



Blødgøring af drikkevand i Aarhus - Forventede konsekvenser

Rygaard, Martin; Albrechtsen, Hans-Jørgen

Publication date:
2020

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Rygaard, M., & Albrechtsen, H-J. (2020). *Blødgøring af drikkevand i Aarhus - Forventede konsekvenser*. Danmarks Tekniske Universitet (DTU).

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



Blødgøring af drikkevand i Aarhus Forventede konsekvenser

Martin Rygaard & Hans-Jørgen Albrechtsen

December 2020

Blødgøring af drikkevand i Aarhus

Forventede konsekvenser

Rapport

2020

Af

Martin Rygaard & Hans-Jørgen Albrechtsen

Copyright: Hel eller delvis gengivelse af denne publikation er tilladt med kildeangivelse

Udgivet af: DTU, Institut for Vand og Miljøteknologi, Bygningstorvet, Bygning 115, 2800 Kgs.
Lyngby
www.env.dtu.dk

Forord

Dette notat er rekvireret af Aarhus Vand og udført af DTU Miljø. Notatet er et fagligt bidrag til Aarhus Vands overvejelser om at implementere blødgøring i Aarhus' drikkevandsforsyning.

Kongens Lyngby, december 2020

Martin Rygaard

Lektor

Indhold

1.	Indledning.....	5
1.1	Formål og metode.....	5
1.2	Drikkevandets nuværende hårdhed i Aarhus.....	5
1.3	Drikkevandsbestanddele påvirket af blødgøring.....	6
2.	Effekter af blødgøring.....	7
2.1	Sundhed.....	7
2.2	Tekniske installationer.....	11
2.3	Miljøeffekter i et livscyklusperspektiv.....	11
2.4	Samfundsøkonomiske effekter.....	12
2.5	Andre økonomiske konsekvenser af hårdt vand.....	14
3.	Forbrugernes oplevelse af blødere vand.....	15
4.	Kalkudfældningspotentiale.....	17
4.1	CCPP.....	17
4.2	MCCP.....	20
5.	Opsummering og anbefalinger.....	21
	Referencer.....	22

1. Indledning

Aarhus Vand overvejer at blødgøre vandet i Danmarks anden største by. I det østlige Danmark har flere undersøgelser peget på, at blødgøring af drikkevandet for de fleste områder vil medføre flere økonomiske og miljømæssige fordele end ulemper (COWI, 2011; Godskesen et al., 2012; Rambøll, 2017). Andre analyser har peget på, at fordelene alene vedrører husholdninger, og at der kan være store omkostninger forbundet for industrier (Deloitte, 2015a) og dele af folkesundheden, navnlig tandsundhed (Arvin et al., 2018). Drikkevandet i Aarhus er generelt blødere end drikkevand i Østdanmark. Hvorvidt blødgøring er fordelagtigt i Aarhus kan belyses på baggrund af en kritisk gennemgang af undersøgelser og publikationer på området.

1.1 Formål og metode

I det følgende vil vi gennemgå den seneste viden om blødgøring og dets samfundsmæssige effekter ved at beskrive de fordele og ulemper, som kan forventes i Aarhus forsyningsområde.

Vi vil gennemgå følgende effekter:

- Sundhed og anbefalede mineralindhold i drikkevand
- Tekniske installationer i husholdninger og virksomheder
- Miljø
- Samfundsøkonomi
- Kundeperspektivet
- Calciumkarbonat fældningspotentiale (CCPP)

Evalueringen er gennemført som en litteraturgennemgang baseret på de eksisterende danske rapporter om blødgøring, samt en gennemgang af tekniske og videnskabelige publikationer på emnet siden 2010. Der er antaget at væsentlige publikationer fra før 2010 allerede indgår i de tidligere evalueringer på området. Vores gennemgang er foretaget uden øvrige nye beregninger eller undersøgelser.

1.2 Drikkevandets nuværende hårdhed i Aarhus

Aarhus Vand har en samlet indvindingstilladelse på 16 mio. m³/år med en typisk hårdhed omkring 16 °dH'. Hårdheden varierer mellem 14 og 18 °dH (Tabel 1.1) og ligger 2-5 °dH lavere end den typiske hårdhed i Hovedstadsområdet.

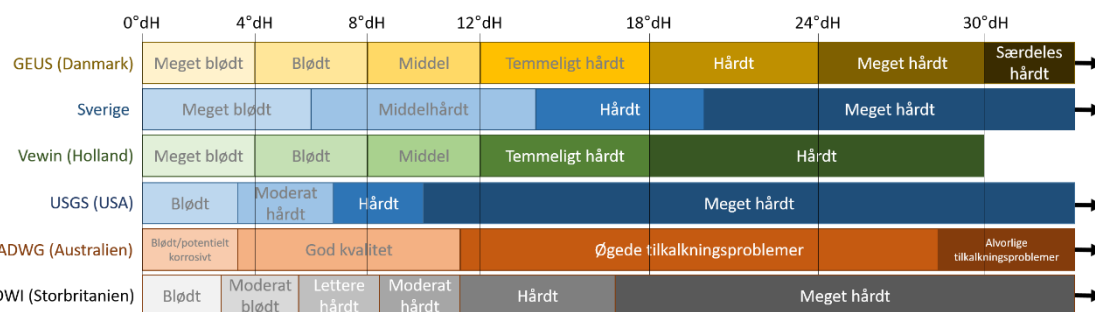
Tabel 1.1 Aarhus Vands vandværker, indvindingstilladelser og nuværende hårdhed. Kilde:

www.aarhusvand.dk 9. september 2020.

Vandværk	Indvindingstilladelse (mio. m ³ /år)	Hårdhed (°dH)
Stautrupværket	4,9	17
Åboværket	2,0	16
Kastedværket	3,8	18
Bederværket	2,7	17
Lyngbyværket	0,9	18
Truelsbjergværket	2,3	14
Elstedværket	1,6	15
Østerbyværket	2,4	14
Hårdhed middelværdi (vægtet efter indvindingstilladelse)		16,1 (16,3)

Drikkevandet i Aarhus betegnes "Temmelig hårdt" ifølge GEUS. Denne betegnelse stemmer overens med Hollandsk terminologi. I Sverige, USA og Storbritannien betegnes

hårdhedsgraden "Hårdt" eller "Meget hårdt", mens det i Australien ville blive betegnet med "Øgede tilkalkningsproblemer" (Figur 1). De internationale betegnelser indikerer en generel opfattelse af at hårdheder over 12°dH opfattes som "hårdt", mens vandet opfattes som blødt når hårdheden er under 8°dH.



Figur 1 Betegnelser af hårdhedsgrader. Generelt betegnes vand under 8°dH som blødt, mens vand over 12°dH generelt betragtes som "hårdt". (Groenendijk et al., 2008; NHMRC and NRMCC, 2011). Sverige: <https://sv.wikipedia.org/wiki/Vattenh%C3%A5rdhet>, USA: <https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/hardness-water>, Storbritannien: http://www.dwi.gov.uk/consumers/advice-leaflets/hardness_map.pdf.

1.3 Drikkevandsbestanddele påvirket af blødgøring

Drikkevandskemi er kompleks, og potentielt kan teknologier til blødgøring af drikkevand påvirke mange parametre. I vores gennemgang af sundhedsmæssige og tekniske konsekvenser af blødgøring, fokuserer vi på parametre, der kan forventes påvirket markant ved blødgøring på danske vandværker (Tabel 1.2).

Tabel 1.2 Parametre, der forventes påvirket ved blødgøring.

Blødgøringsteknologi	Parametre forventet påvirket > 10%	
Udfældning – Pellet	Ca, Na, Fe, Sr, Zn, Ni, F	(Larsen et al., 2016; Tang et al., 2019)
Ionbytning	Ca, Mg, Na (eller K afhængig af regenereringssalt)	(Wist et al., 2009)
Ionbytning - CARIX	Ca, Mg, HCO ₃ , SO ₄ , NO ₃	(Höll and Hagen, 2002)
Membranbehandling	Alle mineraler	(Fritzmann et al., 2007)

2. Effekter af blødgøring

Blødgøring er nyt i Danmark, men en veletableret teknologi i vandforsyninger omkring i verden. Særligt blødgøring i Tyskland og Holland tjener som inspiration for indførelse af blødgøring herhjemme. Sundhedsmæssige, tekniske og økonomiske effekter af blødgøring er evalueret i flere omgange i en dansk sammenhæng, særligt med fokus på potentialet for blødgøring i Østdanmark (COWI, 2011; Deloitte, 2015a; Rambøll, 2017; Rygaard, 2015; Rygaard and Albrechtsen, 2012). Som et supplement til de tidligere undersøgelser har vi screenet den videnskabelige litteratur på området siden 2010, for at finde nyere udgivelser som de tidligere danske rapporter ikke har inddraget (Tabel 2.1). Screeningen fandt 35 nye artikler med klar relevans for blødgøring i Aarhus, og vi har inddraget den ny viden, hvor det er skønnet relevant i det følgende.

Tabel 2.1 Screening i SCOPUS for videnskabelige artikler udgivet 2010 til og med september 2020.

