



Fordampning i lukkede 2.generations pilerenseanlæg

Denne rapport er oversat fra engelsk til dansk af Languageweire.com, og der tages forbehold for evt. fejl. Der henvises til den originale version på engelsk, som findes på nederst på dette link:
<https://salixgreentech.dk/saadan-virker-det/>

Andreas Ibrom, DTU Miljø, Sektion Climate and Monitoring,

april 2021

Vurdering

Andreas Ibrom, DTU Environment, 03.04.2021

Ophavsret: Gengivelsen af hele eller dele af publikationen skal indeholde de almindelige bibliografiske citationer, herunder kreditering af forfattere, rapportens titel osv.

Forord

Denne korte vurdering af vandbalancen i 2. generations pilerenseanlæg (2GWTF) blev bestilt af SalixGreenTech A/S i april 2021. Målsætningen var at vurdere kompatibiliteten af 2GWTF med de gældende regler for lukkede pilerenseanlæg i Danmark.

Lenglern, april 2021

Andreas Ibrom
Prof. Dr.

Indholdsfortegnelse

Resumé	5
1. Indledning	6
2. Høj fordampning i pileanlæg udfordrer de teoretiske øvre grænser for evapotranspiration	7
3. Dimensionering af 2. generations pilerenseanlæg i Danmark	9
4. Konklusion	15

Resumé

Der blev gennemført et skrivebordsstudie for at vurdere kompatibiliteten af et nyt pilerenseanlæg (2GWTF) med den danske lovgivning. Det nye design optager et betydeligt mindre areal sammenlignet med første generations pilerenseanlæg (1GWTF) og kan tilpasses til at driftes under en række forskellige klimatiske forhold. Disse egenskaber sammen med reducerede vedligeholdelsesomkostninger gør 2GWTF til en attraktiv løsning til spildevandsrensning for individuelle husholdninger eller små lokalsamfund i det åbne land. Fokus i undersøgelsen var på vandbalancen, især udsigterne til, at anlægget ville fordampe spildevands- og regnvandstilstrømningen fuldstændigt på lang sigt og være i stand til på sikker vis at afbøde de sæsonudsving i vandmængder, der påvirkes af ustadigt vejr.

For at sammenligne med de danske retningslinjer blev den såkaldte afgrødekoefficient, en kerneparameter i den enkle fordamningsmodel, sat til den foreslåede referenceværdi på 2,5. Ved hjælp af 10 års gennemsnitlige månedlige vejrdata fra hele Danmark blev minimums længden på anlægget og den nødvendige opmagasineringskapacitet, der muliggør nuludledning, fastsat. De anslåede værdier lå godt inden for rammerne af den fleksible anlægskonstruktion. Selvom de anslåede krav til anlæggets længde lå tæt på standardværdierne, skal standardopmagasineringskapaciteten sandsynligvis udvides. Optimal tilpasning til danske klimatiske forhold kræver større fleksibilitet i anlæggets opmagasineringskapacitet pr. anlægslængde.

Undersøgelsen konkluderer, at ud fra de antagelser og parametre, der anvendes i simuleringerne, er den nye anlægskonstruktion lige så kompatibel med den danske lovgivning som det større 1GWTF. Da de referenceparametre og grænseforhold, der foreslås i de danske retningslinjer, endnu ikke er videnskabeligt undersøgt, anbefales effektiv monitorering af anlæggene. Der findes enkle procedurer til at gribe ind, hvor det er nødvendigt, hvilket reducerer risikoen for forurening i tilfælde af uventede funktionsfejl i den nye anlægskonstruktion. Resultaterne af denne undersøgelse tyder på, at risikoen for forurening af miljøet for den nye anlægskonstruktion ikke er højere sammenlignet med første generation.

1. Indledning

Spildevandsrensning med pil er en attraktiv mulighed for at nedbryde den organiske del af spildevandet og fjerne vand ved hjælp af transpiration. Pilerenseanlæg uden udledning (WTF) er især fordelagtige i områder, der ligger langt fra centrale spildevandsrensningseanlæg med stor jordtilgængelighed. WTF kan skaleres fra husholdnings- til landsbyniveau og kan erstatte den forældede bundfældningstanks-teknologi.

Brugen af spildevandsrensningseanlæg i Danmark reguleres af Miljøministeriet (MST), der offentliggør lovkrav og retningslinjer for etableringen af 1. generations pilerensningsanlæg (1G) på deres hjemmesider (Gregersen et al., 2003b).

En kritisk faktor for anlæg uden udledning er opretholdelse af en dynamisk-stabil vandbalance, dvs. at tilførslerne til systemet i gennemsnit svarer til udskillelsen, og at sæsonudsving i opmagasineret vand er mindre end opmagasineringskapaciteten.

