

# Läckagebenägen fosfor i Uttrans sediment

*Åtgärdsunderlag för minskad internbelastning*



**Läckagebenägen fosfor i Uttrans sediment  
Åtgärdsunderlag för minskad internbelastning**

Författare: Anna Gustafsson & Emil Rydin  
Medarbetare: Thomas Jansson & Ulf Lindqvist

2021-10-29

Rapport 2021:22

Naturvatten i Roslagen AB

Norra Malmavägen 33

761 73 Norrtälje

0176 – 22 90 65

<b>SAMMANFATTNING .....</b>	<b>4</b>
<b>INLEDNING .....</b>	<b>5</b>
<b>METODIK .....</b>	<b>5</b>
PROVTAGNING .....	5
ANALYS OCH BERÄKNINGAR.....	7
<b>RESULTAT AV SEDIMENTUNDERSÖKNING .....</b>	<b>8</b>
TEMPERATUR- OCH SYRGASFÖRHÅLLANDEN .....	8
ÖVERGRIPANDE SEDIMENTKARAKTÄR .....	8
VATTENHALT OCH ORGANISK ANDEL.....	8
OORGANISKA FOSFORFORMER .....	10
ORGANISKA FOSFORFORMER .....	12
TOTALFOSFORHALT.....	13
<b>MÄNGD LÄCKAGEBENÄGEN FOSFOR .....</b>	<b>14</b>
<b>ÅTGÄRDER FÖR MINSKAD INTERNBELASTNING .....</b>	<b>17</b>
FOSFORBINDANDE ÄMNER.....	18
SYRESÄTTNING AV BOTTENVATTEN .....	18
MUDDRING ELLER BORTLEDNING AV BOTTENVATTEN.....	18
NOLLALTERNATIVET .....	19
REKOMMENDERAD METOD .....	19
<b>ALUMINIUMBEHANDLING AV UTTRAN.....</b>	<b>20</b>
ALUMINIUMDOS .....	20
APPLICERINGSMETOD .....	21
BUDGETERAD KOSTNAD.....	22
OSÄKERHETER OCH FÖRUTSÄTTNINGAR .....	22
<b>REFERENSER .....</b>	<b>24</b>
<b>BILAGA 1. SEDIMENTANALYSER.....</b>	<b>26</b>
<b>BILAGA 2. BOTTENAREOR .....</b>	<b>29</b>

# Sammanfattning

Tidigare utredningar visar att fosforbelastningen till sjön Uttran ligger på en nivå som inte är acceptabel med hänsyn till miljökvalitetsnormen god ekologisk status 2027. Den fosforbudget som upprättades år 2020 indikerar att fosforläckage från Uttrans botten står för den största fosforpåverkan till sjöns vattenmassa. Denna så kallade interna fosforbelastning beräknas uppgå till i storleksordningen 800 kg/år, att jämföra med en beräknad extern fosfortillförsel kring 450 kg/år.

Föreliggande rapport redovisar resultat av en sedimentundersökning som syftar till att identifiera, kvantifiera och kartera den läckagebenägna fosfor i Uttrans botten, det vill säga den fosfor som med tiden kan komma att läcka till vattenmassan och därmed bidra till övergödning i Uttran och nedströms liggande vatten. Här redovisas även tänkbara metoder för att reducera den interna fosforbelastningen, samt tillvägagångssätt och budget för den metod som rekommenderas. Utredningen utfördes av Naturvatten AB i samarbete med WRS AB på uppdrag av på uppdrag av Salem kommun.

Undersökningen visar att Uttrans sediment håller relativt stora mängder läckagebenägen fosfor, i genomsnitt drygt 7 g/m<sup>2</sup>, och att denna fosfor huvudsakligen är organiskt bunden. Denna fosformängd kommer att frigöras till vattenmassan efterhand som det fosforrika organiska materialet bryts ner under kommande årtionden.

Som åtgärd för att reducera den interna fosforbelastningen rekommenderas en aluminiumbehandling av sjöns botten. Metoden är välbeprövad och innebär att en tillsats av aluminium ger sedimenten extra bindningskapacitet och förmåga att permanent fastlägga den fosfor som annars skulle läcka till vattenmassan och bidra till sjöns övergödningssituation. Den aluminiumdos som krävs för behandling är relativt hög, 60-110 g/m<sup>2</sup>, och har beräknats med hänsyn till att den läckagebenägna fosfor är ojämnt fördelad över sjöns botten. De högre doserna innebär att det är av stor vikt att hänsyn tas till sjöns buffertförmåga vid behandling. Kostnaden för åtgärden beräknas av Vattenresurs AB till 8,7-9,3 Mkr.