Søgestreng	Resultater	Relevante resultater
"(TITLE-ABS-KEY (softening)) AND ("drinking water")"	279	12
"(TITLE-ABS-KEY (softening)) AND ((health)) AND (water AND supply)"	93	3
"(TITLE-ABS-KEY ("drinking water")) AND ((((health)) AND ("water supply")) AND (mineral)) AND (nutrition)"	484	20

Tabel 2.2 Mineralindhold i seneste udvidede analyse på Aarhus Vands vandværker og udvalgte vandværker i Østdanmark. Data fra jupiter.geus.dk per 20. september 2020.

Vandværk	Prøvedato	Ca ²⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	F ⁻ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Na ⁺ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	Hårdhed mg/L CaCO ₃	
Aarhus	Stautrup	2-3-20	110	92	0,28	331	14	58	1,6	43	336
	Åbo	2-3-20	110	37	0,29	284	11	31	1,4	82	323
	Kasted	9-3-20	100	34	0,21	252	9,4	22	1,2	93	291
	Beder	2-3-20	110	31	0,26	333	13	30	1,3	54	332
	Lyngby	9-3-20	96	45	0,27	245	11	22	0,78	72	288
	Truelsbjerg	9-3-20	87	24	0,26	292	8,4	19	0,87	27	254
	Elsted	9-3-20	90	23	0,26	332	9,3	20	0,88	10	265
	Østerby	2-3-20	86	23	0,25	307	11	19	1,2	23	263
Øst-DK	Brøndbyvester (HOFOR)	7-1-20	40	120	0,4	320	20	140	2,2	82	187
	Regnemark (HOFOR)	7-1-20	110	110	0,61	370	19	68	1,8	60	358
	Marbjerg (HOFOR)	6-1-20	100	35	0,45	335	21	16	0,81	80	341
	Store Heddinge	20-9-19	50	39	0,44	289	15	80	0,9	100	190

2.1 Sundhed

Drikkevand og sundhed er undersøgt i sammenhæng med fastsættelse af drikkevandkvalitetskriterier (WHO, 2011), anbefalinger til remineralisering efter afsaltning (WHO, 2005) og i forskning om medicinsk geologi (Rosborg and Kozisek, 2019; Selinus et al., 2013). Vurderingerne af drikkevandets mineraler og påvirkningen af sundhed veksler mellem et fokus på at fastsætte grænseværdier for, hvornår drikkevand er "sikkert", og de ernæringsmæssige (mikro-)påvirkninger af folkesundheden. I det følgende vil vi alene forholde os til mulige ernæringsmæssige påvirkninger fra drikkevand, der overholder kvalitetskriterierne for drikkevand. Det vil sige, at vi har fokus på mikro-påvirkninger af folkesundheden.

En ekspertgruppe under WHO konkluderede i 2005, at drikkevandets indhold af calcium, magnesium, fluorid, natrium, kobber, selen, og kalium er væsentlige for folkesundheden. Rosborg and Kozisek (2019) tilføjede bikarbonat til listen over væsentlige mineraler og påpegede især bikarbonats betydning for kroppens pH-balance, der kan påvirke knogler og muskelmasse. I forhold til blødgøring er det relevant at fokusere på de mineraler, der kan forventes fjernet/tilsat i en markant mængde i forhold til naturlige niveauer i Aarhus grundvand. Det vil sige calcium, magnesium, fluorid og natrium.

2.1.1 Generelle sundhedsforhold

Der findes en lang række studier af drikkevandets påvirkning af øvrige sundhedsforhold. I litteraturen har der været en særlig opmærksomhed på befolkninger, der indtager demineraliseret/afsaltet vand, fx omvendt osmose-behandlet havvand, og hvor der er bekymring for, at drikkevandet med tiden forskyder kroppens mineralbalance og derved forårsager eller forværrer sygdomme (Kozisek, 2020; Nriagu et al., 2016). Blødgøring af drikkevand medfører dog ikke en markant demineralisering af drikkevandet, men kan alligevel have betydning for folkesundheden. I det følgende gennemgås tre sundhedsforhold, som i særlig grad forventes påvirket ved blødgøring. Derudover er der en række andre eksempler på sundhedsforhold, der kan påvirkes positivt eller negativt ved ændret mineralsammensætning, men hvor påvirkningen forventes at være ubetydelig, eller vil kræve omfattende yderligere studier. Det drejer sig for eksempel om sammenhænge mellem drikkevandets calciumkoncentration og forekomsten af:

- knogleskørhed (Vannucci et al., 2018)
- nyresten (Sulaiman et al., 2020)
- spytsten (Schröder et al., 2015)

I det følgende vil vi uddybe de forventede konsekvenser af blødgøring for de bedst undersøgte og mest diskuteret sundhedseffekter af varierende mineralindhold i drikkevand:

- caries
- hjerte-karsygdomme
- børneeksem

2.1.2 Caries

Caries er huller i tænderne, der skyldes, at tændernes emalje nedbrydes i et samspil mellem mundhygiejne og tandemaljens remineralisering. Tændernes emalje nedbrydes og forstærkes i en løbende proces, hvor calcium og fluorid spiller en nøglerolle (Ten Cate, 2013). Det er veldokumenteret, at drikkevandets fluoridindhold har betydning for forekomsten af caries (Featherstone, 2000). Både for meget og for lidt fluorid kan skade tænderne, og derfor anbefaler U.S. Public Health Service i tilfælde af tilsætning af fluorid til drikkevandet (fluoridering) en optimal koncentration på 0,7 mg/L (Gooch, 2015). Dette er 0.4-0.5 mg/L højere end det nuværende niveau i Aarhus.

Et dansk epidemiologisk studie (Arvin et al., 2018) fandt en sammenhæng mellem calcium, fluorid og forekomsten af caries blandt børn. Studiet fandt, at 100 mg/l reduktion i calcium kan modsvares af 0,6 mg/L ekstra fluorid. Forfatterne peger på, at det er drikkevandets og spyttets koncentration af Ca^{2+} og F^- og en løbende påvirkning af tandemaljen i mundhulen, der påvirker remineraliseringen. Der er på den baggrund bekymring for, at blødgørings reducere af calciumindholdet i drikkevand øger forekomsten af caries, hvis der ikke kompenseres med andre cariesforebyggende tiltag (Ekstrand og Arvin, 2018).

Tabel 2.3 Ændring i hyppighed af cariestilfælde (antal beskadigede tandflader, DMF-S) ved en reduktion af calcium til en hårdhed på 8°dH. DMF-S er estimeret i en "alt-andet-lige-betragtning" for en dansk middellindkomst på 232 tDKK baseret på Arvin et al (2018).

Vandværk	Ca Nuværende mg/L	F mg/L	Ca ved 8 dH mg/L	Caries Nuværende DMF-S	Caries Ændring ved blødgøring til 8 dH DMF-S	
Aarhus	Stautrup	110	0,28	33	2,5	+40%
	Åbo	110	0,29	38	2,5	+37%
	Kasted	100	0,21	41	2,7	+29%
	Beder	110	0,26	34	2,5	+39%
	Lyngby	96	0,27	38	2,7	+29%
	Truelsbjerg	87	0,26	42	2,8	+21%
	Elsted	90	0,26	41	2,8	+24%
	Østerby	86	0,25	38	2,8	+23%
Øst-DK	Brøndbyvester (HOFOR)	40	0,4		3,1	
	Regnemark (HOFOR)	110	0,61		2,0	
	Marbjerg (HOFOR)	100	0,45		2,3	
	Store Heddinge	50	0,44		2,9	

Når drikkevandet løbende påvirker tandsundheden, er det relevant for Aarhus Vand at være opmærksom på, at selv mindre ændringer (fx 0,1-0,3 mg/L) i fluoridkoncentrationen kan være u hensigtsmæssig. Blødgøring ved hjælp af pellet-reaktoren har i nogle tilfælde reduceret fluoridindholdet med 0,06-0,07 mg/L (Larsen et al., 2016). Større ændringer (fx 30-80 mg/L) i calciumkoncentrationen, medfører muligvis påvirkning af cariesforekomsten i størrelsesordenen 21-40% svarende til ca. 0,5-1 hul blandt 15-årige (Tabel 2.3). Den forventede påvirkning er en "alt-andet-lige"-betragtning, hvor der ikke er taget højde for initiativer i tandsundhedsplejen og er forbundet med stor usikkerhed (Rygaard and Albrechtsen, 2012).

Fra 1975 til 2010 er antallet af cariestilfælde blandt danske 12-årige faldet med ca. 80% (Rygaard and Albrechtsen, 2012). For 18-årige reduceredes caries ca. 70% i perioden 1989 til 2017 (Sundhedsstyrelsen, 2019). Det markante fald over tid understreger, at øvrige cariesforebyggende tiltag har større betydning for tandsundheden end forandringer i drikkevandets kvalitet.

2.1.3 Hjerte-karsygdomme

Talrige undersøgelser har siden 1950'erne studeret sammenhænge mellem drikkevandets hårdhed og forekomsten af hjerte-karsygdomme (Selinus et al., 2013). Der er efterhånden bred opbakning til teorien om, at det først og fremmest er drikkevandets indhold af magnesium, som er omvendt korreleret med risikoen for at dø af hjerte-karsygdomme (Catling et al., 2008; Cotruvo and Bartram, 2009; Cotruvo et al., 2017; WHO, 2005). Der peges specifikt på, at drikkevandets indhold af magnesium er et væsentligt *baseline* bidrag gennem hele livet (Cotruvo et al., 2017). Effekten er svag, men da hjerte-karsygdomme næstefter kræft er den hyppigste dødsårsag i Danmark (Sundhedsdatastyrelsen, 2018), kan drikkevandets magnesiumindhold have betydning for folkesundheden og de samfundsomkostninger, der er forbundet hjerte-karsygdomme (Rygaard et al., 2011).

