K.D., Wind, E. & Rothuizen, E.D. (2009): Life Cycle Assessment on Central Softening of Drinking Water in

## Central blødgøring af drikkevand

Copenhagen. DTU Management in co-operation with Københavns Energi A/S.

## 6 Samfundsøkonomisk screening

I dette kapitel præsenteres den samfundsøkonomiske screeningsanalyse af blødgøring af drikkevand. Kapitlet indledes med et afsnit, som beskriver den samfundsøkonomiske metode efterfulgt af en beskrivelse af de opstillede scenarier og centrale forudsætninger og antagelser. Dernæst gennemgås de beregningsmæssige forudsætninger og anvendte data, og i afsnit 6.5 og 6.6 præsenteres analysens resultater og robustheden af disse i form af følsomhedsanalyser samt beskrivelse af de ikke-værdisatte effekter.

### 6.1 Samfundsøkonomisk metode

I grundlaget for en strategisk beslutning indgår en række forskellige aspekter, hvoraf en samfundsøkonomisk vurdering kun er ét blandt flere. Den samfundsøkonomiske vurdering er en økonomisk analyse, hvor der foretages en konsistent afvejning af et tiltags gevinster og omkostninger for samfundet som helhed.

Resultatet af den samfundsøkonomiske vurdering udtrykker summen af fordele og ulemper ved tiltagets økonomiske konsekvenser. I den samfundsøkonomiske analyse medregnes såvel de direkte økonomiske konsekvenser som en række af de miljømæssige og øvrige eksterne omkostninger og effekter udtrykt i kr.

Vurderingen af et tiltags samlede lønsomhed baseres på værdien af det samfundsøkonomiske overskud i forhold til en referencesituation uden tiltaget. En positiv samlet værdi indikerer, at det vil være fordelagtigt for samfundet samlet set at gennemføre projektet. En negativ værdi indikerer det modsatte.

I vurderingen af det samfundsøkonomiske resultat er det vigtigt at holde sig for øje, at der inden for miljøøkonomi som oftest er elementer, der ikke inddrages i analysen. Endvidere er nærværende analyse en screening, hvilket gør, at der må foretages en række forsimplende antagelser og afgrænsninger. Det er således vigtigt at tage en række andre forhold i betragtning, som ikke fremgår af en simpel vurdering af analysens centrale økonomiske resultat.

Det drejer sig om følgende tre elementer:

- Ikke-værdisatte effekter
- Usikkerhed
- Fordelingsmæssige konsekvenser

*Ikke-værdisatte effekter*

En samfundsøkonomisk analyse vil sjældent kunne medtage den økonomiske påvirkning af samtlige konsekvenser af et givent tiltag. En række miljøeffekter og andre eksterne omkostninger må nødvendigvis udelades i praksis, enten fordi der ikke findes pålidelige metoder til kvantificering af effektens størrelse, eller fordi der ikke findes brugbar værdisætning (enhedspris) for miljøeffekten. Endvidere udelades effekter, som på forhånd og med god sikkerhed vurderes at være uden betydning for resultatet, fordi effekten er meget lille og værdisætning af effekten vil være ressourcekrævende eller vanskelig.

Da nærværende analyse er en screening, betyder det, at der inden for rammerne af opgaven er en række effekter, som ikke er opgjort og værdisat. Betydningen af de ikke medtagne effekter vil blive diskuteret i afsnit 6.6.

*Usikkerhed*

For en del af de effekter, der medtages i screeningsanalysen, er både kvantificeringen af effekten og værdisætningen usikker. Følsomhedsanalyser er derfor en meget væsentlig del af den samfundsøkonomiske screeningsanalyse, idet de sikrer, at betydningen af sådanne usikkerheder afdækkes. Følsomhedsanalyserne i nærværende analyse fremgår af afsnit 6.6.

*Fordelingsmæssige konsekvenser*

Den samfundsøkonomiske vurdering vil aldrig kunne udgøre hele vurderingsgrundlaget, uanset om alle relevante effekter kunne værdisættes. Fordelingsmæssige hensyn spiller også en væsentlig rolle. Det vil sige, hvordan gevinster og omkostninger rammer forskellige befolkningsgrupper eller virksomheder. Nærværende screeningsanalyse belyser ikke eksplicit fordelingsmæssige konsekvenser.

## 6.2 Scenarier og resultatopgørelse

Som beskrevet i afsnit 3.2.1, er der opstillet en række scenarier til at belyse de samfundsøkonomiske konsekvenser under forskellige forudsætninger. Scenarierne er gengivet i nedenstående tabel.

Tabel 6.1 *Oversigt over scenarier*

| Hovedscenarium:          | Underscenarium: Teknologi og vandværksstørrelse   |   |   |
|--------------------------|---|---|---|
|                          | A: Pellet-metoden<br>1.500.000 m <sup>3</sup> /år | B: Nanofiltrering<br>160.000 m <sup>3</sup> /år | C: Ionbytning<br>160.000 m <sup>3</sup> /år |
| I: Fra 22 odH til 8 odH  | Scenarium IA                                      | Scenarium IB                                    | Scenarium IC                                |
| II: Fra 17 odH til 8 odH | Scenarium IIA                                     | Scenarium IIB                                   | Scenarium IIC                               |

Resultaterne af den samfundsøkonomiske screening opgøres som kr. per m<sup>3</sup> drikkevand afsat fra vandforsyningen. Det vil sige kr. per m<sup>3</sup> drikkevand af hårdhed 8 °dH. Denne tilgang er valgt af flere årsager:

## Central blødgøring af drikkevand

- For det første er det nemmere at fortolke dette resultat end de samlede omkostninger i f.eks. mio. kr.
- For det andet er analysen delt op i de nævnte underscenerier, som er opstillet, fordi der er forskellige lokale forhold i Danmark. Således har vandet på forskellige vandværker forskellige grader af hårdhed. Derfor vil resultaterne af de enkelte underscenerier ikke være repræsentative for hele Danmark, og dermed vil det samlede resultat som fås ved at opregne til f.eks. mio. kr. for hvert af scenarierne ikke give et reelt udtryk for de samlede omkostninger eller gevinster.

Analysen belyser mulige fremtidige alternative måder at blødgøre vand på i Danmark. De valgte teknologier eksisterer alle i dag og kan derfor principielt ibrugtages allerede nu. Til analytisk formål er 2015 valgt som beregningsår ud fra en betragtning om, at der vil gå lidt tid fra en evt. beslutning til implementering.

For så vidt angår fortrængt energiproduktion er det antaget, at kulkraftværker er den marginale energikilde, som fortrænges ved reduceret energiforbrug.

Analysen belyser en steady state situation, hvilket vil sige, at den fulde effekt af tiltaget belyses. Det betyder, at der ikke er taget højde for en eventuel indsvingningsperiode for de forskellige effekter.

### 6.3 Centrale forudsætninger og antagelser

I det følgende redegøres for en række centrale forudsætninger og antagelser anvendt i den samfundsøkonomiske analyse. Tabellen nedenfor summerer disse.

Tabel 6.2 Centrale forudsætninger

| Parameter                              | Værdi/forudsætning   |
|--|--|
| Grundlæggende metode                   | Markedsprismetode baseret på velfærdsøkonomiske principper |
| Diskonteringsfaktor                    | 5 %  |
| Nettoafgiftsfaktor                     | 17 %   |
| Moms                                   | 25 %   |
| Skatteforvridningsfaktor <sup>1)</sup> | 20 %   |
| Prisniveau                             | 2010-priser  |

1) Der regnes ikke med skatteforvridning i den centrale analyse, men alene i en følsomhedsanalyse.

### *Diskonteringsfaktoren*

For at kunne omregne værdier, som falder over tid, til en årlig værdi benyttes en diskonteringsfaktor. Diskonteringsfaktoren fastsættes af Finansministeriet. Den seneste officielle værdi er 6 %, men der arbejdes på en opdateret samfundsøkonomisk vejledning fra Finansministeriet. I denne forventes det, at der anbefales en værdi på 5 %. Det er valgt at benytte denne værdi i analysen.

I nogle tilfælde har det ikke været muligt inden for rammerne af analysen at vurdere, om effekten er forbundet med en latensperiode<sup>18</sup>, som gør, at effekten først indtræder en vis periode efter blødgøringen er sket. I disse tilfælde er effekten opgjort uden diskontering. I en detaljeret analyse, som går væsentligt ud over rapportens screeningsniveau, ville man for at være præcis skulle tilbagediskontere omkostninger hertil baseret op oplysninger om latensperioden.

### *Skatteforvridning*

Ifølge Finansministeriets anbefalinger skal der medregnes et skatteforvridningstab for alle nettoomkostninger, som påføres den offentlige sektor. Skatteforvridningstab er sat til 20 % i overensstemmelse med anbefalingen i Finansministeriets vejledning. Det betyder, at alle omkostninger og indtægter, som påføres den offentlige sektor, skal tillægges 20 %, fordi offentlige omkostninger antages dækket via skatter eller afgifter. Skatter har en forvridende effekt på aktiviteten i samfundet. Populært sagt vil forbrugerne opleve et nytte- eller forbrugstab, fordi de forbruger mindre (og har et lavere aktivitetsniveau), når de betaler skat, end når de ikke gør. Det er dette tab, som skatteforvridningen opgør.

Hvis et tiltag finansieres fuldt ud af brugerbetaling, bliver nettoeffekten i forhold til selve skatteopkrævningen nul, fordi omkostninger og indtægter for staten modsvarer hinanden, og der er dermed ikke nogen skatteforvridningseffekt.

Når man analyserer ændringer i omkostningerne til drikkevand, befinder man sig i en gråzone mellem offentligt finansierede omkostninger og privat finansierede. En beslutning om etablering af blødgøring af vand skal finansieres via brugerbetaling (i henhold til hvile-i-sig-selv princippet), og påvirker således i princippet ikke selve skatteopkrævningen. Øgede udgifter for vandværket medfører højere priser for forbrugerne, som vil påvirke forbruget (der vil være et dødvægtstab ved øgede priser). Forvridningen sker imidlertid ikke som følge af øgede skatter, men som følge af en forhøjet pris. Samtidig vil der ske en tilsvarende forvridning, hvis omkostningerne til blødgøring af vand bæres direkte af den enkelte husholdning. Dette vil ligeledes give anledning til en forvridning af forbruget. Igen - ikke fordi skatteopkrævningen påvirkes, men fordi prisen på forbrug af vand forhøjes.

I denne analyse er det afledte dødvægtstab ikke estimeret.

---

<sup>18</sup> Som f.eks. sundhedseffekterne

## Central blødgøring af drikkevand

Hvis man medregner skatteforvridning for vandværkets øgede omkostninger (og samtidig undlader at estimere forvridningstabet for forbrugere, når de selv afholder omkostningerne, som det er tilfældet i denne analyse), vil man således kun medtage forvridningen for den ene aktør. Det taler for, at der ikke skal medregnes skatteforvridning ved ændringen i de offentlige udgifter, selvom metoden som udgangspunkt tilsiger dette.

Det er i analysen valgt som udgangspunkt ikke at medregne et skatteforvridningstab, men i en følsomhedsanalyse vises effekten af at medregne skatteforvridning.

### *Nettoafgiftsfaktor*

Der regnes i markedspriser i analysen. For at udtrykke produktionsgoders marginale værdiproduktivitet i et prisniveau, der afspejler markedspris og dermed betalingsvilligheden for de resulterende produkter, skal produktionsgodernes købspriser forhøjes med en gennemsnitlig nettoafgiftsfaktor. Nettoafgiftsfaktoren udtrykker det afgiftstryk, der i gennemsnit findes på forbrugsvarer.

Der anvendes en nettoafgiftsfaktor på 17 % svarende til den anbefalede værdi i den seneste version af Finansministeriets vejledning. En undtagelse herfra er dog elprisen, som har en meget anderledes afgift, hvorfor denne er indregnet direkte i dens reelle markedspris. Ligeledes er forbrugsgoder, som det med sikkerhed vides er momsbelagte, opregnet med moms i stedet for den gennemsnitlige nettoafgiftsfaktor.

Ændringer i forbrugernes forbrug vil give anledning til afledte effekter på forbruget. Der foretages derfor en afgiftskorrektion af afgiftskonsekvenserne. Helt konkret betyder det, at hvis en forbruger sparer penge på f.eks. et husholdningsapparat, så vil forbrugeren bruge pengene på varer, som i gennemsnit er afgiftspålagt med nettoafgiftsfaktoren. Det vil sige, at der vil være en lille modsat rettet effekt af den primære afgiftsbetaling. Den betegnes i analysen afgiftskorrektion.