Vandbalanceligningen er:

$$0 = F_{ww} + P - R - E_t + \Delta_s \quad (1)$$

med F_{ww} som tilført spildevand, P nedbør, R afstrømning, E_t som total evapotranspiration bestående af fordampning fra jord (E), transpiration fra planter (T) og fordampning af opfanget regnvand (I) og Δ_s som ændringer i opmagasineret vand, som alle er relateret til en relevant referenceramme. Denne ramme skal tage højde for den korrekte kombination af areal- og anlægsbaserede vandstrømme, hvilke er forholdsvist kompliceret for sådanne anlæg.

Bortset fra F_{ww} svinger alle vandstrømme med årstiderne. Anlæggets konstruktion skal sikre, at disse udsving, især Δ_s , afbødes inden for sikre margener på begge sider, dvs. undgå overløb af spildevand til miljøet og undgå tørkestress for piletræer i tørre perioder. Konstruktionen af et sådant anlæg kræver data om klimaet, først og fremmest nedbørens sæsonudsving, men også faktorer, der påvirker fordampning og plantevækst, plantefysiologiske parametre og spildevandets produktionshastighed.

I en baggrundsrapport indsamlede Gregersen et al. (2003a) de daværende data fra 1GWTF i Danmark. En vigtig komponent er estimeringen af fordampning, som de bygger på et FAO-koncept (FN's fødevarer- og landbrugsorganisation):

$$E_t = K_c E_0 \quad (2)$$

med K_c som afgrødekoefficient og E_0 som den potentielle fordampning.

Ud fra de daværende 1GWTF-data blev den gennemsnitlige K_c for pileanlæg estimeret til at nå en værdi på 2,5 gange referencen, den potentielle fordampning (E_0), hvilket muliggør en fordampning på f.eks. 1500 mm eller mere om året, dvs. ca. 2/3 er spildevand, hvor resten er nedbør. I disse beregninger blev det antaget, at intet spildevand forlader systemet ud over ved fordampning og transpiration. Denne fordampning er ca. en til to gange højere end den fordampning fra pil som er målt ved hjælp af forskningsinfrastrukturen og pileplantagen som driftes med kort omdriftstid på DTU-Risø campus (Wang et al., 2019; Wang et al., 2018), hvor de højeste daglige fordampningshastigheder når op på 5 mm d⁻¹.

Ny teknologisk udvikling af 2. generations (2G) WTF har til formål at reducere arealkravene og omkostningerne pr. enhed behandlet spildevand inden for samme eller endda en forbedret miljø sikkerhedsmargin. 1GWTF var 8 til 10 m brede forseglede bassiner, fyldt med jord og beplantet med pil. Piletræerne vedligeholdes som energipil med kort omdriftstid og 'vandes' med spildevand og regn. Den nye konstruktion bygger en ny beplantet struktur med dedikeret volumen til at opmagasinere spildevand og virke som buffer for udsving i vandstrømmen. Sammenlignet med 1GWTF reducerer den nye konstruktion arealet til rensning, der bruges pr. enhed spildevand, ved at øge anlæggets opmagasineringskapacitet pr. enhedsareal, ved at øge fordampningen pr. enhedsareal og ved at reducere vandoptagelsen fra regn. Alle disse nye egenskaber understøtter hinanden, f.eks. nedsætter den højere fordampning kravene til areal og opmagasineringskapacitet. Øget opmagasineringskapacitet pr. enhedsareal muliggør mere effektiv afbødning af udsving og forsyner piletræerne med vand i tørre perioder med stort fordampningsbehov. Mikrobielle processer nedbryder de organiske forbindelser og mobiliserer næringsstoffer, der understøtter intensiv pilevækst, hvilket igen skaber højt bladareal pr. arealenhed (bladarealindeks, LAI) og dermed fordampningspotentiale af to årsager: Op til en bestemt LAI-værdi stiger transpirationen med LAI. Interceptions-fordampningen (fordampning af vand på trækronens overflader, dvs. bladene) øges over hele det mulige område med LAI, hvis regnintensiteten er høj nok.

Den øgede transpiration formodes at opnås ved en kontinuerlig tilstrækkelig vandforsyning, højt bladareal og er desuden understøttet af den sribeformede struktur med to rækker tætplantet pil, 4 m bred, arrangeret vinkelret iht. den primære vindretning.

Den læhegnsagtige konstruktion er kendt for at øge sammenkædningen mellem trækronen og atmosfæren og dermed opretholde høje vanddampstrykgradienter fra blad til luft og dermed transpiration (Jarvis og McNaughton, 1986). Viden om denne type vegetation er sparsom. Læhegn vandes normalt ikke. Læheggenes vækst hæmmes derfor normalt temmelig meget, og fordampningen begrænses af tilgængeligheden af vand i jorden.

