



MULIGHEDER FOR REDUKTION AF DEN DIFFUSE FOSFORTILFØRSEL TIL SKANDERBORG SØ

Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 383

2026



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

MULIGHEDER FOR REDUKTION AF DEN DIFFUSE FOSFORTILFØRSEL TIL SKANDERBORG SØ

Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 383

2026

Hans Estrup Andersen

Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 383
Kategori:	Rådgivningsrapporter
Titel:	Muligheder for reduktion af den diffuse fosfortilførsel til Skanderborg Sø
Forfatter:	Hans Estrup Andersen
Institution:	Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	https://dce.au.dk
Udgivelsesår:	Maj 2026
Redaktion afsluttet:	30. april 2026
Faglig kommentering:	Hans Thodsen
Kvalitetssikring, DCE:	Henriette Hossy
Ekstern kommentering:	Der er ikke modtaget kommentarer til rapporten
Finansiel støtte:	Skanderborg Kommune
Bedes citeret:	Andersen, H.E. 2026. Muligheder for reduktion af den diffuse fosfortilførsel til Skanderborg Sø. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 31 s. - Teknisk rapport nr. 383
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Rapporten opgør den diffuse fosforbelastning af Skanderborg Sø fordelt på tabsveje, vurderer potentialet i en række virkemidler til reduktion af belastningen og estimerer de forventede effekter. Resultaterne er input til Skanderborg Kommunes arbejde med at forbedre vandkvaliteten i søen.
Emneord:	Fosfor, virkemidler, Skanderborg Sø
Foto forside:	Luftfoto af Skanderborg by i morgenlyset, Colourbox
ISBN:	978-87-7648-056-1
ISSN (elektronisk):	2244-999X
Sideantal:	31

Indhold

Forord	5
Sammenfatning	6
Summary	8
1 Indledning	10
2 Metode	11
2.1 Introduktion	11
2.2 Kalibrering af beregningen af diffust fosfortab på transportveje	11
2.3 Kildeopsplitning	15
2.4 Forbehold	15
3 Effekter af virkemidler mod diffust fosfortab	16
3.1 Skovrejsning	16
3.2 Randzoner	16
3.3 Træer på vandløbsbrinker	17
3.4 Sandfang	18
3.5 Mindre strækingsbaserede restaureringer af vandløb	19
3.6 Genslyngning af vandløb	20
3.7 Mini-vådområder	20
3.8 Integrerede bufferzoner (IBZ)	21
3.9 Fosfor-vådområder (P-ådale)	22
4 Fosforeffekt af omlægningsplanen	23
5 Resultater	25
5.1 Kildeopsplitning	25
5.2 Effekter af virkemidler mod diffust fosfortab	27
5.3 Fosforeffekt af omlægningsplanen	27
5.4 anbefalinger	28
6 Referencer	30

Forord

Skanderborg Sø har en dårlig økologisk tilstand pga. for høj tilførsel af fosfor. Opgørelser viser, at 80 % af fosfortilførslen kommer fra det åbne land. Fosfortab fra det åbne land stammer typisk fra en mindre del af det samlede areal, risikoområderne. For at opnå en omkostningseffektiv reduktion af fosfortabet er det helt afgørende at kunne målrette virkemidler mod disse risikoområder. Skanderborg Kommune har derfor anmodet DCE-Aarhus Universitet om at gennemføre en kortlægning af kilderne til fosfortab samt at evaluere effekten på fosfortabet af en række virkemidler.

Sammenfatning

Dette projekt fokuserer på at anvise muligheder for at reducere diffust fosfortab fra risikoområder i oplandet til Skanderborg Sø ved at kombinere detaljeret kortlægning af fosfortab med forskellige virkemidler. Fosfortabet stammer primært fra fem diffuse kilder: erosion, udvaskning til dræn, makroporetabs til dræn, tab fra dyrket organisk jord og brinkerosion.

For at beregne effekten af virkemidler til reduktion af fosfortab fra det åbne land anvendes en række metoder og modeller. For randzoner, træer på vandløbsbrinker, integrerede bufferzoner og mini-vådområder er der anvendt det fulde (maksimale) potentiale for anvendelse af virkemidlerne. For skovrejsning er anvendt kommuneplanens forslag til skovrejsningsområder. For mindre strækningsbaserede restaureringer (dvs. hævnning af vandløbsbunden) er anvendt forslag til strækninger angivet i vandområdeplanerne 2021-2027. For virkemidlerne sandfang, genslyngning af vandløb og fosfor-ådale anbefales det at gennemføre en lokal undersøgelse af potentialerne for at kunne beregne effekten.

Projektet beregner virkemidlernes effekt ved de angivne potentialer og omkostningerne angives. Desuden er effekten på fosfortab af Grøn Treparts arealudtagning beregnet separat.

Den samlede fosfortilførsel til Skanderborg Sø er som gennemsnit over perioden 2015-2024 ca. 4.920 kg P, hvoraf det diffuse bidrag udgør ca. 3.800 kg fosfor (77 %). De mest betydende diffuse tabsveje for fosfor er tab via makroporer til dræn, brinkerosion og tab fra dyrket, organisk jord, som udgør hhv. ca. 31 %, 22 % og 23 % af den samlede, diffuse tilførsel.

Vandområdeplanerne 2012-2027 angiver et indsatskrav for fosfor på 1207 kg fosfor for at opnå god økologisk tilstand i Skanderborg Sø.

De virkemidler, der umiddelbart kan give de største fosforreduktioner, er træplantning på vandløbsbrinker (305 kg fosfor) og mini-vådområder (385 kg fosfor) ved udnyttelse af de maksimale potentialer, mens kvantificering af effekten af sandfang og fosfor-ådale udestår.

Omlægningsplanen i forbindelse med Grøn Trepert omfatter fire områder i oplandet til Skanderborg Sø: Hylke Enge, Ringkloster Enge, Herschendsgave Mose og Hvolbæk. Landbrugsdriften i områderne ekstensiveres eller ophører helt, og områderne vådlægges i et vist omfang. Det er endvidere antaget, at bunden i vandløbene i områderne hæves, hvilket mindsker brinkerosion. Ekstensivering af områderne og hævnning af vandløbsbunden reducerer isoleret set fosfortabet til Skanderborg Sø med ca. 210 kg fosfor. Det er imidlertid velkendt, at vådlægning af tidligere landbrugsjord kan resultere i en betydelig fosformobilisering. Det er vigtigt under gennemførelse af projekterne at have denne risiko for øje og eventuelt iværksætte afværgeforanstaltninger for at modvirke et fosfortab.

Anbefalinger:

1. Iværksættelse af et måleprogram. Fosfortilførslen til søen måles nu kun et sted, i Ringkloster Å. For at sikre en målrettet indsats bør der også måles månedligt igennem et år i de mindre vandløb og nedstrøms særlige risikoområder (pumpedrænede organiske jorde i Ringkloster Enge). Prisoverslag: 220.000 kr.
2. Visuel kildeopsporing, dvs. vandring langs alle vandløb for at observere tegn på erosion på marker og af vandløbsbrinker. Kan gennemføres af kommunens teknikere og/eller studentermedhjælpere.
3. Udvidelse af kommuneplanens forslag til skovrejsning og målretning mod områder med risiko for fosfortab via makroporer til dræn. Ved overlap med områder med behov for grundvandsbeskyttelse er der mulighed for at benytte en statslig tilskudsordning (op til 75.500 – 94.500 kr./ha), ligesom vandværker kan finansiere ca. 50% af jordprisen. Et område på 225 ha i nærheden af Stilling er udpeget til grundvandsbeskyttelse.
4. Undersøgelse af mulige placeringer af sandfang, dvs. identifikation af vandløbsstrækninger med stor sandvandring. Gennemføres af kommunens teknikere. Etablering af sandfang koster 33.000 – 76.000 kr.
5. Undersøgelse af potentialet for at hæve vandløbsbunden ved udlægning af groft materiale, dvs. identifikation af over-dybe vandløb med forøget risiko for brinkerosion. Gennemføres af kommunens teknikere. Pris for hævning af vandløbsbunden: 67 – 112 kr. pr. m vandløb.
6. Undersøgelse af muligheder for at etablere fosfor-ådale i et eller flere af omlægningsplanens områder, hvor vandløb temporært kan oversvømme de vandløbsnære arealer og derved aflejre fosfor. Gennemføres af kommunens teknikere. Etableringsomkostning af fosfor-ådal: ca. 927.000 kr./km vandløb (dækkes af staten).
7. Afdækning af interesse blandt lodsejere for etablering af træer på vandløbsbrinkerne som sikring mod brinkerosion. Gennemføres i samarbejde med Skanderborg-Odder Landboforening. Pris for etablering af træer langs vandløb: ca. 65.000 kr./km vandløb (en statslig støtteordning udrulles ultimo 2026).
8. Afdække interesse blandt lodsejere for etablering af brede randzoner nedenfor områder med erosionsrisiko. Gennemføres i samarbejde med Skanderborg-Odder Landboforening. Pris for en hektar randzone (varierende bredde): ca. 2.000 kr./ha/år (produktionstab for landbrugeren).
9. Afdække interesse blandt lodsejere for etablering af mini-vådområder. Gennemføres i samarbejde med Skanderborg-Odder Landboforening. Etableringsomkostning af mini-vådområde: ca. 610.000 kr. (pt. er der ikke støttemuligheder til etablering af anlæg i oplandet til Skanderborg Sø, men der forventes en statslig støtteordning målrettet fjernelse af fosfor, hvorved oplandet til Skanderborg Sø vil kunne komme i betragtning).
10. Dialog med Naturstyrelsen om det planlagte klima-lavbundsprojekt i Ringkloster Enge, så de nyeste forskningsresultater om afværgeforanstaltninger (biomassehøst før vådlægning, fjernelse af fosforrig topjod, sandfilter) inddrages samt eventuelle måledata over aktuelt fosfortab fra området.

Summary

This project focuses on identifying options for reducing diffuse phosphorus loss from high-risk areas in the catchment of Skanderborg Lake by combining detailed mapping of phosphorus loss with different mitigation measures. The phosphorus loss originates primarily from five diffuse sources: erosion, leaching to drains, macropore loss to drains, loss from cultivated organic soils, and bank erosion.

To calculate the effect of mitigation measures aimed at reducing phosphorus loss from agricultural land, a range of methods and models is used. For riparian buffer zones, trees on stream banks, integrated buffer zones, and mini-wetlands, the full (maximum) potential for implementing these measures has been applied. For afforestation, the municipality's proposed afforestation areas have been used. For smaller reach-based restorations (i.e., raising the streambed), the stretches proposed in the River Basin Management Plans 2021–2027 have been applied. For sediment traps, stream re-meandering, and phosphorus floodplains, it is recommended to conduct a local assessment of the potential.

The project calculates the effect of the mitigation measures at the indicated potentials and presents the associated costs. In addition, the effect on phosphorus loss from the Green Tripartite land-retirement scheme is calculated separately.

The total phosphorus input to Skanderborg Lake averaged over the period 2015–2024 is approx. 4,920 kg P, of which the diffuse contribution accounts for approx. 3,800 kg phosphorus (77%). The most significant diffuse pathways for phosphorus loss are macropore flow to drains, bank erosion, and loss from cultivated organic soils, which constitute approx. 31%, 22%, and 23% respectively of the total diffuse input.