### *Beregningspriser og værdisætning af miljøeffekter*

De samfundsøkonomiske konsekvenser fra ændret energiforbrug er implicit medregnet i de anvendte enhedspriser på input og produkter for de betragtede processer.

Et særligt aspekt knytter sig til miljøeffekterne fra de tidligere led og fortrængt produktion (op- og nedstrømsprocesser). Kun i det omfang disse er fuldt internaliserede via afgifter på de pågældende markeder, kan de også betragtes som medregnet i de ovennævnte priser.

Sparede miljøeffekter fra fortrængte processer er i denne analyse eksplicit medregnet på basis af opgørelsen af ændret energiproduktion. Det er alene luftemissioner, som kan værdisættes med den nuværende viden. Der er redegjort nærmere for de anvendte priser i det efterfølgende afsnit.



## 6.4 Beregningsmæssige forudsætninger og data

I dette afsnit beskrives de beregningsmæssige forudsætninger og tilhørende data. Det skal bemærkes, at da der er tale om en screeningsanalyse, er data for en række effekter baseret på eksisterende kilder og forhåndenværende oplysninger. Uddybning af forudsætningerne kan findes i kapitel 4 og 5, hvor teknologibeskrivelserne er gennemgået, og metoderne er sammenlignet. I afsnit 3.3 er givet en beskrivelse af de generelle konsekvenser af blødgøring.

### 6.4.1 Tværgående antagelser og data

I dette afsnit præsenteres tværgående antagelser og data.

#### *Vandforbrug*

I beregningerne er det antaget, at en person bruger i gennemsnit 42,80 m<sup>3</sup>/år (DANVA, 2009) i husholdningerne. Ydermere er det antaget, at husholdningerne står for 65,3 % af vandforbruget (DANVA, 2009). Som det er nævnt tidligere omfatter hovedanalysen alene vand leveret til husholdningerne.

#### *Emissionsfaktorer*

De miljømæssige konsekvenser ved ændringerne for vandværkerne og husholdninger er beregnet og prissat. Hertil er anvendt data i Tabel 6.3.

Tabel 6.3 Emissionsfaktorer ved energiforbrug og beregningspriser (markedspris), 2010-priser

|                          | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O | SO <sub>2</sub> | NO <sub>x</sub> |
|--------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Emissionsfaktorer, g/kwh | 862             | 17              | 8                | 238             | 620             |
| Pris, kr./ton            | 149             | 3.129           | 46.190           | 74.000          | 48.000          |

Kilde: Emissionsfaktorer og beregningspriser for CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O: Energistyrelsen (2010). Beregningspriser for SO<sub>2</sub> og NO<sub>x</sub>: DMU (2010). Priserne er opskrevet til 2010-niveau med inflation og stigning i BNP/capita.

### 6.4.2 Vandforsyningerne

I modellen arbejdes med 3 forskellige anlæg i hvert af de to scenarier:

- A - Anvendelse af kalkfældningsmetoden
- B - Anvendelse af nanofiltrering
- C - Anvendelse af ionbytning

I Tabel 6.4 ses anlægsdata for vandforsyningen opdelt på underscenerier. En mere detaljeret opgørelse af omkostningerne findes i Bilag B. Bemærk at omkostningerne er opgjøret i faktorpriser, dvs. før tillæg af nettoafgiftsfaktoren.

Anvendes pelletmetoden (A) med et anlæg med en kapacitet på 1,5 mio. m<sup>3</sup> årligt til at blødgøre vandet fra 22 °dH til 8 °dH, koster det 0,39 kr./m<sup>3</sup> i investeringsomkostninger og 1,87 kr./m<sup>3</sup> i driftsomkostninger.

## Central blødgøring af drikkevand

Blødgøres vandet i stedet for fra 17 °dH til 8 °dH, så vil investeringsomkostningerne forblive de samme, men driftsomkostningerne vil falde med ca. 60 øre/m<sup>3</sup>. Det er her antaget, at levetiden på blødgøringsanlægget er 20 år. Det er i driftsomkostningerne antaget, at der anvendes fødevarer godkendte kemikalier, hvilket giver en relativt høj pris<sup>19</sup>. Da udgifterne til kemikalier udgør ca. 70 % af driftsomkostningerne (se Bilag B), er dette væsentligt. Det er endvidere antaget, at der er omkostninger forbundet med bortskaffelsen af de brugte pellets. Såfremt ovennævnte omkostninger kan reduceres, vil driftsomkostningen nærmere svare til, hvad der er oplyst til KE fra svenske vandforsyninger, der anvender denne teknik. I afsnit 6.6 er der foretaget følsomhedsanalyser af betydningen af at ændre på driftsomkostningerne for alle typer af vurderede anlæg.

Anvendelse af nanofiltrering (B) har de højeste investeringsomkostninger på 0,70 kr./m<sup>3</sup> på et anlæg med en årlig kapacitet på 160.000 m<sup>3</sup>, men denne teknologi har de laveste driftsomkostninger af de tre anlæg på 0,71 kr./m<sup>3</sup>. Dette anlæg har en levetid på 15 år i modsætning til de andre 2 anlæg.

Blødgøring af vandet fra 22 °dH til 8 °dH med ionbytningsmetoden (C) på et anlæg med en årlig kapacitet på 160.000 m<sup>3</sup> koster 0,18 kr./m<sup>3</sup> i investering og 0,99 kr./m<sup>3</sup> i driftsomkostninger. Blødgøres vandet i stedet fra 17 °dH til 8 °dH, falder driftsomkostningerne med 30 øre/m<sup>3</sup>, mens investeringen forbliver den samme per m<sup>3</sup>.

Tabel 6.4 Anlægsdata for vandforsyning opdelt på underscenerier i faktorpriser

|   |                          | IA          | IB          | IC          | IIA         | IIB         | IIC         |
|---|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Hårdhed                                       | °dH                      | 22          | 22          | 22          | 17          | 17          | 17          |
| Levetid på anlægget                           |                          | 20          | 15          | 20          | 20          | 15          | 20          |
| Behandlet vandmængde                          | m <sup>3</sup> /år       | 1.500.000   | 160.000     | 160.000     | 1.500.000   | 160.000     | 160.000     |
| Investering, total                            | Kr.                      | 7.381.440   | 1.166.976   | 352.800     | 7.381.440   | 1.065.960   | 352.800     |
| Driftsudgifter, total                         | Kr./år                   | 2.800.615   | 114.081     | 157.380     | 1.917.115   | 98.967      | 109.212     |
| <b>Investeringsomkostninger</b>               | <b>Kr./m<sup>3</sup></b> | <b>0,39</b> | <b>0,70</b> | <b>0,18</b> | <b>0,39</b> | <b>0,64</b> | <b>0,18</b> |
| <b>Driftsomkostninger</b>                     | <b>Kr./m<sup>3</sup></b> | <b>1,87</b> | <b>0,71</b> | <b>0,99</b> | <b>1,28</b> | <b>0,62</b> | <b>0,68</b> |
| <b>Behandling af spildevand fra processen</b> | <b>Kr./m<sup>3</sup></b> | <b>0,60</b> | <b>3,61</b> | <b>0,57</b> | <b>0,60</b> | <b>3,11</b> | <b>0,48</b> |

Kilde: COWI på grundlag af samtaler med leverandører og anlæg.

Note: Bemærk, at priserne er opgjort i faktorpriser som opregnes med nettoafgiftsfaktoren i den samlede analyse.

<sup>19</sup> NaOH i fødevarer kvalitet koste 148 % mere end i teknisk kvalitet, mens saltsyre koster ca. 100 % mere i fødevarer kvalitet end i teknisk kvalitet

I analysen er for anvendelsen af pelletmetoden valgt et stort anlæg på 1,5 mio. m<sup>3</sup>/år. Havde man i stedet valgt det lille anlæg ville investeringsomkostningerne i scenarie IA blive 1,62 kr./m<sup>3</sup>, og driftsomkostningerne ville være 1,80 kr./m<sup>3</sup>. Der er derfor som forventet stordriftsfordele forbundet med blødgøringsteknologierne. Dette vurderes i følsomhedsanalyserne.

Det er antaget, at spildevandet ledes til rensningsanlæg, og de i Tabel 6.4 angivne omkostninger til håndtering af spildevand fra processerne er estimeret på dette grundlag. Ved udledning af spildevand varierer afgifterne mellem 20 til 35 kr./m<sup>3</sup>. I modellen er der regnet med, at det koster 30 kr./m<sup>3</sup> for at aflede det genererede spildevand til kloak. I en følsomhedsanalyse belyses effekten af ikke at inkludere omkostningerne til spildevandshåndtering (f.eks. såfremt spildevandet fra processen kan ledes direkte til havet).

### 6.4.3 Levetid og elforbrug for husholdningsapparater

Når vandet blødgøres påvirkes levetiden og energiforbruget som nævnt for en række husholdningsapparater. I modellen medtages kaffemaskiner, opvaskemaskiner, vaskemaskiner og elkedler. De anvendte prisdata for husholdningsapparaterne fremgår nedenfor.

Tabel 6.5 Priser på husholdningsapparater, markedspriser (dvs. inklusiv moms)

| Apparat    | Kaffemaskine | Opvaske-maskine | Vaskemaskine | Elkedel |
|------------|--------------|-----------------|--------------|---------|
| Pris i kr. | 300          | 4.000           | 4.000        | 300     |

Kilde: COWI, egne vurderinger ud fra diverse hjemmesider, herunder [www.superbest.dk](http://www.superbest.dk), punkt1

I Tabel 6.6 ses de anvendte forudsætninger om levetiderne for de forskellige hårdhedsgrader i vandet.

Tabel 6.6 Levetider for husholdningsapparater ved 3 hårdheder, år

| Hårdheder, °dH | Kaffemaskine | Opvaske-maskine | Vaske-maskine | Elkedel |
|----------------|--------------|-----------------|---------------|---------|
| 22             | 7            | 10              | 10            | 7       |
| 17             | 9            | 12              | 12            | 9       |
| 8              | 12           | 15              | 15            | 12      |

Kilde: COWIs skøn baseret på Garcia, et al. (2009) til estimation af levetid for hårdhed 22 °dH. for hårdhed 8 °dH. For hårdhed 17 °dH er anvendt en interpolation.

## Central blødgøring af drikkevand

Elforbruget til apparaterne reduceres, når vandets hårdhed reduceres. Den anvendte elpris ses i nedenstående tabel.

Tabel 6.7 Elpris for forbrugeren, kr./kWh

| Priselement    | Værdi, kr./kWh |
|----------------|----------------|
| Afgifter       | 0,68           |
| Elpris         | 0,54           |
| Pris uden moms | 1,22           |
| Moms (25 %)    | 0,31           |
| Pris i alt     | 1,53           |

Kilde: Energistyrelsen (2010)

Energiforbruget ved de forskellige hårdheder er opgjort i nedenstående tabel.

Tabel 6.8 Energiforbrug for husholdningsapparater ved 3 hårdheder, MJ/år/person

| Hårdheder, °dH | Kaffemaskine | Opvaskemaski-<br>ne | Vaskemaskine | Elkedel |
|----------------|--------------|---------------------|--------------|---------|
| 22             | 218          | 214                 | 208          | 138     |
| 17             | 212          | 208                 | 202          | 134     |
| 8              | 200          | 197                 | 191          | 127     |

Kilde: Garcia, et al. (2009) til estimation af levetid for hårdhed 22 °dH. For hårdhed 8 °dH skøn fra COWI.

### 6.4.4 Levetid af installationer

Når vandet blødgøres påvirkes levetiden som nævnt for en række installationer. De anvendte priser på installationerne er vist i nedenstående tabel.

Tabel 6.9 Priser på installationer i pris pr. stk., markedspriser (dvs. inklusiv moms)

| Installation | Vandvarmere | Varmtvands-<br>beholdere | Toiletter | Vandhaner |
|--------------|-------------|--------------------------|-----------|-----------|
| Pris i kr.   | 3.000       | 4.000                    | 1.200     | 600       |

Kilde: Egne vurderinger fra COWI ud fra diverse hjemmesider.