2. Høj fordampning i pileanlæg udfordrer de teoretiske øvre grænser for evapotranspiration

FAO (Allen, 1998) har anvendt en fremgangsmåde til at beskrive effekten af trækronen på afgrødekoefficienten (fig. 1). Forholdet er begrænset til en maksimal K_c -værdi på 2,5 (fig. 1b), når træerne er omgivet af tørre overflader, hvormed grænselaget opvarmes og den potentielle fordampning øges. For træer omgivet af godt vandet vegetation når denne K_c -tærskelværdi kun op på 1,4. Normalt overstiger K_c -værdierne sjældent 1,3, hvilket er et niveau, der understøttes godt af vores målinger i en pilemark med kort omdriftstid i Risø. På baggrund af den høje fordampning, der er observeret i danske 1GWTF, har Gregersen et al. (2003a) anbefalet brug af en K_c -værdi lig med 2,5 som reference for WTF.

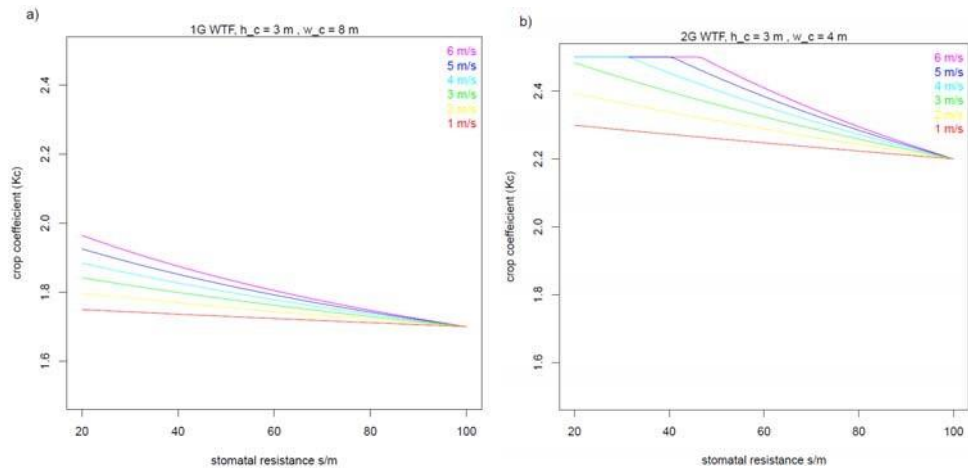


Fig. 1: Afhængighed af afgrødekoefficienten for a) 1GWTF og b) 2GWTF af stomatal modstand og vindhastighed (Allen, 1998), med h_c og w_c som henholdsvis trækrone højde og bredde.

Resultaterne viser det ekstremt høje fordampningspotentiale i velvandede pileplantager. Men teoretisk set vil en halvering af bredden af pilestriben endda øge K_c -værdien, og den vil være meget højere, hvis funktionen ikke begrænser K_c til maksimalt 2,5.

Data observeret i danske 1GWTF er treårige gennemsnit. Da piletræerne over store dele af året ikke har blade, skal fordampningen være meget højere end gennemsnittet i sommermånederne, hvilket udfordrer den øvre K_c -grænseværdi i den maksimale vækstsæson. Disse resultater og overvejelser antyder, at begrænsningen af K_c , der tilsyneladende fungerer godt i større afgrødeplantager, muligvis skal revideres for i tilstrækkelig grad at beskrive fordampning i striber med tæt beplantet pil. Indledningsvist antog den nye 20 m lange konstruktion af 2GWTF en påkrævet K_c -værdi på 3,3, en værdi højere end den maksimumværdi, som FAO-metoden foreslår, og overstiger referenceværdien for 1GWTF. Men det næste vil vise, at den faktiske K_c -værdi for 2GWTF kan være lavere end det.

Som nævnt ovenfor skal referencerammen for vandstrømmene vælges med omhu. Den potentielle fordampning beregnes i mm pr. tidsenhed. Alle strømme i vandbalanceligningen, eq. (1) er i m^3 vand pr. tidsenhed pr. anlæg. Ved ovenstående skøn over den krævede K_c -værdi = 3,3 for at etablere stabilitet i 2GWTF udgør det beplantede areal og dermed den fysiske udvidelse af det byggede anlæg i dets oprindelige koncept $75 m^2$ (A_{fac}), mens trækronen optager $111 m^2$, idet der tages højde for overhængende grene på mindst $0,725 m$ ud over anlæggets sider (A_{can}). A_{can} er således $\sim 1,5$ af A_{fac} . Det betyder, at den påkrævede K_c antaget på baggrund af A_{fac} , dvs. 3,3, kan lempes til en værdi af 2,2 (dvs. $= 3,3 A_{fac}/A_{can}$), dvs. en smule mindre sammenlignet med referenceværdien for 1GWTF.

Derfor stilles der ikke højere krav til K_c for 2GWTF sammenlignet med lovgivningen, men der er et par grunde til at forvente højere transpirationshastigheder i de nye, smallere anlæg.

3. Dimensionering af 2. generations pilerenseanlæg i Danmark

2GWTF's designkoncept giver mulighed for en vis fleksibilitet. Anlæggets længde pr. enhed forventet spildevandstilførsel kan tilpasses det lokale klima. I modsætning til 1GWTF kan opmagasineringskapaciteten pr. anlægslængde tilpasses de lokale forhold ved at justere bredden på bioreaktoren. For at vise gennemførligheden af 2GWTF-konstruktionen i forhold til vandbalancen blev minimum anlægslængde og en minimum opmagasineringskapacitet beregnet baseret på klimaet i Danmark.