Af et forsigtighedsprincip er det relevant at undgå blødgøringsteknologier, der reducerer drikkevandets indhold af magnesium. Det bemærkes i den forbindelse, at Aarhus allerede har magnesiumniveauer nede omkring det minimum på 10 mg/L, som er anbefalet af eksperter på området (Tabel 2.4).

2.1.4 Børneeksem

Børneeksem (atopisk eksem eller atopisk dermatitis) kendes ved tørre eller væskende røde udslet, der klør og kan medføre betændelse. Børneeksem findes blandt ca. 15% af småbørn i Danmark (Engebretsen et al., 2017) og forbindes med væsentlige gener og omkostninger for børn og forældre (Langan et al., 2020). Samfundsøkonomiske estimater varierer, men det enkelte tilfælde kan have store konsekvenser for både barn og forældre, der kan risikere at bruge mange ressourcer i behandlingen. Et studie fra Singapore opgjorde de gennemsnitlige årlige samfundsomkostninger for behandling, medicin og pårørendes tidsforbrug til ca DKK(2017) 50.000 per barn med børneeksem (Olsson et al., 2019).

Flere internationale studier har påvist sammenfald mellem hårdt vand og forekomst af børneeksem (Jabbar-Lopez et al., 2020; McNally et al., 1998; Miyake et al., 2004; Perkin et al., 2016). Sammenfaldet er også fundet i Danmark, hvor den relative forekomst af børneeksem blandt 56.950 børn op til 18 måneders alderen på tværs af landet steg med 5% for hver gang hårdheden øgedes med 5°dH (Engebretsen et al., 2017). Forklaringen er ukendt, men der er indikationer på en sammenhæng til en genmutation, der findes hos et mindretal af børnene, og som hæmmer forekomsten af filaggrin i huden (Jabbar-Lopez et al., 2020). Der afventes resultater af et igangværende engelsk studie af blødgøring i husstande, hvor der tages højde for observationer af denne genmutation (Arents et al., 2020; Jabbar-Lopez et al., 2019).

Det er relevant at forholde sig til central blødgørings mulige påvirkning af forekomsten af børneeksem. På det nuværende vidensgrundlag må det forventes, at blødgøring af drikkevandet i Aarhus kan medføre en reduktion i forekomsten af børneeksem. Påvirkningen er usikker men i en "alt-andet-lige" betragtning er den danske erfaringer at en reduktion på 5-10 °dH svarer til 5-10% reduktion i forekomsten af børneeksem..

2.1.5 Anbefalede mineralindhold i drikkevand i forhold til sundhed

Både WHO (2017) og Det Europæiske Råds forslag til revision af EU's drikkevandsdirektiv (EU, 2020) nævner, at myndigheder bør fastsætte minimumskrav til calcium og magnesium, når vandbehandling "signifikant" fjerner mineraler fra drikkevandet. Der er dog ikke tale om en generel anbefaling til minimumsniveauer i drikkevand. Selvom myndighederne endnu ikke har minimumskrav parat, har fagfolk angivet anbefalinger for optimale mineralindhold i litteraturen (Tabel 2.4). Fx opsummerer *Kozisek (2020)* udvalgte EU-landes anbefalinger til kommende minimum- og (optimale) niveauer for calcium, magnesium og samlet mineralindhold (TDS). Det er tilrådeligt at der efter blødgøring i Aarhus tilstræbes 40-80, dog mindst 30 mg/L calcium og 20-40, dog mindst 10 mg/L magnesium.

Med Aarhus nuværende calciumindhold på 86-110 mg/L og magnesiumindhold på 8-14 mg/L er der udmærket råderum til en calciumreduktion, mens magnesium allerede er nær det anbefalede minimum og derfor ikke bør reduceres. Det bemærkes, at fluoridindholdet i Aarhus på 0,3-0,5 mg/L er lavere end det anbefalede optimum på 0,5-1 mg/L.

Tabel 2.4. Anbefalede optimale mineralindhold i drikkevand.

Parameter	Enhed	(Rosborg and Kozisek, 2019)	(Kozisek, 2020)	(Rygaard et al., 2011)	Aarhus nuværende
pH	-	7–8.5		-	
Calcium	mg/L	30–80	>30 (40-80)	40-50	86-110
Magnesium	mg/L	10–50	>10 (20-40)	>10	8-14
Bikarbonat	mg/L	100–300		-	245-333
Fluorid	mg/L	0.5–1.0		0.5-1	0,2-0,3
Inddampningsrest (TDS)	mg/L	100–500	>100 (200-500)	<200	
Hårdhed (CaCO ₃)	mg/L	>142 (8°dH)		<150	254-336

Rosborg and Koziseks (2019) anbefalinger for minimum sulfat- og kloridkoncentration i drikkevand er udeladt, da studiets forfattere bemærker, at der generelt indtages rigeligt fra fødevarer, og at der mangler studier af betydningen af drikkevandets bidrag.

2.2 Tekniske installationer

Når vandforsyningen blødgør vandet ændres kalkudfældning i forsyningens rørsystemer. Generelt forventes kalkafsætning i distributionssystemet at reduceres, men der ventes ikke problemer med korrosion fra det blødgjorte vand, så længe vandet holdes mættet med calciumkarbonat (Rambøll, 2017). I Aarhus vil der derfor ikke forventes nye problemer med tilkalkning og korrosion ved central blødgøring.

Vandforsyningerne vil skulle håndtere en ny behandlingsteknologi, og især håndtere et nyt restprodukt i form af kalkpellets eller koncentrat fra ionbytter/membrananlæg.

Den største forandring forventes hos kunderne, hvor vandet opvarmes og kommer i kontakt med atmosfæren, så CO₂ kan afgasses. Både temperaturstigningen og CO₂-reduktionen øger det teoretiske potentiale for kalkfældning (afsnit 4.1), og forbrugernes og industriens vandforbrugende installationer udsættes for mindre slid med en forbedret levetid til følge (COWI, 2011; Godskesen et al., 2012; Van der Bruggen et al., 2009). Andre rapporter har udfordret, i hvor høj grad levetiden påvirkes, men har dog stadig indregnet en ændret levetid i deres opgørelse af effekten af blødgøring (Deloitte, 2015a). Da de hollandske erfaringer og beregninger af fordele ved blødgøring typisk baserer sig på blødgøring fra ca. 14 ned til 8°dH (Beeftink et al., 2021), må det forventes, at der også er fordele ved blødgøring fra Aarhus nuværende niveau. I Tyskland er der tidligere vist klare fordele ved en blødgøring fra niveauer over 14°dH og ned til 10°dH eller lavere (Hillebrand et al., 2004). Der er på den baggrund en forventning om at blødgøring i Aarhus også vil medføre markante gevinster som følge af en reduceret kalkafsætning, reduceret sæbeforbrug mv. i husholdninger og industrien. Effekterne er kvantificeret i danske og udenlandske livscyklusvurderinger (LCA) og cost-benefit opgørelser.

2.3 Miljøeffekter i et livscyklusperspektiv

Livscyklusvurderingen i Godskesen et al (2012) ligger til grund for store dele af de senere miljøeffektvurderinger og cost-benefit opgørelser. Godskesen et al. (2012) tog udgangspunkt i Københavns drikkevand med en hårdhed omkring 20°dH og beregnede effekten ved en reduktion til henholdsvis 14 og 8°dH. Antagelsen var, at effekterne i husholdningerne afhænger lineært af hårdheden, og derfor blev den miljømæssige gevinst fundet lige stor i springene fra 20 til 14 og 14 til 8°dH. De miljømæssige omkostninger forbundet med det yderligere behandlingstrin var hentet ind ved gevinster hos forbrugerne, når hårdheden var reduceret 1,2°dH. Det vil sige, at en blot beskeden reduktion i hårdhed forventes at medføre positive miljøeffekter. Siden 2012 og fremover vil andelen af fornybare energiressourcer i det danske

elmix stige. Det betyder, at blandt andet bidraget til klimaforandringer vil reduceres i forbindelse med el- og varmekonsum hos både vandværker og vandforbrugere. Det vurderes, at effekten af et ændret elmiks ikke vil ændre de tidligere konklusioner, hvilket også støttes af et senere studie, der fandt markante fordele ved blødere vand i København i et scenarie, hvor el alene antages at komme fra vindenergi (Godskesen et al., 2013).

Et studie estimerede karbonfodaftrykket for seks forskellige blødgøringsteknologier for en typisk hollænderes årlige forbrug af 43 m³ drikkevand. Central blødgøring med pellet reaktor, fældning i bassin, nanofiltrering og ionbytning gav alle et kulstoffodaftryk omkring -2 kg CO₂-eq/43 m³, og er i et klimaforandringsperspektiv en gevinst for miljøet (Beeftink et al., 2021). Central blødgøring med omvendt osmose gav et nettobidrag til CO₂-udledning på 0,5 kg CO₂-eq/43 m³, mens decentral blødgøring i den enkelte husholdning gav et nettobidrag på 1,6 kg CO₂-eq/43 m³, hvilket forklares af miljøomkostningerne knyttet til en mindre effektiv blødgøring i decentrale anlæg. Hollænderne påpeger, at effekterne i husholdningerne aftager ved hårdhedsniveauer under 8°dH, og blødgøring til lavere hårdhedsniveauer medfører færre miljømæssige fordele.

