



VIRKER MAGNETISK KALKBEHANDLING?

Den videnskabelige baggrund – fra kalkkemi
til Coys designkriterium



Skejby Nordlandsvej 305, 1. sal
8200 Aarhus N
Danmark

+45 70 60 56 00
Eksperten@lagur.dk
www.lagur.dk



KORT FORTALT

Mange oplever, at hårdt vand giver kalkgener overalt i hjemmet, men mange er samtidig skeptiske over for de løsninger der findes til at fjerne kalkgener – blødgøringsanlæg tilfører natrium til drikkevandet, og magnetisk vandbehandling mødes med skepsis. Virker det overhovedet, eller er det en moderne form for kvaksalveri?

Denne whitepaper tager skepsissen alvorligt. Den gennemgår, hvor kalken kommer fra, hvilke løsninger der findes, og – som sit hovedemne – den efterhånden omfattende peer-reviewed forskning i, om og hvordan et magnetfelt kan ændre den måde, kalk udfældes på. Til sidst forklares det, hvorfor LAGUR HOME og PRO er teknisk optimeret i forhold til fysikeren J.M.D. Coeys matematiske kriterium for, hvornår sådan en behandling faktisk virker.

RESUME

Kalk i drikkevand er ikke et sundhedsproblem, men et fysisk og økonomisk: den sætter sig som hård belægning på varmeplader og forkorter apparaters levetid. I årtier blev magnetisk vandbehandling afvist, fordi ingen kunne forklare, hvordan et magnetfelt skulle kunne efterlade en effekt på kalkgener. Gennembruddet kom, da man påviste, at kalk udfældes via langlivede præ-nukleare klynger (PNC'er/DOLLOPs) – og at netop disse klynger giver et magnetfelt et fysisk angrebepunkt. Coey (2012) opstillede et konkret designkriterium, der viser, at effekten afhænger af behandlingsenhedens længde og magnetfeltets gradient. LAGUR HOME og PRO er konstrueret til at opfylde dette kriterium, og fire uvildige eksterne analyser bestilt af LAGUR (GEUS, Teknologisk Institut, Rambøll og FORCE Technology) peger samstemmende på en omdannelse af kalkens krystalstruktur fra hård calcit mod blød aragonit – uden at fjerne vandets sunde mineraler. FORCE Technologys XRD-kvantificering af faserne er foreløbig og fortsat undervejs.

Denne whitepaper refererer udelukkende til fagfællebedømt litteratur og navngivne analyserapporter. Alle kilder er anført løbende og samlet bagest.



INDHOLDSFORTEGNELSE

- 01** Kalkgener: hvorfor hårdt vand er et problem 4
- 02** Hvordan kommer kalken i vandet? 5
- 03** Løsninger mod kalkgener: fjerne eller omdanne 7
- 04** Fordelen ved ikke at fjerne mineralerne 8
- 05** Forskningen: kan magnetisme ændre kalkens udfældning? 9
 - 05.01 Hvorfor blev magnetisk vandbehandling mødt med skepsis? 9
 - 05.02 Gennembruddet: ikke-klassisk nukleation og præ-nukleare klynger 9
 - 05.03 Coeys mekanisme – og et konkret designkriterium 11
 - 05.04 Den eksperimentelle dokumentation 14
 - 05.05 Et uafhængigt ingeniørmæssigt realitetstjek 15
 - 05.06 Dansk dokumentation på LAGUR specifikt 15
- 06** Hvorfor LAGUR er optimeret: Coeys formel i praksis 19
 - 06.01 Sådan påvirker LAGUR feltet: $\partial B / \partial t + v \cdot \nabla B$ – enkelt forklaret 19
- 07** Konklusion 23
- 08** Referencer 24



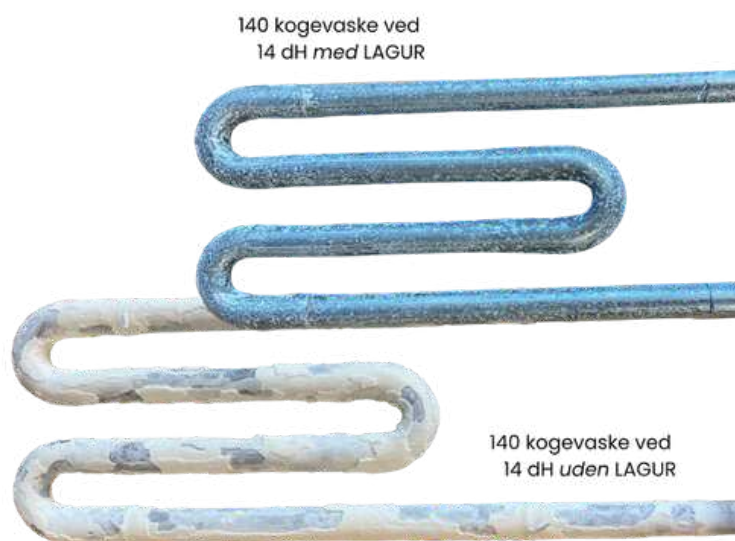
01 KALKGENER: HVORFOR HÅRDT VAND ER ET PROBLEM

Hårdhed i drikkevand skyldes primært opløste calcium- og magnesiumioner, hvor calciumcarbonat (CaCO_3) er den dominerende kilde i kalkholdige grundvandsmagasiner (WHO, 2011). I Danmark, hvor størstedelen af drikkevandet indvindes fra kalk- og kridtmagasiner, har vandet typisk en totalhårdhed på 15–30 °dH, hvilket klassificeres som "hårdt" til "meget hårdt" (Hansen et al., 2011).

Problemet er ikke sundhedsmæssigt – der er ingen dokumenteret helbredsrisiko ved at drikke hårdt vand. Problemet er teknisk og økonomisk. Når kalken udfældes på varmeklader, reducerer den varmeoverføringen markant: et belæg på blot 1 mm CaCO_3 kan øge energiforbruget i en varmtvandsbeholder med 7–10 % (Müller-Steinhagen et al., 2011). Dertil kommer øget trykfald i rørsystemer, forkortet levetid på husholdningsapparater samt højere forbrug af sæbe og rengøringsmidler (MacAdam & Parsons, 2004; Gabrielli et al., 2006). Flere europæiske undersøgelser har estimeret, at de samlede omkostninger ved hårdt vand over en 10-årig periode overstiger udgiften til et kalkbehandlingsanlæg (van der Bruggen et al., 2009).

Årsagen til, at konventionel kalk er så vanskelig at fjerne, ligger i, hvordan den dannes. Når kalken udfældes direkte på en varmeklader, dannes tætte, orienterede aflejringer med nåleformede eller romboedriske krystaller, der mekanisk forankres i overfladens mikroporer (Andritsos & Karabelas, 2003). Denne epitaktiske vækst er grunden til, at kalkbelægninger er hårde, tætte og typisk kræver syre for at blive fjernet.

Figur 1. Varmelegemer fra to identiske vaskemaskiner efter ~190 timers kogevask ved 14–15 °dH. Øverst (blåt): med LAGUR. Nederst (hvidt): uden LAGUR. Kilde: Teknologisk Institut (TI LAGUR Test, 2020).





02 HVORDAN KOMMER KALKEN I VANDET?

Kalken opløses ved CO₂-drevet forvitring. Regnvand er svagt surt (pH ~5,6), fordi atmosfærisk CO₂ opløses og danner kulsyre (Stumm & Morgan, 1996). Når dette CO₂-berigede vand siver gennem jordlag, hvor CO₂-partialtrykket kan være 10–100 gange højere end i atmosfæren, accelereres opløsningen af kalkholdige bjergarter – den klassiske karbonatforvitring beskrevet af Plummer & Busenberg (1982). Denne forvitring af karbonatbjergarter er samtidig et centralt led i Jordens langsigtede kulstofkredsløb (Bernier, 2003).