## Central blødgøring af drikkevand

Af Tabel 6.10 fremgår de vurderede effekter på installationernes levetider. Som beskrevet i afsnit 3.3.2 skønnes det baseret på samtaler med VVS-folk, at levetiderne øges med 50 % for vandvarmere, varmtvandsbeholdere og toiletter, hvis vandet blødgøres fra hårdhed 22 °dH til hårdhed 8 °dH. For hårdhed 17 °dH er anvendt interpolation.

Tabel 6.10 Levetider for installationer ved 3 hårdheder, år

| Hårdheder, °dH | Vandvarmere | Varmtvandsbeholdere | Toiletter | Vandhaner |
|----------------|-------------|---------------------|-----------|-----------|
| 22             | 20          | 20                  | 15        | 20        |
| 17             | 24          | 24                  | 19        | 22        |
| 8              | 30          | 30                  | 25        | 25        |

Kilde: Egne vurderinger i COWI. Størrelsesordenen svarer til Brüggeren, et al, (2009)

### 6.4.5 Forbrug af vaskepulver

Forbruget af vaskepulver ved de forskellige hårdheder er opgjort i nedenstående tabel.

Tabel 6.11 Forbrug af vaskepulver ved 3 hårdheder, kg/person/år

| Hårdheder, °dH | Vaskepulver |
|----------------|-------------|
| 22             | 8,5         |
| 17             | 6,9         |
| 8              | 4,0         |

Kilde: Garcia, et al. (2009).

Der er regnet med en pris på 15 kr./kg for vaskepulver baseret på prisoplysninger fra diverse supermarkeder.

### 6.4.6 Vedligehold af husholdningsapparater, kalkfjerner og tid

Jo mere kalk, der er i vandet, jo oftere skal elkedler og kaffemaskiner afkalkes. Det er antaget, at man bruger kalkfjerner eller eddike til dette formål. Prisen er angivet nedenfor.

## Central blødgøring af drikkevand

Tabel 6.12 Priser på kalkfjerner, kr./liter, markedspris (dvs. inklusiv moms)

| Produkt     | Kalkfjerner |
|-------------|-------------|
| Pris, kr./l | 20          |

Kilde: Egne vurderinger af COWI ud fra at en liter kalkfjerner koster ca. 30 kr. Da nogen i stedet bruger eddike, er vurderet en pris på 20 kr.

Det er skønnet, at man bruger ca. dobbelt så meget kalkfjerner, hvis vandets hårdhed er 22 °dH i stedet for 8 °dH, se Tabel 6.13.

Tabel 6.13 Mængde kalkfjerner til vedligehold, liter/år/person

| Hårdheder, °dH | Kaffemaskine | Elkedel |
|----------------|--------------|---------|
| 22             | 1            | 1,0     |
| 17             | 0,7          | 0,7     |
| 8              | 0,4          | 0,4     |

Kilde: Garcia, et al. (2009)

Den tid, som forbrugeren bruger på at afkalke kaffemaskiner og elkedler, er opgjort og værdisat. Den anvendte tidsværdi følger de officielle retningslinjer for værdisætning af tid på transportområdet og er således sat til 77 kr./time<sup>20</sup>.

Det er vurderet, at en person bruger 2 - 3 minutter hver måned på at afkalke henholdsvis kaffemaskine og elkedel ved de høje hårdhedsgrader, og at forbrugertiden tilnærmelsesvis halveres ved blødgøring af vand til hårdhed 8 °dH.

Tabel 6.14 Forbrugertid til afkalkning, timer/år/person

| Hårdheder, °dH | Kaffemaskine | Elkedel |
|----------------|--------------|---------|
| 22             | 0,55         | 0,55    |
| 17             | 0,43         | 0,43    |
| 8              | 0,20         | 0,20    |

Kilde: Egne vurderinger af COWI.

### 6.4.7 Rengøring af baderum m.m.

Det er vurderet, at man, ligegyldigt om hårdheden i vandet er 22 °dH eller 8 °dH, vil bruge den samme tid på at gøre rent ved vandhaner, baderum, vask m.m. Dog vil der være en ændring i den mængde og koncentrering af rengøringsmiddel, man bruger.

<sup>20</sup> Kilde: Tidsværdi for persontime er taget fra nøgletalskataloget i 2010 priser.

## Central blødgøring af drikkevand

I Tabel 6.15 ses tidsforbruget og mængden af kalkfjerner, den enkelte bruger om året. Det er her vurderet, at man bruger 5 minutter hver anden måned på fjernelse af kalk uanset vandhårdheden<sup>21</sup>.

Tabel 6.15 Rengøring

| Hårdheder, °dH | Liter | Timer/år/person |
|----------------|-------|-----------------|
| 22             | 2,0   | 0,50            |
| 17             | 1,5   | 0,50            |
| 8              | 1,0   | 0,50            |

Kilde: Egne vurderinger af COWI.

### 6.4.8 Forbrug af sæbe til personlig hygiejne

Når hårdhedsgraden i vandet reduceres, har det en betydning for mængden af sæbe og shampoo, man anvender. Prisen på sæbe fremgår af nedenstående tabel.

Tabel 6.16 Priser på forbrugsprodukter, kr./kg, markedspris (dvs. inklusiv moms)

| Produkt | Sæbe |
|---------|------|
| Pris    | 40   |

Kilde: Egne vurderinger af COWI ud fra [www.superbest.dk](http://www.superbest.dk)

Forbruget af sæbe til personlig hygiejne fremgår af nedenstående tabel.

Tabel 6.17 Forbrug af sæbe til personlig hygiejne, kg/person/år

| Hårdheder, °dH | Sæbemængde |
|----------------|------------|
| 22             | 2,7        |
| 17             | 2,3        |
| 8              | 1,9        |

Kilde: Garcia, et al. (2009).

### 6.4.9 Sundhedseffekter

De økonomiske tal for sundhedseffekterne er meget usikre, se 3.3.2. Rygaard, et al. (2010) har som nogle af de få sat økonomi på de sundhedsmæssige konsekvenser, og det er derfor valgt at benytte det samme grundlag i nærværende analyse. Der henvises således til deres artikel for en nærmere beskrivelse af grundlaget.

<sup>21</sup> Er sat ind som en variabel i modellen for at kunne ændre på denne værdi om ønsket.

## Central blødgøring af drikkevand

I Tabel 6.18 ses de primære nøgletal for hjertetilfælde. Da magnesiumindholdet i vandet ikke ændres ved kalkfældningsmetoden, giver blødgøring med denne metode ingen ændret sundhedseffekt.

For de to andre metoder, hvor magnesiumindholdet reduceres, er der med estimationsmetoden fra Rygaard, et al. (2009) opgjort, at der i scenarie I vil være 29 % flere tilfælde, hvilket vil koste 176 kr./person/år (ligeledes med estimationsmetoden fra Rygaard, et al. (2009)). (hvilket jo er meget usikkert). For scenarie II vil der være 13 % flere, hvilket vil koste 81 kr./person/år. Dette er baseret på Ryland, et al. (1991), som fandt, at den relative risiko for mænd for at dø af iskæmiske hjertesygdomme (lokal blodmangel p.g.a. blodpropper) steg med 0,002 per mg/l ændring i magnesium indholdet i drikkevandet. Rygaard, et al. (2010) antager beregningsmæssigt, at dette kan overføres til alle hjertekar-sygdomme som følge af ændringer i magnesiumindholdet, hvilket er meget usikkert, hvad de også pointerer. Denne sundhedsrelaterede omkostning er stor, og betydningen af den bør klart indgå i de efterfølgende følsomhedsanalyser.

Tabel 6.18 Nøgletal for hjertetilfælde<sup>22</sup>

|                            | Enhed          | IA | IB          | IC          | IIA | IIB         | IIC         |
|----------------------------|----------------|----|-------------|-------------|-----|-------------|-------------|
| Procentvis flere           | %              | 0  | 29          | 29          | 0   | 13          | 13          |
| Antal flere med sygdommen* | Antal personer | 0  | 34.882      | 34.882      | 0   | 16.099      | 16.099      |
| Pris i alt** per år        | Kr./år         | 0  | 978.431.942 | 978.431.942 | 0   | 451.583.973 | 451.583.973 |
| Pris (markedspris)         | Kr./person/år  | 0  | 176         | 176         | 0   | 81          | 81          |

\* baseret på det samlede antal hjerte-kar sengeliggende per år i Danmark (Danmarks Statistik, 2007)

\*\* baseret på standardsengepriser for hjertepatienter (Indenrigsministeriet, 2005)

Arvin, et al. (2010), Bruvo, et al. (2010) og Rygaard, et al. (2009) beskriver konsekvenser for tænderne ved at blødgøre vand, både med hensyn til antal af resulterende huller m.m. samt økonomi. Ændringerne i DMF-S (Decayed Missing and Filled Surfaces per person) afhængigt af calciumindholdet (med fastholdt fluoridindhold) er taget fra figuren i Arvin, et al. (2010) ligesom prisen per tandreparation.

<sup>22</sup> Pris per person er beregnet ud fra det samlede befolkningstal i Danmark. Da en del af befolkningen allerede har blødt vand, er dette en tilnærmelse, og den "korrekte" pris per person burde være højere. Omvendt er diskontering ikke medtaget, hvor der må forventes en vis lagtid, inden effekten af en blødgøring rent faktisk viser sig som flere sygdomstilfælde. Det er vurderet, at dette størrelsesordensmæssigt opvejer hinanden,



## Central blødgøring af drikkevand

I Tabel 6.19 ses konsekvenserne for tænderne ved at blødgøre vandet. Omkostningerne her vil være højest for anvendelsen af kalkfældningsmetoden, da calciumindholdet reduceres mest ved denne metode. Forskellen mellem metoderne er dog ikke så stor som den, der estimeres for hjertetilfælde, hvor forskellen på det resulterende magnesiumindhold som den udløsende faktor er større.

Tabel 6.19 Nøgletal for ødelæggelse af tænder

|                                   | Enhed         | IA  | IB  | IC  | IIA | IIB | IIC |
|-----------------------------------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Udgangspunkt*                     | DMF-S         | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 3   | 3   | 3   |
| Procentvis flere efter blødgøring | %             | 64  | 50  | 50  | 28  | 20  | 20  |
| Pris (markedspris)                | Kr./person/år | 127 | 99  | 99  | 76  | 54  | 54  |

Note: DMF-S (Decayed Missing and Filled Surfaces per person)

\* Antal DMF-S ved den givne udgangshårdhed.

Ved omregning til pris per m<sup>3</sup> tages der højde for, at sundhedseffekterne alene berører husholdningerne og således kun vedrører den vandmængde, der leveres til husholdningerne.

### 6.4.10 Rensningsanlæg

I Tabel 6.20 er angivet besparelserne ved spildevandsrensning i de to hovedscenarier. Besparelserne skyldes, at der ved blødgjort vand anvendes mindre vaskemiddel, og dermed udledes der mindre fosfor (P) i spildevandet. Dette medfører, at rensningsanlæggene ikke skal fælde så meget P. Uddybende forklaring af beregningerne findes i Bilag A.

Tabel 6.20 Besparelse for rensningsanlæg, faktorpris

|            |               | I*  | II** |
|------------|---------------|-----|------|
| Besparelse | Kr./år/person | 3,6 | 3,0  |

\* udgangshårdhed lig 22 °dH

\*\* udgangshårdhed lig 17 °dH

## 6.5 Resultater

I dette afsnit beskrives analysens centrale resultater. Resultaterne er opgjort i kr./m<sup>3</sup>. I Tabel 6.21 ses resultaterne opdelt på fire aktører. Først gevinster/-omkostninger for vandforsyningen, dernæst husholdninger, rensningsanlæggene og til sidst afgiftskorrektion. Alle priserne er regnet i markedspriser og der er gennemført afgiftskorrektion.

## Central blødgøring af drikkevand

For de husholdningsreleaterede gevinster og omkostninger er der taget hensyn til, at det kun vedrører ca. 65 % af denne leverede vandmængde.