Åtgärder för reducerad interbelastning är normalt sett motiverade först då fosfortillförseln från tillrinningsområdet ligger på en nivå som bedöms långsiktigt hållbar. Om den externa fosforbelastningen tillåts ligga kvar på en förhöjd nivå kommer nya förråd av läckagebenägen fosfor byggas upp i Uttrans botten vilket medför att internbelastningen på sikt kommer att öka igen, med risk för att behandlingen behöver upprepas.

# Inledning

Sjön Uttran som delas av Salem, Botkyrka och Södertälje kommuner utgör en vattenförekomst med beslutad miljö kvalitetsnorm god ekologisk status 2027. Tidigare utredningar visar att fosforbelastningen till sjön ligger på en nivå som inte är acceptabel med hänsyn till miljö kvalitetsnormen (Gustafsson & Lindqvist 2020). Den fosforbudget som då upprättades indikerar att fosforläckage från Uttrans bottnar står för den största fosforpåverkan till sjöns vattenmassa. Denna så kallade interna fosforbelastning beräknas uppgå till i storleksordningen 800 kg/år, att jämföra med en beräknad extern fosfortillförsel kring 450 kg/år.

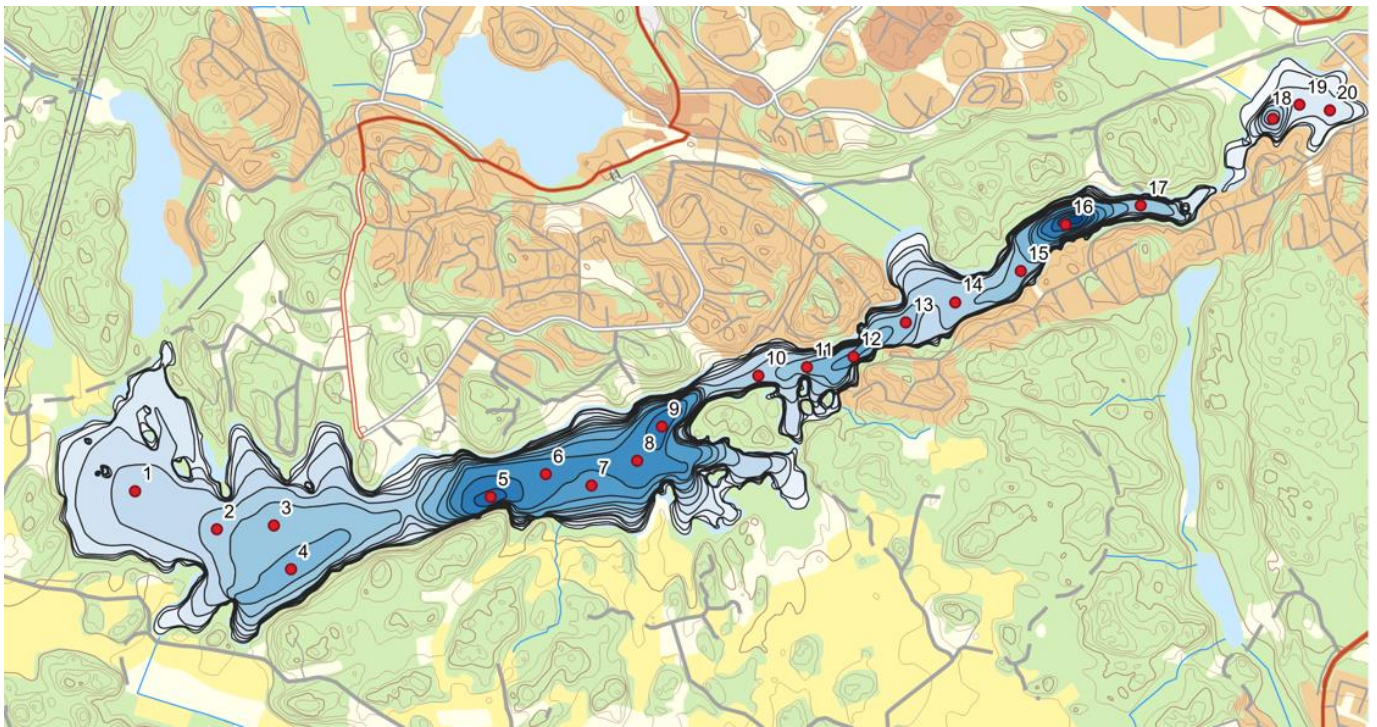
Föreliggande rapport redovisar resultat av en sedimentundersökning som syftar till att identifiera, kvantifiera och kartera den läckagebenägna fosfor i Uttrans bottnar, det vill säga den fosfor som med tiden kan komma att läcka till vattenmassan och därmed bidra till övergödning i Uttran och nedströms liggande vatten. Utredningen redovisar även tänkbara metoder för att reducera den interna fosforbelastningen, samt budget och rekommendationer kring utförande för den metod som förordas. Utredningen utfördes av Naturvatten AB i samarbete med WRS AB på uppdrag av Salem kommun.