I grundvand findes "kalken" som adskilte ioner – ikke som fast stof. Uorganisk kulstof optræder i tre former, hvis fordeling styres af pH. Ved typiske grundvands-pH (6,8–7,8) dominerer bicarbonat (HCO₃⁻), mens carbonat (CO₃²⁻) findes i lave koncentrationer. Calcium foreligger som den frie kation Ca²⁺ (Parkhurst & Appelo, 2013). Kalken er altså tilstede som Ca²⁺, HCO₃⁻ og en smule CO₃²⁻ – ikke som fast CaCO₃.

Den kemiske formel for nedbrydningen af kalk ser således ud:



Vandet "balancerer på kanten". Dansk grundvand er typisk tæt på mætning eller let overmættet med hensyn til calcit (Appelo & Postma, 2005; Hansen et al., 2011). Det betyder, at selv små forstyrrelser – temperaturstigning, trykfald eller CO₂-afgasning – driver systemet mod udfældning. Denne marginale stabilitet forklarer, hvorfor kalkbelægninger opstår spontant ved selv beskedne ændringer i vandets tilstand.

Opvarmning udløser den omvendte reaktion. Når hårdt vand opvarmes, forskydes ligevægten: opløseligheden af CO₂ falder med temperaturen (Henrys lov) og afgasses, og – i modsætning til de fleste salte – falder calcits opløselighed også med temperaturen. Denne retrograde opløselighed (Plummer & Busenberg, 1982; Morse et al., 2007) er præcis den mekanisme, der danner det hvide belæg i elkedler, brusehoveder, varmelegemer og vaskemaskiner (MacAdam & Parsons, 2004; Muryanto et al., 2014). Trykfald ved hanudløb og fordampning virker på samme måde.

Når hårdt vand udtørres eller opvarmes, sker reaktionen altså omvendt – CO₂ frigives, og CaCO₃ udfældes som fast stof:





Tre krystalformer – én blød, én hård. CaCO_3 udfældes i tre vandfrie polymorfer: calcit, aragonit og vaterit (Elfil & Roques, 2001; Morse et al., 2007). Calcit er den termodynamisk stabile form med romboedrisk krystalstruktur (Markgraf & Reeder, 1985) og dominerer i langsom udfældning på varmekflader – det er den, der giver den hårde, tæt bundne skorpe. Aragonit favoriseres ved højere temperaturer ($>60\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Chen et al., 2006) og danner blødere, mindre hæftende aflejringer. Denne skelnen – hård calcit versus blød aragonit – er nøglen til at forstå, hvad magnetisk behandling forsøger at gøre.



03 LØSNINGER MOD KALKGENER: FJERNE ELLER OMDANNE

Løsningerne mod kalk falder i to grundlæggende forskellige familier, der ofte forveksles:

A. Metoder der FJERNER calcium (og mineraler) fra vandet

- Ionbytning / blødgøring: Ca^{2+} og Mg^{2+} udskiftes med natrium (Na^+) over en harpiks. Effektivt mod kalk, men tilfører natrium, kræver salt og regenerering og producerer saltholdigt spildevand (Gabrielli et al., 2006).
- Omvendt osmose (RO) / nanofiltrering: Vandet presses gennem en membran, der tilbageholder ioner. Fjerner kalk effektivt, men afmineraliserer vandet, spilder en del som rejektvand og kræver energi og vedligehold (van der Bruggen et al., 2009).
- Templatassisteret krystallisation (TAC/NAC): Kalk bindes til kim på et granulat og fjernes som mikrokorn. Kemikaliefri, men forbrugsmedie skal skiftes (Fox et al., 2014).

B. Metoder der OMDANNER kalken uden at fjerne den

Fysisk vandbehandling – herunder magnetisk og elektromagnetisk behandling, som LAGUR anvender – fjerner ikke calcium. I stedet ændres den måde, kalken udfældes på, så den danner en blød, ikke-hæftende belægning frem for en hård skorpe. Vandets kemiske sammensætning er uændret. Sammenfattende reviewlitteratur beskriver denne kategori som ikke-invasiv: den ændrer hverken vandets sammensætning eller producerer kemisk affald (Martínez Moya & Boluda Botella, 2021; Fox et al., 2014).

Tabel 1 Sammenligning af kalkløsninger

Metode	Princip	Fjerner mineraler?	Kemi / affald?	Type
Ionbytning (blødgøring)	$\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ byttes med Na^+	Ja	Salt + spildevand	Fjerner
Omvendt osmose	Membranfiltrering	Ja (alt)	Spildevand	Fjerner
Nanofiltrering	Delvis membranfiltrering	Delvist	Spildevand	Fjerner
TAC / templat	Kalk bindes til granulat	Delvist	Forbrugsmedie	Fjerner
LAGUR (magnetisk)	Omdanner calcit → aragonit	Nej	Ingen	Omdanner

Kilder: Gabrielli et al. (2006); van der Bruggen et al. (2009); Fox et al. (2014); Martínez Moya & Boluda Botella (2021).



04 FORDELEN VED IKKE AT FJERNE MINERALERNE

At omdanne kalken frem for at fjerne den har en vigtig konsekvens: vandets naturlige indhold af calcium og magnesium bevares. Det er en fordel af flere grunde:

- Calcium og magnesium er næringsstoffer. WHO har i en særskilt ekspertrapport gennemgået den mulige sundhedsmæssige betydning af calcium og magnesium i drikkevand, herunder vandets bidrag til det samlede daglige indtag og de epidemiologiske sammenhænge mellem vandhårdhed/magnesium og hjerte-kar-sygdom (WHO, 2009). Drikkevand kan således udgøre et supplerende – om end mindre – bidrag til indtaget af disse mineraler.
- Afmineraliseret og meget blødt vand er mere aggressivt. Vand med lavt mineralindhold er mere korrosivt over for rør og installationer, hvilket netop indgår i WHO's vurdering af de tekniske og økonomiske aspekter ved blødgøring og afmineralisering (WHO, 2009; van der Bruggen et al., 2009).
- Ingen natriumbelastning. Ionbytningsblødgøring erstatter calcium med natrium og hæver dermed vandets natriumindhold – relevant for personer på natriumreduceret kost (Gabrielli et al., 2006). Magnetisk behandling tilfører intet.
- Ingen kemikalier, intet spild. Membran- og ionbytningsmetoder producerer spildevand eller regenereringsvand. Fysisk behandling gør ikke (Martínez Moya & Boluda Botella, 2021).



05 KAN MAGNETISME ÆNDRE KALKENS UDFÆLDNING?

Dette afsnit er whitepaperens kerne.

Spørgsmålet er enkelt at stille og svært at besvare: kan et magnetfelt – uden at tilsætte noget – ændre den måde, kalk udfældes på, og dermed fjerne problemerne ved kalk i vandet? Svaret har bevæget sig fra "sandsynligvis ikke" til "ja, under de rette betingelser" i takt med, at grundforskningen i, hvordan kalk overhovedet dannes, er modnet. Nedenfor gennemgås dokumentationen.