*Tabel 6.21 Centrale samfundsøkonomiske resultater, kr./m<sup>3</sup> vand. A - C henviser til blødgøringsteknologierne kalkfældningsmetoden, nanofiltrering og ionbytning og I - II henviser til blødgøringsintervallerne fra 22 - 8 og 17 - 8 °dH. Positivt fortegn angiver en gevinst, negativt fortegn angiver en omkostning.*

|  |                          | Scenarie<br>IA | Scenarie<br>IB | Scenarie<br>IC | Scenarie<br>IIA | Scenarie<br>IIB | Scenarie<br>IIC |
|--|--------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>Vandforsyning/ledningsejer</b>                    |                          |                |                |                |                 |                 |                 |
| Investeringsomkostninger                             | Kr./m <sup>3</sup>       | -0,5           | -0,8           | -0,2           | -0,5            | -0,8            | -0,2            |
| Driftsomkostninger, ekskl. spildevand                | Kr./m <sup>3</sup>       | -2,0           | -0,8           | -1,2           | -1,4            | -0,7            | -0,8            |
| Rensning af processpildevand                         | Kr./m <sup>3</sup>       | -0,6           | -3,6           | -0,6           | -0,6            | -3,1            | -0,5            |
| <b>I alt</b>   | <b>Kr./m<sup>3</sup></b> | <b>-3,1</b>    | <b>-5,3</b>    | <b>-1,9</b>    | <b>-2,4</b>     | <b>-4,6</b>     | <b>-1,5</b>     |
| <b>Husholdninger</b>                                 |                          |                |                |                |                 |                 |                 |
| Levetid, husholdningsapparater + installationer      | Kr./m <sup>3</sup>       | 3,2            | 3,2            | 3,2            | 1,7             | 1,7             | 1,7             |
| Energiforbrug, husholdningsapparater                 | Kr./m <sup>3</sup>       | 0,4            | 0,4            | 0,4            | 0,3             | 0,3             | 0,3             |
| Forbrug af vaskepulver til vaskemaskine              | Kr./m <sup>3</sup>       | 1,0            | 1,0            | 1,0            | 0,7             | 0,7             | 0,7             |
| Vedligehold af husholdningsapparater                 | Kr./m <sup>3</sup>       | 0,5            | 0,5            | 0,5            | 0,3             | 0,3             | 0,3             |
| Forbrugertid på vedligehold af husholdningsapparater | Kr./m <sup>3</sup>       | 1,1            | 1,1            | 1,1            | 0,8             | 0,8             | 0,8             |
| Rengøring af baderum mm.                             | Kr./m <sup>3</sup>       | 0,3            | 0,3            | 0,3            | 0,2             | 0,2             | 0,2             |
| Forbrug af sæbe til personlig hygiejne               | Kr./m <sup>3</sup>       | 0,5            | 0,5            | 0,5            | 0,3             | 0,3             | 0,3             |
| <b>I alt</b>   | <b>Kr./m<sup>3</sup></b> | <b>6,9</b>     | <b>6,9</b>     | <b>6,9</b>     | <b>4,1</b>      | <b>4,1</b>      | <b>4,1</b>      |
| <b>Rensningsanlæg/ledningsejer, i alt</b>            | <b>Kr./m<sup>3</sup></b> | <b>0,1</b>     | <b>0,1</b>     | <b>0,1</b>     | <b>0,1</b>      | <b>0,1</b>      | <b>0,1</b>      |
| <b>Eksternaliteter</b>                               |                          |                |                |                |                 |                 |                 |
| - Hjerter-karsygdomme                                | Kr./m <sup>3</sup>       | 0,0            | -2,7           | -2,7           | 0,0             | -1,2            | -1,2            |
| - Huller i tænderne                                  | Kr./m <sup>3</sup>       | -1,9           | -1,5           | -1,5           | -1,2            | -0,8            | -0,8            |
| - Vandforsyning, emissionsfaktorer                   | Kr./m <sup>3</sup>       | -0,01          | -0,06          | -0,01          | -0,01           | -0,05           | -0,01           |
| - Husholdninger, emissionsfaktorer                   | Kr./m <sup>3</sup>       | 0,01           | 0,01           | 0,01           | 0,01            | 0,01            | 0,01            |
| <b>I alt</b>   | <b>Kr./m<sup>3</sup></b> | <b>-1,9</b>    | <b>-4,3</b>    | <b>-4,2</b>    | <b>-1,2</b>     | <b>-2,1</b>     | <b>-2,1</b>     |
| <b>Skatteforvridning</b>                             | <b>Kr./m<sup>3</sup></b> | <b>0,0</b>     | <b>0,0</b>     | <b>0,0</b>     | <b>0,0</b>      | <b>0,0</b>      | <b>0,0</b>      |
| <b>Direkte afgiftsændring</b>                        | <b>Kr./m<sup>3</sup></b> | <b>-1,4</b>    | <b>-1,4</b>    | <b>-1,4</b>    | <b>-0,8</b>     | <b>-0,8</b>     | <b>-0,8</b>     |
| <b>Afgiftskorrektion</b>                             | <b>Kr./m<sup>3</sup></b> | <b>0,9</b>     | <b>0,9</b>     | <b>0,9</b>     | <b>0,5</b>      | <b>0,5</b>      | <b>0,5</b>      |
| <b>I alt</b>   | <b>Kr./m<sup>3</sup></b> | <b>1,5</b>     | <b>-3,0</b>    | <b>0,4</b>     | <b>0,3</b>      | <b>-2,9</b>     | <b>0,3</b>      |

Det fremgår af tabellen, at der opnås nettogevinst for samfundet ved blødgøring af vand ved kalkfældningsmetoden (A) og ved ionbytning (C). Blødgøres vandet ved nanofiltrering (B), bliver resultatet en netto-omkostning, hvilket skyldes den store udgift forbundet med rensning af processpildevand fra behandlingen på et kommunalt rensningsanlæg (idet nanofiltrering producerer væsentligt mere spildevand end de to andre metoder).

Med de anvendte forudsætninger giver det store anlæg med anvendelse af kalkfældningsmetoden det bedste resultat (IA). Tager man hensyn til anlægsstørrelsen, ser ionbytning ud til at være mere fordelagtig end kalkfældningsmetoden ved blødgøring fra hårdhed 17 °dH til 8 °dH (se resultaterne følsomhedsanalyserne, Figur 6.1).

Omkostningerne<sup>23</sup> (investeringer og drift) for vandforsyningerne er mellem 1 kr. og 2,5 kr. per m<sup>3</sup> vand (målt i markedspriser) afhængigt af anlægsstørrelse og blødgøringsmetode. Det fremgår af tabellen, at ionbytning er billigere end nanofiltrering for små anlæg.

Fælles for alle scenarierne er, at der er væsentlige gevinster for husholdningerne ved blødgøring af vand. De største gevinster kommer fra forøget levetid for husholdningsapparater, sparet energiforbrug for husholdningsapparater, reduceret forbrug af vaskepulver og sparet tid.

Disse gevinster er størst for scenarierne med størst reduktion i hårdhed (I). Gevinsterne for husholdningerne er i øvrigt ens på tværs af blødgøringsmetoderne, idet det er forudsat, at den resulterende hårdhed bliver den samme i alle scenarierne.

Det fremgår også af tabellerne, at sundhedseffekterne grundet fjernelsen af magnesium er betydelige. For ionbytning og nanofiltrering er effekterne på hjertekarsygdomme således 2,7 kr./m<sup>3</sup> ved den største hårdhedsreduktion (I) og 1,2 kr./m<sup>3</sup> ved den mindre hårdhedsreduktion (II). Kalkfældningsmetoden reducerer ikke magnesiumindholdet i vandet og har derfor en fordel frem for de andre metoder på dette område.

Også øgede omkostninger til tandpleje spiller en væsentlig rolle i beregningerne. Her medfører kalkfældningsmetoden de største omkostninger, og de to andre metoder har lavere omkostninger grundet forskellen i reduktionen af calciumindholdet.

Eksterne omkostninger fra ændret energiforbrug spiller en mindre rolle for kalkfældningsmetoden og ved ionbytning. Ved nanofiltrering er elforbruget højt, hvilket giver høje eksterne omkostninger knyttet til luftforurening og klimaeffekt.

Endelig følger afgiftsberegningerne direkte af de øvrige effekter.

### **6.6 Følsomhedsanalyser og ikke værdisatte effekter**

Der er en række effekter og parametre i den samfundsøkonomiske screeningsanalyse, som er behæftet med væsentlig usikkerhed. Der er derfor gennemført følsomhedsanalyser, som belyser resultaternes afhængighed af variation i disse effekter. De undersøgte variationer er præsenteret og begrundet i Tabel 6.22.

---

<sup>23</sup> Bortset fra omkostninger til spildevandsrensning

## Central blødgøring af drikkevand

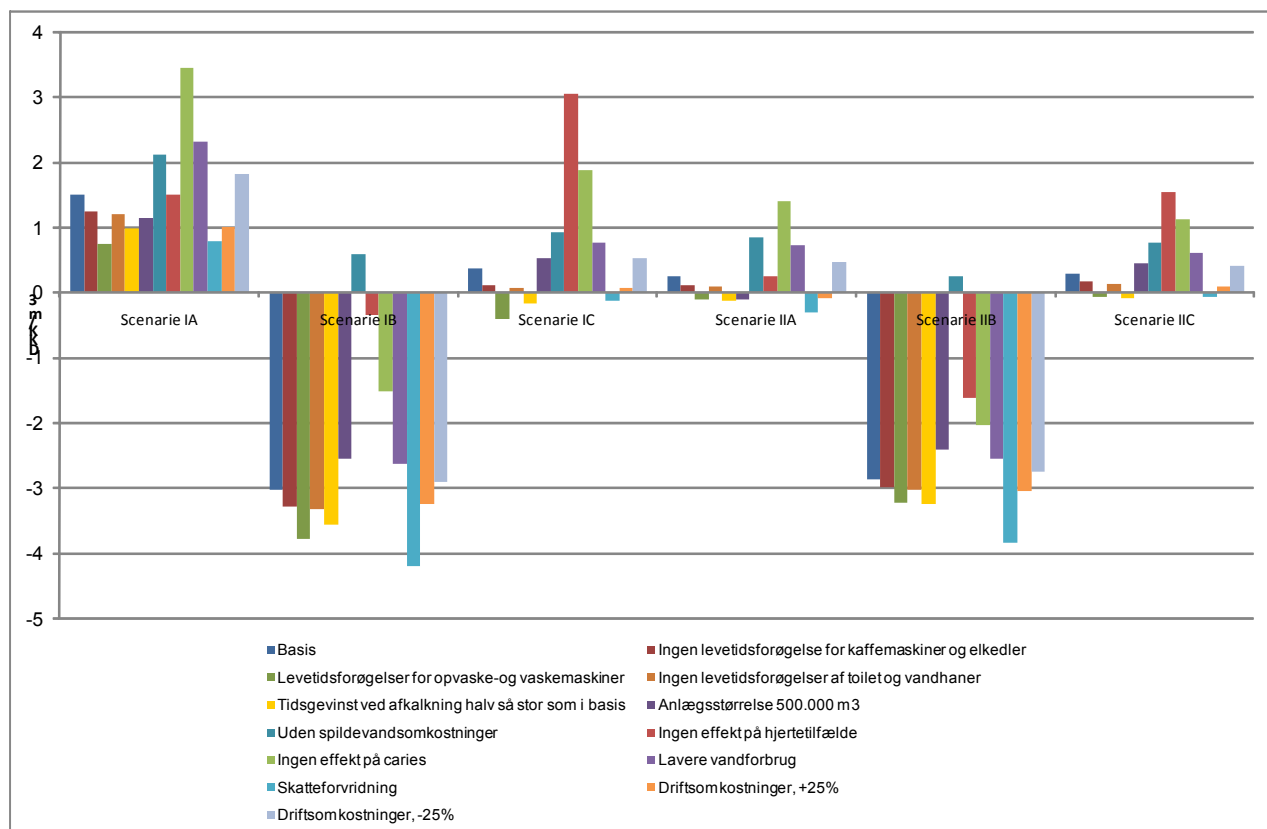
Tabel 6.22 Liste over følsomhedsanalyser