## Metodik

### Provtagning

Sedimentprovtagningen omfattade 20 kärnor och planerades för att dels ge en representativ bild av läget i sjöns olika delar, dels nå ner tillräckligt långt i sedimenten för att få med lager som speglar den fosforhalt som kan anses permanent begravd. Provtagningsstationernas lägen framgår nedan (Figur 1, Tabell 1, nästa sida).





Figur 1. Provtagningsstationer vid sedimentundersökning av Uttran, maj 2021. Bakgrundskartan visar sjöns djupförhållanden där varje linje motsvarar en djupmeter.

Tabell 1. Provtagningsstationer med fördelning på områden samt med angivelse av djup (m) och position (SWEREF99 TM) vid sedimentprovtagning i Uttran, maj 2021.

Område	Station	Djup m	Position	
			N	O
Västra bassängen	1	5,9	6563339	654559
Västra bassängen	2	6,8	6563175	654960
Västra bassängen	3	7,8	6563239	655247
Västra bassängen	4	9	6562980	655339
Västra djupbassängen	5	13,8	6563277	656190
Västra djupbassängen	6	11,8	6563407	656427
Västra djupbassängen	7	10,9	6563333	656685
Västra djupbassängen	8	11,6	6563508	656871
Västra djupbassängen	9	13	6563640	657007
Östra djupbassängen	10	7,4	6563840	657365
Östra djupbassängen	11	8,6	6563888	657616
Östra djupbassängen	12	10	6563935	657824
Östra djupbassängen	13	8	6564097	658036
Östra djupbassängen	14	7,4	6564204	658323
Östra djupbassängen	15	8,1	6564277	658558
Östra bassängen	16	15,7	6564534	658833
Östra bassängen	17	8,5	6564591	659186
Utterkalven	18	8,1	6564987	659679
Utterkalven	19	4,3	6565068	659804
Utterkalven	20	4,2	6565013	660004

Sedimentskikten 0–2, 2–4, 6–8, 12–14, 18–20, 26–28 och 36–38 cm bedömdes dels ge tillräckligt hög upplösning i de yngre lagren för att kunna följa den förväntade haltminskningen och ett par skikt i djupare sedimentlager med en lägre och en i det närmaste konstant fosforkoncentration. Vid provtagningen användes en så kallad Willnerhämtare som tar kärnor med en diameter av 63 mm och når cirka 45 cm ner i bottenarna.

Sedimentprovtagningen utfördes av Thomas Jansson den 5 och 6 maj 2021. Sedimentkärnorna skiktades omedelbart i 2 cm-skikt ner transporterades till Erkenlaboratoriet där de förvarades kallt (4 grader) och mörkt fram till analystillfället. I samband med provtagningen noterades sedimentens karaktär, liksom de temperatur- och syrgasförhållanden som rådde vid bottenarna.

## Analys och beräkningar

Samtliga sedimentskikt analyserades med avseende på vattenhalt, glödningsförlust, totalfosforhalt och fosforfraktioner. De sedimentkemiska analyserna utfördes av Erkenlaboratoriet, ackrediterat av SWEDAC (nr 1239).