05.01 HVORFOR BLEV MAGNETISK VANDBEHANDLING MØDT MED SKEPSIS?

I årtier manglede der en plausibel mekanisme. Klassisk nukleationsteori antager, at (kalk)krystaller dannes spontant fra frie ioner, og at en sådan kerne kun lever i mikrosekunder – alt for kort til at "huske" en magnetisk påvirkning, der måske skete minutter eller timer tidligere (Coey, 2012). Dertil kom, at effekten af magnetisk behandling af vand i mange tidlige forsøg var svær at reproducere, fordi den afhænger af strømningshastighed, magnetfeltgradient og feltstyrke (Vaskina et al., 2020; Martínez Moya & Boluda Botella, 2021). Uden en mekanisme og med svingende resultater var skepsissen berettiget.

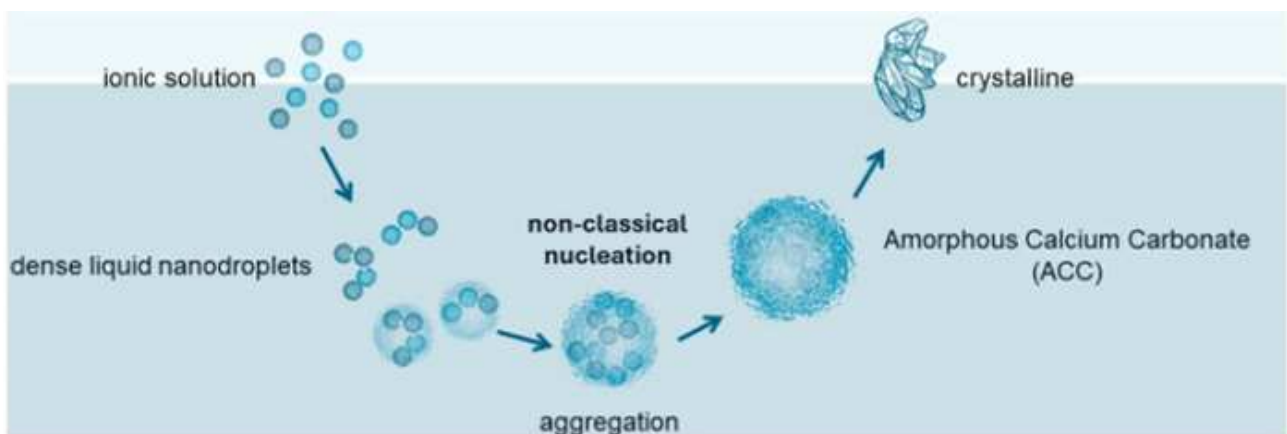
05.02 GENNEMBRUDET: IKKE-KLASSISK NUKLEATION OG PRÆ-NUKLEARE KLYNGER

Det videnskabelige gennembrud kom, da man påviste, at kalk i virkeligheden følger en ikke-klassisk nukleationsvej, altså en ikke klassisk krystaldannelse. Allerede i undermættede opløsninger findes der stabile, præ-nukleare klynger (PNC'er) – nanometerstore, dynamiske ion-aggregater, der kan udgøre op til ca. 50 % af det opløste calcium i vandet (Gebauer, Völkel & Cölfen, 2008; Pouget et al., 2009). Molekylærdynamiske simuleringer viste, at disse klynger er fleksible, væskelignende ioniske polymerer – såkaldte DOLLOPs (Dynamically Ordered Liquid-like Oxyanion Polymers) – kæder, ringe og forgreninger af alternerende Ca^{2+} og CO_3^{2-} holdt sammen af rene ioniske vekselvirkninger (Demichelis, Raiteri, Gale, Quigley & Gebauer, 2011). Afgørende for det følgende: en DOLLOPs radius kan ændres med en faktor to ved en energiomkostning mindre end den termiske energi $k_B T$ – den er med andre ord let at deformere (Demichelis et al., 2011).

Eksistensen af PNC'er er siden bekræftet eksperimentelt med flere uafhængige metoder – herunder synkrotronbaseret røntgenspredning (SAXS), der finder klyngerne selv i opløsninger, der er undermættede med hensyn til alle kendte kalkfaser (Avaro, Moon, Schulz & Rose, 2023), og DNP-forstærket NMR-spektroskopi, der har fanget de kortlivede præ-nukleare arter direkte (Balodis et al., 2024). Klyngerne er endda målt som reelle nanopartikler i almindeligt drikkevand (Zarei et al., 2024). Nyere arbejde fra Coeys egen gruppe har desuden undersøgt de præ-nukleare klyngers stabilitet og vekselvirkning med nanobobler under ultralydsbehandling af hårdt vand (Fitzgerald et al., 2024).

Kalkkrystaldannelsen forløber altså i trin – ikke direkte fra frie ioner:

$\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{PNC'er} / \text{DOLLOPs (1-3 nm)} \rightarrow \text{aggregater} \rightarrow \text{amorft CaCO}_3 (\text{ACC}) \rightarrow \text{krystallinsk kalk}$



Figur 2. Den ikke-klassiske nukleationsvej: fra ioner via væskelignende nanodråber og amorft calciumcarbonat til krystallinsk kalk. Kilde: LAGUR, efter Gebauer & Cölfen (2011).

Pointen er, at PNC'erne hverken er faste krystaller eller frie ioner, men dynamiske nanoskala-klynger. Det er præcis klyngens geometri – og fordelingen af protoner på dens overflade – der afgør, om den senere nukleerer, eller udfælder, som hård calcit eller som blød aragonit. Og en langlivet, deformerbart klynge er noget, et magnetfelt kan nå at påvirke.

Forestil dig mennesker i små samtalegrupper. Det kraftigt vekslende felt virker som gentagne vindstød: det forstyrrer grupperne, og når de samles igen, sker det i en lidt anden konstellation. Ladningen (personerne) er den samme – men organiseringen er ændret. På samme måde ændrer LAGUR ikke vandets kemi, men omorganiserer ionernes positioner i klyngerne, og dermed den krystalstruktur, de senere udvikler sig til.

05.03 COEYS MEKANISME – OG ET KONKRET DESIGNKRITERIUM

Fysikeren J.M.D. Coey (Trinity College Dublin) leverede i 2012 den manglende mekanisme. Han påpegede, at direkte kræfter fra feltet på frie ioner er alt for svage til at forklare noget. Effekten må derfor virke på en langsom, langlivet mellemform: de præ-nukleare klynger (Coey, 2012). To fysiske mekanismer er i spil:

- Lorentz-kraften deformerer ladede klynger. Kraften på en ladet partikel i et magnetfelt er $F = q(E + v \times B)$. På de polære PNC-aggregater virker den som en mekanisk stress – og da DOLLOPs er væskelignende og letdeformerbare, kan selv moderate kræfter omorganisere ionernes indbyrdes positioner (Coey, 2012; Demichelis et al., 2011).

FAKTABOKS Hvor kraften $F = q(E + v \times B)$ kan læses led for led

- F : kraften på klyngen (i newton) – det er den, der presser og omorganiserer klyngen.
- q : klyngens elektriske ladning (i coulomb) – summen af Ca^{2+} - og carbonat-/bicarbonat-ionernes ladninger; jo større ladning, jo større kraft.
- E : det elektriske felt (volt pr. meter); leddet qE virker på ladningen, uanset om klyngen bevæger sig.
- v : klyngens (vandets) hastighed gennem feltet (meter pr. sekund).
- B : magnetfeltet – den magnetiske fluxtæthed (i tesla).
- $v \times B$: krydsproduktet af hastighed og felt; står vinkelret på dem begge. Dette led kræver bevægelse (det er nul, når $v = 0$) og kobler strømmingen til magnetfeltet – det er den magnetiske del af Lorentz-kraften, $q(v \times B)$.