| Følsomhedsanalyse                              | Udmøntning i analyse   | Beskrivelse  |
|--|--|--|
| Graden af høstning af potentiale fra forbruger | Ingen levetidsforøgelse af kaffemaskiner og elkedler   | Opgørelsen af levetid for husholdningsapparater mv. er baseret på, at forbrugerne alene agerer ud fra den fysiske tilstand af apparaterne. Det kan imidlertid diskuteres, om forbrugerne reelt vil ændre deres handle-mønstre. Det kan være, at man f.eks. vælger at udskifte et husholdnings-apparat ud fra andre argumenter, f.eks. design, og at den forlængede levetid derfor ikke udnyttes. Dette vil i højere grad gælde for kaffemaski-ner og elkedler end det vil for opvaske- og vaskemaskiner. |
|  | Kun halvt så store levetidsfor-øgelser for opvaske- og va-skemaskiner  | Der kan være andre dele af maskinerne, som går i stykker uafhængigt af tilkalkning, f.eks. elektroniske dele.  |
|  | Ingen levetidsforøgelse af toilet og vandhaner   | Opgørelsen af levetid for installationer er baseret på, at forbrugerne alene agerer ud fra den fysiske tilstand af apparaterne. Det kan imidlertid disku-teres, om forbrugerne reelt vil ændre deres handle-mønstre. Det kan være, at man f.eks. vælger at udskifte et toilet eller en vandhane ud fra andre argumenter, f.eks. design, og at den forlængede levetid derfor ikke udnyt-tes. Dette vil i højere grad gælde for toiletter og vandhaner end det vil for vandvarmere og varmtvandsbeholdere. |
|  | Tidsgevinst ved afkalkning halv så stor som i basisanaly-sen   | Der er stor usikkerhed forbundet med opgørelsen af tidsforbruget til af-kalkning.  |
| Teknologiomkostninger for vandforsyningerne    | Alle anlæg har en kapacitet på 500.000 m <sup>3</sup> /år  | Der er stordriftsfordele ved teknologierne. Derfor vil omkostningerne varie-re med størrelsen af vandforsyningen. For scenarierne A analyseres min-dre anlæg, for scenarier B og C analyseres større anlæg.  |
|  | Driftsomkostningerne er 25 % lavere  | Driftsomkostningerne til blødgøring på vandforsyningerne er behæftet med usikkerhed.   |
|  | Driftsomkostningerne er 25 % højere  | Driftsomkostningerne til blødgøring på vandforsyningerne er behæftet med usikkerhed.   |
| Spildevandsrensning                            | Omkostninger medregnes ikke.   | Omkostninger til afledning og rensning af spildevand medtages ikke, f.eks. i tilfælde af mulighed for afledning direkte til havet.   |
| Sundhedseffekter                               | Ingen effekt på hjertetilfælde   | Der er stor usikkerhed forbundet med opgørelsen af effekten på hjertetil-fælde. Endvidere kan man potentielt remineralisere vandet (tilsætte mag-nesium), så ledes at man helt forhindrer denne effekt.  |
|  | Ingen effekt på caries   | Der er stor usikkerhed forbundet med opgørelsen af effekten på caries.   |
| Lavere vandforbrug                             | Vandforbruget per person reduceres med 15% svarende til et vandforbrug på ca. 36,5 m <sup>3</sup> per person/år (eller 100 liter/person/dag) | Der er en generel målsætning om, at vandforbruget per person skal redu-ceres over tid af miljømæssige hensyn.  |
| Inklusion af skattefor- vridning               | Der medtages 20% skattefor- vridning på det offentliges omkostninger.  | Se diskussion i rapport vedrørende skatteforvridning.  |

Beregnes resultaterne uden spildevandshåndtering, er der antaget, at spildevandet udledes til havet, og omkostningerne forbundet med dette er sat til 0.

Resultatet af følsomhedsanalyserne fremgår af nedenstående figur.

Figur 6.1 Resultat af følsomhedsanalyse. A - C henviser til blødgøringsteknologi-erne kalkfældningsmetoden, nanofiltrering og ionbytning, og I - II hen-



viser til blødgøringsintervallerne fra 22 - 8 og 17 - 8 °dH.

Figuren viser, at anvendelse af kalkfældningsmetoden (A) giver anledning til nettogevinster for samfundet i alle følsomhedsanalyser for den høje hårdhedsgrad. Det gælder også for mindre anlæg end det centrale store anlæg, som indgår i basisforudsætningerne. Ved reduktion af hårdhed 17 °dH til 8 °dH (IIA) fås mindre eller ingen nettogevinster for samfundet afhængigt af den varierede parameter. For disse hårdhedsgrader vil en samfundsmæssig gevinst især være afhængig af, om de skønnede levetider på opvaske- og vaskemaskiner opnås, og om driftsomkostningerne er vurderet for lavt<sup>24</sup> (samt om skatteforvridningen medtages i regnestykket). Endvidere vil der ikke være en samfundsmæssig gevinst, hvis der bygges et relativt lille anlæg.

Anvendelse af ionbytning (C) ser ligeledes generelt ud til at være fordelagtigt for samfundet, omend gevinsten i nogle tilfælde er begrænset. Blandt andet vil dette afhænge af, om de forudsatte levetider på vaske- og opvaskemaskiner opnås. Det fremgår, at effekten for hjertetilfælde er afgørende for, om ionbytning er mere eller mindre attraktivt end kalkfældningsmetoden.

<sup>24</sup> Hvilket ikke burde være tilfældet baseret på de svenske erfaringer.

## Central blødgøring af drikkevand

Hvis der ikke er nogen effekt på hjertetilfælde, er ionbytning mere fordelagtig end kalkfældningsmetoden<sup>25</sup>.

Nanofiltrering (B) er ugunstig for samfundet i stort set alle følsomhedsanalyserne. Dog viser følsomhedsanalysen, at der vil være en nettogevinst for samfundet, når man ikke indregner håndtering af spildevand.

Bemærk, at årsagen til at et lavere vandforbrug giver højere samfundsøkonomiske omkostninger er, at forbrugerens effekter opgøres på årsbasis og deles ud på det årlige vandforbrug. Derfor vil et lavere vandforbrug give højere værdier per m<sup>3</sup>.

De tilhørende nettoresultater til figuren fremgår af nedenstående tabel.

*Tabel 6.23 Resultat af følsomhedsanalyser. A - C henviser til blødgøringsteknologierne kalkfældningsmetoden, nanofiltrering og ionbytning og I - II henviser til blødgøringsintervallerne fra 22 - 8 og 17 - 8 °dH.*

| <i>I alt når der tages højde for den enkelte parameter i følsomhedsanalysen</i> |                    | <b>Scenarie IA</b> | <b>Scenarie IB</b> | <b>Scenarie IC</b> | <b>Scenarie IIA</b> | <b>Scenarie IIB</b> | <b>Scenarie IIC</b> |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Basis</b>  | Kr./m <sup>3</sup> | <b>1,51</b>        | <b>-3,03</b>       | <b>0,37</b>        | <b>0,26</b>         | <b>-2,86</b>        | <b>0,30</b>         |
| Ingen levetidsforøgelse for kaffemaskiner og elkedler                           | Kr./m <sup>3</sup> | 1,25               | -3,29              | 0,11               | 0,12                | -2,99               | 0,16                |
| Levetidsforøgelser for opvaske- og vaskemaskiner                                | Kr./m <sup>3</sup> | 0,75               | -3,79              | -0,39              | -0,10               | -3,22               | -0,06               |
| Ingen levetidsforøgelser af toilet og vandhaner                                 | Kr./m <sup>3</sup> | 1,21               | -3,33              | 0,06               | 0,10                | -3,02               | 0,14                |
| Tidsgevinst ved afkalkning halv så stor som i basis                             | Kr./m <sup>3</sup> | 0,99               | -3,56              | -0,16              | -0,13               | -3,24               | -0,08               |
| Anlægsstørrelse 500.000 m <sup>3</sup>  | Kr./m <sup>3</sup> | 1,15               | -2,56              | 0,53               | -0,10               | -2,42               | 0,46                |
| Uden spildevandsomkostninger  | Kr./m <sup>3</sup> | 2,11               | 0,58               | 0,94               | 0,86                | 0,25                | 0,77                |
| Ingen effekt på hjertetilfælde  | Kr./m <sup>3</sup> | 1,51               | -0,34              | 3,06               | 0,26                | -1,62               | 1,54                |
| Ingen effekt på caries  | Kr./m <sup>3</sup> | 3,45               | -1,52              | 1,88               | 1,41                | -2,04               | 1,12                |
| Lavere vandforbrug  | Kr./m <sup>3</sup> | 2,32               | -2,62              | 0,77               | 0,73                | -2,54               | 0,61                |
| Skatteforvridning   | Kr./m <sup>3</sup> | 0,79               | -4,19              | -0,13              | -0,30               | -3,84               | -0,06               |
| Driftsomkostninger, +25 %   | Kr./m <sup>3</sup> | 1,02               | -3,24              | 0,08               | -0,09               | -3,04               | 0,10                |
| Driftsomkostninger, -25 %   | Kr./m <sup>3</sup> | 1,81               | -2,90              | 0,54               | 0,46                | -2,75               | 0,42                |

Der er en række effekter, som ikke er værdisat i analysen. I Tabel 6.24 er de ikke-værdisatte effekter summeret og deres forventede betydning for analysens resultat er angivet sammen med en kort forklaring af effekten.

<sup>25</sup> Bemærk at der ved sammenligningen, hvor der ikke er effekt på hjertetilfælde sammenlignes anlæg med forskellig størrelse

## Central blødgøring af drikkevand

Tabel 6.24 *Vurdering af ikke-værdisatte effekter Signaturer: + = positiv effekt, - = negativ effekt, 0 = ingen effekt, ? = ukendt fortegn på effekt.*

| Effekt   | Påvirkning af samfundsøkonomisk resultat | Forklaring af effekt   |
|--|--|--|
| Effekter for erhverv                                     | +  | Effekter for erhverv forventes at være positive. Eksemplerne fremgår af det efterfølgende kapitel.   |
| Levetid af ledningsnet                                   | +  | Levetiden af ledningsnettet er afhængig af materialer, og tilkalkning kan betyde, at rørene må udskiftes, før de er slidt ned.   |
| Elforbrug i ledningsnet                                  | +  | Kalkbelægninger i rørene vil forøge energiforbruget til pumpning af vand. Dan-nelsen af belægninger kan imidlertid ikke altid forudsiges.  |
| Korrosion i ledningsnet                                  | 0  | Korrosionsforholdene i ledningsnettet vil ikke ændres væsentligt ved delvis blødgøring af drikkevandet, da man ikke ændrer afgørende på de parametre i vandet, som giver årsag til korrosion af rørmaterialerne. Det forudsættes, at der ikke opstår aggressiv vand ved blødgøringsprocessen.                |
| Arbejds miljø ved drift af blødgøringsprocessen          | -  | Afhængig af den valgte blødgøringsproces skal man håndtere og opbevare kemikalier (salt, natronlud, saltsyre, rensedmidler, antiscalingsmidler), som man normalt ikke anvender på vandværker. Det betyder større fokus på arbejdsmiljø - herunder forebyggelse og minimering af påvirkninger fra kemikalier. |
| Krævet uddannelse til drift af blødgøringsprocessen      | -  | Driftspersonalet skal under alle omstændigheder instrueres i drift og vedligehold af de nye blødgøringsanlæg. Specielt pelletmetoden vil kræve lidt mere uddannelse af personalet.   |
| Metalindholdet i spildevandsslam                         | +  | Ifølge hollandske erfaringer vil blødgøring af drikkevandet medføre et lavere indhold af især kobber i spildevandsslammet, hvilket kan have betydning for muligheden af at udbringe det på landbrugsarealer.   |
| Forbedret økonomi i fjernvarmen                          | +  | Mindre kalk i fjernvarmerør, varmevekslere med mere vil give lavere tilbageløbs-temperatur og dermed bedre energiøkonomi, se afsnit 3.3.2.   |
| Bortskaffelse af hus-holdningsmaskiner og installationer | +  | Når apparater og installationer skal skiftes ud med længere mellemrum, vil der blive bortskaffet færre af disse, hvilket vil medføre mindre omkostninger til af-faldsbortskaffelse fra husholdningerne   |
| Vandsmag   | ?  | Smagen af vandet vil også ændres, men om dette opleves positivt eller negativt vil være meget individuelt.   |
| Tidsforbrug og oplevelse ved hårvask                     | ?  | Der er muligvis et ekstra tidsforbrug forbundet med at skylle hårshampoo ud. Ligesom der kan være gener i oplevelsen af hårvask. Der kan imidlertid argu-menteres for, at disse effekter forsvinder efter en tilvænningsperiode, hvor man som forbruger bl.a. lærer at dosere shampoo mængden korrekt.       |

Det er i sagens natur svært at konkludere noget om størrelsesordenen af de ikke-værdisatte effekter. Man må dog forvente, at effekterne for erhvervene vil vægte noget i den samlede vurdering af om blødgøring af vand er samfunds-økonomiske fordelagtigt. Se eksemplerne i Kapitel 7.