Sedimentens olika fosforformer kan separeras och analyseras genom så kallad fosforfraktionering (Psenner m.fl. 1988). Sex olika fosforformer kvantifieras genom stegvis extrahering:

1. löst bunden fosfor ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ -rP)
2. järnbunden fosfor (BD-rP)
3. aluminiumbunden fosfor (NaOH-rP)
4. organiskt bunden fosfor (NaOH-nrP)
5. kalciumbunden fosfor (HCl-rP)
6. residualfosfor (huvudsakligen organiska fosforformer)

Den läckagebenägna fosfor kvantifierades genom att en bakgrundshalt antogs, det vill säga den fosforkoncentration som yngre sedimentlager förväntas nå ner till efter att den läckagebenägna fosfor har frisatts och diffunderat ut i vattenmassan. Bakgrundshalten subtraherades från de ytligare sedimentlagrens högre halter för varje enskild kärna. Skillnaden anses utgöra summan av den fosfor som kommer att frigöras med tiden (Rydin 2000) och benämns här läckagebenägen eller mobil fosfor. Den läckagebenägna fosfor består vanligtvis av organiska former tillsammans med järnbunden fosfor. Läckagebenägen fosfor i varje sedimentskikt räknades om till mängd och summerades till en totalmängd per ytenhet ( $\text{m}^2$ ). Mängden läckagebenägen sedimentfosfor beräknades genom att bestämma ytorna för olika djupintervall i sjöns bassänger. För fördjupad

information om fosforfraktionering och läckagebenägen fosfor i sediment hänvisas till publikation av Rydin (2000).

## Resultat av sedimentundersökning

### Temperatur- och syrgasförhållanden

Temperaturen vid bottenarna låg vid provtagningstillfället stabilt kring 7°C. Lägst temperatur, 6,2-6,5°C, uppmättes vid den djupaste stationen (nr 16) i Uttrans östra del, samt i den lilla djuphålan i Utterkalven (nr 18). De högsta temperaturerna, 8-8,3°C, rådde vid Utterkalvens grundare stationer (nr 19 och 20). Bottenvattnet var överlag väl syresatt med syrgashalter i intervallet 7,5-11,3 mg/l. Det gäller med undantag för Utterkalvens djuphåla där syrgashalter nära noll noterades. Utöver det var syrgasförhållandena något nedsatta (5,3 mg/l) vid den djupaste stationen (nr 16). Doft av svavelväte noterades inte för någon station.

### Övergripande sedimentkaraktär

Merparten av ytsedimenten utgjordes av väloxiderad, brun eller brungrå gytta. Även vid den djupaste stationen (nr 16) där syrgashalterna var något nedsatta, var ytsedimentet gråsvart men bedömdes oxiderat. I Utterkalvens lilla djuphåla där syrgashalterna låg nära noll, var ytsedimentet svart och reducerat. Att ytsedimentet var brunsvart vid de grundare stationerna i Utterkalven (nr 19 och 20) kan tyda på tidvis ansträngda syrgasförhållanden.