The River Basin Management Plans 2012–2027 specify a phosphorus reduction requirement of 1,207 kg phosphorus to achieve good ecological status in Skanderborg Lake.

The mitigation measures that can immediately provide the largest phosphorus reductions are tree planting on stream banks (305 kg phosphorus) and mini-wetlands (385 kg phosphorus) when their maximum potentials are utilized, while quantification of the effect of sediment traps and phosphorus floodplains is still pending.

The land-conversion plan under the Green Tripartite Agreement includes four areas in the catchment of Skanderborg Lake: Hylke Enge, Ringkloster Enge, Herschendsgave Mose, and Hvolbæk. Agricultural activity in these areas will be reduced or cease entirely, and the areas will be rewetted to some extent. Extensification of these areas alone reduces phosphorus loss to Skanderborg Lake by approx. 170 kg phosphorus. However, it is well known that re-wetting former agricultural land can result in significant phosphorus mobilization. It is important during project implementation to keep this risk in mind and, if necessary, initiate mitigation measures to counteract phosphorus release.

Recommendations:

1. Implementation of a monitoring program. Phosphorus input to the lake is currently measured only at one location, in Ringkloster Stream. To ensure a targeted effort, monthly measurements should also be taken for one year in the smaller streams and downstream of specific high-risk areas (pumped organic soils in Ringkloster Enge). Estimated cost: 220,000 DKK.
2. Visual source identification, i.e., walking along all streams to observe signs of erosion on fields and stream banks. This can be carried out by municipal technicians and/or student assistants.
3. Expansion of the municipality's proposed afforestation areas, targeting areas with risk of phosphorus loss via macropores to drains. Where these overlap with areas requiring groundwater protection, a state subsidy scheme may be used (up to 75,500–94,500 DKK/ha), and water utilities can finance approx. 50% of land costs.
4. Assessment of possible locations for sediment traps, i.e., identification of stream sections with high sand transport. Conducted by municipal technicians. Establishment cost: 33,000–76,000 DKK.
5. Assessment of the potential for raising streambeds by adding coarse material, i.e., identifying over-deepened streams with increased risk of bank erosion. Conducted by municipal technicians. Cost for raising the streambed: 67–112 DKK per meter of stream.
6. Assessment of opportunities to establish phosphorus floodplains in one or more of the land-conversion areas, where streams can temporarily flood adjacent low-lying areas and deposit phosphorus. Conducted by municipal technicians. Establishment cost: approx. 927,000 DKK per km of stream (covered by the state).
7. Assessment of landowner interest in establishing trees on stream banks as protection against bank erosion. Conducted in collaboration with the Skanderborg-Odder Farmers' Association. Cost: approx. 65,000 DKK per km of stream (a state subsidy scheme will be launched at the end of 2026).
8. Assessment of landowner interest in establishing wide buffer strips below areas with erosion risk. Conducted in collaboration with the Skanderborg-Odder Farmers' Association. Cost: approx. 2,000 DKK/ha/year (lost agricultural production).
9. Assessment of landowner interest in establishing mini-wetlands. Conducted in collaboration with the Skanderborg-Odder Farmers' Association. Establishment cost: approx. 610,000 DKK. (Currently, no subsidy options exist for constructing such facilities in the Skanderborg Lake catchment, but a state subsidy scheme targeting phosphorus removal efficiency is expected, which may include the catchment.)
10. Dialogue with the Danish Nature Agency regarding the planned climate lowland project in Ringkloster Enge, ensuring that the latest research on mitigation measures (biomass harvesting before re-wetting, removal of phosphorus-rich topsoil, sand filters) is incorporated, as well as any available monitoring data on current phosphorus loss from the area.

1 Indledning

Skanderborg Sø har en dårlig økologisk tilstand pga. for høj tilførsel af fosfor. Opgørelser viser, at 80 % af fosfortilførslen kommer fra det åbne land, det såkaldte diffuse fosfortab. Det resterende bidrag fra punktkilder (renseanlæg, regnvandsbetingede overløb mv.) er teknisk besværligt og dyrt yderligere at reducere, hvorfor det er meningsfuldt at undersøge mulighederne for at begrænse det diffuse fosfortab.

Fosfortab fra det åbne land stammer typisk fra en mindre del af det samlede areal, risikoområderne. For at opnå en omkostningseffektiv reduktion af fosfortabet er det helt afgørende at kunne målrette virkemidler mod disse risikoområder. Skanderborg Kommune har derfor indgået en aftale med DCE/Institut for Ecoscience, Aarhus Universitet (AU) om ekspertstøtte til at gennemføre en grundig gennemgang af de relevante deloplande til søen med henblik på at identificere potentialer og virkemidler til reduktion af fosfortilførslen.

Dette notat beskriver de data, som AU har stillet til rådighed for Skanderborg Kommune til arbejdet med at undersøge mulighederne for reduktion af den diffuse fosfortilførsel til Skanderborg Sø. Der er tale om data vedrørende transportveje for diffust fosfortab samt potentialer for og effekter af fosforvirkemidler.

2 Metode

2.1 Introduktion

Fosfortab fra det åbne land, det diffuse fosfortab, hidrører kun fra en mindre del af landskabet – de såkaldte risikoområder. For at have effekt skal virkemidler mod diffust fosfortab derfor målrettes mod disse risikoområder. Metoden i nærværende projekt består i at kombinere den detaljerede kortlægning af diffust fosfortab foretaget af Andersen & Heckrath (2020) med en række virkemidler, hvis effekter er beskrevet i Andersen et al. (2020).

Effektberegningen forudsætter, at potentialet for det enkelte virkemiddel er kendt. For visse virkemidler er potentialet ukendt, men er her estimeret: for skovrejsning anvendes kommuneplanernes udpegede skovrejsningsområder som potentiale. For vandløbsvirkemidlerne (genslyngning, hævning af vandløbsbunden, sandfang, okkeranlæg) anvendes de foreslåede indsatser i Vandområdeplanerne 2021-2027 som potentiale. Endelig er der virkemidler (f.eks. fosfor-vådområder), hvor effektberegningen kræver lokal information, og hvor beregningen derfor må afvente en lokal udpegning af placering. Som grundlag for formulering af lokalt funderede scenarier beregnes indledningsvist effekten af, at hele potentialet udnyttes – altså den teoretiske, øvre grænse for reduktion i det diffuse fosfortab. Kommunen kan i formulering af lokalt funderede scenarier foreslå andre/ændrede potentialer, som dernæst effektberegnes. Det er vigtigt at være opmærksom på, at ikke alle virkemidler er additive; for eksempel får man ikke nogen fosforreduktion ud af at placere en randzone nedenfor en mark med en potentiel erosionsrisiko, hvis denne risiko allerede er elimineret ved at virkemidlet skov er anvendt på marken.

Alle effekter i form af reduktion af det diffuse fosfortab er opgjort ved vandløbskant. På trods af at der vil forekomme en vis tilbageholdelse af fosfor i eventuelle nedstrøms beliggende søer (Trolle et al., 2015), er der ikke indregnet retention af fosfortransporten gennem oplandene mod Skanderborg Sø, da virkemidler fordeles spredt i oplandet, både op- og nedstrøms eventuelle søer.

2.2 Kalibrering af beregningen af diffust fosfortab på transportveje

Andersen & Heckrath (2020) har kortlagt og beregnet fosfortransporten fra de fem mest betydende diffuse kilder: erosion, udvaskning til dræn, tab gennem makroporer til dræn, tab fra dyrket organisk jord og tab via brinkerosion. Fosfortransporterne er beregnet med en række uafhængige modeller. På nationalt niveau tegner de fem diffuse kilder sig for 94 % af den samlede diffuse fosfor-transport. Fosfortab med vinderosion og overfladisk afstrømning samt tab via grundvand fra ikke-drænede marker udgør de resterende 6 %. I det følgende beskrives de fem transportveje kortfattet:

Erosion

Ved erosion foregår der en samlet transport af jord og associeret fosfor. Kilden er derfor indholdet af total-fosfor i det øverste jordlag. Desuden foregår der en berigelse med fosfor af det eroderede materiale i forhold til udgangsjorden på grund af en selektiv transport af finpartikulært materiale med høj affinitet

for fosfor. Endelig vil nyligt overfladeudlagt gødning, der ikke med infiltrerende nedbør er ført ned under det øverste jordlag, kunne transporteres med erosion.

Matrice-udvaskning

Normalt bindes fosfor i minerogene jorde hårdt til jordpartiklerne, således at der til enhver tid kun er en lille mængde fosfor i opløsning i jordvæsken. Imidlertid kan der ved stigende mætningsgrad af fosforbindingskomplekset, som helt overvejende består af dårligt krystalliseret jern og aluminium, opstå en kritisk høj koncentration af opløst fosfor i jordvæsken og en udvaskning af fosfor ned gennem jordprofilet.

Makropore-udvaskning

Makroporer er f.eks. regnormegange og gamle rodkanaler, som kan danne forbindelser mellem den fosforberigede overjord og dræn. I lerrige jorde er makroporer stabile og kan ved vandmætning af jorden transportere både opløst fosfor og fosfor bundet på jordpartikler direkte til dræn.

Tab af fosfor fra dyrkede, organiske jorde

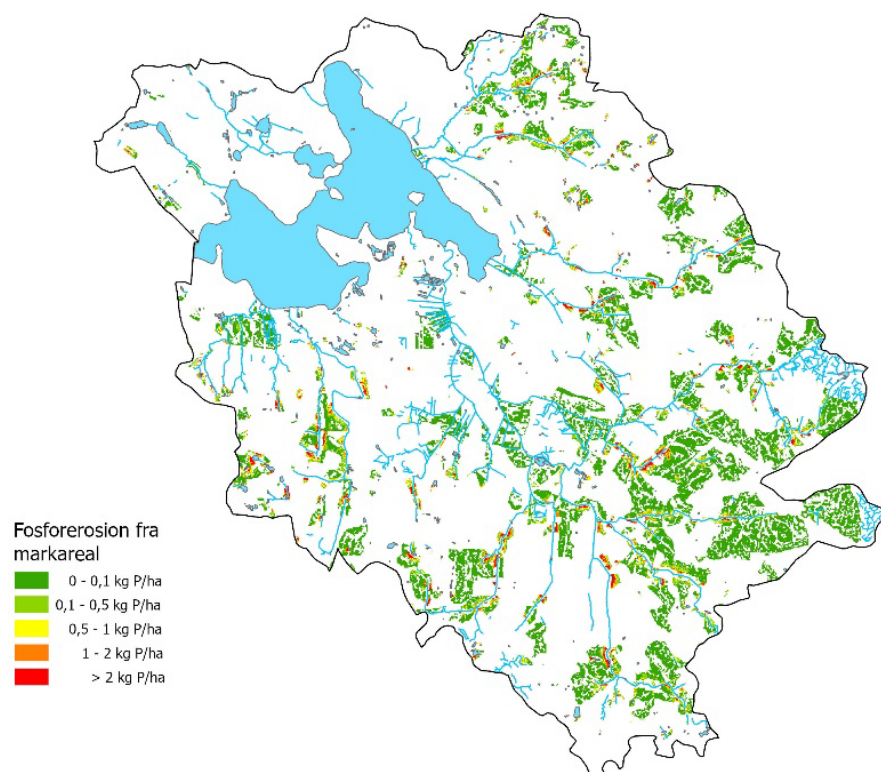
På grund af dårlig vandledningsevne og grundet deres beliggenhed i lavtliggende og våde dele af landskabet, kan organiske lavbundsorde ofte være vandmættede i perioder, selvom de er drænede. Under disse forhold opstår der iltfrie (anaerobe) zoner, hvor jern(III)oxider opløses i forskellig grad i forbindelse med anaerobe mikrobielle omsætningsprocesser. Derved reduceres ferri-jern, Fe(III), fra oxiderne til vandopløseligt ferro-jern, Fe(II), hvorved fosfor frigives til jordvæsken og kan udvaskes.