### 6.7 Referencer

- Arvin, E., Bardow, A., Bruvo, M, Rygaard, M. & Spliid, H. (2010): Dental Caries affected by water quality and water treatment. IWA Montreal, 19-24 September 2010.
- Bruvo, M., Ekstrand, K., Arvin, E., Spliid, H., Moe, D., Kirkeby, S. & Bardow, A. (2008): Optimal drinking water composition for caries control in populations. *J. Dent. Res.* 87(4), 340–343.

## Central blødgøring af drikkevand

- Brüggem, B. van der; Goossens, H.; Everard, P.A.; Stemgée, K. & Rogge, W. (2009): Cost-benefit analysis of central softening for production of drinking water, *Journal of Environmental Environment*, 91, pp. 541–549
- DANVA (2009): Vand i tal. DANVAs benchmarking og vandstatistik 2009
- DMU (2010): *Miljøøkonomiske beregningspriser for emissioner*. Faglig rapport fra DMU nr. 783.
- Energistyrelsen (2010): Forudsætninger for samfundsøkonomiske analyser på energiområdet.
- Garcia, A.L.T, Godskesen, B., Nielsen, K.D., Wind, E. & Rothuizen, E.D. (2009): Life Cycle Assessment on Central Softening of Drinking Water in Copenhagen. DTU Management in co-operation with Københavns Energi A/S.
- Rygaard, M.; Arvin, E. & Binning, P.J. (2010): Indirect economic impact in water supplies augmented with desalinated water. *Water Science & Technology: Water Supply*, 10, 4, pp 664-671.
- Rygaard, M.; Arvin, E. & Binning, P.J. (2009): The valuation of water quality. Effects of mixing different drinking water qualities. *Water Research*, 43, 5, pp. 1207 - 121.
- Superbest (2010): Sortiment, alt på et sted, [www.superbest.dk](http://www.superbest.dk)



## 7 Eksempler på effekter for erhvervsvirksomheder

I dette kapitel er gennemgået tre eksempler på erhvervsbrancher, som typisk ikke vil have egen indvinding, og som i dag selv blødgør vand til brug i deres processer. I disse eksempler er ikke taget hensyn til, hvor mange virksomheder der i praksis ligger i områder med vand hårdhed over 17 °dH og 22 °dH. I de økonomiske overslag for brancherne er det desuden ikke indkalkuleret, at prisen vil stige, hvis man foretager central blødgøring på vandværkerne. Der fokuseres alene på de fordele, som de pågældende brancher vil kunne opnå.

### 7.1 Vaskeribranchen

Der findes i Danmark ca. 70 større erhvervsvaskerier, hvor 59 er organiseret i Brancheforening for Vask og Textiludlejning (BVT). Det vurderes, at de to største vaskerier står for ca. 50 % af den professionelle vask for institutioner, hoteller, restauranter m.m. herhjemme. På vaskerierne anvendes i dag stort set kun blødgjort vand fremstillet ved ionbytning

Ud fra kontakt med de to store vaskerier kan følgende tal estimeres for branchen:

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| Samlet vandforbrug:   | 1,4 mio. m <sup>3</sup> /år |
| Teoretisk saltforbrug (NaCl) til regeneration af ionbytter: | 810 tons/år                 |
| Faktisk saltforbrug <sup>26</sup> :                         | 1000 tons/år                |

Ved de følgende beregninger er det forudsat, at det anvendte råvand på vaskerierne har en gennemsnitlig hårdhed på 17 °dH. Ud fra nogle udvalgte virksomhedseksempler tyder det på, at vaskerierne ofte bruger noget mere salt en nødvendigt til regenerering af ionbytterne. Derfor er det faktiske saltforbrug anslået ca. 23 % højere end det "teoretiske" forbrug.

Såfremt vandværkerne leverer vand med 8 °dH, skal vandet alligevel blødgøres på vaskerierne, da man ønsker at vaske i vand helt uden hårdhed. Det gælder også skyllevandet, da det som regel genbruges i selve vaskeprocessen.

---

<sup>26</sup> estimeret af COWI

## Central blødgøring af drikkevand

Perspektivet er således, at de danske vaskerier formentlig vil kunne spare 500 tons salt pr. år til regenerering samt halvdelen af det vand, som anvendes til regenerering, da ionbytterne kun skal regenereres halvt så ofte, når vandets hårdhed er 8 °dH. Det svarer til en vandbesparelse på ca. 1 % eller 14.000 m<sup>3</sup>/år. Besparelsen kan godt være endnu større i praksis, hvis vaskerierne bruger mere vand end nødvendigt til regenerering af deres ionbytningsanlæg

Baseret på ovenstående kan den forventede samlede årlige besparelse for vaskeribranchen opgøres til:

|   |                      |
|---|----------------------|
| 500 tons salt á 2000 kr./ton:                   | 1.000.000 kr.        |
| 14.000 m <sup>3</sup> vand/spildevand á 45 kr.: | <u>630.000 kr.</u>   |
| Total pr. år ekskl. moms                        | <u>1.630.000 kr.</u> |

Det svarer til en besparelse på 1,16 kr. pr. m<sup>3</sup> forbrugt vand. I beregningen er anvendt en gennemsnitstakst for indkøb af afledning af vand på 45 kr. Denne takst omfatter blandt andet en grøn afgift på 5,00 kr. pr. m<sup>3</sup> leveret drikkevand. Besparelsen for det enkelte vaskeri vil afhænge af den nuværende hårdhed i postevandet, det aktuelle saltforbrug og vandforbrug samt den aktuelle vandpris og saltpris.

## 7.2 Fjernvarmanlæg

Tal fra brancheforeningen Dansk Fjernvarme vedr. 2009:

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| Husstande med fjernvarme, ca. | 1.500.000  |
| Antal målere ifølge statistik | 654.283    |
| Leveret varmemængde per år    | 39.374 GWh |

Da ejendomme ofte kun har én måler, men indeholder flere husstande, er der mere end dobbelt så mange husstande, som der er målere. Flere fjernvarmeværker har ikke indberettet tal til den årlige statistik, og på den baggrund anslår COWI, der årligt leveres ca. 45.000 GWh via fjernvarmenettet.

Fjernvarmeværkerne spæder løbende vand op i rørsystemet i takt med, at der forsvinder vand på grund af utætheder og fordampning. Vandet blødgøres normalt før opspædning i et ionbytningsanlæg, mens enkelte værker anvender vand behandlet ved omvendt osmose til opspædning. Vandet tilsættes natronlud for at holde pH-værdien mellem 9,6 og 10,0. Undertiden tilsættes også andre kemikalier (f.eks. for at fjerne ilt).

Spædevandsmængden afhænger meget af systemets opbygning. Efterhånden har de fleste systemer varmevekslere ude hos forbrugerne, men der er stadigvæk en del ældre systemer med direkte vandforbrug fra fjernvarmesystemet til forbrugernes centralvarmesystem. I disse gamle systemer er forbruget af spædevand en del større end i de nye systemer med varmevekslere. Et par forespørgsler hos fjernvarmeselskaber viser, at spædevandsforbruget kan svinge fra 3 m<sup>3</sup>/år pr. GWh til 30 m<sup>3</sup>/år pr. GWh, når man går fra et system med varmevekslere til et system med direkte forbrug.

## Central blødgøring af drikkevand

I hovedstadsområdet distribueres store mængder varme af CTR, som leverer fjernvarme til KE, Frederiksberg, Gentofte, Gladsaxe og Tårnby, der modtager varmen via en varmeveksler over i deres eget system (sekundær systemet). CTR distribuerer 11 - 12 % af den samlede fjernvarme i Danmark, og CTR leverer samtidigt spædevand til Frederiksberg, Gentofte, Gladsaxe og Tårnby, hvorimod KE skaffer sit eget spædevand samt køber fjernvarme fra andre leverandører (DONG og Vattenfall). CTR anvender blødgjort sekundavand fra Øresundsforbindelsen til spædevand, og KE anvender spædevand (total afsaltet vand) fra DONG og Vattenfall.

KE og CTR bruger tilsammen ca. 480.000 m<sup>3</sup> spædevand pr. år. Antages det, at de resterende danske fjernvarmeværker anvender grundvand, vil de forbruge ca. 575.000 m<sup>3</sup> spædevand pr. år, under forudsætning af et gennemsnitsforbrug af spædevand på 15 m<sup>3</sup>/år pr. GWh.

Perspektivet er således, at de danske fjernvarmeværker formentlig vil kunne spare 200 tons salt pr. år til regenerering samt halvdelen af det vand, som anvendes til regenerering, da ionbytterne kun skal regenereres halvt så ofte, når vandets hårdhed er 8 °dH. Det svarer til en vandbesparelse på ca. 1 % eller 5.750 m<sup>3</sup>/år. Besparelsen kan godt være endnu større i praksis, hvis fjernvarmeværkerne bruger mere vand end nødvendigt til regenerering af deres ionbytningsanlæg

Baseret på ovenstående kan den forventede samlede årlige besparelse for fjernvarmeværkerne opgøres til:

|  |                    |
|--|--------------------|
| 200 tons salt á 2000 kr./ton:                  | 400.000 kr.        |
| 5.750 m <sup>3</sup> vand/spildevand á 45 kr.: | <u>258.750 kr.</u> |
| Total pr. år ekskl. moms                       | <u>658.750 kr.</u> |

Det svarer til en besparelse på 1,15 kr. pr. m<sup>3</sup> forbrugt vand. I beregningen er anvendt en gennemsnitstakst for indkøb og afledning af vand på 45 kr. Denne takst omfatter blandt andet en grøn afgift på 5,00 kr. pr. m<sup>3</sup> leveret drikkevand. Besparelsen for det enkelte fjernvarmeværk vil afhænge af den nuværende hårdhed i vandet, det aktuelle saltforbrug og vandforbrug samt den aktuelle vandpris og saltpris.

### 7.3 Hotelbranchen

Ifølge oplysninger på Horestas (Brancheforening for restauranter og hoteller) hjemmeside fandtes der i 2008 935 hoteller/kursuscentre i Danmark med 48.933 værelser. Antallet af overnatninger var i 2008 i gennemsnit på 40.096 pr. døgn. Belægningsprocenten var 53 %.

På disse hoteller anvendes ofte en meget god vandbehandling i forbindelse med opvask. Det er blødgøring (ionbytning) efterfulgt af omvendt osmose. Herved undgås både kalkbelægninger og saltbelægninger på de emner, der vaskes op. Nogle af hotellerne har endvidere etableret blødgøringsanlæg til forbehandling af det varme brugsvand, der anvendes til bad og vask på værelserne.

## Central blødgøring af drikkevand

Det er dog formentlig kun 25 - 35 % af hotellerne, der har installeret blødgøringsanlæg til dette formål.

Såfremt der etableres central blødgøring af drikkevandet til 8 °dH, vil det blive en stor fordel for hotellerne. De hoteller, som allerede har blødgøring, vil spare på udgifterne til drift af det eksisterende blødgøringsanlæg, og de hoteller, som endnu ikke har blødgøringsanlæg, vil muligvis helt kunne undvære et blødgøringsanlæg.

Ud fra kontakt med nogle udvalgte hoteller vurderes det, at der i gennemsnit bruges ca. 13,5 m<sup>3</sup> varmt vand pr. år pr. værelse med den nuværende belægningsprocent. Det svarer til et forbrug af varmt vand for alle danske hoteller på ca. 660.000 m<sup>3</sup>/år. Går vi ud fra, at de 200.000 m<sup>3</sup>/år (ca. 30 %) allerede blødgøres, vil der kunne opnås store fordel for hoteller, hvis de resterende 460.000 m<sup>3</sup> kan leveres med 8 °dH. Disse hoteller vil fremover få mindre kalkudfældninger i varmtvandssystemet, uden at de selv behøver at investere i et blødgøringsanlæg, som knap 1/3 af alle hoteller allerede selv har anskaffet.

For de hoteller, der allerede har installeret blødgøringsanlæg vil besparelsen blive på ca. 1,15 kr./m<sup>3</sup> jf. beregningerne for vaskerier og fjernvarmeanlæg, hvilket skal holdes op mod den merpris, som det koster at foretage en central blødgøring af vandet.