Minimum anlægslængden (l_{min}) defineres som længden af 2GWTF, der muliggør en stabil vandbalance, dvs. opfyldelse af eq. (1) på lang sigt over flere år. Hvis den faktiske anlægslængde er større end denne værdi, er én betingelse for nuludledning opfyldt. Minimum opmagasineringskapaciteten (κ_{min}) defineres her som den gennemsnitlige maksimale forskel i den akkumulerede vandbelastning over forskellige måneder, der tager højde for sæsonbetingelserne i vandbalanceligningen. I lighed med baggrundsundersøgelsen for 1GWTF var der kun gennemsnitlige klimadata til rådighed for denne korte vurdering, og de faktiske forskelle kan overstige disse simulerede intervaller. For at opfylde den anden betingelse for nuludledning af WTF'er skal den realiserede κ derfor være større end κ_{min} , så den også dækker ekstreme klimatiske hændelser.

Vilkårene for vandbalanceligningen, eq. (1), er beregnet for gennemsnitlige vejrdata (2001-2010), som er leveret af Dansk Meteorologisk Institut på et 20 x 20 km grid (Wang, 2013). Anlægsparametrene blev anvendt som anført i tabel 1. For at forblive sammenlignelig med de danske retningslinjer anvendes en K_c -værdi på 2,5. Referencepotentialet for fordampning blev beregnet på grundlag af det areal, der er dækket af trækronen. Afstrømning fra den skrå jordoverflade ved anlæggets ydermargen og eventuel aktiv eksklusion af regn blev undladt, hvilket begge ville lempe kravet til høj K_c og κ værdier.

Tab. 1: Parametre til estimering af vandbalancen for standard størrelse 2GWTF i Danmark.

Parameter	beskrivelse	værdi	enhed
w	anlæggets bredde	3,75	m
l_d	standardlængden af anlægget	20	m
A_{fac}	standardareal af anlægget	75	m ²
A_{can}	mindste standardareal af trækronen (0,725 m overhængende grene ved hver kant)	111,5	m ²
$V_{p,n}$	porrevolumen pr. enheds anlægslængde	2,48	m ²
κ_d	anlæggets opmagasineringskapacitet ($V_{p,n}/l_d$)	49,5	m ³
K_c	afgrødekoeficient	2,5	
F_{ww}	spildevandsproduktion, 5PE, antages at være ensartet over et år (10 m ³ /måned).	120	m ³ yr ⁻¹
C_{E0}	omregningsfaktor for potentiel fordampning fra mm til m ³ pr. anlæg ($E0 A_{can}/1000$).	0,11154	m ³ mm ⁻¹
C_P	omregningsfaktor for nedbør fra mm til m ³ pr. anlæg ($A_{fac}/1000$) ved fravær af afstrømning og eksklusion af regn.	0,075	m ³ mm ⁻¹