Brinkerosion

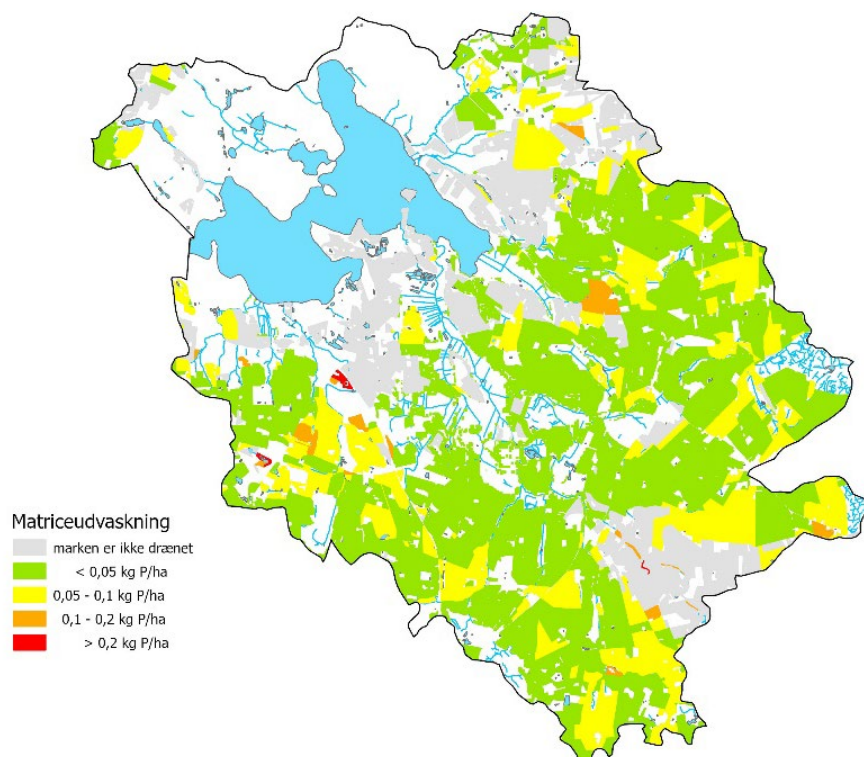
Brinkerosion forekommer ved flere fysiske processer: (i) brinksvækkelse – (ved påvirkning af grundvand, tryk på brinker, frost/tø – processer, der sker hele tiden, hvis betingelserne er til stede), (ii) fluvial erosion af brinker (strømmens energi slider materiale fra brinker ved erosion – proces, der sker hele tiden, når brinken er vanddækket), og (iii) brinkkollaps (brinker skrider sammen efter underminering – proces, der sker med lange mellemrum). Samtidig har undersøgelser vist, at fosforindholdet i vandløbsbrinkerne mange steder er højt, hvorfor brinkerosion samlet set er en vigtig tabsvej for fosfor.

I dette projekt er de modelberegnedede fosfortab via de fem diffuse transportveje summeret på ID15-oplandsniveau. Efterfølgende er den modelberegnedede fosfor-transport justeret, så summen for hvert ID15-opland er identisk med 94 % af den diffuse fosfortransport opgjort ifølge den nationale vandmiljøovervågning NOVANA (Thodsen et al., 2025). De resterende 6 % udgøres af fosfortab med vinderosion og overfladisk afstrømning samt tab via grundvand fra ikke-drænede arealer, som ikke kunne kortlægges i Andersen & Heckrath (2020). Der er anvendt et gennemsnit af fosfor-transportdata for perioden 2015-2024. Den relative fordeling mellem de fem diffuse transportveje er bibeholdt. Denne justering sikrer, at der er overensstemmelse mellem resultater fra dette projekt opgjort på ID15-niveau og landstal for fosfortab. Figur 2.1 – 2.5 viser kortlægningen af de fem diffuse transportveje for oplandet til Skanderborg Sø.

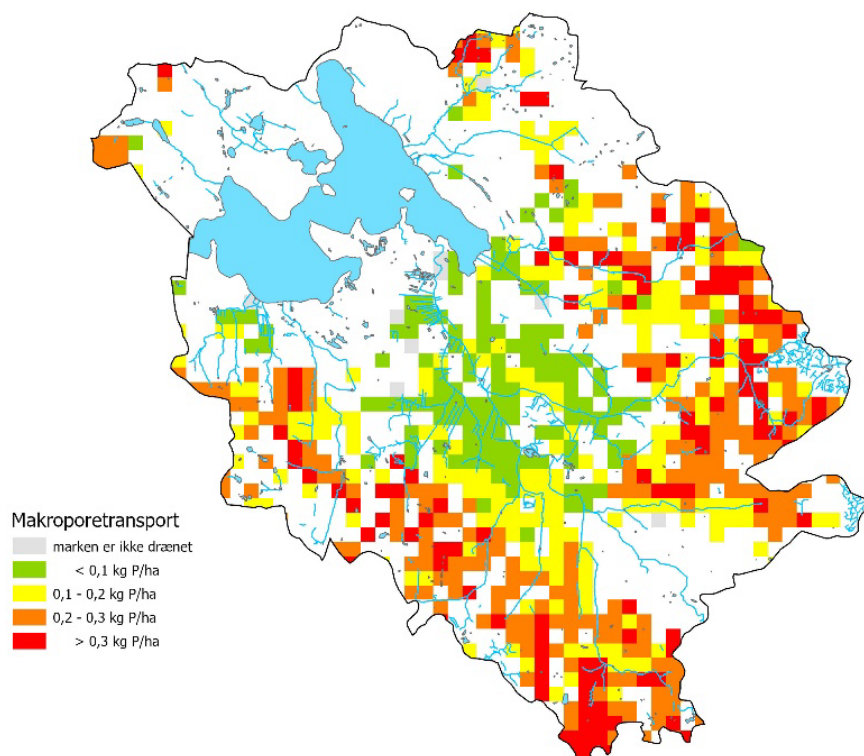
Figur 2.1. Erosionsbetinget fosfortab fra mark til vandløb.



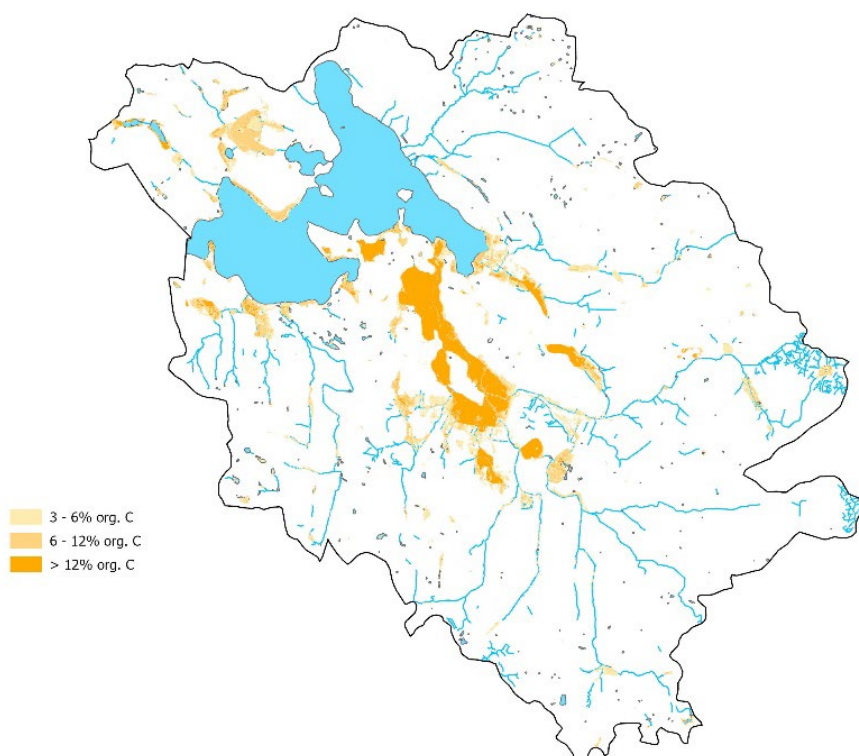
Figur 2.2. Udvaskning af fosfor til dræn.



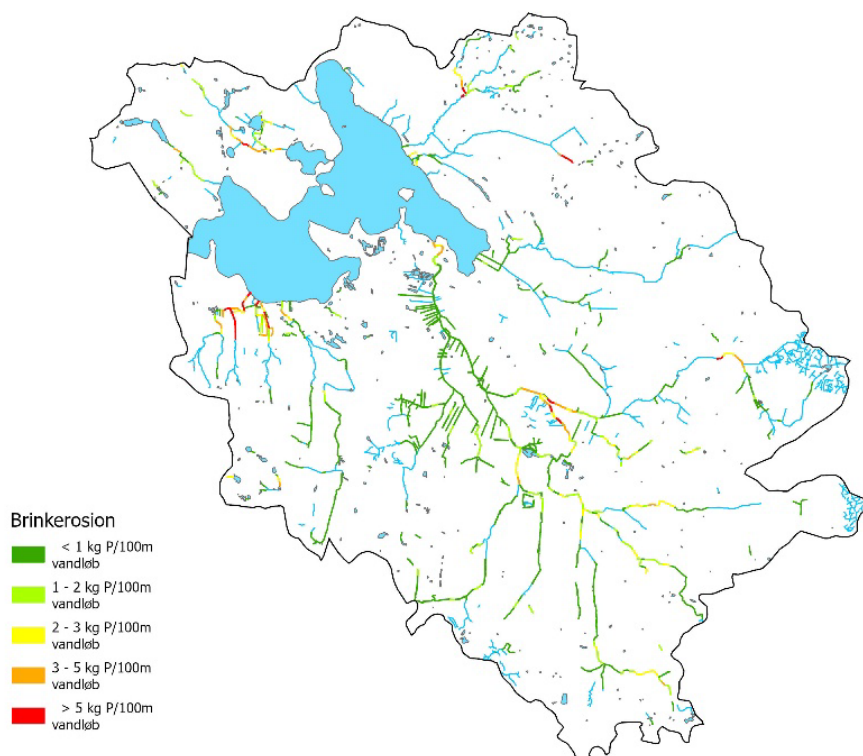
Figur 2.3. Tab af fosfor via makroporer til dræn.



Figur 2.4. Dyrket organisk jord.



Figur 2.5. Fosfortab ved erosion af vandløbsbrinker.



2.3 Kildeopsplitning

For hvert ID15-opland i det samlede opland til Skanderborg Sø foretages en kildeopsplitning af det samlede diffuse fosfortab på de mest betydende transportveje: erosion, udvaskning, tab via makroporer, tab fra dyrket organisk jord og brinkerosion. Dette giver en indikation af, hvilke virkemidler der i det enkelte opland vil være effektive.