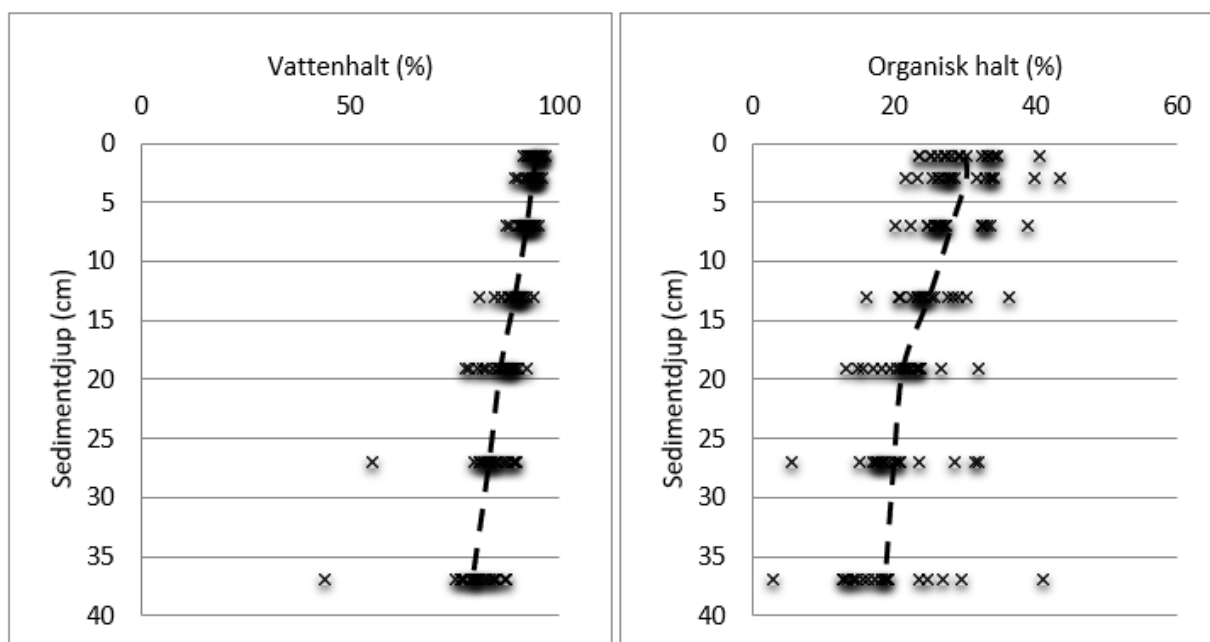
### Vattenhalt och organisk andel

Vattenhalt och glödgningsförlust är två grundläggande sedimentparametrar som ofta används för att särskilja ackumulationsbottnar från erosions- och transportbottnar. En tumregel är att vattenhalten i ytsediment bör vara högre än 75 procent för att sedimentet skall anses representera en ackumulationsbotten (Håkanson and Jansson, 1983). På motsvarande sätt bör halten organiskt material (glödgningsförlusten) överstiga 10 procent för att det med säkerhet skall röra sig om ackumulationsbottensediment.



Vattenhalten i Uttrans sediment var hög, mellan 90 och 95 procent i kärnornas ytskikt (Figur 2, Bilaga 1). Vattenhalten klingar sakta av mot 80 procent i det djupaste sedimentskiktet (36-38 cm). Den kontinuerliga avklingningen av vattenhalten med ökande sedimentdjup indikerar att så kallade ackumulationsförhållanden råder i alla stationer. Två stationer avviker dock från mönstret. Vid station 14 i Uttrans östra del avviker vattenhalten i det djupaste skiktet med ett lågt värde (44%). I stationen bredvid (nr 15) avviker skiktet 26-28 cm med en låg vattenhalt (55%) medan de djupare skikten faller in i det generella mönstret. De avvikande låga vattenhalterna indikerar ett annat material än sediment som kontinuerligt avsatts under de senaste seklerna. För station 14 kan resultaten förklaras av att äldre lera återfinns under det relativt unga sedimentlagret. För station 15 är den rimliga förklaringen att äldre leror har eroderat från grundare områden och omlagrats till djupare bottenar (möjligen en effekt av sjösänkning).

Halten av organiskt material var hög, i medeltal cirka 30 av torrsubstanshalten, i de översta sedimentskikten. Först vid 20 cm sedimentdjup har en tydlig avklingning skett till i medeltal 20 procent; en halt som står sig ner till de djupaste lager som analyserats. Två värden är betydligt lägre än de övriga, nämligen de skikt vid station 14 och 15 som uppvisade låga vattenhalter. Dessa skikt håller också en mycket liten andel organiskt material (3-6%).



Figur 2a och b. Vattenhalt (%), vänster) och glödningsförlust (organisk andel %, höger) i Uttrans sediment, maj 2021. Medelhalter (%) visas som streckad linje.