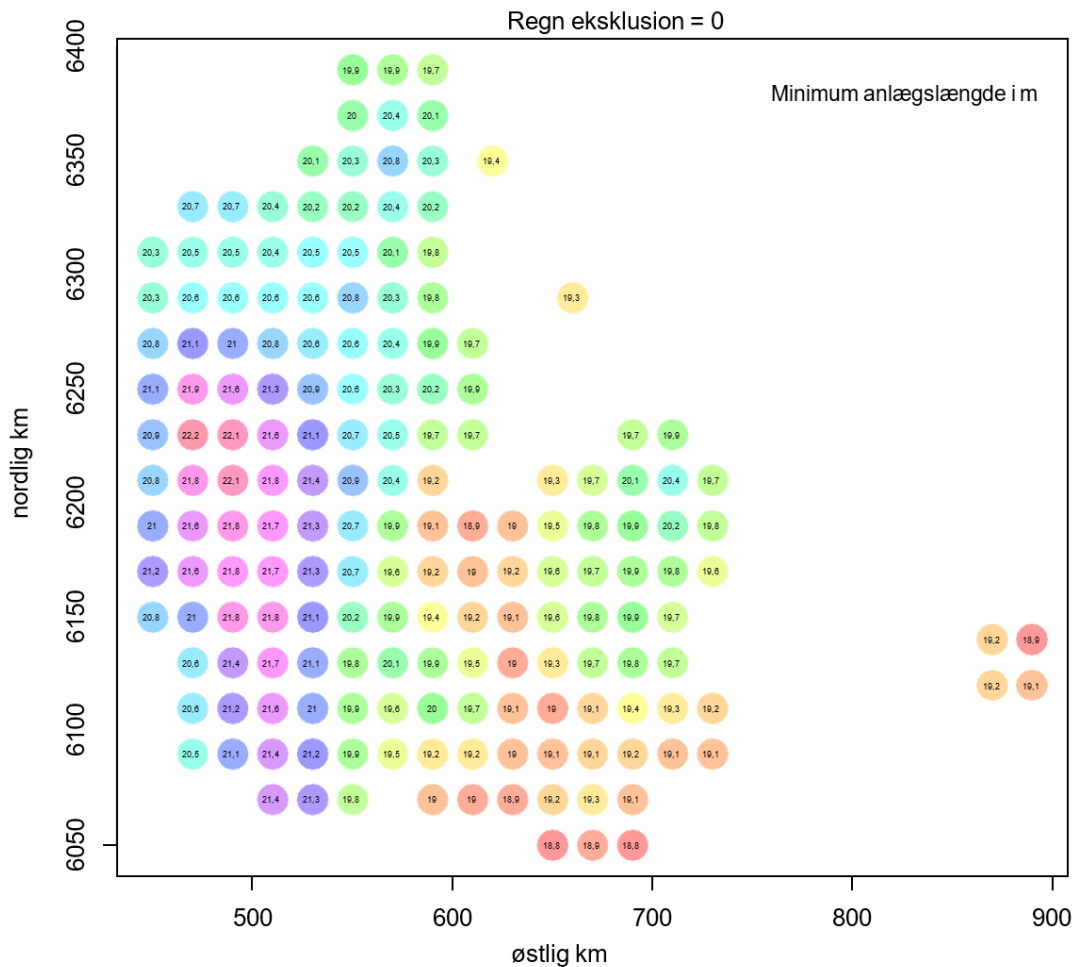


Fig. 2: Minimum anlægslængden for 2GWTF på forskellige lokationer i Danmark uden eksklusion af regn.

Den geografiske fordeling af I_{min} (fig. 1) afspejler forholdet mellem gennemsnitlig månedlig potentiel fordampning og nedbør med de højeste værdier i regioner med den højeste årlige nedbør og den laveste potentielle fordampning, dvs. Midtjylland. Gennemsnittet I_{min} er $20,2 \pm 0,9$ m (usikkerhed om middelværdien angives som standardafvigelse). I de vestlige dele af Danmark har I_{min} en tendens til at være større end I_d , i de østlige dele er standardkonstruktionen på 2GWTF tilstrækkelig ($I_d \approx I_{min}$).

Interessant nok er fordelingen i kravet til opmagasineringskapaciteten (fig. 3) omvendt relateret til minimum anlægslængden. Den geografiske fordeling afspejler den stigende amplitude for klimatiske faktorer med det mere kontinentale klima i det sydøstlige Danmark. Gennemsnitsværdien for minimum opmagasineringskapaciteten (κ_{min}) over alle lokationer er ca. 20 % større (59 ± 3 m³) end opmagasineringskapaciteten (κ_d i Tab. 1). Det reelle krav til opmagasineringskapaciteten vil være højere og bør estimeres med månedlige data snarere end med gennemsnitlig månedlige data.

κ_{min} 's stærke afhængighed af I_{min} (fig. 3) som følge af den geografiske variabilitet i danske klimatiske forhold, kræver en fleksibel værdi af porevolumen, som i gennemsnit bør overstige værdien af standardkonstruktionen (fig. 5). Gennemsnitsværdien af V_{pn} for alle lokationer er $2,9 \pm 0,2$ m².