2.4 Forbehold

Der er i mange tilfælde en betydelig usikkerhed på de anvendte tabs- og effektestimater. For usikkerheder på fosfortab henvises til Andersen og Heckrath (2020). For usikkerheder på effekter af fosforvirkemidler henvises til Andersen et al. (2020).

3 Effekter af virkemidler moddiffust fosfortab

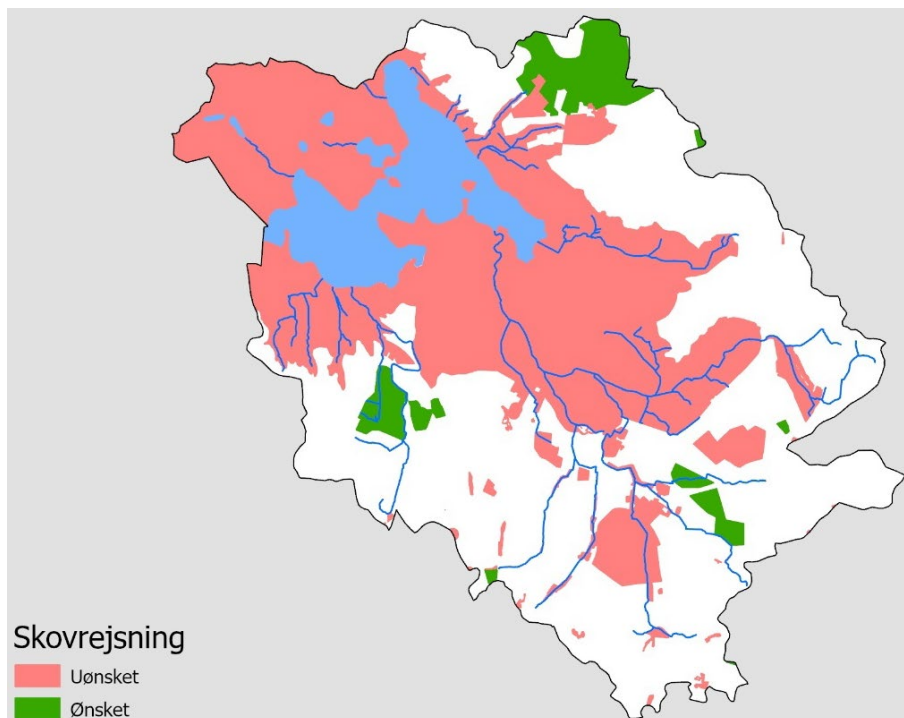
For alle virkemidler gives i det følgende en kort beskrivelse af mekanisme, effekt og potentiale for anvendelse.

3.1 Skovrejsning

Skovrejsning kan modvirke fosfortab ved erosion og kan også reducere risikoen for tab af fosfor via makroporer og eksisterende dræn, idet mobiliteten af opløst og partikelbundet fosfor i jorden reduceres, når jorden ikke længere dyrkes og gødes. Med andre ord kan virkemidlet have effekt i risikoområder for erosion og i risikoområder for makroporestrømning til dræn. Det er estimeret, at fosfortabet ved erosion reduceres 100 %, og at fosfortab via makroporer til dræn reduceres 25-50 % (Andersen et al., 2020).

Risikoarealer for fosfortab via erosion og via makroporer til dræn er kortlagt i Andersen & Heckrath (2020). Som potentielt skovrejsningsareal er anvendt kommunens indmelding om arealer, hvor skovrejsning er ønsket (figur 3.1). Temaet er downloadet fra [Miljøgis \(mim.dk\)](https://mim.dk). Cirka 325 ha af arealet udpeget til skovrejsning er imidlertid allerede tilplantet (K. Jensen, pers.komm.) og skal derfor ikke indgå i effektberegningen.

Figur 3.1. Arealer i oplandet til Skanderborg Sø, hvor skovrejsning er hhv. ønsket og uønsket.



3.2 Randzoner

Måltrettede, brede og tørre randzoner bredde designes, så de matcher den overfladiske afstrømning, der strømmer gennem randzonen fra den ovenfor liggende mark ned mod vandløbet eller søen. Det betyder, at randzonens bredde fra kronekanten af vandløbet kan varieres fra de f.eks. pligtige 2 - 3 meter bræmmer til en bredde bestemt af de lokale topografiske og jordbunds-mæssige forhold. De brede randzoner vil typisk kunne udlægges langs mindre og mellemstore vandløb, hvor ådalen er smal. Bredden vil typisk variere

mellem 10 og 30 m. Den væsentlige effekt af en udlagt, udyrket bred og tør randzone vil være en forventet større infiltrationskapacitet i en randzone end i et areal i omdrift. Den større infiltration i randzonen opstår i kraft af den permanente vegetation, der med rødderne øger infiltrationskapaciteten i jorden. Når overfladisk afstrømning med dets indhold af jordpartikler og hertil bundet fosfor møder randzonen, vil der både ske en opbremsning af vandet (pga. vegetationens ruhed) samt en infiltration af vand i randzonen. Begge mekanismer medfører en sedimentation og tilbageholdelse af jord og fosfor. Desuden vil opløst uorganisk fosfor kunne blive sorberet til jordens frie bindingsflader, når vandet infiltrerer i randzonen. Tilbageholdelsen af fosfor i randzoner sker altså ved tre processer: 1) sedimentation i randzonen af jord og dertil bundet fosfor; 2) sorption af opløst fosfat i randzonen i jordmatricen; 3) infiltration og optag af opløste fosforforbindelser i vegetationen i randzonen. Andersen et al. (2020, s. 185-197) beskriver randzonens effekt på fosfortransporten ind i randzonen som en funktion af randzonens bredde. En 20 m bred randzone kan således tilbageholde 75 % af den tilførte totalfosfor.

Risikoarealer for fosfortab via erosion er kortlagt i Andersen & Heckrath (2020). Kortet anviser rumligt, hvor sedimenttransporten med associeret fosfor til vandløb foregår. På grundlag af kortlægningen er alle 50 m vandløbsstrækninger, hvor sedimenttransporten fra mark til vandløb overstiger 1 ton sediment pr. år, identificeret. Med et antaget fosforindhold på 600 mg fosfor pr. kg sediment svarer en sedimenttransport på 1 ton til 0,6 kg fosfor. I beregningerne i nærværende projekt er det antaget, at der udlægges 20 m brede randzoner langs alle de identificerede 50 m vandløbsstrækninger.

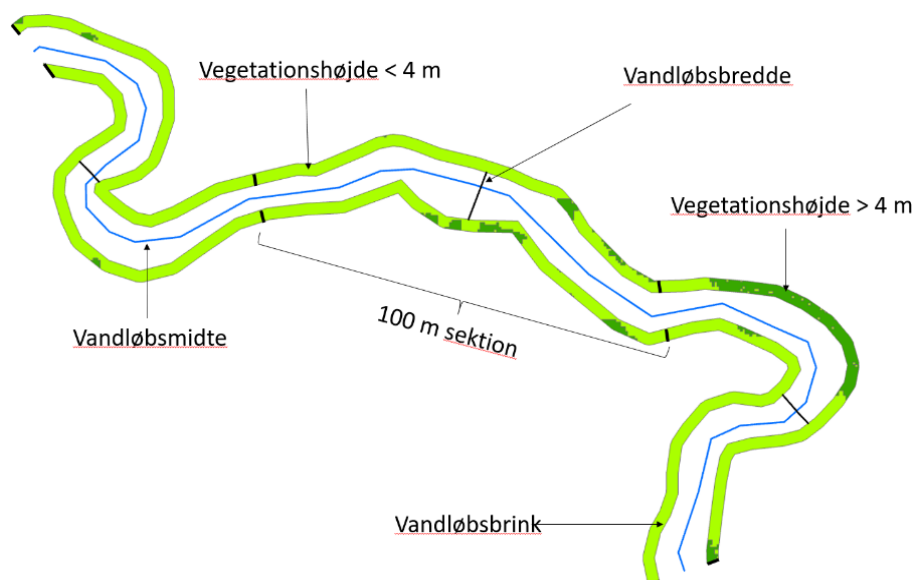
3.3 Træer på vandløbsbrinker

Træer langs vandløbets brinker har i mange undersøgelser vist sig at medvirke til at stabilisere vandløbsbrinken og dermed reducere brinkerrosionen og tilskuddet af sediment og partikulært bundet fosfor. Træernes rodnet trænger ned i brinken og er dermed med til at holde på jorden i brinken. Derved reduceres den løbende erosion af brinkerne ved vandets kræfter, og desuden fastholdes brinken, så perioden, der går mellem store brinkkollaps, forventes at blive betydeligt forlænget.

Kronvang & Larsen (2023) har udviklet en metode til beregning af effekten af træer på vandløbsbrinken. Beregning af effekten kræver information om vandløbets beliggenhed i landskabstype (moræne- eller hedeslettelandskab) og i georegion samt information om vandløbets størrelse (bredde mindre end 2 m, 2-10 m eller større end 10 m) og information om den nuværende vegetation på brinken. Effekten af træer er en reduktion af brinkerrosion på 27-53 % på strækninger, hvor der ikke i den nuværende situation er træer.

Brinkerrosion i alle danske vandløb er kortlagt i Andersen & Heckrath (2020) opgjort på 100 m-vandløbsstrækninger. Kortlægningen indeholder desuden information om vandløbets beliggenhed i hhv. landskabstype og georegion samt vandløbets bredde. Ydermere er vegetationen i en 2 m's zone på hver side af vandløbet kortlagt og inddelt i hhv. lav vegetation (græs, urter, mindre buske) og høj vegetation (træer) (figur 3.2). Potentialet for træplantning på vandløbsbrinker udgøres således af de vandløbsstrækninger, hvor der for nuværende er lav vegetation.

Figur 3.2. Opdeling af vandløb i 100 m-strækninger samt klassificering af vegetationshøjder i brinkzonerne. Mørkegrøn farve indikerer vegetation højere end 4 m og dermed tolket som træagtig vegetation, mens lysegrøn farve indikerer vegetation lavere end 4 m, tolket som buskads og græs- og urtevegetation.



3.4 Sandfang

Et sandfang anlægges ved at udvide vandløbets bredde og dybde på en kort strækning. Derved nedsættes vandets hastighed, og sandet transporteres ikke igennem sandfanget under almindelige afstrømningsforhold. Som tommelfingerregel udvides vandløbets bundbredde til 2-3 gange normal bredde, og bunden sænkes til ca. 1 m under normal bund. Sandfangets længde graves til ca. 10 gange vandløbets bredde, afhængigt af sandtransportens størrelse (Wandall et al., 2000). Et forbehold mod sandfang er dog, at vandløbets transportkapacitet nedstrøms sandfanget er øget, hvorved der er risiko for forøget erosion af vandløbets bund og sider specielt i alluviale vandløb (Bartholdy og Hasholt, 1992).