- Magnetfeltgradienten manipulerer protonspin. Den væsentligste, langtidsholdbare effekt opstår, fordi klyngerne er polære: bicarbonat (HCO_3^-) samler sig på den ene side, Ca^{2+} på den anden. For at klyngen kan vokse, må en proton fortrænges, og der dannes kortvarigt en proton-dimer. Protonernes spin præcesserer med Larmor-frekvensen $f_p B$ ($f_p = 42,6 \text{ MHz/T}$), og i et inhomogent felt dephaseres singlet- og triplet-tilstandene, hvilket øger sandsynligheden for, at Ca^{2+} inkorporeres. Resultatet er en ændret ionisk struktur, der overlever i timer – den berømte memory effect (Coey, 2012).

I HVERDAGSSPROG

Klyngen vokser ved at optage calcium, men først skal en brintkerne (en proton) skubbes til side – og et kort øjeblik mødes to protoner. Hver proton er som en lille snurretop, der vugger rundt i magnetfeltet; jo stærkere felt, jo hurtigere vugger den (det er Larmor-frekvensen).

Det afgørende: i et ujævnt (inhomogent) felt – en gradient – vugger de to protoner med lidt forskellig fart og driver ud af takt, som to metronomer, der er stillet næsten, men ikke helt, ens. Denne ud-af-takt tipper protonparret mellem to tilstande, og den ene gør det lettere for calcium at sætte sig fast på klyngen.

Feltet ændrer altså ikke vandets kemi – det finjusterer kun, hvordan klyngen bygger sig op (mod blød aragonit frem for hård calcit). Og fordi klyngerne er langlivede, hænger effekten ved i timer, efter vandet har forladt magneten – det er memory effect-effekten. Et helt ensartet felt ville få protonerne til at vugge i takt, så intet skete: det er netop uensartetheden – gradienten – der driver effekten.

Det afgørende – Coeys designkriterium. Coey udledte en konkret betingelse for, hvornår en magnetisk behandlingsenhed overhovedet kan virke:

$$C = 2 \cdot (L/v) \cdot f_p \cdot a \cdot \nabla B \geq 1$$



hvor L er enhedens aktive længde, v er vandets hastighed, f_p er protonens Larmor-frekvens (fast konstant), a er protonseparationen (fast konstant på $\sim 0,25$ nm), og ∇B er magnetfeltets gradient (Coey, 2012). Kriteriet siger noget kontraintuitivt, men vigtigt: effekten skales med enhedens længde og magnetfeltets gradient – og omvendt med hastigheden – ikke med feltets rå styrke. En svag magnet med en stærk gradient og tilstrækkelig længde kan opfylde kriteriet, mens en kraftig, men kort og ensartet magnet ikke kan. For en enhed på 5 cm ved 0,1 m/s kræver kriteriet en feltgradient i størrelsesordenen 100 T/m (Coey, 2012).

Netop dét, at teorien peger på gradient og længde frem for feltstyrke, forklarer hvorfor tidligere, simple påklips-magneter ofte fejlede – og hvorfor en enhed skal designes bevidst efter kriteriet for at virke.

FAKTABOKS Hvorfor gradient og strømning slår feltstyrke

Et kraftigere felt er ikke nødvendigvis bedre. Coeys kriterium afhænger af feltets gradient (∇B) og enhedens længde – ikke af feltets rå styrke (B).

Strømning er nødvendig. Den magnetiske kraft på en ladet klynge, $F = q(v \times B)$, er proportional med hastigheden v – står vandet stille, er kraften nul. Samtidig skal klyngen føres gennem feltgradienten for at opbygge den spin-faseforskydning, der driver effekten; derfor indgår opholdstiden L/v i Coeys kriterium. Lavere hastighed giver længere eksponering – og dermed større effekt (Coey, 2012; Kožić et al., 2010).

Et for stærkt felt kan svække effekten. Mekanismen er en kohærent spin-effekt (beslægtet med radikalpar-mekanismen), ikke en brute force-effekt. Et meget stærkt felt kan opsplitte spin-tilstandene så meget (Zeeman-opsplitning), at den singlet-triplet-blanding, effekten hviler på, afkobles og standser (Vaskina et al., 2020; Paulitsch-Fuchs et al., 2021). Derfor virker selv meget svage felter med stejle gradienter: Sammer et al. (2016) og Paulitsch-Fuchs et al. (2021) opnåede en målbar effekt med felter på blot ~ 6 gauss (0,6 mT), fordi gradienten var stærk ($C = 1,8\text{--}8,1$).

Konsekvens for design: Målet er et optimalt, ikke et maksimalt, felt – en stærk gradient over tilstrækkelig længde ved den rette hastighed. Det er præcis derfor, LAGUR bruger en langstrakt spole med høje gradienter og et vekslende frekvensfelt frem for én kraftig, statisk magnet – og hvorfor simple påklips-magneter ofte fejler.



05.04 DEN EKSPERIMENTELLE DOKUMENTATION

Med en plausibel mekanisme på plads står tilbage det empiriske spørgsmål: ændrer et magnetfelt faktisk kalkens udfældning i forsøg? En række fagfællebedømte studier siger ja – med målbare tal.

- Coey & Cass (2000): i blindede forsøg steg andelen af aragonit fra 7 % (ubehandlet) til 54 % (behandlet), og effekten (memory) varede i over 200 timer (refereret i Fox et al., 2014; Martínez Moya & Boluda Botella, 2021).
- Ben Latifa et al. (2023): med et statisk felt på 0,70 T steg tiden før udfældning fra 51 til 86 minutter; hæmningseffektiviteten steg med eksponeringstiden fra 24 % til 60 % (homogen) og op til 88 % (heterogen), og feltet fremmede aragonit. Memory-effekten varede op til 24 timer.
- Lipuš & Dobersek (2007): i en 3-ugers parallel driftstest med permanentmagneter (0,6–0,8 T, strømning 1,25 m/s) blev kalkbelægningen på en varmespiral 2,5× tyndere, krystalnålene ~4× tyndere og bundfaldet ~70 % mindre – alt identificeret som aragonit – svarende til ca. 50 % bedre varmeoverførsel.
- Kožić et al. (2010): bekræftede 2,5× tyndere belægning, og at partikler i behandlet vand var 10–20 nm mod 50–180 nm i ubehandlet. Vigtigt: dynamisk (strømmende) behandling ved $\geq 0,05$ T slog statisk behandling ved 0,3 T, og der kræves en opholdstid på $\geq 0,1$ s – helt i tråd med Coeys L/v - og gradientlogik.
- Vaskina et al. (2020): en teoretisk gennemgang, der forklarer, hvorfor strømning er nødvendig, hvorfor et inhomogent felt (gradient) plus Lorentz-kraft kræves, og hvorfor et for stærkt felt kan reducere effekten – netop grunden til, at et svagt felt med stærk gradient kan være optimalt.
- Sammer et al. (2016) og Paulitsch-Fuchs et al. (2021): den mest direkte bekræftelse af Coey. Med meget svage magneter (felt ~6 gauss, dvs. 0,6 mT) men stærke gradienter (170–770 G/m) beregnede forfatterne Coey-kriteriet til $C = 1,8\text{--}8,1$ (altså ≥ 1) – og målte en stigning på op til 25 % i antallet af nm-store klynger samt en vedvarende, statistisk signifikant effekt i 15 af 16 henholdsvis 8 af 10 forsøg.



- Et næsten-nulstyrke felt med stor gradient virker, præcis som teorien forudsiger.
- Martínez Moya & Boluda Botella (2021): en samlende oversigt over feltet rapporterer typiske reduktioner i hårdhed og fouling på 15–45 % på tværs af feltstyrker fra 0,007 til 1 T – men understreger samtidig ærligt, at effekten afhænger af temperatur, pH, CO₂, feltstyrke og strømning.