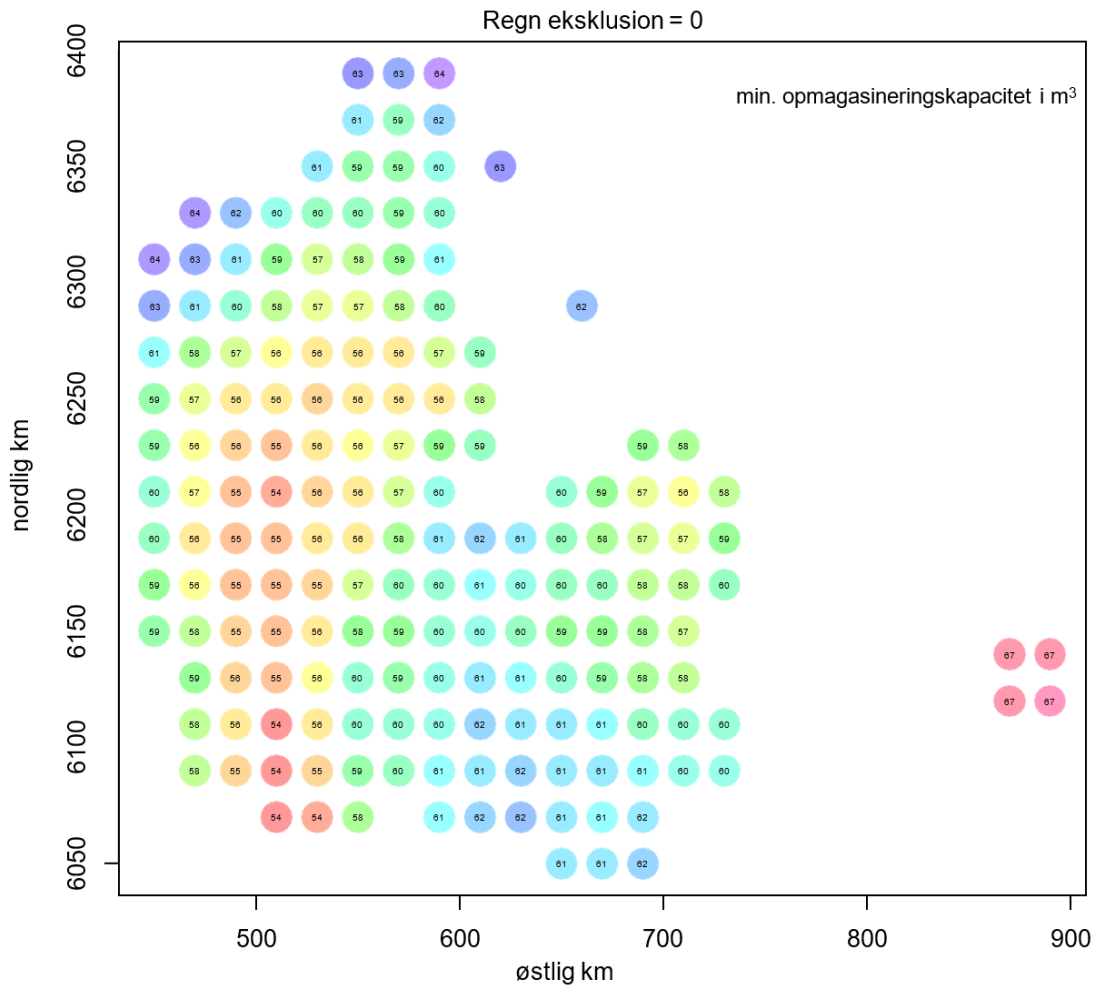


Fig. 3: Minimums opmagasineringskapaciteten for 2GWTF forskellige steder i Danmark uden eksklusion af regn for anlæg med minimumslængde som vist i fig. 2.

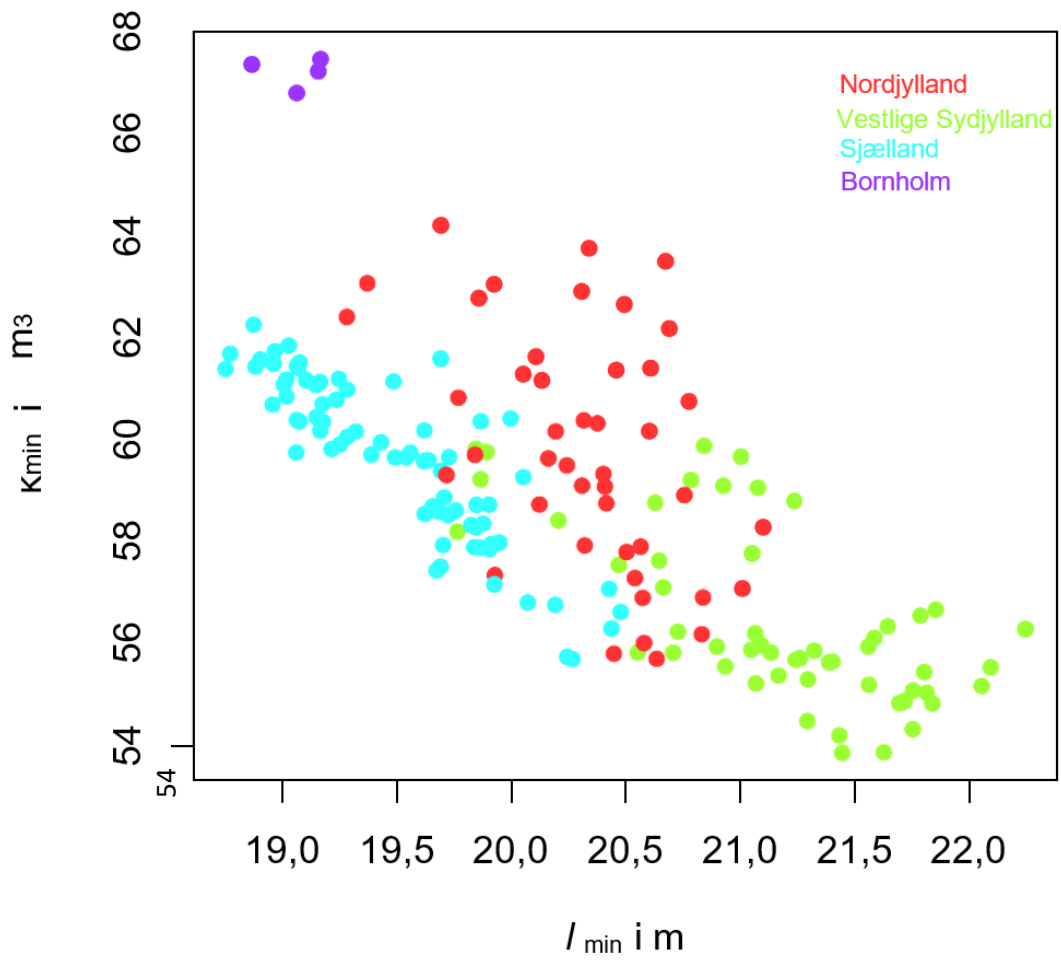


Fig. 4: Forholdet mellem minimum opmagasineringskapaciteten (K_{\min} .) og minimumsanlægslængden (l_{\min}) for danske regioner.