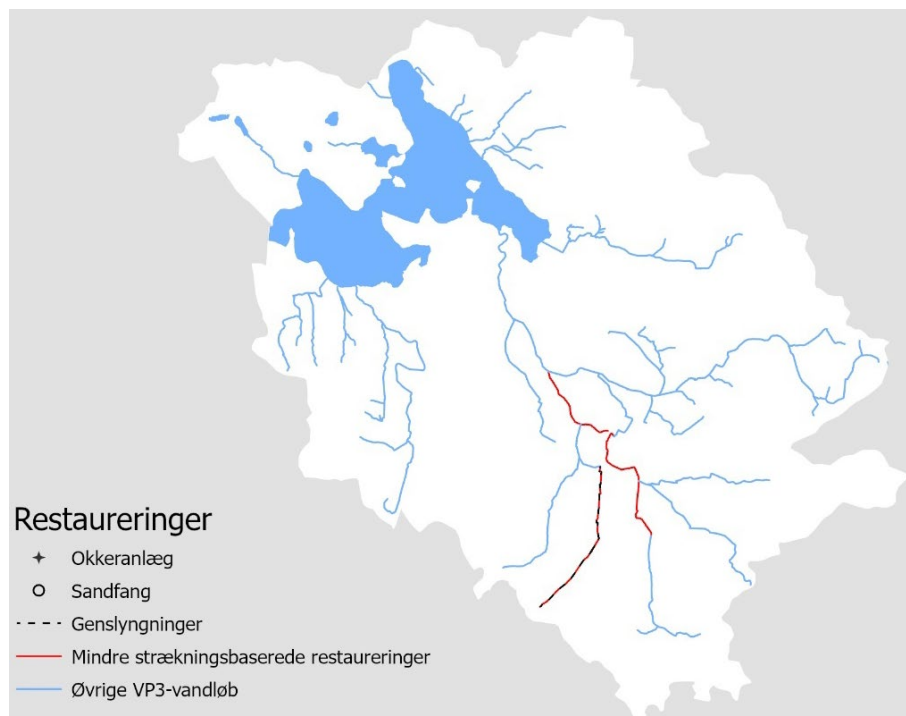
For at bevare sin funktionalitet skal sandfanget jævnligt tømmes for aflejret sediment. Sedimentet indeholder fosfor, hvorfor sandfang har en reducerende effekt på fosfortransporten i vandløbet. I en undersøgelse af sandfangs effekt på fosfortransport i vandløb (Andersen & Nilsson, 2023) er det vist, at den gennemsnitlige størrelse af et sandfang er 75 m², men med stor variation, og at sedimentfjernelsesraten (m³ m⁻² år⁻¹) varierer mellem georegioner: georegion 2 (Nordjylland) 1,1 m³ m⁻² år⁻¹, georegion 3 (Vestjylland) 0,5 m³ m⁻² år⁻¹, øvrige georegioner 0,3 m³ m⁻² år⁻¹. Der er ikke statistisk signifikant forskel mellem georegioner på sedimentets volumenvægt (gennemsnit 1,41 kg l⁻¹) eller sedimentets indhold af totalfosfor (gennemsnit 221 mg P kg⁻¹).

Fosforeffekten af et sandfang findes ved først at gange arealet af sandfanget med sedimentfjernelsesraten. Det beregnede sedimentvolumen omsættes til en vægt ved at gange med volumenvægten (gennemsnit 1,41 t m⁻³). Den mængde fosfor, der fjernes med sedimentet, findes ved at gange sedimentets fosforkoncentration (gennemsnit 221 mg P kg⁻¹ = 0,221 kg P t⁻¹) med vægten af sedimentet. Et sandfang med en størrelse på 75 m² beliggende i Nordjylland vil således kunne fjerne ca. 26 kg P år⁻¹ fra vandløbet, mens de tilsvarende tal for sandfang af samme størrelse i hhv. Vestjylland og i de øvrige georegioner er ca. 12 kg P år⁻¹ og ca. 7 kg P år⁻¹.

Sandfang kan principielt anlægges i alle vandløb og med vilkårlig afstand. Der er således ikke nogen teoretisk øvre grænse for mængden af sandfang. Der findes allerede mere end 1000 sandfang i danske vandløb (Andersen & Nilsson, 2023). Som potentiale for etablering af nye sandfang er anvendt de

foreslåede indsatser i vandområdeplanerne for tredje planperiode (figur 3.3) (data downloadet fra <https://miljoegis.mim.dk/spatialmap?profile=vandrammedirektiv3-2022>). Der er ikke foreslået etablering af sandfang i vandløbene i oplandet til Skanderborg Sø.

Figur 3.3. Placering af eventuelle, foreslåede sandfang i vandområdeplanerne for tredje planperiode. Desuden er vist placering af eventuelle, foreslåede okkeranlæg samt øvrige foreslåede vandløbsindsatser i form af hhv. genslyngninger og mindre strækningsbaserede restaureringer.



3.5 Mindre strækningsbaserede restaureringer af vandløb

Mindre, strækningsbaserede restaureringer kan ifølge Miljøstyrelsen (2020) omfatte udlægning af groft materiale, udskiftning af bundmateriale, hævnning af vandløbsbunden uden genslyngning og plantning af træer langs vandløb. Vi har ikke mulighed for at estimere en eventuel effekt på fosfortransporten i vandløb af hhv. udlægning af groft materiale og udskiftning af bundmateriale. Plantning af træer langs vandløb behandles i nærværende projekt som et selvstændigt virkemiddel mod fosfortab ved brinkerrosion. Hævnning af vandløbsbunden har også en reducerende effekt på brinkerrosion ved at mindske den flade, der kan eroderes. I projektet har vi antaget, at alle udpegede strækningsbaserede restaureringer foretages som en hævnning af vandløbsbunden. Herved overestimerer vi med stor sandsynlighed potentialet, da kommunerne i mange tilfælde undgår at hæve vandløbsbunden for at overholde vandløbsregulativet. Et forbehold mod hævnning af vandløbsbunden er, at det risikerer at øge den laterale erosion medmindre vandløbet allerede har sin naturlige bredde svarende til den hævede vandløbsbund (f.eks. Donelly, 1993).

Den relative effekt på fosfortab ved brinkerrosion af en hævnning af vandløbsbunden beregnes efter Andersen & Nilsson (2023) gennem en sammenligning af fosfortabet før og efter hævnning af bunden. Den relative effekt overføres på det forlods beregnede fosfortab ved brinkerrosion på strækningen (beregnet i Andersen & Heckrath, 2020). Der kræves information om landskabstype, vandløbsbredde og længden af vandløbsstykket, hvor bunden hæves. I nærværende projekt er der beregnet effekt af hævnning af vandløbsbunden for seks kombinationer af landskabstype og vandløbsbredde: hhv. vandløb i moræne og vandløb på hedeslette opdelt på små vandløb (0-2 m), mellemstore vandløb (2-10 m) og store vandløb (større end 10 m). Det forudsættes, at vandløbsbunden hæves 40 cm.

Mindre strækningbaserede restaureringer kan principielt anlægges i alle vandløb og med vilkårlig afstand. Som potentiale for etablering af nye strækningbaserede restaureringer er anvendt de foreslåede indsatser i vandområdeplanerne for tredje planperiode (figur 3.3) (data downloadet fra <https://miljoegis.mim.dk/spatialmap?profile=vandrammedirektiv3-2022>)

3.6 Genslyngning af vandløb

Genslyngning af udrettede vandløb til vandløb med naturligt, slynget forløb kan foretages med det formål, at vandløbets naturlige morfologiske processer kan udfoldes (Miljøministeriet, 2021). Genslyngning medfører et længere vandløb, hvorved et større brinkareal kan udsættes for erosion. Ydermere er brinkerosionsraten (antal mm eroderet brink per år) for vandløb på hedeslette markant større for slyngede vandløb end for udrettede vandløb (Kronvang & Larsen, 2023). Genslyngning af vandløb bør derfor suppleres med hævnning af vandløbsbunden, ændret brinkhældning og/eller plantering af træer på brinken for at reducere brinkerosion, således at tilførslen af fosfor til vandløbet formindskes fremfor at øges.

Den relative effekt på fosfortab ved brinkerosion af en genslyngning af vandløbet beregnes efter Andersen & Nilsson (2023) gennem en sammenligning af fosfortabet før og efter genslyngning. Den relative effekt overføres på det forlods beregnede fosfortab ved brinkerosion på strækningen (beregnet i Andersen & Heckrath, 2020). Der kræves information om landskabstype, vandløbsbredde og længden af vandløbsstykket, der genslynges. I nærværende projekt er der beregnet effekt af genslyngning af vandløb for seks kombinationer af landskabstype og vandløbsbredde: hhv. vandløb i moræne og vandløb på hedeslette opdelt på små vandløb (0-2 m), mellemstore vandløb (2-10 m) og store vandløb (større end 10 m). Det forudsættes, at slyngningsgraden er 1,4, at brinkanlæg før genslyngning er 1:1, mens det efter genslyngning er 1:1,25 og med anlæg i indersiden af meanderbuer på 1:3, samt at vandløbsbunden hæves 40 cm.

Genslyngning kan principielt foretages på alle udrettede vandløb. Som potentiale for genslyngning er anvendt de foreslåede indsatser i vandområdeplanerne for tredje planperiode (figur 3.3) (data downloadet fra <https://miljoegis.mim.dk/spatialmap?profile=vandrammedirektiv3-2022>)

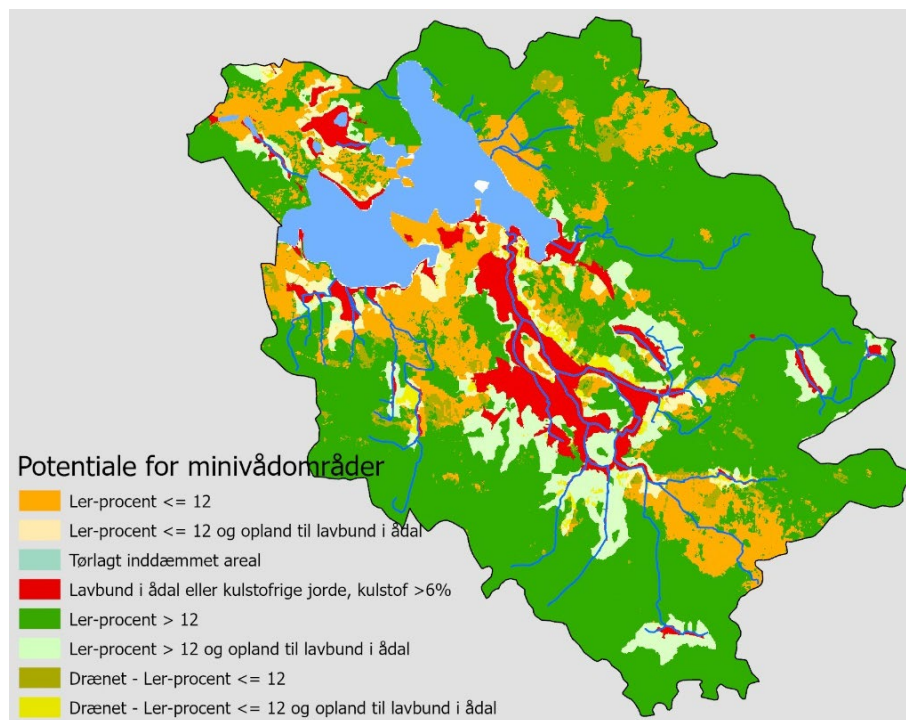
3.7 Mini-vådområder

Minivådområder med åben vandflade er et drænvirkemiddel, som anvendes som en *end-of-pipe*-løsning, der etableres på et areal beliggende umiddelbart før drænets udløb i vandløb. Fosfor på både opløst og partikelbundet form kan tilføres drænvandet via udvaskning og transport gennem makroporer. Et åbent minivådområde består af et sedimentationsbassin efterfulgt af et bassin med skiftende dybe og lavvandede vegetationszoner. Det nuværende design viser god effekt på retention af fosfor. Andersen et al., 2020 (s. 146-155) angiver en tilbageholdelse af den tilførte mængde totalfosfor på 25-65 %.