## 7.4 Referencer

- Andersen, O. (2010): Personlig kommunikation, Svendborg Fjernvarme
- Christensen, S. (2010): Personlig kommunikation, Brancheforeningen for Vask og Textiludlejning.
- Dansk Fjernvarme <http://www.fjernvarmen.dk/> . Års statistik 2008 og 2009.
- Hansen, M. (2010): Personlig kommunikation, Hotel Kong Arthur.
- Jensen, A. (2010): Personlig kommunikation, Comwell, Klarskovgård
- Jensen, M. (2010): Personlig kommunikation, Horesta <http://www.horesta.dk/>
- Magnussen, P. (2010): Personlig kommunikation, KE
- Nielsen, P. (2010): Personlig kommunikation, Gentofte Fjernvarme
- Nyborg, A. (2010): Personlig kommunikation, De Forenede Dampvaskerier.
- Nielsen, P. (2010): Personlig kommunikation, Gentofte Fjernvarme

## Central blødgøring af drikkevand

- Pedersen, O. (2010): Personlig kommunikation, CTR.
- Plou, J. (2010): Personlig kommunikation, Glostrup Parkhotel
- Stegman, M. (2010): Personlig kommunikation, Slagelse Fjernvarme
- Tuesen, G (2010). Personlig kommunikation, Berendsen Textil Service A/S.
- Vendelbo, T. (2010): Personlig kommunikation, Vilvorde Kursuscenter

## 8 Konklusioner

I dette kapitel opsummeres konklusionerne fra kapitel 5 og 6.

### 8.1 Teknologi og miljø

Kalkfældningsmetoden og nanofiltrering er klart de mest investeringstunge teknologier, og kalkfældningsmetoden kræver også mest i drift og vedligehold, hvilket desuden vil medføre større behov for efteruddannelse for denne metode. Endvidere er kalkfældningsmetoden den mest arealkrævende

Energiforbruget - og dermed CO<sub>2</sub>-emissionen er størst ved nanofiltrering og mindst ved kalkfældningsmetoden.

Kemikalieforbruget er mindst ved nanofiltrering og i samme størrelsesorden ved ionbytning og kalkfældningsmetoden. Da de arbejdsmiljømæssige konsekvenser hænger tæt sammen med dette, vil forholdet mellem metoderne på denne front være stort set tilsvarende.

Nanofiltrering medfører den største mængde overskydende vand, både med hensyn til oppumpet vandmængde i forhold til vandmængde udledt til forbrugerne og med hensyn til behov for evt. spildevandsrensning afhængigt af den potentielt påvirkede recipient. Den vurderede spildevandsmængde er således af betydning for resultatet. De anslåede mængder er baseret på en konservativ vurdering af leverandør oplysninger. Spildevandsmængderne vil principielt kunne optimeres ved forskellige tiltag, der dog typisk også vil have en omkostning.

Endelig vil kalkfældningsmetoden medføre et restprodukt, som enten skal håndteres som affald eller transporteres til et område, hvor det kan have en nytte.

En ændring af kvaliteten af drikkevandet kan potentielt have nogle sundhedseffekter, som der dog er væsentlig usikkerhed om omfanget af. En reduktion af magnesium indholdet i vandet (hvilket er en konsekvens af både ionbytning og nanofiltrering) synes at kunne øge antallet af hjerte-kar relaterede sygdomstilfælde. I princippet kan dette modvirkes ved en remineralisering af vandet, hvilket dog ikke er nærmere vurderet i nærværende redegørelse. En reduktion af calciumindholdet synes at kunne øge antallet af cariestilfælde. Her vil kalk-

fældningsmetoden reducere calciumindholdet mere, end hvad der er tilfældet for ionbytning og nanofiltrering.

De generelle fordele, som blødgøring af vand har for forbrugerne, er omtalt i afsnit 8.2.

## 8.2 Samfundsøkonomi

Screeningsanalysen indikerer, at blødgøring af vand kan være samfundsøkonomisk fordelagtig. Således er det muligt at opnå gevinster ved blødgøring af vand, som overstiger omkostningerne.

Tabel 8.1. Sammenligning af hovedanalysen af scenarierne (uddrag af Tabel 6.21).

|       |                    | Scenarie<br>IA | Scenarie<br>IB | Scenarie<br>IC | Scenarie<br>IIA | Scenarie<br>IIB | Scenarie<br>IIC |
|-------|--------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| I alt | kr./m <sup>3</sup> | 1,5            | -3,0           | 0,4            | 0,3             | -2,9            | 0,3             |

De vigtigste gevinster omfatter forøget levetid af husholdningsapparater og installationer. Reduceret energiforbrug ved husholdningsapparater og forbrug af vaskepulver samt sparet tid til afkalkning af husholdningsapparater.

De vigtigste omkostninger er vandværkernes omkostninger til blødgøring. I samfundet har påvirkningerne af sundheden også en effekt, der er beregnet til en forøgelse af hjertetilfælde med 13 - 29 % ved nanofiltrering og 28 - 64 % øget antal huller i tænderne ved anvendelse af kalkfældningsmetoden.

Både kalkfældningsmetoden og ionbytning giver større eller mindre samfundsøkonomiske gevinster<sup>27</sup> eller er samfundsøkonomisk neutrale, mens resultatet for nanofiltreringsmetoden helt vil afhænge af, om der skal betales for spildevandsrensning eller ej. Hvis der skal betales for spildevandsrensning, vil blødgøring med denne metode give en resulterende samfundsøkonomisk omkostning på grund af den væsentligt større spildevandsmængde, der er forbundet med nanofiltrering<sup>28</sup>.

Kalkfældningsmetoden fremstår som den mest fordelagtige for store reduktioner i hårdheden. Denne metode har bl.a. den fordel, at der ikke fjernes magnesium, hvorfor kalkfældningsmetoden potentielt ikke giver anledning til en forøgelse af hjerte-karsygdomme. Såfremt betydningen af magnesiumindholdet i vandet ikke medregnes<sup>29</sup>, vil ionbytningsmetoden være mere samfundsøkonomisk fordelagtig.

<sup>27</sup> Som dog afhængigt af hårdhedsgraden kan afhænge af i hvor stort omfang de skønnede levetidsforlængelser på især vaske- og opvaskemaskiner opnås eller ej

<sup>28</sup> Det skal dog bemærkes, at nanofiltrering af vand kan muliggøre anvendelse af vand fra lettere forurenede kildepladser, hvilket ikke er vurderet nærmere i nærværende redegørelse.

<sup>29</sup> På grund af usikkerheden omkring dette.

## Central blødgøring af drikkevand

For alle tre metoder gælder, at de er forbundet med stordriftsfordele, som gør det mere fordelagtigt samfundsøkonomisk jo større blødgøringsanlæg, der etableres.

Endelig giver blødgøring af vand anledning til gevinster for en række typer af erhvervsvirksomheder.



## Bilag A. Gevinster for rensningsanlæg

Ifølge Winther, et al. (2009) udleder hver person udleder i gennemsnit 1,4 kg P pr. år. I dag stammer kun 30 % (tidligere var det 50 %) af P fra vaskemidler svarende til 0,42 kg/år pr. person.

25 % af danske renselanlæg har kun kemisk fældning, hvor de bruger 2 mol Fe pr. mol P. Det svarer til, at der til fældning af 1 kg tilført fosfor bruges 3,60 kg jern eller 31,86 kg jernklorid (PIX118), som koster i snit 1150 kr./ton.

75 % af danske renselanlæg har biologisk fosforfjernelse, og de bruger derfor kun lidt kemisk fældning. Man kan regne med, at de bruger 0,3 mol Fe pr. mol tilført P. Det svarer til, at der til fældning af 1 kg tilført fosfor bruges:  $31,86 * 0,3 / 2 = 4,79$  kg jernklorid (PIX118).

Som vægtet landsgennemsnit bruges således 11,57 kg jernklorid pr. kg tilført fosfor.

*En reduktion fra 22 °dH til 8 °dH udregnes således:*

P-bidraget fra vaskemidler reduceres med:  $0,42 * (22-8)/22 = 0,267$  kg P pr. person pr. år.

Det sparer renselanlæggene for:  $0,267 * 11,57 * 1,15$  kr./kg = 3,55 kr. pr. person pr. år

*En reduktion fra 17dH til 8 °dH udregnes således:*

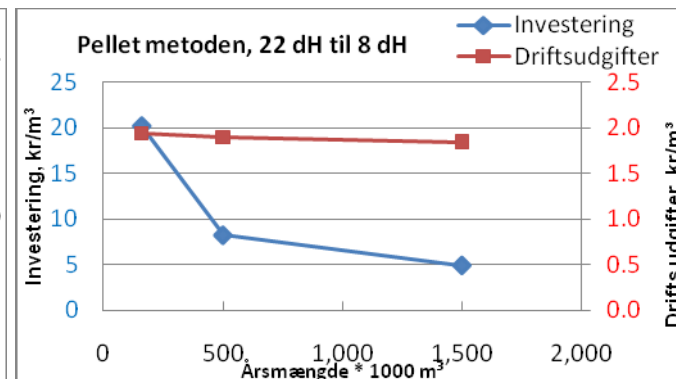
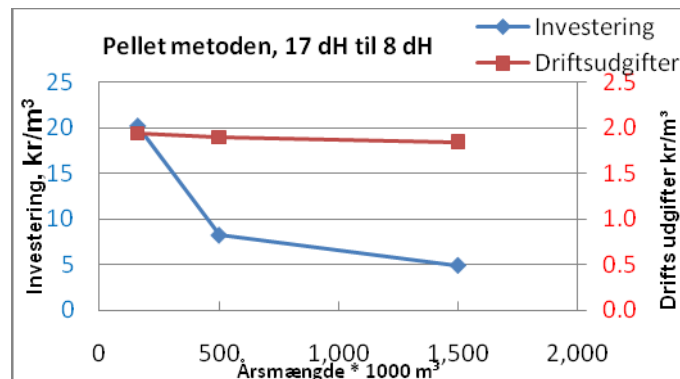
Reduceres P-bidraget fra vaskemidler med:  $0,42 * (17-8)/17 = 0,222$  kg P pr. person pr. år.

Det sparer renselanlæggene for:  $0,222 * 11,57 * 1,15$  kr./kg = 2,95 kr. pr. person pr. år

## Bilag B: Investerings- og driftsomkostninger for teknologierne

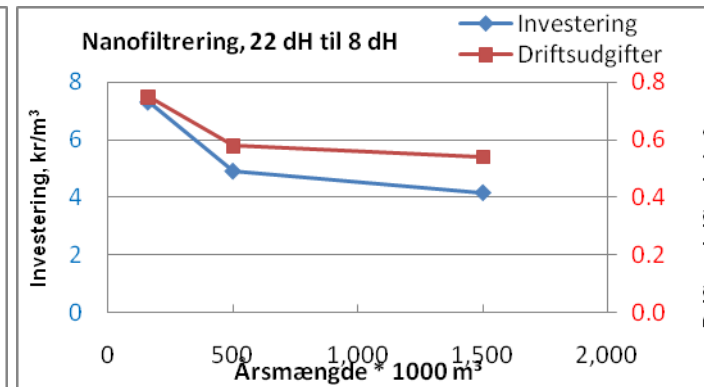
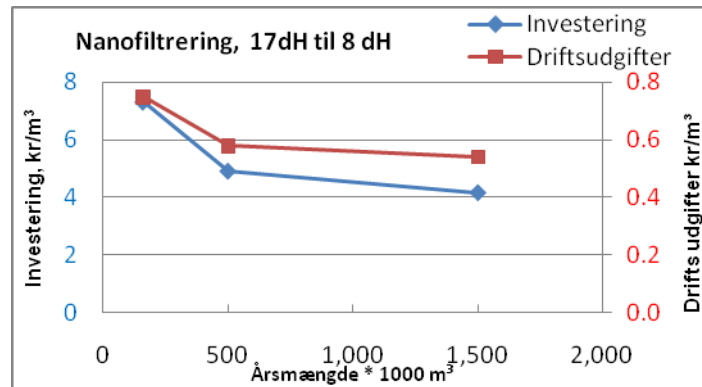
Tabel B1 Detaljering af investering og driftsomkostninger for kalkfældningsmetoden ekskl. spildevandsudgifter. Den varierende faktor mellem de 3 scenarier under henholdsvis I og II er vandmængden, der produceres (henholdsvis 160, 500 og 1.500 tusinde m<sup>3</sup>/år). Det er forudsat, at der anvendes fødevarer-godkendte kemikalier, der er ca. dobbelt så dyre som de tekniske kvaliteter.