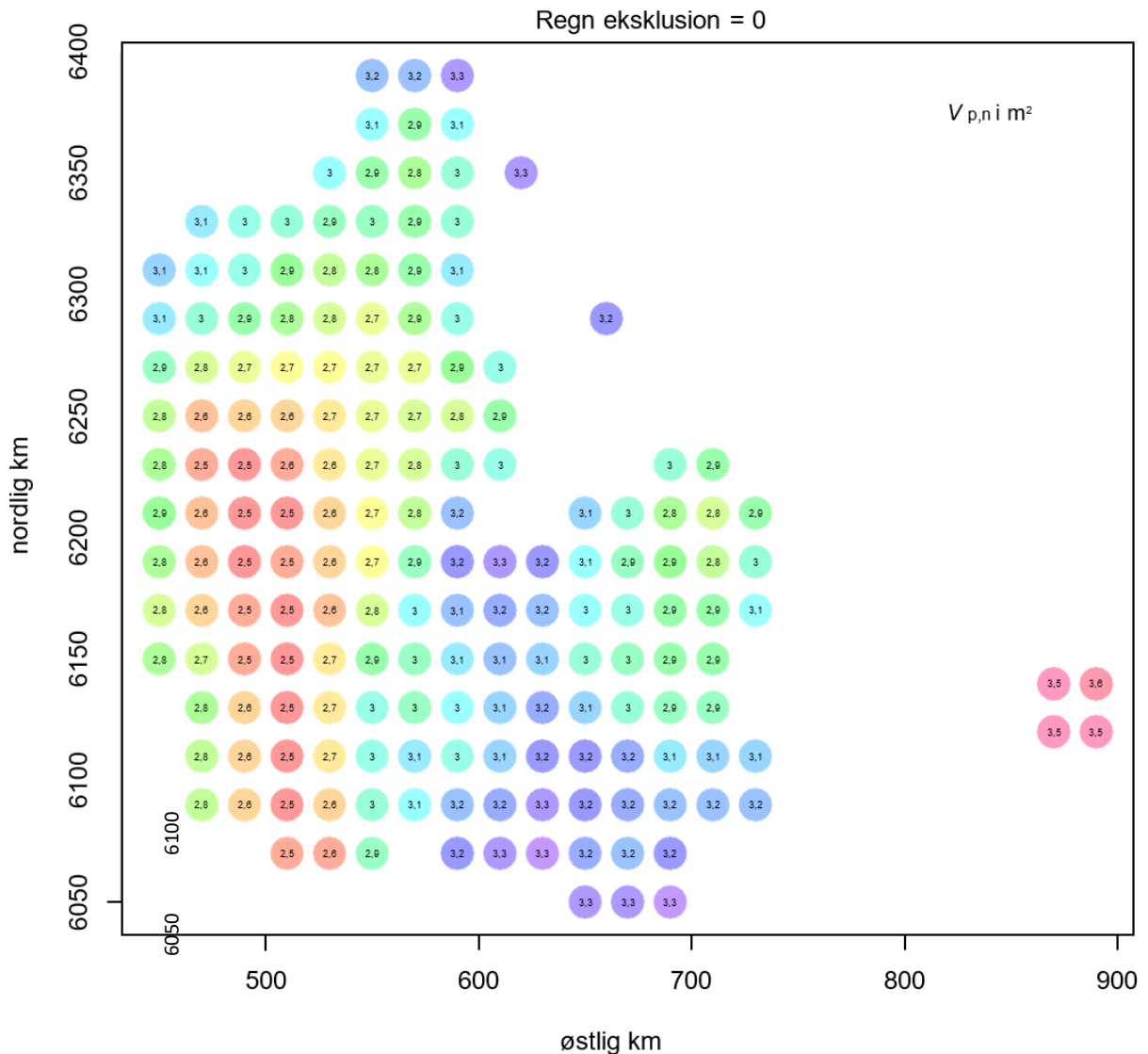


Fig. 5: Minimums porevolumen (m^3 porevolumen pr. m anlæg) af 2GWTF på forskellige lokationer i Danmark uden eksklusion af regn for anlæg baseret på minimumslængde som vist i fig. 2.