Risikoarealer for fosfortab via udvaskning til dræn og via makroporer til dræn er kortlagt i Andersen & Heckrath (2020). Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet, har for Styrelsen for Grøn Arealudtagning og Vandmiljø udarbejdet et potentialekort, der viser områder, hvor minivådområder kan etableres (Børgesen et al., 2024). Det er i nærværende projekt valgt at begrænse potentialet til klasserne 'lerprocent >12' og 'drænet, lerprocent ≤12', figur 3.4.

Områderne, som er opland til lavbund, er 'betinget egnede' til mini-vådområder, men kræver at kommunerne frigiver arealerne, der som udgangspunkt er reserveret til de store kommunale vådområdeprojekter. Potentialekortet for minivådområder er overlagt med hhv. kortet, der viser områder med fosfordrivskning til dræn, og kortet, der viser områder, hvor der forekommer fosfortab via makroporer til dræn. Det er i maksimalscenariet antaget, at hele fosfortabet med udvaskning og via makroporer inden for det potentielle minivådområdeareal kan behandles i minivådområder med ovenstående renseseffekt.

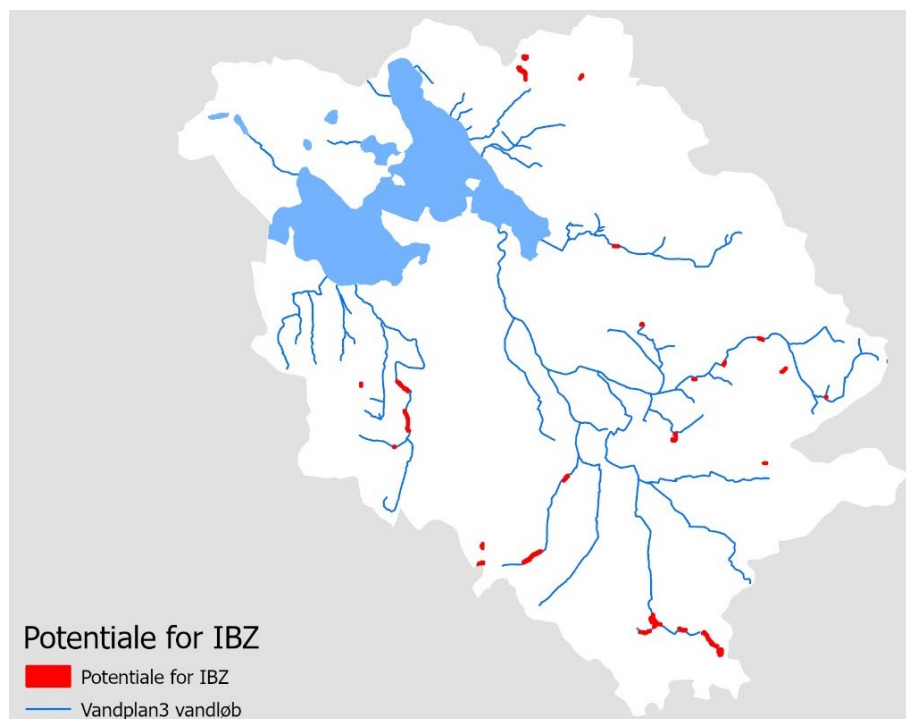
Figur 3.4. Potentialet for etablering af mini-vådområder udgøres af de to klasser hhv. "Ler-procent > 12" og "Drænet - lerprocent ≤ 12".



3.8 Integrerede bufferzoner (IBZ)

Integrerede bufferzoner (IBZ) er et drænvirkemiddel, som anvendes i randzonen langs med grøfter og vandløb samt rundt om søer til afskæring af drænvand og eventuelt overfladisk afstrømmende vand fra skrånende marker. En IBZ består af en dybere grøft og en lavvandet infiltrationszone. Den integrerede bufferzone virker ved, at drænvandet samt eventuelt overfladisk afstrømmende vand fra marken skal passere gennem IBZ'ens åbne vanddel, hvorved vandets opholdstid forlænges, og partikelbundet fosfor kan tilbageholdes ved sedimentation. Desuden kan opløst fosfat blive optaget i planter og træer i IBZ-anlægget, og der kan ske en adsorption af opløst fosfat til frie bindingsflader i anlæggets sediment. En del af drænvandet vil fra den åbne vanddel af IBZ'en kunne infiltrere gennem en anlagt infiltrationszone, hvor vandet nedsiver og strømmer gennem jorden i randzonen bag IBZ-anlægget mod vandløb. IBZ-anlæg kan anskues som et supplement til mini-vådområder, da de typisk kan etableres på mindre drænsystemer (<25 ha), og hvor der er en rimeligt stor terrænhældning på marken (>4 %) i den nedre del mod vandløb og sø. Andersen et al. (2020, s. 118-131) vurderer, at et IBZ-anlæg kan tilbageholde 30-70 % af den tilførte fosfor. Potentialet for anlæggelse af IBZ-anlæg er vurderet af Institut for Agroøkologi, figur 3.5 (Heckrath, G., pers. komm.).

Figur 3.5. Potentiale for anlæg-
gelse af integrerede bufferzoner
(IBZ).



3.9 Fosfor-vådområder (P-ådale)

Fosforvådområder eller P-ådale er områder langs vandløb, der etableres med det formål at tilbageholde suspenderet stof og partikulært fosfor via sedimentation, når områderne oversvømmes af vandløbsvand i forbindelse med store afstrømningshændelser. Virkemidlet er først og fremmest tænkt anvendt opstrøms søer, hvor der er behov for at reducere tilførslen af fosfor for at forbedre den økologiske tilstand i søen. Kriteriet for anlæggelse af P-ådale er først og fremmest, at der forekommer perioder med store vandføringer i det pågældende vandløbssystem, og dernæst at der er kendskab til mængden og koncentrationen af suspenderet stof i vandløbet.

Sedimentation på vandløbsnære arealer og ådale er styret af flere faktorer: topografien, sedimentkoncentrationen, oversvømmelsens varighed, antallet af oversvømmelser, udvekslingen af vand mellem å og oversvømmet areal, strømningsmønsteret på det oversvømmede areal og åens morfologi (geometri, hældning, sinuositet). Andersen et al., (2020, s. 198-209) angiver vejledende deponeringsrater af partikelbundet fosfor på 0,5-1,5 kg P pr. oversvømmet hektar pr. dag.

For nuværende findes der ikke et kortlagt potentiale for fosfor-vådområder. En beregning af effekten kræver således lokal information om minimumstørrelsen af det oversvømmede areal og længden af oversvømmelser.

4 Fosforeffekt af omlægningsplanen

Omlægningsplanen i forbindelse med Grøn Trepert indeholder for oplandet til Skanderborg Sø fire områder, benævnt hhv. Hylke Enge, Ringkloster Enge, Herschendsgave Mose og Hvolbæk, figur 4.1. Ved arealudtagning under Grøn Trepert er der en række mulige, alternative arealanvendelser: ekstensivering, skovrejsning, kvælstofvådområde eller lavbundsprojekt. Effekten på fosforudledning af de forskellige alternative arealanvendelser kan beregnes under nedenstående antagelser. For arealerne planlagt udtaget i oplandet til Skanderborg Sø er den specifikke, fremtidige anvendelse ikke angivet, hvorfor der for alle fire områder foreløbigt udelukkende er regnet på effekten af ekstensivering. Desuden er der lavet en beregning af effekten af at hæve vandløbsbunden i vandløbene i områderne, som det praktiseres i mange vådområde- og lavbundsprojekter. Hævning af vandløbsbunden vil nedsætte erosion af vandløbsbrinkerne.

Ekstensivering/braklægning

Ved ekstensivering af erosionstruede omdriftsarealer på højbund kan man forvente, at fosfortabet ved erosion reduceres 100 % (Andersen et al. 2009, Schou et al 2007). Denne effekt skønnes at være ret sikker. Hvor den nuværende arealanvendelse er permanent vegetation (vedvarende græs), vil fosfortab ved erosion allerede være negligibelt. Mht. fosfortab via vandafstrømning i makroporer og dræn (udvaskning) er det også ret sikkert, at der vil være en effekt af ekstensivering på omdriftsmarker, men størrelsen af denne er dårligt belyst. Det er tidligere blevet skønnet, at fosfortabet via udvaskning fra et risikoareal vil kunne reduceres med 25-50 % ved at rejse skov på en risikomark frem for at lade den fortsætte i omdrift (Andersen et al., 2009, Schou et al., 2007). Det skønnes, at effekten af permanent udtagning til ugødet brak for udvaskning vil være af tilsvarende størrelse, 25-50%. I beregningerne er anvendt et gennemsnit på 37,5%. Fosfortabet fra dyrket organisk jord (omdrift) er estimeret til gennemsnitligt 1,9 kg P/ha (Andersen og Heckrath, 2020). Ved ophør af dyrkning antages fosfortabet at reduceres til 1 kg P/ha, altså en effekt på 0,9 kg P/ha.

Skovrejsning

Fosforeffekten er den samme som ved braklægning: 100% reduktion af erosionstab og 37,5% reduktion af fosfortabet ved udvaskning fra omdriftsarealer, der omlægges til skov.

Kvælstofvådområder

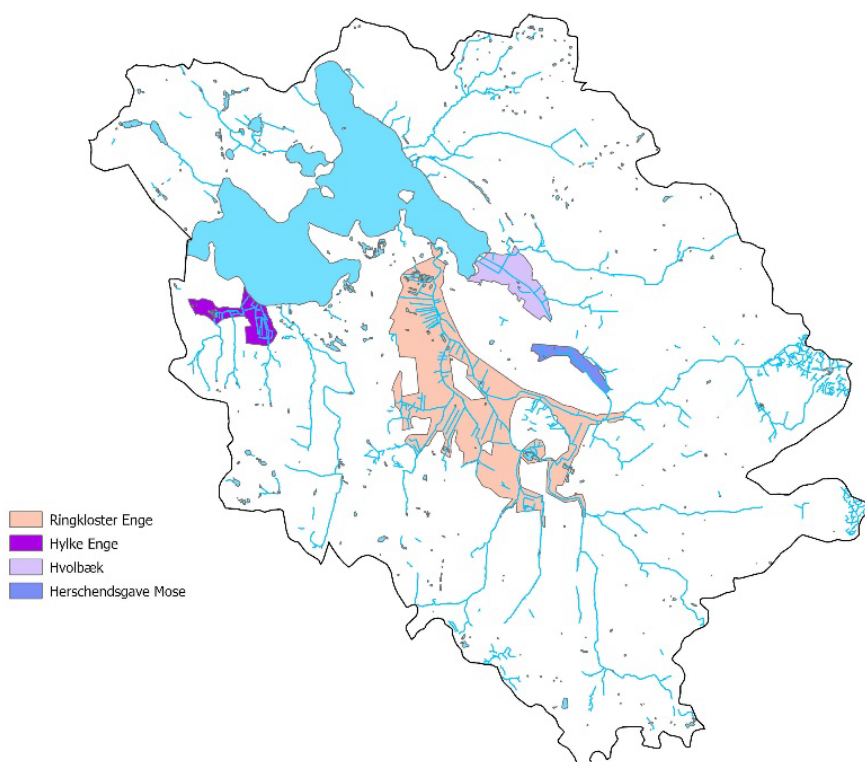
Fosforeffekten for den del af marken, der ligger udenfor ådalen, er som ved braklægning: 100% reduktion af erosionstab og 37,5% reduktion af fosfortabet ved udvaskning fra omdriftsarealer. Er en del af marken udenfor ådalen dyrket organisk jord (omdrift), sættes effekten som ovenfor til 0,9 kg P/ha. Målinger af fosfortab ved ådals-vådområder varierer fra et fosfortab til en fosfortilbageholdelse afhængigt af, hvordan vådområdet etableres (udelukkende ved overrisling med drænvand, ved gennemstrømning af grundvand, ved mulighed for midlertidige oversvømmelser med vandløbsvand, eller ved kombinationer af disse) (Andersen et al., 2020 s. 146-155)). Her er det konservativt antaget, at fosforeffekten er 0 for den del af marken, der ligger i ådalen.