|  | Enhed              | Scenarie I       | Scenarie I       | Scenarie I       | Scenarie II      | Scenarie II      | Scenarie II      |
|--|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Hårdhed                                  |                    | 22               | 22               | 22               | 17               | 17               | 17               |
| Levetid                                  |                    | 20               | 20               | 20               | 20               | 20               | 20               |
| <b>Investering</b>                       |                    |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Pris for pellet-anlæg (incl. 10% EI+SRO) | Kr                 | 1.600.000        | 1.940.000        | 3.460.000        | 1.600.000        | 1.940.000        | 3.460.000        |
| Installation, 10%                        | Kr                 | 160.000          | 194.000          | 346.000          | 160.000          | 194.000          | 346.000          |
| Bygning                                  | Kr                 | 480.000          | 720.000          | 1.320.000        | 480.000          | 720.000          | 1.320.000        |
| Sammenkobling, 20%                       | kr                 | 448.000          | 570.800          | 1.025.200        | 448.000          | 570.800          | 1.025.200        |
| Projektering, 20%                        | Kr                 | 537.600          | 684.960          | 1.230.240        | 537.600          | 684.960          | 1.230.240        |
| <b>Investering, total</b>                | <b>Kr</b>          | <b>3.225.600</b> | <b>4.109.760</b> | <b>7.381.440</b> | <b>3.225.600</b> | <b>4.109.760</b> | <b>7.381.440</b> |
| <b>Driftsomkostninger</b>                |                    |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| <b>Total vand fra vandværk</b>           | m <sup>3</sup> /år | 160.000          | 500.000          | 1.500.000        | 160.000          | 500.000          | 1.500.000        |
| Kemikalieudgifter, NaOH                  | kr/år              | 213.776          | 668.050          | 2.004.150        | 138.384          | 432.450          | 1.297.350        |
| Kemikalieudgifter, HCl                   | kr/år              | 7.498            | 23.430           | 70.290           | 7.498            | 23.430           | 70.290           |
| Sandudgifter                             | kr/år              | 4.768            | 14.900           | 44.700           | 2.720            | 8.500            | 25.500           |
| Bortskaffelse af pelletaffald            | kr/år              | 19.312           | 60.350           | 181.050          | 12.172           | 38.038           | 114.113          |
| Elektricitet                             | Kr/år              | 3.784            | 11.825           | 35.475           | 3.784            | 11.825           | 35.475           |
| <b>Variable udgifter</b>                 | <b>kr/år</b>       | <b>249.138</b>   | <b>778.555</b>   | <b>2.335.665</b> | <b>164.558</b>   | <b>514.243</b>   | <b>1.542.728</b> |
| Service                                  | kr/år              | 10.000           | 15.000           | 20.000           | 5.000            | 10.000           | 20.000           |
| Pasning                                  | kr/år              | 28.750           | 82.500           | 200.000          | 28.750           | 82.500           | 200.000          |
| <b>Faste udgifter</b>                    | <b>kr/år</b>       | <b>38.750</b>    | <b>97.500</b>    | <b>220.000</b>   | <b>33.750</b>    | <b>92.500</b>    | <b>220.000</b>   |
| <b>Driftsudgifter, Total</b>             | <b>kr/år</b>       | <b>287.888</b>   | <b>876.055</b>   | <b>2.555.665</b> | <b>198.308</b>   | <b>606.743</b>   | <b>1.762.728</b> |



Tabel B2 *Detaljeret af investering og driftsomkostninger for nanofiltrering, ekskl. spildevandsudgifter. Den varierende faktor mellem de 3 scenarier under henholdsvis I og II er vandmængden, der produceres (henholdsvis 160, 500 og 1.500 tusinde m<sup>3</sup>/år). Udgifter til eventuel neutralisering af aggressiv kulddioxid er ikke medregnet.*

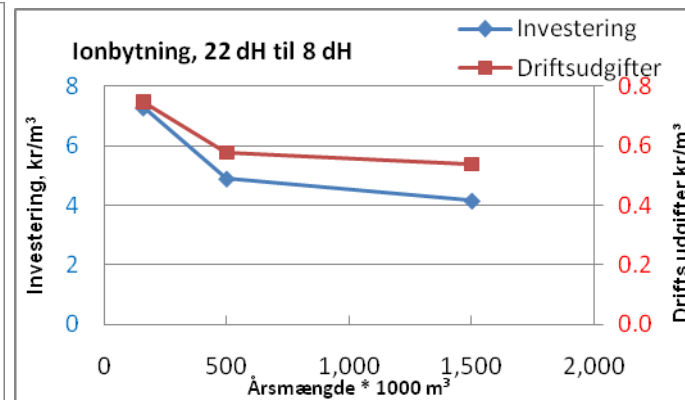
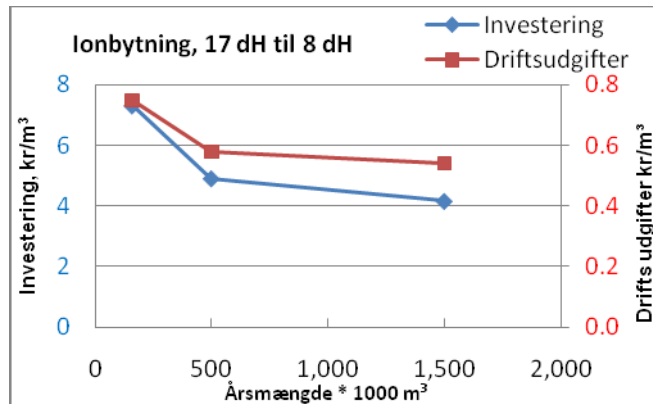
|                                     | Enhed              | Scenarie I       | Scenarie I       | Scenarie I       | Scenarie II      | Scenarie II      | Scenarie II      |
|-------------------------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Hårdhed                             |                    | 22               | 22               | 22               | 17               | 17               | 17               |
| Levetid                             |                    | 15               | 15               | 15               | 15               | 15               | 15               |
| <b>Investering</b>                  |                    |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Pris for NF 03-18 komplet           | 0                  | 496.000          | 1.220.000        | 3.420.000        | 435.000          | 1.036.000        | 2.898.000        |
| Installation af NF                  | 0                  | 74.400           | 122.000          | 342.000          | 65.250           | 103.600          | 289.800          |
| Bygning                             | 0                  | 240.000          | 420.000          | 960.000          | 240.000          | 420.000          | 960.000          |
| Sammenkobling, 20%                  | 0                  | 162.080          | 317.160          | 708.300          | 148.050          | 280.728          | 622.170          |
| Projektering, 20%                   | 0                  | 194.496          | 374.249          | 814.545          | 177.660          | 331.259          | 715.496          |
| <b>Investering, total</b>           | <b>0</b>           | <b>1.166.976</b> | <b>2.453.409</b> | <b>6.244.845</b> | <b>1.065.960</b> | <b>2.171.587</b> | <b>5.485.466</b> |
| <b>Driftomkostninger</b>            |                    |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Total vand fra vandværk             | m <sup>3</sup> /år | 160.000          | 500.000          | 1.500.000        | 160.000          | 500.000          | 1.500.000        |
| Antiscalingskemikalier              | kr/år              | 30.829           | 96.341           | 289.023          | 19.934           | 62.294           | 186.882          |
| Elektricitet                        | Kr/år              | 24.252           | 61.275           | 183.825          | 20.033           | 55.647           | 166.941          |
| <b>Variable udgifter</b>            | <b>kr/år</b>       | <b>55.081</b>    | <b>157.616</b>   | <b>472.848</b>   | <b>39.967</b>    | <b>117.941</b>   | <b>353.824</b>   |
| Service og membranrensning          | kr/år              | 18.000           | 36.000           | 108.000          | 18.000           | 36.000           | 108.000          |
| Membran, 7 års levetid              | Kr/år              | 15.000           | 48.000           | 144.000          | 15.000           | 48.000           | 144.000          |
| Pasning                             | kr/år              | 26.000           | 32.500           | 39.000           | 26.000           | 32.500           | 39.000           |
| <b>Faste udgifter</b>               | <b>kr/år</b>       | <b>59.000</b>    | <b>116.500</b>   | <b>291.000</b>   | <b>59.000</b>    | <b>116.500</b>   | <b>291.000</b>   |
| <b>Driftsudgifter, total pr. år</b> | <b>kr/år</b>       | <b>114.081</b>   | <b>274.116</b>   | <b>763.848</b>   | <b>98.967</b>    | <b>234.441</b>   | <b>644.824</b>   |



## Central blødgøring af drikkevand

Tabel B3 *Detaljeret af investering og driftsomkostninger for ionbytning, ekskl. spildevandsudgifter. Den varierende faktor mellem de 3 scenarier under henholdsvis I og II er vandmængden, der produceres (henholdsvis 160, 500 og 1.500 tusinde m<sup>3</sup>/år).*

|  |                    | Scenarie I     | Scenarie I     | Scenarie I       | Scenarie II    | Scenarie II    | Scenarie II      |
|--|--------------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|------------------|
| Hårdhed                                |                    | 22             | 22             | 22               | 17             | 17             | 17               |
| Levetid                                |                    | 15             | 15             | 15               | 15             | 15             | 15               |
| <b>Investering</b>                     |                    |                |                |                  |                |                |                  |
| Pris for ionbytningsanlæg (2 kolonner) | Kr                 | 100.000        | 180.000        | 600.000          | 100.000        | 180.000        | 600.000          |
| Installation, 20%                      | Kr                 | 20.000         | 32.400         | 90.000           | 20.000         | 32.400         | 90.000           |
| Bygning                                | Kr                 | 120.000        | 240.000        | 360.000          | 120.000        | 240.000        | 360.000          |
| Pumpe                                  | kr                 | 5.000          | 40.000         | 90.000           | 5.000          | 40.000         | 90.000           |
| Sammenkobling, 20%                     | Kr                 | 49.000         | 98.480         | 228.000          | 49.000         | 98.480         | 228.000          |
| Projektering, 20%                      | Kr                 | 58.800         | 118.176        | 273.600          | 58.800         | 118.176        | 273.600          |
| <b>Investering, total</b>              | <b>Kr</b>          | <b>352.800</b> | <b>709.056</b> | <b>1.641.600</b> | <b>352.800</b> | <b>709.056</b> | <b>1.641.600</b> |
| <b>Driftomkostninger</b>               |                    |                |                |                  |                |                |                  |
| Total vand fra vandværk                | m <sup>3</sup> /år | 160.000        | 500.000        | 1.500.000        | 160.000        | 500.000        | 1.500.000        |
| Saltudgift                             | kr/år              | 132.364        | 413.636        | 1.240.909        | 84.706         | 264.706        | 794.118          |
| Elektricitet                           | Kr/år              | 4.816          | 15.050         | 45.150           | 4.007          | 12.521         | 37.562           |
| <b>Variable udgifter</b>               | <b>kr/år</b>       | <b>137.180</b> | <b>428.686</b> | <b>1.286.059</b> | <b>88.712</b>  | <b>277.226</b> | <b>831.679</b>   |
| Service                                | kr/år              | 5.000          | 8.500          | 3.500            | 5.000          | 8.500          | 3.500            |
| Harpiks, 8 års levetid                 | Kr/år              | 2.500          | 4.875          | 19.875           | 2.500          | 4.875          | 19.875           |
| Pasning                                | kr/år              | 13.000         | 13.000         | 13.000           | 13.000         | 13.000         | 13.000           |
| <b>Faste udgifter</b>                  | <b>kr/år</b>       | <b>20.500</b>  | <b>26.375</b>  | <b>36.375</b>    | <b>20.500</b>  | <b>26.375</b>  | <b>36.375</b>    |
| <b>Driftsudgifter, Total</b>           | <b>kr/år</b>       | <b>157.680</b> | <b>455.061</b> | <b>1.322.434</b> | <b>109.212</b> | <b>303.601</b> | <b>868.054</b>   |



**Sammenligning af investerings- og driftsomkostninger (ekskl. spildevandsbehandling):**