Evalueringerne fra Danmark og Holland er i tråd med en af tidligste beregninger af miljøeffekter blødgøring i Tyskland (Hillebrand et al., 2004). Evalueringerne viser, at central blødgøring af vand fra 14°dH og fx ned til 8°dH er en miljømæssig gevinst i et livscyklusperspektiv. Med baggrund i de nævnte studier, må det forventes at også Aarhus i en livscyklusbetragtning kan høste miljømæssige fordele i forbindelse med blødgøring.

Tabel 2.5 Kulstoffodaftryk af blødgøringsteknologier estimeret for hollandske forhold ved en reduktion fra 14°dH. Der er regnet på en gennemsnitligt forbrug på 43 m³/person/år (Beeftink et al., 2021). Decentral ionbytning er blødgøring i den enkelte husholdning.

Blødgøringsteknologi	Hårdhed efter blødgøring °dH	Kulstoffodaftryk kg CO₂-eq per 43 m³
Pellet reaktor	8	-1,9
Fældning i bassin ved tilsætning af base	8	-2,4
Omvendt osmose	8	0,5
Nanofiltrering	8	-2,4
Central ionbytning	8	-2,3
Decentral ionbytning	0	1,6

2.4 Samfundsøkonomiske effekter

Der er gennemført flere samfundsøkonomiske analyser af blødgøring i Danmark, og der er også en række internationale analyser på området. Det er ikke muligt at sammenligne de økonomiske opgørelser på tværs, fordi de indregner forskellige effekter, prissætter omkostninger forskelligt, er beregnet for forskellige størrelser vandværker og blødgøringsniveauer. Endeligt varierer de i antal leverede m³, som omkostningen fordeles over. Når investering i og drift af blødgøring indregnes, viser analyserne alle en positiv gevinst i størrelsesordenen 0,3-4 kr per m³ leveret til husholdningen (Tabel 2.4). Det forudsætter, at den billigste blødgøringsteknologi anvendes. COWI udførte en række analyser for vandforsyningen i København i perioden 2011 til 2014. En række prissætninger blev justeret undervejs, og den seneste opgørelse viste en nettobesparelse på 4,4 kr/m³ og væsentligt mere end det første bud på 0,3 kr/m³. Det var især højere udgifter til VVS-håndværkeromkostninger, afkalkning af kaffemaskiner, samt saltforbrug i opvaskemaskiner, der medførte en justering af prisen.

Deloitte lavede en kritisk gennemgang af COWIs beregninger og udførte på den baggrund et bud på konsekvenserne af blødgøring hos Forsyning Ballerup. Hvor COWI i sin tid kom frem til, at den positive gevinst ved blødgøring var robust mod usikkerheder i opgørelsesmetoderne, kom Deloitte frem til, at den økonomiske gevinst ville være mindre (1,9 kr/m³) og vurderede det positive udbytte mindre sikkert. Derudover viste Deloitte's analyse også, at for Ballerups fire mest vandforbrugende virksomheder ville der være tale om en samfundsøkonomisk tab omkring 2 kr/m³. Tabet forklarer Deloitte med, at virksomhederne alligevel har brug for en komplet afmineralisering af en del af deres brugsvand.

I et bredere dansk perspektiv har Rambøll vurderet, at det i kommuner med "temmelig hårdt" vand (12-18 dH) vil være samfundsøkonomisk fordelagtigt at blødgøre til 6 dH, og at "det kan være" samfundsøkonomisk fordelagtigt at blødgøre til 10 dH (Rambøll, 2017). Samme evaluering fandt, at det er fordelagtigt at blødgøre "hårdt vand" (18-24 dH) til 14 dH eller lavere. I lyset af blandt andet de Hollandske erfaringer (afsnit 2.3) og i overensstemmelse med Godskesen et al. (2012), Van der Bruggen et al. (2009) og Groenendijk et al. (2008) må det antages, at konsekvenserne af blødgøring ned til 8°dH i høj grad afhænger af blødgøringsdybden, dvs den absolutte reduktion i hårdhed. I de nævnte analyser vil en blødgøring fra 16 til 8°dH vurderes lige så fordelagtigt som en reduktion fra 20 til 12°dH.

De danske samfundsøkonomiske opgørelser indregnede udgifter til blødgøring, sundhedseffekterne caries, hjerte-karsygdomme, og en række besparelser hos forbrugerne til sæbe, afkalkning, opvarmning mv. Derudover er en række mulige fordele ved blødgøring ikke indregnet, herunder børneeksem (afsnit 2.1) og effekter i ejendomme og hos virksomheder, som fx perlatorskift, cisterne-kit-skift, varmetab i varmevekslere (afsnit 3). Sådanne effekter er kun undersøgt i begrænset omfang og det er ikke muligt at kvantificere, men de vil alle bidrage positivt til den samfundsøkonomiske konsekvens ved blødgøring. Det vurderes derfor, at samfundsøkonomiske konsekvenser vil trække i en mere positiv retning ved fremtidige analyser, hvor flere forhold inkluderes.

Tabel 2.6 Samfundsøkonomiske opgørelser af konsekvensen af blødgøring.

Analyse	Hårdhed før blødgøring °dH	Hårdhed efter blødgøring °dH	Vandforbrug m ³ /person/år	Samfundsøkonomisk konsekvens DKK/m ³ i året for publicering
Flandern, Belgien	26	8	42	0,5
Husholdninger (Van der Bruggen et al., 2009)				
Brabant Water, Holland (Groenendijk et al., 2008)	14	8	Ikke angivet	150 DKK/husholdning/år
KE København	17	8	43	0,3
Pellet/ionbytter (COWI, 2011)				
KE Ejerkommuner 2014 (COWI, 2014)	18	8	37	4,4
Ballerup husholdninger (Deloitte, 2015a)	18	10	Ikke angivet	1,9
Ballerup, 4 virksomheder, 280.000 m ³ /år (Deloitte, 2015b)	18	10	Ikke relevant	-2,1
Danmark (Rambøll, 2017)	Nuværende dansk niveau	14 10 6		3,1 4,0 5,0

På baggrund af de her refererede studier vurderer vi, at en reduktion af hårdheden fra 16 til 8°dH også kan have positive samfundsøkonomiske konsekvenser for Aarhus' husholdninger og forsyningsområde som helhed.

2.5 Andre økonomiske konsekvenser af hårdt vand

Hvor folk oplever gener af drikkevandets mineralindhold, kan de selv tage initiativ til at ændre vandkvaliteten i deres hjem. Et amerikansk studie viste, at den gennemsnitlige husholdning i staterne Californien, Nevada og Texas er villig til at betale USD 12 (ca. 75 kr) per år for et reduceret mineralindhold i drikkevandet (Farah and Torell, 2019). I England og Wales viste en spørgeskemaundersøgelse, at 39% ud af 4520 husstande betalte for en form for "afværgelse" af en oplevet problematisk æstetisk vandkvalitet (Lanz and Provins, 2016). Afværgelsen kunne fx bestå i en filterkande, køb af flaskevand, decentral blødgøring mv. Omfanget af afværgelsen var korreleret med drikkevandets hårdhed og typisk ville en 10% lavere hårdhed reducere omkostningen til afværgelse med GBP 1 (ca. DKK 8) per år. Der er ikke udført lignende undersøgelser i Danmark.

I Flandern var der i et område med 26°dH fundet at 35% af husholdningerne havde egne blødgøringsanlæg (Van der Bruggen et al., 2009). Resultaterne fra USA, England og Belgien viser at folk i udbredt grad er villige til at betale for blødere vand. Måske endnu mere relevant er det, at husholdninger aktivt forandrer vandkvaliteten i deres hjem, hvis de finder den utilfredsstillende. Har folk i Aarhus en opfattelse af at vandkvaliteten er utilstrækkelig, er der grobund for at de vælger selv at gøre noget lokalt, med konsekvenser for deres egen økonomi og miljøet.

3. Forbrugernes oplevelse af blødere vand

Beregningerne af miljø-, sundheds-, og økonomieffekter er i overvejende grad baseret på forventede effekter, og kun sjældent ligger der observationer til grund. På nuværende tidspunkt findes der kun få målinger af folk og virksomheders oplevelser af skiftet til blødere vand. De fleste vurderinger af fordele, ulemper og samfundsøkonomiske konsekvenser af blødgøring er baseret på forventninger og ikke på målte effekter.

I forbindelse med indfasningen af blødgjort vand i Brøndby udførte HOFOR og DTU en undersøgelse af effekterne i husholdninger og enkelte virksomheder (Godskesen et al., 2019). Undersøgelsen vurderede en række forudsagte effekter af blødgøring i forhold til, hvad der kunne observeres i området, da hårdheden blev reduceret fra ca. 21 til 11°dH. Det overordnede billede var, at blødere vand havde en målbar effekt i Brøndby, og at det reducerede kalkindhold medførte færre gener hos vandkunderne (Tabel 3.1).