Lavbundsprojekter

Ved lavbundsprojekter ekstensiveres landbrugsdriften, eller den ophører helt, og en del af området vådlægges. Der er endnu kun ufuldstændige og modstridende data på effekten af vådlægning af store lavbundsarealer, men det er velkendt, at vådlægning af tidligere dyrkede jorde kan resultere i betydelig fosfor-mobilisering afhængigt af størrelsen af fosforpuljen og især af fosforbindende elementer, primært jern og aluminium. Der findes en række afværgeforanstaltninger, der kan tages i brug for at bremse en eventuel fosfor-mobilisering som følge af vådlægning: høst af biomasse i en årrække før vådlægning, fjernelse af den mest fosforberigede topjord eller etablering af fosforfiltre ved udløb fra lavbundsområdet, f.eks. i form af jern-coatet sand. I nærværende beregning er der kun taget højde for ekstensiveringseffekten på omdriftsjord, som beregnes som ovenfor beskrevet, men altså ikke for en eventuel fosfor-mobilisering som følge af vådlægning. Effektberegningen er derfor særdeles usikker og kan være stærkt overvurderet.

Resultatet af beregning af effekter af omlægningsplanen fremgår af afsnit 5.3.

Figur 4.1. Omlægningsplanens forslag til udtagning af arealer i oplandet til Skanderborg Sø.



5 Resultater

5.1 Kildeopsplitning

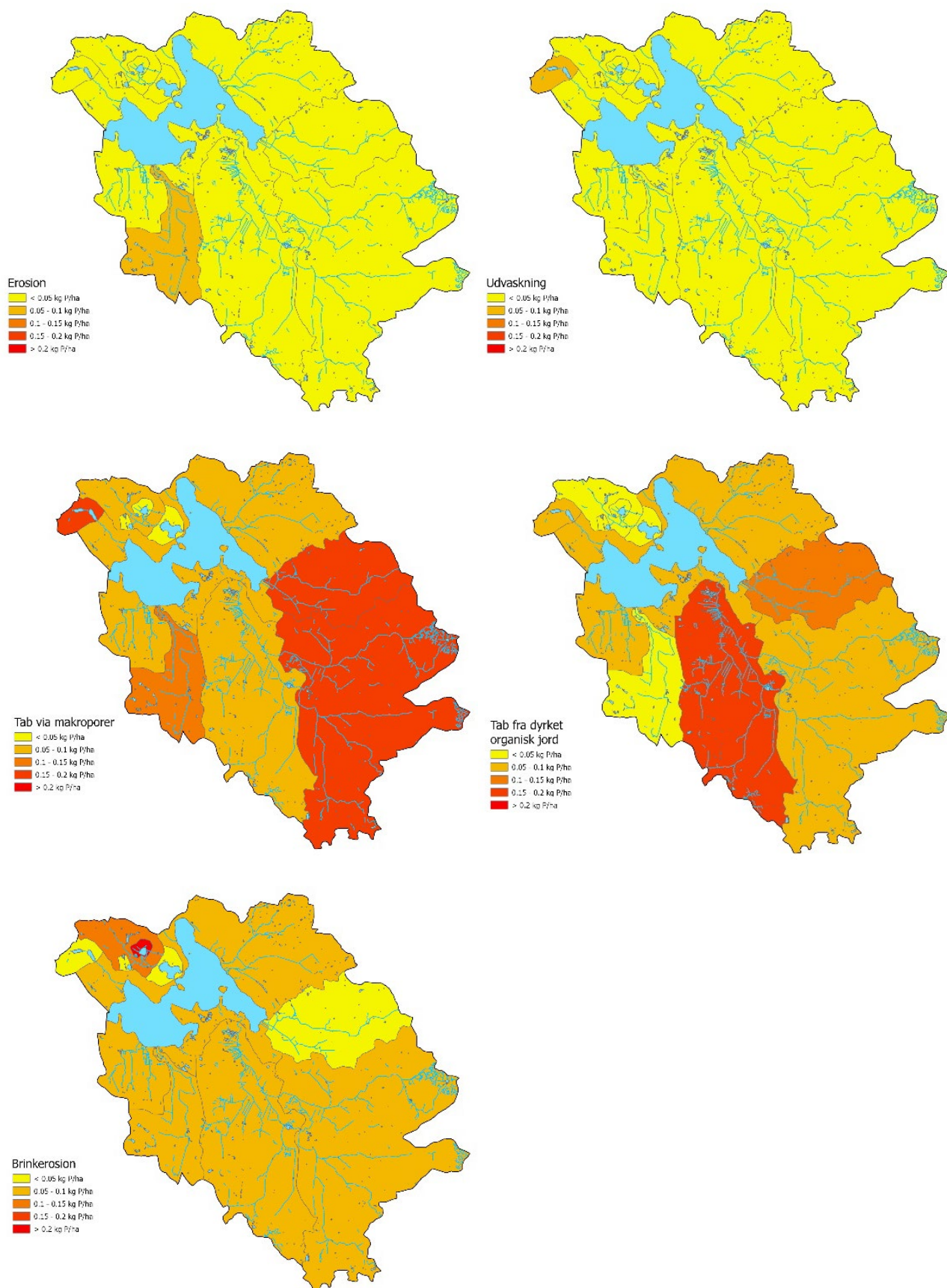
Den samlede, årlige fosfortilførsel til Skanderborg Sø er som gennemsnit over perioden 2015-2024 på 4.920 kg P, hvoraf det diffuse bidrag udgør 3.800 kg P (77 %). Punktkilder i oplandet består af renseanlæg, regnvandsbetingede udløb og bidrag fra spredt bebyggelse, som i gennemsnit over 10 års-perioden udgør hhv. 580 kg P, 440 kg P og 95 kg P. De tilsvarende tal for 2024 er: samlet tilførsel: 6.225 kg P, diffust bidrag: 5.205 kg P, renseanlæg: 400 kg P, regnvandsbetingede udløb: 470 kg P og spredt bebyggelse: 85 kg P. Især det diffuse bidrag varierer stærkt mellem år afhængigt af vejret, mens der tilsyneladende er foretaget en forbedret rensning på renseanlægget i 2024 sammenlignet med 10 års-perioden forud. I kildeopsplitningen vist nedenfor er det derfor valgt, at diffuse bidrag fremstår som 10 års-gennemsnit for at udligne årtil-år variationen, mens punktkildebidrag er opgjort for det seneste år (2024) for at kreditere forbedringer i spildevandsrensningen siden 2025.

Tabel 5.1 viser for Skanderborg Sø kildeopsplitningen på punktkilder og på diffust bidrag med en yderligere opsplitlelse på del-bidrag.

Tabel 5.1. Kildeopsplitning af fosfortilførslen til Skanderborg Sø. Punktkildebidrag for 2024. Diffuse bidrag er gennemsnit for perioden 2015 – 2024.

Total tilførsel		4.755 kg P/år
Punktkilder		955 kg P/år (20 % af total tilførsel)
Relativ betydning af de enkelte punktkilder		
	Regnvandsbetingede udløb	49 %
	Spredt bebyggelse	9 %
	Renseanlæg	42 %
Diffust bidrag		3.800 kg P/år (80 % af total tilførsel)
Andel af den samlede diffuse tilførsel		
	Tab via makroporer	30 %
	Udvaskning	7 %
	Erosion	11 %
	Tab fra dyrket, organisk jord	23 %
	Brinkerosion	22 %

I figur 5.1 er fosfortabene ad de fem transportveje vist på ID15-oplandsniveau. Tabene er arealvægtede (kg P/ha) og vist med samme legende for at lette sammenligning mellem transportveje og oplande.



Figur 5.1. Arealvægtet tab af fosfor (kg P/ha/år) via hhv. erosion, udvaskning, makroporer, dyrket organisk jord og brinkerosion opgjort på ID15-oplandsniveau.

5.2 Effekter af virkemidler mod diffust fosfortab

Reduktion i diffust fosfortab er beregnet for alle virkemidler og opgjort på ID15-niveau. Disse data er i tabel 5.2 aggregeret og vist for oplandet til Skanderborg Sø. For virkemidlerne randzoner, træer langs vandløb, IBZ og mini-vådområder er der regnet på det fulde potentiale. For virkemidlerne skovrejsning, hævning af vandløbsbunden, genslyngning og sandfang er der regnet på det omfang, de er omfattet af vandområdeplanerne eller for skovrejsnings vedkommende kommuneplanen. Her er der således mulighed for at opnå en større effekt ved at etablere mere skov, hæve vandløbsbunden på længere strækninger, gennemføre slyngninger af vandløb eller etablere flere sandfang. Beregning af effekter af fosfor-ådale er ikke foretaget, da dette kræver lokal information om placering og omfang. For en række virkemidler er omkostning angivet i kr. pr kg fjernet fosfor. Disse data stammer fra Andersen, Rubæk, Hasler og Jacobsen (2020) og skal justeres til aktuelt prisniveau. Omkostningsberegningerne har som forudsætning, at virkemidlerne indsættes i risikoområder for fosfortab.

Tabel 5.2. Overblik over virkemidler til reduktion af den diffuse fosforbelastning af Skanderborg Sø

	Anvendt potentiale	Fuldt potentiale	Effekt v. anvendt potentiale	Omkostn./omkostn.effekt.
Skovrejsning	75 ha	Kan øges v. ændring i kommuneplanen	10 kg P	9.570 kr/kg P ¹⁾
20 m randzoner	2,7 km	2,7 km	35 kg P	1.883 kr/ha/år / 1.218 kr/kg P ¹⁾
Træer langs vandløb < 2 m	44,8 km	44,8 km	45 kg P	2.154 kr/km / 1.164 kr/kg P ¹⁾
Træer langs vandløb 2-10 m	35,4 km	35,4 km	230 kg P	2.154 kr/km / 1.164 kr/kg P ¹⁾
Træer langs vandløb > 10 m	2,3 km	2,3 km	30 kg P	2.154 kr/km / 1.164 kr/kg P ¹⁾
IBZ	110 ha	110 ha	10 kg P	128.000 kr / 15.772 - 36.802 kr/kg P ¹⁾
Mini-vådområder	5.830 ha	5.830 ha	385 kg P	609.830 kr / 9.923 - 25.800 kr/kg P ¹⁾
Hævning af vandløbsbunden	6,2 km	Kan øges	15 kg P	67 - 112 kr/m ²⁾
Genslyngning	-	Bør undersøges	⁴⁾	90 - 343 kr/m ²⁾
Sandfang	-	Bør undersøges	⁵⁾	33.600 - 76.160 kr ³⁾
Fosfor-ådale	-	Bør undersøges	⁶⁾	743 kr/kg P ¹⁾

¹⁾ 2020-priser, som skal korrigeres til aktuelt niveau (kilde: Andersen, Rubæk, Hasler og Jacobsen, 2020)

²⁾ Anlægsomkostninger (kilde: Andersen, Heckrath og Hasler, 2025)

³⁾ Anlægsomkostninger. Hertil kommer en årlig omkostning på 6.856 kr. til vedligeholdelse (tømning) (kilde: Andersen, Heckrath og Hasler, 2025)

⁴⁾ Kan reducere brinkerrosion 39 - 47%

⁵⁾ Et sandfang på 100 m² vil fjerne ca. 10 kg P/år.