05.05 ET UAFHÆNGIGT INGENIORMÆSSIGT REALITETSTJEK

For balancens skyld er den vigtigste kritiske kilde en uafhængig amerikansk evaluering: Fox, Wiest, Thomure & Lee (2014) testede saltfri anti-kalk-enheder efter den tyske DVGW-W512-protokol for WaterReuse Research Foundation og U.S. Bureau of Reclamation. Her gav elektromagnetisk behandling en reel, men moderat reduktion i kalk på ca. 50 % og – vigtigt i praksis – en blød belægning, der let kunne børstes af, samt de laveste 10-årige livscyklusomkostninger af alle testede alternativer. Men rapporten fandt også, at behandlingen i moderat hårdt vand ikke omdannede hovedparten af calcitten til aragonit (over 90 % forblev calcit) – den bløde belægning skyldtes ændret krystalorientering, ikke en fuld faseomdannelse. Konklusionen er nøgtern: effekten er virkelig og økonomisk attraktiv, men dens størrelse og karakter afhænger af vandet og anti-kalk-enheden.

05.06 DANSK DOKUMENTATION PÅ LAGUR SPECIFIKT

Den internationale litteratur viser, at magnetisk behandling ændrer kalkudfældning. Fire uvildige eksterne analyser bestilt af LAGUR er udført direkte på LAGUR-produkterne og peger samstemmende i samme retning: en ændret krystalmorfologi og en omdannelse mod blød aragonit.



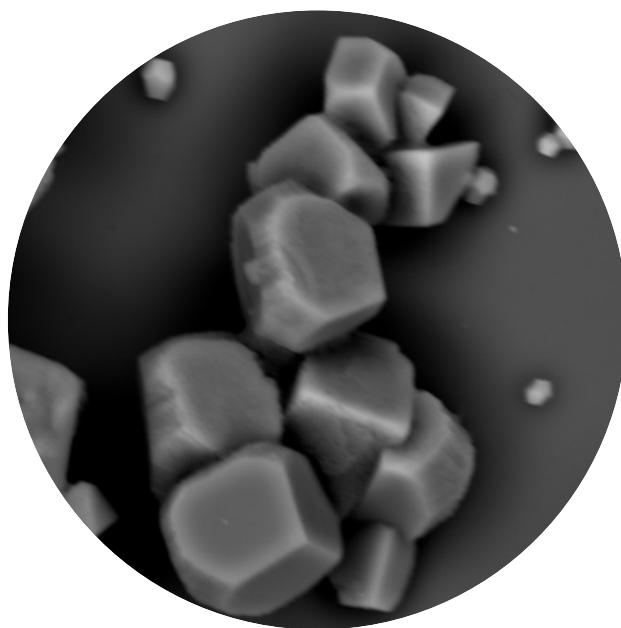
GEUS — ELEKTRONMIKROSKOPI AF KALKENS STRUKTUR

I samarbejde med De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) sammenlignede LAGUR kalk fra ubehandlet vand med kalk behandlet med 8 forskellige LAGUR-produkter i elektronmikroskop ved over 100.000× forstørrelse. Vandet blev ikke tilsat noget.

Resultatet viste en tydelig forskel i krystalstruktur. Testen viste desuden en direkte sammenhæng mellem styrken af den magnetiske påvirkning og graden af omdannelse (GEUS SEM-testrapport, april 2026). SEM dokumenterer forskelle i krystallernes morfologi og i belægningens blødhed — ikke fasesammensætningen i sig selv; den kvantitative fasebestemmelse (aragonit vs. calcit) hviler på FORCE Technologys røntgendiffraktion (afsnittet nedenfor).



Ubehandlet kalk: nåleformede, sammenvoksede dendritter, der hæfter til overflader.



LAGUR-behandlet kalk: adskilte, afrundede/kubiske krystaller, der giver en løs, blød belægning.

Figur 3. GEUS SEM-analyse (>100.000×) af kalk fra ubehandlet vand (venstre) og LAGUR-behandlet vand (højre). Kilde: GEUS SEM-billeder, april 2026.

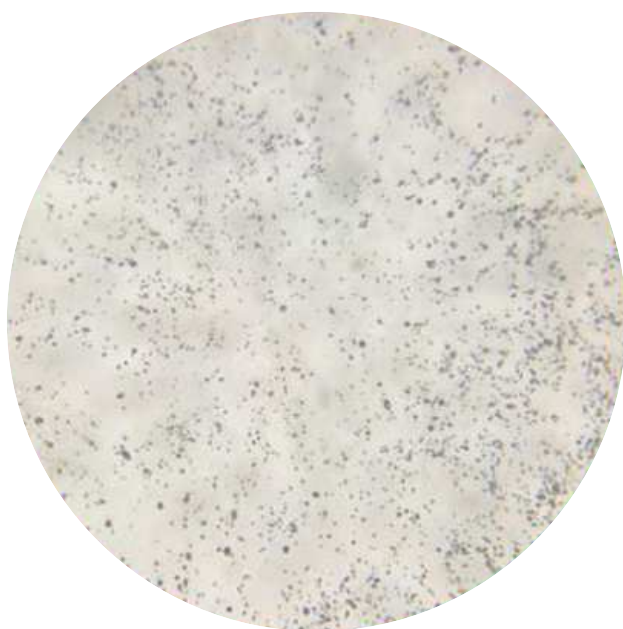


TEKNOLOGISK INSTITUT — DRIFTSTEST PÅ TO VASKEMASKINER

Teknologisk Institut kørte to identiske Siemens-vaskemaskiner side om side — én med og én uden LAGUR — over ca. 190 timers kogevask ved en vandhårdhed på ~15 °dH (i alt 140–147 starter, svarende til ~28–29 ugers husholdningsvask). Varmelegemet med LAGUR havde markant mindre tilbageværende kalk, bekræftet visuelt og med mikroskopi på tre målepunkter. En skrabetest viste, at kalken på det ubehandlede legeme sad 1,2–2,1 gange hårdere fast (Teknologisk Institut, 2020; jf. figuren i afsnit 1).

RAMBØLL — FELTSTUDIE I ET HELT FORSYNINGSNET

Rambøll undersøgte LAGUR installeret på Grauballe Vandværk ved at sammenligne vandprøver hos fire forbrugere før og efter installationen. Efter installation blev kalken omdannet fra hårde calcitbelægninger til bløde, fint omformede aragonitbelægninger hos alle fire forbrugere — størst hos dem, der oprindeligt havde mest kalkudfældning. En opfølgning viste, at effekten stadig kunne måles mindst 8 dage efter prøvetagning og op til 6 km fra vandværket (Rambøll, Grauballe Vandværk, februar 2026). Den vedvarende effekt over afstand er i tråd med den dokumenterede memory-effekt i litteraturen.



Ubehandlet vandprøve: talrige diskrete, hårde kalkpartikler.