3.1 Forventede risici ved de første 2. generations pileanlæg

Begge typer WTF er sårbare over for forstyrrelser i pilens trækrone. Det kan skyldes dyr, der lever af pil, insektinfektion (bladlus) eller vandmangel, hvis spildevandsproduktionen ophører om sommeren. Mens indhegnede anlæg reducerer risikoen for græsning, er nogle af de andre faktorer mere kritiske. I normale pileplantager er risikoen for skader fra insektinvasioner moderat, men sårbarheden i de stærkt voksende plantager kan være anderledes.

Hvis fordampningen af en eller anden grund ikke kan forhindre vandstanden i at stige, og kapaciteten til at lagre mere vand er nået, skal anlægget tømmes efter den traditionelle metode for at undgå forurening af miljøet med ubehandlet spildevand. Kontinuerlig monitorering af vandstanden anbefales. Mulighederne for automatisk monitorering af anlæggets funktion er mange, og nogle billige løsninger er allerede ved at blive testet.

4. Konklusion

Teknologiske fremskridt indebærer en vis risiko for fejl. Økonomiske begrænsninger under innovationsprocessen giver stramme marginer til at teste og konsolidere koncepterne og deres realisering. Overgangen fra 1G til det 2G WTF har introduceret nogle nye miljømæssige og økonomisk attraktive funktioner, der danner et økosystem mellem en husholdning og en lille skovlignende struktur. Men for at sikre, at systemet forvaltes på en bæredygtig måde, skal det testes og undersøges videnskabeligt. Denne korte vurdering drejede sig primært om vandbalancen og var baseret på eksisterende oplysninger om andre systemer og teori. Ud fra teoretiske overvejelser og empiriske data fra 1GWTF virker denne nye konstruktion lovende, fordi den arrangerer systemkomponenterne på en mere effektiv måde med den vigtigste innovation i form af øget fordampningspotentiale og reduceret arealanvendelse. Disse værdier overstiger derfor de hidtil kendte normale grænseværdier for faktisk fordampning, på samme måde som 1GWTF gjorde, da den gennemsnitlige K_c -værdi blev sat til den højest mulige værdi på 2,5. Teoretiske overvejelser understøtter denne tilgang og indikerer endnu højere transpirationspotentiale i 2GWTF sammenlignet med 1G. Praxis vil vise, om dette potentiale også realiseres under ekstreme vejrforhold samt under miljøændringer og menneskelige fejl. Effektiv observation og omhyggelig vedligeholdelse i tæt samarbejde med videnskabelige eksperter vil bidrage til at håndtere risikoen for fejl og endda udnytte uidentificerede potentialer.

Baseret på den bedste tilgængelige viden og den teori, der ligger til grund for den danske lovgivning for pilebaserede spildevandsrensning kan den fleksible 2GWTF-konstruktion overholde lovgivningen om en stabil vandbalance for mange regioner i Danmark, forudsat at anlægget tilpasses de lokale klimaforhold. Selvom standardanlægslængden på 20 m er meget tæt på kravene, skal opmagasineringskapaciteten øges. Resultaterne tyder på etablering af den respektive normaliserede porevolumen sammen med minimumslængden for et givent klima.

Da de præsenterede simuleringer er baseret på antagelser og gennemsnitlige klimadata, tilrådes et forsigtighedsprincip. Kontinuerlig monitorering af anlægget og indgriben, når det er nødvendigt, anbefales. Der findes metoder til at monitorere og modvirke funktionsfejl på anlægget og dermed håndtere de potentielle risici for forurening af miljøet med spildevand. Med hensyn til nuludledningskravene fandt denne undersøgelse ingen indikation for større risiko ved brug af den adaptive 2GWTF-konstruktion sammenlignet med 1GWTF.

Referencer

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). 56.
- Gregersen, P., Gabriel, S., Brix, H. and Faldager, I., 2003a. Etablering af pileanlæg - Baggrundsrapport, Miljøministeriet.
- Gregersen, P., Gabriel, S., Brix, H. and Faldager, I., 2003b. Retningslinier for etablering af pileanlæg op til 30 PE, Copenhagen.
- Jarvis, P.G. and McNaughton, K., 1986. Stornatal Control of Transpiration: Scaling Up from Leaf to Region Advances in Ecological Research, 15: 1-45.
- Wang, P.R., 2013. Klimagrid Danmark Referenceværdier 2001-2010 Måned- og årsværdier for temperatur, relativ luftfugtighed, vindhastighed og globalstråling 20x20 km samt nedbør 10x10 km, Copenhagen.
- Wang, S. et al., 2019. High spatial resolution monitoring land surface energy, water and CO₂ fluxes from an Unmanned Aerial System. Remote Sensing of Environment, 229: 14-31.
- Wang, S. et al., 2018. Mapping Root-Zone Soil Moisture Using a Temperature-Vegetation Triangle Approach with an Unmanned Aerial System: Incorporating Surface Roughness from Structure from Motion. Remote Sensing, 10(2).

Anerkendelse

M.Sc. Adina Schwartzbach og Bjarne Jørgensen har leveret data om konstruktionen af 2G WTF.