⁶⁾ Effekt 0,5 - 1,5 kg P pr. ha oversvømmet ådal pr. dag med oversvømmelse.

5.3 Fosforeffekt af omlægningsplanen

Effekten på fosforudledning til Skanderborg Sø som følge af udtag af de områder, der er foreslået i omlægningsplanen, og hvor det for alle områder foreløbig er antaget, at den fremtidige arealanvendelse er ekstensivering, er vist i tabel 5.3. Omkostninger ved gennemførelse af omlægningsplanen antages afholdt af staten.

Desuden er effekten af en antaget hævning af bunden af vandløbene i områderne estimeret. Det er antaget, at bunden hæves ved udlægning af groft materiale med 40 cm i små vandløb (bredde < 2 m) og 60 cm i større vandløb.

Da en del af de udtagne områder udover ekstensivering også vil blive vådlagte, skal data vist i tabel 5.3 tages med et forbehold. Der er endnu kun ufuldstændige og modstridende data på effekten af vådlægning på fosfortab af store lavbundsarealer, men det er velkendt, at vådlægning af tidligere dyrkede jorde kan resultere i betydelig fosfor-mobilisering afhængigt af størrelsen af fosforpuljen og især af fosforbindende elementer, primært jern og aluminium. Der findes en række afværgeforanstaltninger, der kan tages i brug for at bremse en eventuel fosformobilisering som følge af vådlægning: høst af biomasse i en årrække før vådlægning, fjernelse af den mest fosforberigede topjod eller etablering af fosforfiltre ved udløb fra lavbundsområdet, f.eks. i form af jern-coatet sand.

I nærværende beregning er der kun taget højde for ekstensiveringseffekten og effekten af en eventuel hævning af vandløbsbunden, men altså ikke for en eventuel fosfor-mobilisering (et øget fosfortab) som følge af vådlægning. Ligeledes er effekten i form af tilbageholdelse af sedimentbundet fosfor ved eventuelle oversvømmelser af de vandløbsnære arealer med vandløbsvand (dvs. hvis områderne udformes som egentlig fosfor-ådale) ikke beregnet. Effektberegningen er derfor særdeles usikker. Kommende, konkrete forundersøgelser i områderne vil kvalificere beregningerne.

Tabel 5.3. Effekter på fosforudledning til Skanderborg Sø ved implementering af omlægningsplanens forslag til arealudtag under antagelse af, at der for alle områder sker ekstensivering. Desuden er vist en effekt i form af reduceret brinkerrosion ved hævning af bunden i vandløbene i områderne.

	Længde vandløb	Effekt, kg P
Ekstensivering, Ringkloster Enge		45
Ekstensivering, Hvolbæk		< 5
Ekstensivering, Hylke Enge		< 1
Ekstensivering, Herschendsgave Mose		< 5
Hævning af vandløbsbunden, Ringkloster Enge	31,5 km	100
Hævning af vandløbsbunden, Hvolbæk	2,1 km	5
Hævning af vandløbsbunden, Hylke Enge	4,2 km	60
Hævning af vandløbsbunden, Herschendsgave Mose	1,0 km	< 5

5.4 anbefalinger

Med henblik på at nedsætte fosforbelastningen af Skanderborg Sø anbefales det at igangsætte følgende aktiviteter:

1. Iværksættelse af et måleprogram. Fosfortilførslen til søen måles nu kun et sted, i Ringkloster Å. For at sikre en målrettet indsats bør der også måles månedligt igennem et år i de mindre vandløb og nedstrøms særlige risikoområder (pumpedrænede organiske jorde i Ringkloster Enge). Prisoverslag: 220.000 kr.
2. Visuel kildeopsporing, dvs. vandring langs alle vandløb for at observere tegn på erosion på marker og af vandløbsbrinker. Kan gennemføres af kommunens teknikere og/eller studentermedhjælpere.
3. Udvidelse af kommuneplanens forslag til skovrejsning og målretning mod områder med risiko for fosfortab via makroporer til dræn. Ved overlap med områder med behov for grundvandsbeskyttelse er der mulighed for at benytte en statslig tilskudsordning (op til 75.500 – 94.500 kr./ha), ligesom vandværker kan finansiere ca. 50% af jordprisen. Et område på 225 ha i nærheden af Stilling er udpeget til grundvandsbeskyttelse.

4. Undersøgelse af mulige placeringer af sandfang, dvs. identifikation af vandløbsstrækninger med stor sandvandring. Gennemføres af kommunens teknikere. Etablering af sandfang koster 33.000 – 76.000 kr.
5. Undersøgelse af potentialet for at hæve vandløbsbunden ved udlægning af groft materiale, dvs. identifikation af over-dybe vandløb med forøget risiko for brinkerrosion. Gennemføres af kommunens teknikere. Pris for hævnning af vandløbsbunden: 67 – 112 kr. pr. m vandløb.
6. Undersøgelse af muligheder for at etablere fosfor-ådale i et eller flere af omlægningsplanens områder, hvor vandløb temporært kan oversvømme de vandløbsnære arealer og derved aflejre fosfor. Gennemføres af kommunens teknikere. Etableringsomkostning af fosfor-ådal: ca. 927.000 kr./km vandløb (dækkes af staten).
7. Afdækning af interesse blandt lodsejere for etablering af træer på vandløbsbrinkerne som sikring mod brinkerrosion. Gennemføres i samarbejde med Skanderborg-Odder Landboforening. Pris for etablering af træer langs vandløb: ca. 65.000 kr./km vandløb (en statslig støtteordning udrulles ultimo 2026).
8. Afdække interesse blandt lodsejere for etablering af brede randzoner nedenfor områder med erosionsrisiko. Gennemføres i samarbejde med Skanderborg-Odder Landboforening. Pris for en hektar randzone (varierende bredde): ca. 2.000 kr./ha/år (produktionstab for landbrugeren).
9. Afdække interesse blandt lodsejere for etablering af mini-vådområder. Gennemføres i samarbejde med Skanderborg-Odder Landboforening. Etableringsomkostning af mini-vådområde: ca. 610.000 kr. (pt. er der ikke støttemuligheder til etablering af anlæg i oplandet til Skanderborg Sø, men der forventes en statslig støtteordning målrettet fjernelse af fosfor, hvorved oplandet til Skanderborg Sø vil kunne komme i betragtning).
10. Dialog med Naturstyrelsen om det planlagte klima-lavbundsprojekt i Ringkloster Enge, så de nyeste forskningsresultater om afværgeforanstaltninger (biomassehøst før vådlægning, fjernelse af fosforrig topjord, sandfilter) inddrages samt eventuelle måledata over aktuelt fosfortab fra området.

6 Referencer

Andersen, H.E. & Heckrath, G. (redaktører). 2020. Fosforkortlægning af dyrkningsjord og vandområder i Danmark. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 340 s. - Videnskabelig rapport nr. 397.

Andersen, H.E. & Nilsson, I-E.F. 2023. Fosforeffekt af vandløbsvirkemidler. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 108 s. - Teknisk rapport nr. 272

Andersen, H.E., Rubæk, G.H., Hasler, B. & Jacobsen, B.H. (redaktører). 2020. Virkemidler til reduktion af fosforbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 284 s. - Videnskabelig rapport nr. 379.

Andersen, H.E., Hasler, B., Heckrath, G. 2025. Udviklingsspor for fosfor: fosforrisikokort og virkemidler Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 50 s. – Videnskabelig rapport nr. 674

Bartholdy, J. og Hasholt, B. 1992. Fluvialmorfologi. Kompendium, Geografisk Institut, København Universitet.

Børgesen, C.D., Bach, E.O., Iversen, B.V & Hoffmann, C.C. 2024. Opdatering af minivådområdeordningens potentialekort. Rådgivningsnotat fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet. <https://pure.au.dk/portal/da/publications/opdatering-af-miniv%C3%A5domr%C3%A5deordningens-potentialekort/>

DHI. 2014. Status for okkerrensning. Vurdering af behovene for og effekterne af alternative rensningsmetoder for okker. Teknisk notat, Naturstyrelsen.

Donnelly, T.W. 1993. Impoundment of rivers – sediment regime and its effect on benthos. *Aquat Conserv-Mar Freshw Ecosyst*, 3, 331-342.

Kjærgaard, C. & D. Forsmann 2014. Fosforfældningsbassiner. Faglig udregning vedrørende fosforretention i okkerfældningsbassiner som supplerende virkemiddel til P-reduktion. Teknisk rapport fra Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi.

Kronvang, B. & Larsen, S.E. 2023. Virkemiddel for brinkerose og fosfortab ved restaurering af vådområder og vandløb. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 22 s. - Teknisk rapport nr. 263 <https://dce2.au.dk/pub/TR263.pdf>

Miljøstyrelsen. 2020. Vandløbsrestaurering – national ordning. Vejledning og tilskud til kommunale projekter vedrørende vandløbsrestaurering. Miljø- og Fødevareministeriet.

Thodsen, H., Rasmussen, J.J., Kronvang, B., Andersen, H.E., Nielsen, A., Larsen, S.E. 2019. Suspended matter and associated contaminants in Danish streams: a national analysis. *J. Soil and Sediments*, 19, 3068-3082.

Thodsen, H., Tornbjerg, H., Larsen, S.E., Conradsen, A.R., Muff, E. Blicher-Mathiesen, G., Ovesen, N.B., Troldborg, L. 2025. Vand- og Næringsstoftransport 2024. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 104 s. - Videnskabelig rapport nr. 681

Trolle, D., Søndergaard, M. & Bjerring, R. 2015. Sammenhænge mellem næringsstofftilførsel og søkoncentrationer i danske søer. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 34 s. - Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 138
<https://dce2.au.dk/pub/SR138.pdf>

Wandall, K., Levesen, B., Landsfeldt, P & Frandsen, S.B. 2000. Bedre vandløb – en praktisk håndbog. Haderslev Amt.

MULIGHEDER FOR REDUKTION AF DEN DIFFUSE FOSFORTILFØRSEL TIL SKANDERBORG SØ

Rapporten opgør den diffuse fosforbelastning af Skanderborg Sø fordelt på tabsveje, vurderer potentialet i en række virkemidler til reduktion af belastningen og estimerer de forventede effekter. Resultaterne er input til Skanderborg Kommunes arbejde med at forbedre vandkvaliteten i søen.