Driftsansvarlige i boligforeninger oplevede en markant reduktion i vedligehold af cisterner og perlatorer, hvilket også blev understøttet af målingerne. I interviewede virksomheder var oplevelsen, at blødere vand kan kræve en tilpasning af produktionsprocesser, men efter tilpasning er der færre gener forbundet med kalkafsætning i udstyr. Hos både husholdninger og i virksomheder blev der observeret et mindre behov for service og et reduceret kemikalieforbrug til rengøring. Den fulde besparelse krævede en adfærdsændring og det er derfor vigtigt at vandforsyninger ved overgang til blødere vand er opmærksom at informere forbrugerne om mulighederne for besparelser.

Tabel 3.1 Observerede effekter af blødgøring i Brøndby (Godskesen et al., 2019).

Emne	Måling	Observeret effekt	Yderligere undersøgelse anbefalet	
Erhverv	Opvarmning af vand	Nyttevirkning per brugsvand i varmeveksler (fjernvarme)	Ja	X
		Kalkudfældning og serviceinterval	Ja	
	Ionbytteranlæg	Reduktion saltforbrug	Ja	
		Reduktion i vandforbrug	Ja	
	Ældrecentre	Kalkudfældning perlatorer og cisterne kits	Ja	
		Rengøringsmiddel-forbrug	Ja	X
Forbrugeroplevelser	Tidsforbrug, arbejdsprocesser, beboerservice	*Ja		
Husholdninger	Elkedel	El-forbrug	Nej	
		Afkalkningsmængde	Ja	
		Levetid (hårdt vand)	Ja	X
	Kaffemaskine	Afkalkningsmængde	Ja	
		Levetid (kun hårdt vand)	**Ja	X
	Opvaskemaskine	Reduktion af saltforbrug	Ja	
		Reduktion af afspændingsmiddelforbrug	*Ja	
	Vaskemaskine	Levetid (hårdt vand)	**Ja	X
		Afkalkningsmiddel	*Ja	
		Vaskemiddel	Ja	
	Afkalkning	Levetid (kun hårdt vand)	**Ja	X
		Afkalkningsmiddel	Ja	
	Forbrugeroplevelser	Perlatorer	Ja	
		Miljø, tidsforbrug, maskiners levetid, mm.	Ja	

*Effekten har ikke været med i de samfundsøkonomiske opgørelser

**Levetider af vandforbrugende apparater blev ikke målt, men det blev bekræftet at tilkalkning kan have betydning for levetider og udskiftningsrate. Yderligere undersøgelser anbefales for at bestemme hvor stor påvirkningen af udskiftningsrater er.

Af de tidligere forudsagte effekter af blødere vand, var det kun opvarmningstiden i tilkalkede elkedler, som ikke kunne bekræftes. Vandets hårdhed påvirkede ikke elforbruget i elkedler.

Selvom observationerne i Brøndby i store træk svarede til forventningerne, er der stadig en række områder, hvor det vil være relevant at foretage yderligere undersøgelser, før en mere præcis forudsigelse af de økonomiske effekter kan etableres. Følgende forhold vurderer vi væsentlige for yderligere undersøgelser:

- **Varmeoverførslen i varmevekslere i områder med fjernvarme.**
COWI medtog en reduceret varmeoverførsel i deres økonomiske beregninger, mens Rambøll vurderede at effekten måtte være ubetydelig (COWI, 2011; Rambøll, 2017). Før-efter målingerne i Brøndby indikerede at varmeoverførslen i en varmeveksler blev forbedret med blødere vand, men det komplekse samspil med resten af fjernvarmeforsyningen blev ikke undersøgt.
- **Levetider af vandinstallationer og vandforbrugende apparater.**
Undersøgelser af levetider kræver observationer over så lang tid, som ikke har været muligt indtil videre. Det er uafklaret, i hvor høj grad kalkafsætninger medvirker til at installationer og apparater udskiftes før tid fx på grund af brud eller slidtage. Undersøgelsen i Brøndby viste, at elkedler slides af kalkafsætninger, men hvordan det påvirker udskiftningsraten er uafklaret.
- **Sundhedseffekter.**
Der er ikke undersøgt betydningen for tandsundhed, hjerte-karsygdomme og børneeksem før og efter blødgøring. Cariesdata indsamles rutinemæssigt og vil med tiden måske vise om blødgøring har en målbar effekt på tandsundheden i Brøndby.

Undersøgelsen i Brøndby efterlader et billede af, at blødgøring af drikkevand i et hårdtvandsområde virker og har betydning for folk og virksomheders dagligdag.

Ifølge flere hollandske vandforsyninger og baseret på mere end 20 års erfaring, er blødgøring af drikkevand overvejende forbundet med fordele. Det bemærkes, at man i Holland typisk blødgør til 6-8°dH og dermed til noget lavere niveauer end hvad der indtil videre er set i Danmark (Groenendijk et al., 2008; Hofman et al., 2007).

En eventuel beslutning om decentral blødgøring af det relativt hårde danske drikkevand bør ske i tæt dialog med kunderne. Nogle forbrugere vil værdsætte en reduceret hårdhed. Nogen vil værdsætte det så meget, at de vil vælge en decentral løsning på trods af, at det kommer med yderligere omkostninger for dem selv og miljøet. Fra udlandet kendes eksempler, hvor decentral blødgøring med ionbytter er populært og med tiden skaber problemer for spildevandsbehandlingen i forsyningsområdet når det salte koncentrat udledes fra hovedparten af husstandene (Bakshi et al., 2021). Andre forbrugere vil foretrække hårdt vand og være ærgerlige over en central blødgøring. Det er derfor vigtigt, at beslutninger på området er transparente og tages i dialog med både tilhængere og modstandere af blødgøring. Det er også vigtigt, at forventninger afstemmes, så fx tilhængere af blødgøring ikke forventer fuldstændigt kalkfrit vand, når der opretholdes et reduceret kalkniveau af hensyn til sundhed, miljø og teknik. Omvendt vil modstandere af blødgøring have brug for forklaringer om, hvordan risici er afvejet og afhjulpet i den endelige beslutning og dens implementering.

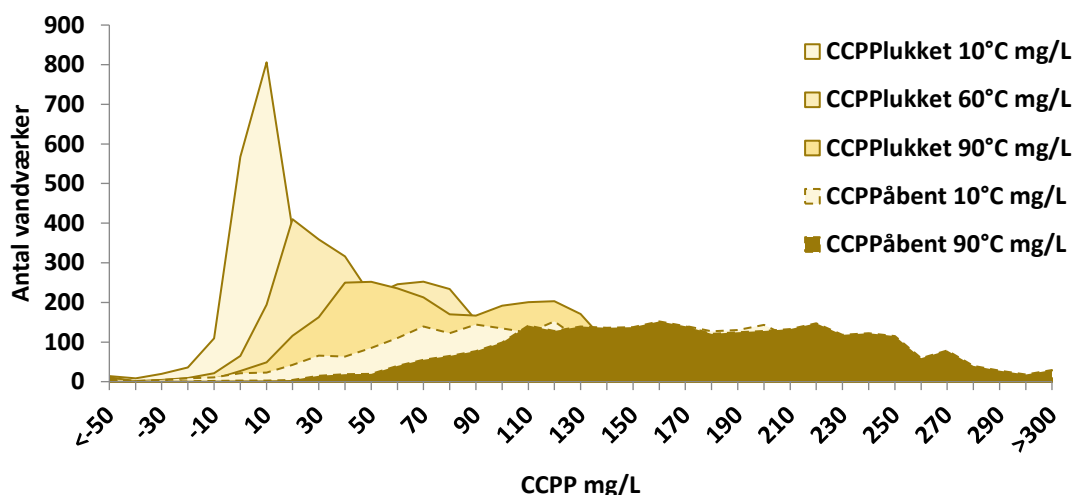
4. Kalkudfældningspotentiale

I lyset af det generelt hårde drikkevand i Danmark er det tankevækkende, at der har været begrænset fokus på at måle og forstå kalkudfældninger i dansk vandforsyning. Kalkudfældninger er komplekse og styres af kemiske ligevægte, forekomsten af mikrokrystaller, materialeoverflader i kontakt med vandet med mere (Brink et al., 2004). Der findes ikke et enkelt værktøj til en sikker forudsigtelse af kalkudfældninger. I Danmark har der traditionelt været fokus på drikkevandets hårdhedsgrad (summen af calcium og magnesium), aggressivitet overfor calcium dels beregnet som mætningsindex (Saturation Index, SI), eller angivet ved mængden af aggressiv kuldioxid. Aggressiv kuldioxid kan beregnes (de Moel et al., 2013) eller måles/aflæses på et diagram (DS 236, 1977) og angiver mængden af kuldioxid i en vandprøve, der vil reagere med calciumkarbonat. SI indikerer om vandet er mættet eller ikke mættet, men er alene en termodynamisk parameter, der ikke siger noget om mængden og hastigheden af kalkudfældninger. Aggressiv kuldioxid er et mål for vandets tendens til at opløse eller udfælde calciumkarbonat. Aggressiv kuldioxid angives som 0 mg/L når vandet er mættet med CaCO_3 (DS 236, 1977).