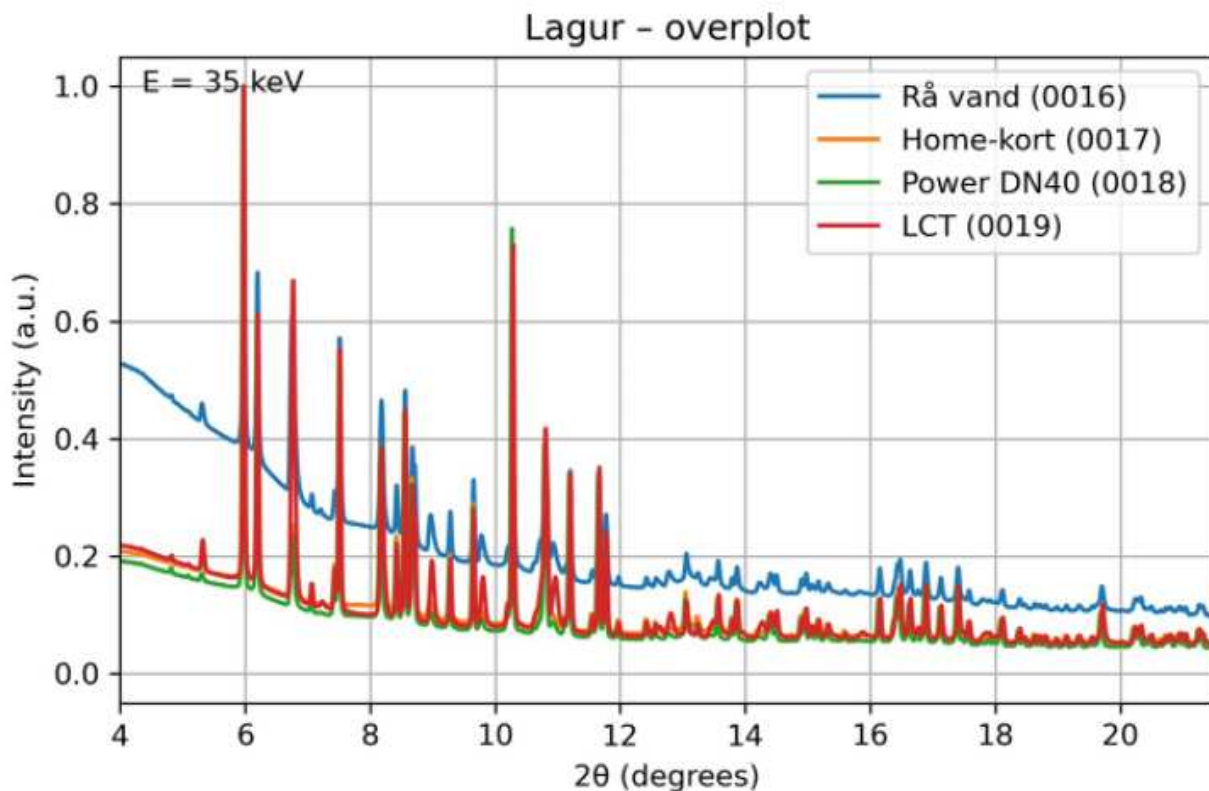


LAGUR-behandlet vandprøve: blødere, fint omformet materiale.

Figur 4. Inddampede vandprøver fra forbrugere ved Grauballe Vandværk, før og efter LAGUR. Kilde: Rambøll, februar 2026.

FORCE TECHNOLOGY — SYNKROTRON-RØNTGENDIFFRAKTION

FORCE Technology analyserede kalk-prøver fra tre forskellige LAGUR-produkter samt råvand med transmissions-røntgendiffraction ved 35 keV. Alle fire prøver kunne beskrives som en kombination af aragonit og calcit/Mg-holdig calcit. Mest calcit og mest amorf materiale fandtes i råvandet (FORCE Technology, synkrotron-XRD, juli 2026). Det er en foreløbig vurdering – en mere grundig analyse skal fastlægge de præcise fasekoncentrationer – men den bekræfter faseomdannelsen mod aragonit på et uafhængigt, kvantitativt grundlag.



Figur 5. Synkrotron-XRD-spektre (35 keV) for råvand og tre LAGUR-behandlede prøver. Kilde: FORCE Technology, juli 2026.



06 HVORFOR LAGUR ER OPTIMERET: COEYS FORMEL I PRAKSIS

Forskellen mellem en virkningsløs magnet og en effektiv behandlingsenhed ligger, som afsnit 5.3 viste, i Coey-kriteriet $C = 2(L/v) \cdot f_p \cdot \alpha \cdot \nabla B \geq 1$. LAGUR HOME og PRO produkter er konstrueret bevidst efter netop dette kriterium.

Konstruktionen. En LAGUR-enhed monteres som en aktiv del af vandforsyningen og indeholder mindst 1,5 kg kobberviklinger, der genererer et stærkt og langstrakt magnetfelt med stejle feltgradienter ind i selve vandstrømmen. Feltet veksler systematisk i et patenteret frekvensområde på 300–3000 Hz ("frekventerende magnetisk"), så hver volumendel af vandet eksponeres mange gange under passagen. Oven på dette frekvenssweep vender polerne (nord/syd) desuden retning op til 20 gange i sekundet — to adskilte, samtidige former for tidslig feltveksling. Tilsammen giver polvekslingen og frekvenssweepet en kraftig tidslig feltændring ($\partial B / \partial t$) — et selvstændigt bidrag oven på selve den rumlige feltgradient (∇B), der stammer fra, hvordan feltet aftager i rummet omkring viklingerne.

06.01 SÅDAN PÅVIRKER LAGUR FELTET: $\partial B / \partial t + v \cdot \nabla B$ — ENKELT FORKLARET

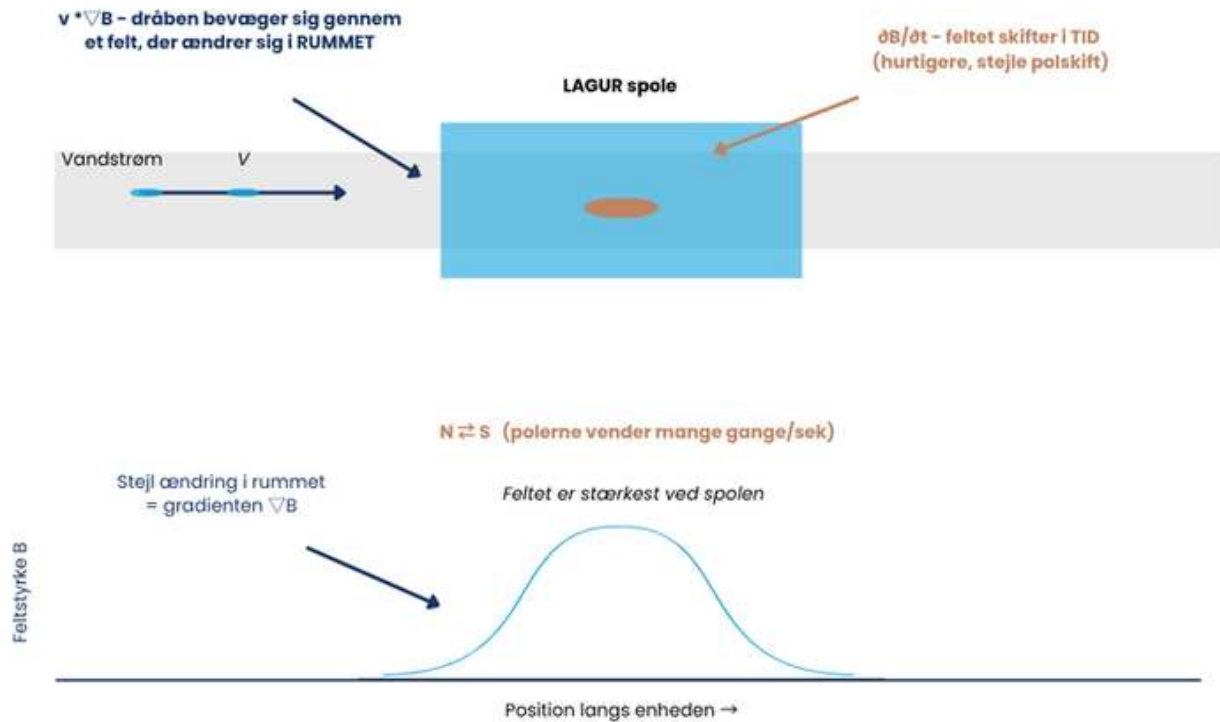
Det, der driver effekten, er ikke feltets styrke, men hvor meget feltet ændrer sig, mens en vanddråbe passerer enheden. En LAGUR-dråbe oplever to slags ændring på én gang, og virkningen lægger sig sammen:

Samlet feltændring $dB/dt = \partial B / \partial t + (v \cdot \nabla) B$

- $v \cdot \nabla B$ — ændring, fordi dråben bevæger sig. Feltet er stærkere ved spolen end længere væk (det er gradienten, ∇B). Når dråben strømmer igennem med hastigheden v , mærker den en ændring, netop fordi den flytter sig. Jo stærkere gradient og jo hurtigere flow, jo større er dette led.
- $\partial B / \partial t$ — ændring, fordi feltet selv skifter i tid. LAGUR vender polerne (nord/syd) mange gange i sekundet og kører samtidig 300–3000 Hz — og styreboksen er bygget, så hvert skift er så hurtigt og stejlt som muligt. Det giver en stor feltændring i tid, helt uafhængigt af hvor hurtigt vandet strømmer.



SÅDAN PÅVIRKER LAGUR FELTET: TO BIDRAG PÅ EN GANG



Figur 6. De to bidrag: dråben bevæger sig gennem den rumlige gradient ($\mathbf{v} \cdot \nabla B$), mens spolen samtidig skifter feltet i tid ($\partial B / \partial t$).

Hvorfor det er vigtigt. De to led supplerer hinanden. Ved højt flow bidrager bevægelsen ($\mathbf{v} \cdot \nabla B$) mest. Ved lavt flow bliver $\mathbf{v} \cdot \nabla B$ lille, og så er det den hurtige switching ($\partial B / \partial t$), der bærer effekten. Fordi LAGUR aktivt maksimerer $\partial B / \partial t$, virker produktet også, når vandet strømmer langsomt.

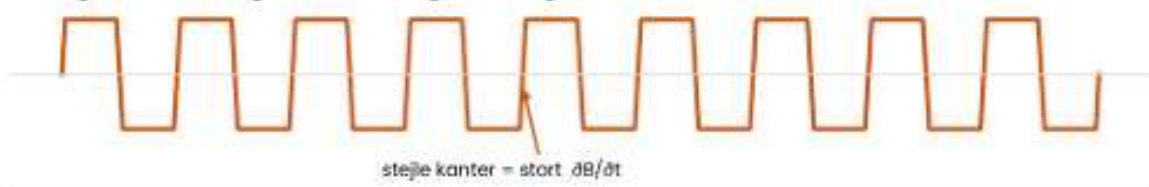


FELTET, SOM EN VANDDRÅBE OPLEVER UNDER PASSAGEN

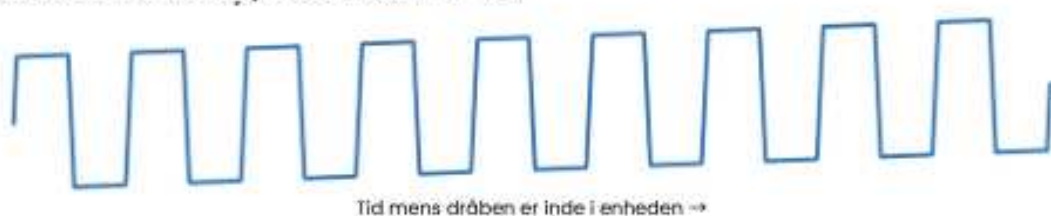
Bidrag fra bevægelsen: $v \cdot \nabla B$ (langsom ændring)



Bidrag fra switching: $\partial B / \partial t$ (hurtig ændring i tid)



Det dråben SAMLET oplever: $\partial B / \partial t + v \cdot \nabla B$



Ved lavt flow er den langsomme hædning ($v \cdot \nabla B$) næsten flad – så er det de hurtige, stejle skift ($\partial B / \partial t$), der bærer effekten.

Figur 7. Feltet, en dråbe oplever undervejs: en langsom ændring fra bevægelsen ($v \cdot \nabla B$) plus hurtige, stejle skift fra switchingen ($\partial B / \partial t$), lagt sammen. Ved lavt flow er det de stejle skift, der dominerer.

I Coeys oprindelige kriterium indgår kun det bevægelsesbårne led (udledt for en statisk magnet). LAGUR tilføjer det tidslige led med sit vekslende felt.

Tabel 2 LAGURs design mappet til Coey-kriteriet

Parameter i C	Hvad kriteriet kræver	LAGUR's designsvar
L (længde)	Lang aktiv strækning øger C	Langstrakt spole, betydelig aktiv længde
∇B (gradient)	Stærk feltgradient er den bærende faktor	$\geq 1,5$ kg kobberspole giver høje feltgradienter
v (hastighed)	Lavere hastighed giver længere eksponering – og dermed større effekt (højere C)	Dimensioneret til lang opholdstid (L/v) i det tilsigtede flowområde
$\partial B/\partial t$ (tidslig switching)	Tidsvarierende felt giver ekstra eksponeringer – LAGURs tilføjelse ud over Coeys statiske kriterium; bærer effekten ved lavt flow	300–3000 Hz frekvenssweep + polveksling op til $20\times/s$ = mange eksponeringer pr. passage

Konsekvensen. Ved at fremskynde dannelsen af klynger og mikropartikler i selve vandstrømmen sker en større del af udfældningen i vandfasen (homogen nukleation) frem for på rør- og varmeflader (heterogen nukleation). Afhængigt af vandet kan resultatet opstå ad to veje, der kan optræde hver for sig eller samtidig: en delvis faseomdannelse mod blød aragonit, og/eller – som Fox et al. (2014) fandt i moderat hårdt vand, hvor over 90 % forblev calcit – en ændret krystalorientering, hvor kalken forbliver overvejende calcit, men får tilfældig orientering og variabel størrelse. Begge veje danner en blød, løs belægning, der let kan tørres eller børstes af – i stedet for en hård calcitskorpe. Det er præcis dét, GEUS, Rambøll og FORCE dokumenterer på LAGUR-prøver, og som Teknologisk Instituts skrabetest kvantificerer i praksis.

Skalerbarhed. Samme fysik gælder fra en enkelt husstand (HOME) over større installationer (PRO) til et helt vandværk: Rambølls feltstudie viste, at effekten fra én enhed på Grauballe Vandværk kunne måles hos forbrugere op til 6 km væk. LAGUR omdanner altså kalken dér, hvor vandet bruges – uden at fjerne de mineraler, der gør vandet sundt at drikke.



07 KONKLUSION

Magnetisk kalkbehandling er ikke længere en mekanisme uden forklaring. Opdagelsen af præ-nukleare klynger gav feltet et fysisk fundament, Coeys kriterium gjorde det til ingeniørvidenskab, og en voksende peer-reviewet litteratur – sammen med LAGUR's danske analyser – dokumenterer, at et rigtigt designet felt ændrer kalkens krystalstruktur fra hård calcit mod blød aragonit.

LAGUR HOME og PRO er bygget til at opfylde netop det kriterium – og reducerer kalkgenerne uden at tilsætte kemikalier og uden at fjerne vandets sunde mineraler.



08 REFERENCER

FAGFÆLLEBEDØMT LITTERATUR

Andritsos, N., & Karabelas, A. J. (2003). Calcium carbonate scaling in a plate heat exchanger in the presence of particles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(24), 4613–4627.

Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution* (2nd ed.). A. A. Balkema, Leiden.

Avaro, J., Moon, E. M., Schulz, K. G., & Rose, A. L. (2023). Calcium Carbonate Prenucleation Cluster Pathway Observed via In Situ Small-Angle X-ray Scattering. *J. Phys. Chem. Lett.*, 14, 4517–4523.

Balodis, M., Rao, Y., Stevanato, G., Kellner, M., Meibom, J., Negroni, M., Chmelka, B. F., & Emsley, L. (2024). Observation of Transient Prenucleation Species of Calcium Carbonate by DNP-Enhanced NMR. *J. Phys. Chem. Lett.*, 15, 7954–7961.

Ben Latifa, S., Cheap-Charpentier, H., Perrot, H., & Ben Amor, Y. (2023). Effects of Magnetic Field on Homogeneous and Heterogeneous Precipitation of Calcium Carbonate. *ChemElectroChem*, 10, e202300105.

Berner, R. A. (2003). The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition. *Nature*, 426, 323–326.

Chen, T., Neville, A., & Yuan, M. (2006). Calcium carbonate scale formation – assessing the initial stages of precipitation and deposition. *J. Petroleum Science and Engineering*, 46(3), 185–194.

Coey, J. M. D. (2012). Magnetic water treatment – how might it work? *Philosophical Magazine*, 92(31), 3857–3865.

Coey, J. M. D., & Cass, S. (2000). Magnetic water treatment. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 209, 71–74.

Demichelis, R., Raiteri, P., Gale, J. D., Quigley, D., & Gebauer, D. (2011). Stable prenucleation mineral clusters are liquid-like ionic polymers. *Nature Communications*, 2, 590.

Elfil, H., & Roques, H. (2001). Role of hydrate phases of calcium carbonate on the scaling phenomenon. *Desalination*, 137(1–3), 177–186.

Fitzgerald, E., Kumar, A., Poulouse, S., & Coey, J. M. D. (2024). Interaction and Stability of Nanobubbles and Prenucleation Calcium Clusters during Ultrasonic Treatment of Hard Water. *ACS Omega*, 9, 2547–2558.

Fox, P., Wiest, M., Thomure, T. M., & Lee, W. (2014). Evaluation of Alternatives to Domestic Ion Exchange Water Softeners. WaterReuse Research Foundation (WRRF-08-06); U.S. Bureau of Reclamation.



- Gabrielli, C., Maurin, G., Francy-Chausson, H., Thery, P., Tran, T. T. M., & Tlili, M. (2006).** Electrochemical water softening: principle and application. *Desalination*, 201(1–3), 150–163.
- Gebauer, D., Völkel, A., & Cölfen, H. (2008).** Stable Prenucleation Calcium Carbonate Clusters. *Science*, 322, 1819–1822.
- Gebauer, D., & Cölfen, H. (2011).** Prenucleation clusters and non-classical nucleation. *Nano Today*, 6(6), 564–584.
- Hansen, B., Thorling, L., Dalgaard, T., & Erlandsen, M. (2011).** Trend reversal of nitrate in Danish groundwater. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 228–234.
- Kožić, V., Hamler, A., Ban, I., & Lipuš, L. Č. (2010).** Magnetic water treatment for scale control in heating and alkaline conditions. *Desalination and Water Treatment*, 22, 65–71.
- Lipuš, L. C., & Dobersek, D. (2007).** Influence of magnetic field on the aragonite precipitation. *Chemical Engineering Science*, 62, 2089–2095.
- MacAdam, J., & Parsons, S. A. (2004).** Calcium carbonate scale formation and control. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 3(2), 159–169.
- Markgraf, S. A., & Reeder, R. J. (1985).** High-temperature structure refinements of calcite and magnesite. *American Mineralogist*, 70(5–6), 590–600.
- Martínez Moya, S., & Boluda Botella, N. (2021).** Review of Techniques to Reduce and Prevent Carbonate Scale. *Prospecting in Water Treatment by Magnetism and Electromagnetism. Water*, 13, 2365.
- Morse, J. W., Arvidson, R. S., & Lüttge, A. (2007).** Calcium carbonate formation and dissolution. *Chemical Reviews*, 107(2), 342–381.
- Müller-Steinhagen, H., Malayeri, M. R., & Watkinson, A. P. (2011).** Heat exchanger fouling: mitigation and cleaning strategies. *Heat Transfer Engineering*, 32(3–4), 189–196.
- Muryanto, S., Bayuseno, A. P., Ma'mun, H., Usamah, M., & Jotho. (2014).** Calcium carbonate scale formation in pipes. *Procedia Chemistry*, 9, 69–76.
- Parkhurst, D. L., & Appelo, C. A. J. (2013).** Description of input and examples for PHREEQC version 3. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, Chap. A43.
- Paulitsch-Fuchs, A. H., Stanulewicz, N., Pollner, B., Dyer, N., & Fuchs, E. C. (2021).** Strong Gradients in Weak Magnetic Fields Affect the Long-Term Biological Activity of Tap Water. *WATER*, 12, 28–48.
- Plummer, L. N., & Busenberg, E. (1982).** The solubilities of calcite, aragonite and vaterite in CO₂–H₂O solutions between 0 and 90 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(6), 1011–1040.



- Pouget, E. M., Bomans, P. H. H., Goos, J. A. C. M., Frederik, P. M., de With, G., & Sommerdijk, N. A. J. M. (2009).** The Initial Stages of Template-Controlled CaCO_3 Formation Revealed by Cryo-TEM. *Science*, 323, 1455–1458.
- Sammer, M., Kamp, C., Paulitsch-Fuchs, A. H., Wexler, A. D., Buisman, C. J. N., & Fuchs, E. C. (2016).** Strong Gradients in Weak Magnetic Fields Induce DOLLOP Formation in Tap Water. *Water*, 8, 79.
- Stumm, W., & Morgan, J. J. (1996).** *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Vaskina, I., Roi, I., Plyatsuk, L., Vaskin, R., & Yakhnenko, O. (2020).** Study of the Magnetic Water Treatment Mechanism. *Journal of Ecological Engineering*, 21(2), 251–260.
- van der Bruggen, B., Goossens, 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(2), 541–549.
- WHO (2009).** Calcium and magnesium in drinking-water: Public health significance. World Health Organization, Geneva (ISBN 978 92 4 156355 0).
- WHO (2011).** Hardness in drinking-water (WHO/HSE/WSH/10.01/10/Rev/1). World Health Organization, Geneva.
- Zarei, T., Colombo, M. B. A., Fuchs, E. C., Offerhaus, H. L., Gebauer, D., & Agostinho, L. L. F. (2024).** Characterization of Nanoparticles in Drinking Water Using Field-Flow Fractionation with MALS and ICP-MS. *Water*, 16, 2419.

ANALYSERAPPORTER (LAGUR'S DOKUMENTATION)

- FORCE Technology (2026).** Synkrotron-XRD-analyse af LAGUR-behandlet kalk — indledende fasevurdering. Juli 2026.
- GEUS (2026).** SEM-analyse af kalkstruktur: LAGUR-behandlet vs. ubehandlet drikkevand. SEM-testrapport, april 2026. De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland.
- Rambøll (2026).** Feltstudie af LAGUR på Grauballe Vandværk — kalkstruktur i forsyningsnettet. Februar 2026.
- Teknologisk Institut (2020).** Undersøgelse af Lagur vandbehandler (ordrenr. 923059; R. Pedersen). Installation og Kalibrering, 9. juni 2020.