4.1 CCPP

I Holland, men også i en række andre lande, beregnes det teoretiske kalkudfældningspotentiale (Calcium Carbonate Precipitation Potential, CCPP), der anvendes i evalueringer af drikkevandets æstetiske kvalitet. CCPP har den fordel, at det angiver den mængde calciumkarbonat, som skal udfældes eller opløses for at opnå ligevægt i en "alt-andet-lige" betragtning. Beregningen af CCPP bør tage højde for vandets pufferkapacitet, ionstyrke og ionernes speciering og er dermed være robust i forhold til varierende vandtyper. Vi anbefaler, at CCPP beregnes i PHREEQC og at det altid angives, hvilken temperatur beregningen gælder for (Tang et al., 2021). Derudover er det væsentligt, om beregningen er for et lukket system eller for et åbent system, hvor der antages ligevægt med luftens CO_2 -indhold.

CCPP øges med stigende temperatur og når CO_2 afgasses til atmosfæren. Kalkudfældningspotentialet øges derfor kraftigt, når vandet varmes op i boligerne og når vandet kommer i kontakt med atmosfæren. Ifølge vores beregninger baseret på seneste udvidede vandanalyse, udpumper 29% af 2641 danske vandværker kalkopløsende vand ved 10°C , mens blot 2-4% er kalkopløsende ved 60°C ($\text{CCPP}_{\text{lukket}, 60^\circ\text{C}}$) eller efter afgangning af CO_2 ($\text{CCPP}_{\text{åbent}, 10^\circ\text{C}}$) (Figur 2).



Figur 2 Fordeling af CCPP i drikkevandet fra 2641 danske vandværker. Baseret på seneste udvidede vandanalyse registreret i Jupiter per august 2020. CCPP stiger markant ved højere temperaturer eller når vandet opnår ligevægt med atmosfæren og CO_2 er afgasset. Beregningsmetode: (Tang et al., 2021).

I en brugerundersøgelse blandt husholdninger på tværs af 18 vandværker, fandt Vandforsyningen Vitens (Holland) en sammenhæng mellem "udfældningsproblemer" og tilfredsheden med vandkvaliteten (Tas, 2016). Folk der var generet af udfældninger, var generelt mindre tilfredse med vandkvaliteten som helhed, end folk der oplevede færre problemer med udfældninger. Vitens fandt også at oplevelsen af udfældningsgener hang stærkere sammen med $\text{CCPP}_{\text{lukket}, 90^\circ\text{C}}$ end med hårdhedsgraden. Vitens har en målsætning om at levere vand med $\text{CCPP}_{\text{lukket}, 90^\circ\text{C}}$ lavere end 60 mg/L CaCO_3 hvilket stemmer med det daværende KIWAs erfaring, at $\text{CCPP}_{\text{lukket}, 90^\circ\text{C}}$ medfører færre udfældningsproblemer i vandvarmere (Brink et al., 2004). CCPP betragtes i Holland som et mere retvisende mål for de potentielle kalkudfældninger, end hårdheden alene, men også andre af vandets egenskaber er relevante at tage i betragtning, herunder mikropartikler, temperaturændringer og interaktion med materialeoverflader (Brink et al., 2004; Tang et al., 2021).

Tabel 4.1 Hårdhed og kalkfældningspotentialet CCPP beregnet uden (lukket) og med (åben) atmosfærisk ligevægt ved 10 og 90°C. Beregnet i PHREQC baseret på prøveresultaterne angivet i Tabel 1.2. Enheden er mg/L CaCO_3 .

Vandværk	CCPP Lukket 10°C	CCPP Lukket 90°C	CCPP Åben 10°C	Hårdhed
Stautrup	25	115	198	336
Åbo	18	97	170	323
Kasted	16	83	144	291
Beder	33	121	200	332
Lyngby	17	80	137	288
Truelsbjerg	-0,2	85	159	254
Elsted	28	110	181	265
Østerby	9	92	165	263
Brøndbyvester (HOFOR)	16	58	84	187
Regnemark (HOFOR)	32	129	216	358
Marbjerg (HOFOR)	-2	100	190	341
Store Heddinge	2	92	100	190

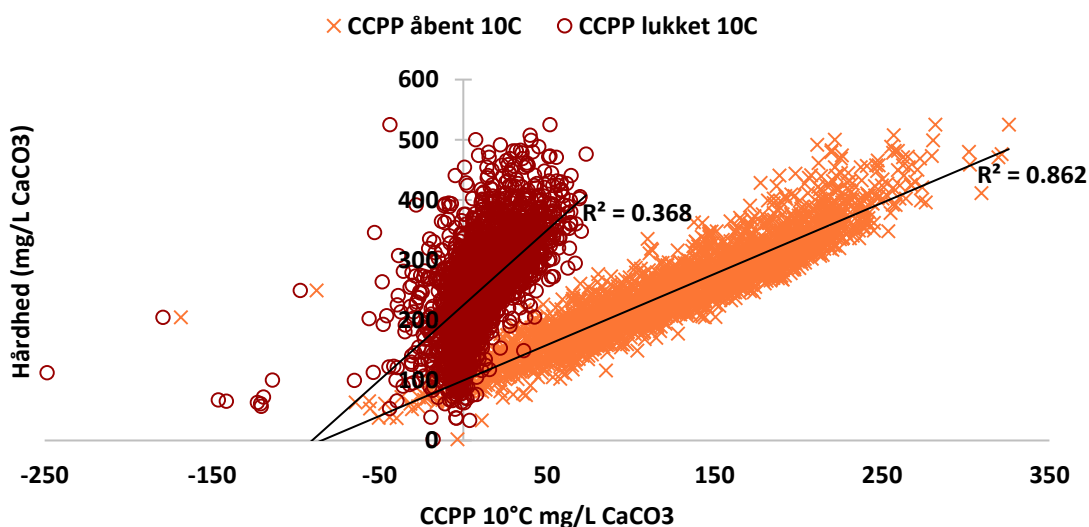
I Aarhus havde alle de seneste drikkevandsprøver i august 2020 positive CCPP værdier, med undtagelse af Truelsbjerg, der var svagt kalkopløsende i prøven 9. marts 2020 ($\text{CCPP} = -0,2$ mg/L CaCO_3) (Tabel 4.1). Ved høje temperaturer stiger CCPP markant og for alle Aarhus Vands vandværker er $\text{CCPP}_{\text{lukket}, 90^\circ\text{C}}$ større end 80 mg/L og dermed over de Hollandske

anbefalinger. CCPP-beregninger viser, at ønsket om at reducere kalkudfældninger fra Aarhus' drikkevand kan have sin berettigelse.

Mens både hollandske og tyske vandforsyninger og forskere anvender CCPP i evalueringen af drikkevandskvalitet, er der kun få studier af sammenhængen mellem CCPP og oplevede effekter i husholdninger og virksomheder. Da kalkudfældninger styres af karbonatsystemets ligevægte sammen med drikkevandets øvrige bestanddele, kan det tænkes at $CCPP_{\text{lukket}}$ beskriver effekter oplevet hos forbrugeren bedre end hårdhedsniveauet alene, blandt andet i overensstemmelse med erfaringerne fra Vitens nævnt ovenfor. Omvendt vil $CCPP_{\text{åben}}$, dvs under antagelse at CO_2 er i ligevægt med atmosfæren, i høj grad styres af drikkevandets hårdhed. Hårdheden forklarer 86% af variationen i $CCPP_{\text{åben}, 10^\circ C}$ på tværs af 2641 danske vandværker, mens hårdheden blot forklarer 37% af variationen i $CCPP_{\text{lukket}, 10^\circ C}$ (Figur 3).

På baggrund af de tyske og hollandske erfaringer, giver det god mening at beregne CCPP for lukkede systemer ved 10 og $90^\circ C$. I vurderingen af blødgøringsteknologier, er det vigtigt at være opmærksom på, at teknologierne effektivt nedbringer kalkudfældningspotentialerne, uden at risikere kalkopløsende forhold. Blandes vand fra flere vandværker eller renseprocesser, skal CCPP genberegnes, hvilket nemt kan gøres i PHREEQC. CCPP-værdierne kan indgå i evalueringen af den leverede drikkevandskvalitet som en kvantificering af kalkudfældningspotentialiet i de lukkede dele af systemet.

Når flere danske vandforsyninger overvejer blødgøring eller membranfiltrering af drikkevandet, hvor mineralsammensætningen ændres, vil det være relevant at få undersøgt sammenhængen mellem CCPP og effekter oplevet hos forbrugerne under danske forhold. Med en bedre forståelse af CCPP, vil det blive tydeligere, hvordan og hvornår CCPP kan bruges som beslutningsstøtte. Det er i den forbindelse uheldigt, at den seneste drikkevandsbekendtgørelse, ikke kræver måling for koncentration af calcium, magnesium og bikarbonat i drikkevand (Miljø og Fødevareministeriet, 2019), hvilket er en forudsætning for beregning af kalkaggressivitet og CCPP.



Figur 3 Hårdhed i relation til CCPP for 2641 danske vandværkers seneste udvidede vandanalyse indberettet i Jupiter per august 2020. Til forskel fra $CCPP_{\text{lukket}}$ korrelerer $CCPP_{\text{åben}}$ stærkt med hårdheden. Beregningsmetode: (Tang et al., 2021).

4.2 MCCP

Da CCPP er et teoretisk udtryk for kalkfældningspotentialer, er det relevant at overveje mere direkte målinger af kalkudfældninger. Til det formål anvender hollænderne et målt kalkfældningspotentialer (MCCP). MCCP måles typisk ved at bestemme forskellen i calciumkoncentration før og efter en kontrolleret opvarmning af en vandprøve. Hollænderne har både anvendt en omstændelig metode, hvor vandet opvarmes i et rør nedsænket i et oliebad, så opvarmningen kontrolleres nøje, men har siden lagt sig fast på en simple opstilling, hvor vandet opvarmes i flasker placeret på en kogeplade (Brink et al., 2004). Udfordringen er, at der måles på en vandprøve, hvor karbonatsystemet ikke er i ligevægt, og hvor resultatet derfor er meget følsomt over for kogetid, turbulens i vandfasen, mikrokrytaller mv. Det er ikke lykkedes DTU Miljølaboratoriet at bringe analysevariansen ned på et fornuftigt niveau (Afshar et al., 2021). Derudover, er det usikkert hvilke situationer MCCP er et udtryk for, da metoden ikke ligner det, der foregår hverken i en vandvarmer, varmeveksler, elkedel eller vaskemaskine. Vi forventer derfor ikke, at MCCP er en relevant parameter for evalueringen af vandkvalitet i en dansk vandforsyningskontekst.

Ønskes der et "praksisnært" mål for kalkudfældning som supplement til det beregnede, foreslår vi i stedet, at der udvikles en standard for måling af kalkudfældninger i lukkede systemer, som en vandvarmer, eller varmeveksler, og en metode for det åbne system, fx observeret kalkudfældninger i en elkedel eller på en flise (Afshar et al., 2021; Godskesen et al., 2019). Kvantificering af sådanne aktuelle kalkudfældninger, vil være nærmere den forbrugeroplevede effekt af vandets hårdhed.

5. Opsummering og anbefalinger

Gennemgangen af litteraturen og ovenstående overvejelser vedrørende blødgøring af drikkevand i et Aarhusiansk perspektiv kan opsummeres i følgende punkter:

- Der er med overvejende sandsynlighed både økonomiske og miljømæssige gevinster ved blødgøring af drikkevandet i Aarhus. Gevinsterne optræder som følge af reduceret kemiforbrug, samt forbedret drift og vedligehold af vandinstallationer
- Der er mulige påvirkninger af folkesundheden, som kan være både negative og positive. Negative effekter kan formentlig afhjælpes helt eller delvist med ændret praksis i sundhedssektoren.
- Der skal nok blødgøres til et lavere niveau end i København for at opnå samme absolutte effekt, fx 8 fremfor 10-11°dH. Beslutningen om ønsket niveau, bør følge af en helhedsvurdering af forbrugernes forventninger og ønsker, myndighedskrav, samt de tekniske muligheder på vandværkerne.
- Da flere danske vandforsyninger er i gang med, eller overvejer at indføre blødgøring, er det relevant at følgende undersøges og udvikles:
 - Effekten på varmesystemer baseret på varmevekslere
 - Levetider af rørsystemer og vandinstallationer (effekten forventes at være lille)
 - Observationer af sundhedseffekter (især caries, børneeksem) ved ændret mineralsammensætning som følge af blødgøring
 - To eller flere metoder til kvantificering af vandets kalkudfældning i henholdsvis et lukket og åbent system
- Kalkudfældningspotentialet CCPP kan beregnes og bruges som indikator for kalkudfældninger. Dette er især relevant for lukkede systemer uden kontakt med atmosfæren, fx varmevekslere, hvor hårdheden ikke er den eneste styrende parameter.

Tabel 5.1. Forventede effekter og konsekvenser ved blødgøring i Aarhus samt eksempler på mulige alternative afhjælpninger af negative effekter. *** = effekten vurderes sikker uden væsentlige undtagelser, ** = effekten vurderes sikker, men enkelte forhold går i modsat retning, * = effekten vurderes at være mindre sikker og kræver yderligere undersøgelser.

Effekt	Konsekvens	Vurderingens sikkerhed	Eksempler på alternativ afhjælpning
Caries	Negativ	**	Ændret indsats i den lokale tandpleje.
Hjertekarsygdomme	Neutral/Negativ	**	Undgå reduktion af magnesiumindhold
Børneeksem	Positiv	*	
Tekniske installationer	Positiv	***	Undgå kalkaggressivt vand
Miljøeffekter	Positiv	**	1) Optimere kemikalie- og materialeforbrug i vandbehandling. 2) Kommunike gavnlige ændringer i adfærd, fx sæbeforbrug.
Samfundsøkonomi	Positiv	**	Afklaring med virksomheder og større ejendomme om ændret drift og vedligehold af lokal vandrensning og VVS-installationer

Referencer

- Afshar, S.V., Albrechtsen, H.-J., Hedegaard-Jørgensen, M., Bülow, D. von, Rygaard, M., 2021. Blødgøring - CCPP og observerede effekter. Kongens Lyngby.
- Arents, B.W.M.W.M., Leonardi-Bee, J., Leonardi-Bee, J., 2020. Eczema and water hardness: another piece of the puzzle found? *Br. J. Dermatol.* 183, 203–204. <https://doi.org/10.1111/bjd.18864>
- Arvin, E., Bardow, A., Spliid, H., 2018. Caries affected by calcium and fluoride in drinking water and family income. *J. Water Health* 16, 70–77. <https://doi.org/10.2166/wh.2017.139>
- Bakshi, B., Doucette, E.M., Kyser, S.J., 2021. Centralized softening as a solution to chloride pollution: An empirical analysis based on Minnesota cities. *PLoS One* 16, e0246688. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246688>
- Beefink, M., Hofs, B., Kramer, O., Odegard, I., van der Wal, A., 2021. Carbon footprint of drinking water softening as determined by life cycle assessment. *J. Clean. Prod.* 278, 123925. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123925>
- Brink, H., Slaats, P.G.G., van Eekeren, M.W.M., 2004. Scaling in domestic heating equipment: getting to know a complex phenomenon. *Water Sci. Technol.* 49, 129–136.
- Catling, L. a, Abubakar, I., Lake, I.R., Swift, L., Hunter, P.R., 2008. A systematic review of analytical observational studies investigating the association between cardiovascular disease and drinking water hardness. *J. Water Health* 6, 433–442. <https://doi.org/10.2166/wh.2008.054>
- Cotruvo, J., Bartram, J., 2009. Calcium and magnesium in drinking water: Public health significance. World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- Cotruvo, J.A., Costello, R., Weglicki, W.B., 2017. Magnesium, Hard Water, and Health. *J. Am. Water Works Assoc.* 109, 62–68. <https://doi.org/10.5942/jawwa.2017.109.0146>
- COWI, 2014. SAMFUNDSØKONOMISK VURDERING AF BLØDGØRING AF VAND TIL HUSHOLDNINGER I HOFOR'S EJERKOMMUNER. Kongens Lyngby.
- COWI, 2011. Central blødgøring af drikkevand.
- de Moel, P.J., van der Helm, A.W.C., van Rijn, M., van Dijk, J.C., van der Meer, W.G.J., 2013. Assessment of calculation methods for calcium carbonate saturation in drinking water for DIN 38404-10 compliance. *Drink. Water Eng. Sci.* 6, 115–124. <https://doi.org/10.5194/dwes-6-115-2013>
- Deloitte, 2015a. Samfundsøkonomisk analyse af central blødgøring af vand på Forsyning Ballerups værker – screening af konsekvenser for private husholdninger Afrapportering af delopgave 1.
- Deloitte, 2015b. Samfundsøkonomisk analyse af central blødgøring af vand på Forsyning Ballerups værker – screening af konsekvenser for virksomheder Afrapportering af delopgave 2.
- DS 236, 1977. Aggressivitet over for calciumcarbonat.
- Ekstrand, K., Arvin, E., 2018. Cariesforebyggende tiltag i forbindelse med blødgøring af drikkevandet. *Tandlægebladet* 122, 2–5.
- Engelbrechtsen, K.A., Bager, P., Wohlfahrt, J., Skov, L., Zachariae, C., Nybo Andersen, A.-M., Melbye, M., Thyssen, J.P., 2017. Prevalence of atopic dermatitis in infants by domestic water hardness and season of birth: Cohort study. *J. Allergy Clin. Immunol.* 139, 1568-1574.e1. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2016.11.021>
- EU, 2020. (Proposal) Directive of the European Parliament and of the Council on the quality of water intended for human consumption. Council of the European Union, Brussels, Belgium.
- Farah, N., Torell, G.L., 2019. Defensive Investment in Municipal Water Hardness Reduction. *Water Resour. Res.* 55, 4886–4900. <https://doi.org/10.1029/2018WR024422>
- Featherstone, J.D., 2000. The science and practice of caries prevention. *J. Am. Dent. Assoc.* 131, 887–99.
- Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., Melin, T., 2007. State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination* 216, 1–76.

- Godskesen, B., Albrechtsen, H.-J., Rygaard, M., 2019. Før- og eftermålinger af effekter af blødgøring i Brøndby: Et samarbejdsprojekt mellem DTU og HOFOR. Kongens Lyngby.
- Godskesen, B., Hauschild, M., Rygaard, M., Zambrano, K., Albrechtsen, H.-J., 2012. Life cycle assessment of central softening of very hard drinking water. *J. Environ. Manage.* 105, 83–89. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.030>
- Godskesen, B., Hauschild, M., Rygaard, M., Zambrano, K., Albrechtsen, H.-J.H.-J., 2013. Life-cycle and freshwater withdrawal impact assessment of water supply technologies. *Water Res.* 47, 2363–2374. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.02.005>
- Gooch, B.F., 2015. U.S. public health service recommendation for fluoride concentration in drinking water for the prevention of dental caries. *Public Health Rep.* 130, 318–331. <https://doi.org/10.1177/003335491513000408>
- Groenendijk, M., Van De Wetering, S., Van Nieuwenhuijze, R., 2008. Central water softening: Customer comfort is relevant in new WHO view. *Water Sci. Technol. Water Supply* 8, 69–74. <https://doi.org/10.2166/ws.2008.036>
- Hillebrand, T., Böhm, E., Kotz, C., Schikorra, V., Schleich, J., Hesse, S., Baldauf, G., 2004. Zentrale Enthärtung von Trinkwasser. Eine ökologische und ökonomische Bewertung. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- Hofman, J., Kramer, O., Hoek, J.P. van der, Nederlof, M., Groenendijk, M., 2007. Twenty years of experience with centralised softening in the netherlands. *Water* 21 21–24.
- Höll, W.H., Hagen, K., 2002. Partial demineralisation of drinking water using carbon dioxide regenerated ion exchangers. *Water Sci. Technol. Water Supply* 2, 57–62. <https://doi.org/10.2166/ws.2002.0007>
- Jabbar-Lopez, Z.K., Craven, J., Logan, K., Greenblatt, D., Marrs, T., Radulovic, S., McLean, W.H.I., Lack, G., Strachan, D.P., Perkin, M.R., Peacock, J.L., Flohr, C., 2020. Longitudinal analysis of the effect of water hardness on atopic eczema: evidence for gene–environment interaction. *Br. J. Dermatol.* 183, 285–293. <https://doi.org/10.1111/bjd.18597>
- Jabbar-Lopez, Z.K., Gurung, N., Greenblatt, D., Briley, A., Chalmers, J.R., Thomas, K.S., Frost, T., Kezic, S., Common, J.E.A., Kong, H.H., Segre, J.A., Danby, S., Cork, M.J., Peacock, J.L., Flohr, C., 2019. Protocol for an outcome assessor-blinded pilot randomised controlled trial of an ion-exchange water softener for the prevention of atopic eczema in neonates, with an embedded mechanistic study: the Softened Water for Eczema Prevention (SOFTER) trial. *BMJ Open* 9, e027168. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2018-027168>
- Kozisek, F., 2020. Regulations for calcium, magnesium or hardness in drinking water in the European Union member states. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 112, 104589. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2020.104589>
- Langan, S.M., Irvine, A.D., Weidinger, S., 2020. Atopic dermatitis. *Lancet* 396, 345–360. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31286-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31286-1)
- Lanz, B., Provins, A., 2016. The demand for tap water quality: Survey evidence on water hardness and aesthetic quality. *Water Resour. Econ.* 16, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2016.10.001>
- Larsen, S.L., Hedegaard, M.J., Lopato, L., Dollerup Nielsen, O., Juul, H., Albrechtsen, H.-J., 2016. Demonstrationsanlæg til blødgøring af drikkevand. København, Danmark.
- 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, 527–531.
- Miljø og Fødevareministeriet, 2019. BEK nr 1070 af 28/10/2019 Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg. Miljø og Fødevareministeriet, Danmark.
- 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, 33–37.
- NHMRC, NRMCC, 2011. Australian Drinking Water Guidelines 6 2011, National Health and Medical Research Council, National Resource Management Ministerial Council, Commonwealth of Australia, Canberra, Australia. <https://doi.org/1864965118>
- Nriagu, J., Darroudi, F., Shomar, B., 2016. Health effects of desalinated water: Role of electrolyte disturbance in cancer development. *Environ. Res.* 150, 191–204. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.05.038>
- Olsson, M., Bajpai, R., Wee, L.W.Y., Yew, Y.W., Koh, M.J.A., Thng, S., Car, J., Järbrink, K., 2019. The cost of childhood atopic dermatitis in a multi-ethnic Asian population: a cost-of-

- illness study. *Br. J. Dermatol.* 1245–1252. <https://doi.org/10.1111/bjd.18442>
- Perkin, M.R., Craven, J., Logan, K., Strachan, D., Marrs, T., Radulovic, S., Campbell, L.E., MacCallum, S.F., McLean, W.H.I., Lack, G., Flohr, C., Young, L., Offord, V., DeSousa, M., Cullen, J., Taylor, K., Tseng, A., Raji, B., Nesbeth, S., Regis, G., Bigwood, C., Stedman, C., Tonner, S., Banks, E., Kahnum, Y., Babic, R., Stockwell, B., Thompson, E., Wheatley, L., Patkunam, D., Richards, K., Pietraszewicz, E., Stephens, A., Sudra, A., Turcanu, V., 2016. Association between domestic water hardness, chlorine, and atopic dermatitis risk in early life: A population-based cross-sectional study. *J. Allergy Clin. Immunol.* 138, 509–516. <https://doi.org/10.1016/J.JACI.2016.03.031>
- Rambøll, 2017. BLØDT VAND I EN CIRKULÆR ØKONOMI.
- Rosborg, I., Kozisek, F., 2019. Drinking Water Minerals and Mineral Balance, 2nd ed, Drinking Water Minerals and Mineral Balance. Springer, Cham, Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09593-6>
- Rygaard, M., 2015. Blødgøring, natrium og sundhedseffekter.
- Rygaard, M., Albrechtsen, H., 2012. Redegørelse om sundhedseffekter af blødgøring i København specielt med fokus på caries. Kgs. Lyngby, Denmark.
- Rygaard, M., Arvin, E., Bath, A., Binning, P.J., 2011. Designing water supplies: Optimizing drinking water composition for maximum economic benefit. *Water Res.* 45, 3712–3722.
- Schrøder, S., Homøe, P., Wagner, N., Vataire, A.-L., Lundager Madsen, H.E., Bardow, A., 2015. Does drinking water influence hospital-admitted sialolithiasis on an epidemiological level in Denmark? *BMJ Open* 5, e007385. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2014-007385>
- Selinus, O., Alloway, B., Centeno, J.A., Finkelman, R.B., Fuge, R., Lindh, U., Smedley, P., 2013. Essentials of Medical Geology, Revised ed. ed, Essentials of Medical Geology. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4375-5>
- Sulaiman, S.K., Enakshie, J., Traxer, O., Somani, B.K., 2020. Which Type of Water Is Recommended for Patients with Stone Disease (Hard or Soft Water, Tap or Bottled Water): Evidence from a Systematic Review over the Last 3 Decades. *Curr. Urol. Rep.* 21. <https://doi.org/10.1007/s11934-020-0968-3>
- Sundhedsdatastyrelsen, 2018. Dødsårsagsregisteret 2018. Tal og analyse.
- Sundhedsstyrelsen, 2019. Tandplejeprognose 2018-2040 - udbudet af personale i tandplejen. Sundhedsstyrelsen, København.
- Tang, C., Godskesen, B., Aktor, H., Rijn, M. Van, Kristensen, J.B., Rosshaug, P.S., Albrechtsen, H., Rygaard, M., 2021. Procedure for Calculating the Calcium Carbonate Precipitation Potential (CCPP) in Drinking Water Supply: Importance of Temperature, Ionic Species and Open / Closed System.
- Tang, C., Jørgensen Hedegaard, M., Lopato, L., Albrechtsen, H.J., 2019. Softening of drinking water by the pellet reactor - Effects of influent water composition on calcium carbonate pellet characteristics. *Sci. Total Environ.* 652, 538–548. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.157>
- Tas, M., 2016. Relation water quality and customer satisfaction.
- Ten Cate, J.M., 2013. Contemporary perspective on the use of fluoride products in caries prevention. *Br. Dent. J.* 214, 161–7. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2013.162>
- Van der Bruggen, B., Goossens, H., Everard, P.A.A., Stengée, K., Rogge, W., Stengée, K., Rogge, W., 2009. Cost-benefit analysis of central softening for production of drinking water. *J. Environ. Manage.* 91, 541–549. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.09.024>
- Vannucci, L., Fossi, C., Quattrini, S., Guasti, L., Pampaloni, B., Gronchi, G., Giusti, F., Romagnoli, C., Cianferotti, L., Marcucci, G., Brandi, M.L., 2018. Calcium Intake in bone health: A focus on calcium-rich mineral waters. *Nutrients* 10, 1–12. <https://doi.org/10.3390/nu10121930>
- WHO, 2017. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating first addendum, 4th ed. World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- WHO, 2011. Guidelines for drinking-water quality - 4th Edition.
- WHO, 2005. Nutrients in drinking water. Water, Sanitation and Health Protection and the Human Environment, WHO, Geneva, Geneva.
- Wist, W., Lehr, J.H., McEachern, R., 2009. Water Softening With Potassium. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.