## Oorganiska fosforformer

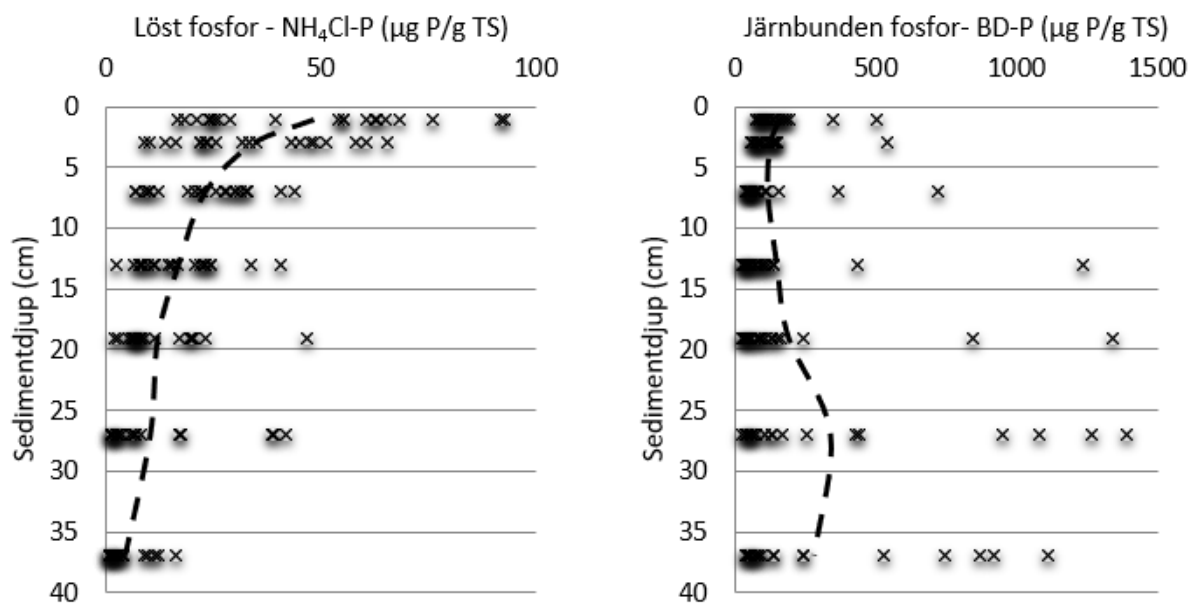
Till de oorganiska fosforformerna räknas den fosfor som är löst bunden, samt den som är bunden till järn, aluminium eller kalcium. De båda förstnämnda ingår i den mobila fosforpoolen, det vill säga utgör delar av den fosfor som kan frisättas från sediment till vattenmassa. Både den aluminiumbundna och den kalciumbundna fosfor betraktas som tillräckligt hårt fastlagd för att inte frisättas under sedimentdiagenesen.

**Löst bunden fosfor** detekterades i måttliga halter i Uttrans ytsediment, i medeltal cirka 50 µg P/g TS (Figur 3a, Bilaga 1). Det indikerar att det finns ett visst överskott av fosfat i sedimentens porvatten även när sedimentet blir syresatt under analysens extraktionsförfarande. Halterna klingar av med ökande sedimentdjup och blir i det närmaste odetekterbara från och med 26-28 cm sedimentdjup, även om station 9 och 18 (västra djupbassängen och Utterkalven) avviker med ca 40 µg P/g TS. Det sker en upptransport av löst fosfat på grund av diffusion vilket är den drivande kraften bakom fosforfrigörelsen från de djupare sedimentlagren.

**Järnbunden fosfor** ingår tillsammans med den löst bundna fosfor i den läckagebenägna oorganiska fosforpoolen. Halterna var förvånansvärt låga i ytskikten, i medeltal drygt 150 µg P/g TS (Figur 3b, Bilaga 1). Låga halter av järnbunden fosfor kan vara en följd av dåliga syreförhållanden, eftersom järn då reduceras varvid fosfor frisätts till vattenmassan. Så tycks dock inte vara fallet med Uttran, där mätdata visar att goda syrgasförhållanden rådde vid samtliga stationer undantaget Utterkalvens djuphåla (nr 18). Vid just denna station uppmättes dock de högsta ythalterna järnbunden fosfor (ca 500 µg P/g TS). Att så var fallet kan möjligen förklaras av att de ansträngda syrgasförhållandena nyligen inträtt efter vårens omblandning, och att fosfor därför ännu inte frisätts. Halterna var förhållandevis höga även vid ytterligare en station i Utterkalven (nr 19). Den järnbundna fosfor uppvisar tydligt förhöjda halter även längre ner i dessa kärnor. Även om järnbunden fosfor frisätts under syrefria förhållanden (och vid analysen extraheras under kraftigt reducerande förhållanden) så bör den järnbundna fosfor som återfinns i djupare sedimentlager betraktas som tillräckligt hårt bunden för att inte bidra till sedimentläckage. Det stöds av det faktum att den återfinns i förhöjda halter i halvsekelgamla sedimentlager, även om det inte kan uteslutas att det pågår en långsam mobilisering av fosfat även från dessa lager.

Vid fem stationer (nr 5, 9, 12, 16, 18) uppvisar de djupaste sedimentskikten förhöjda halter järnbunden fosfor. Förklaringen kan vara rester efter kemisk fällning i lokalt avloppsreningsverk. Fällningskemikalier kan vara baserade på järn eller aluminium, eller en kombination av de två, något som skulle kunna förklara att även förhöjda

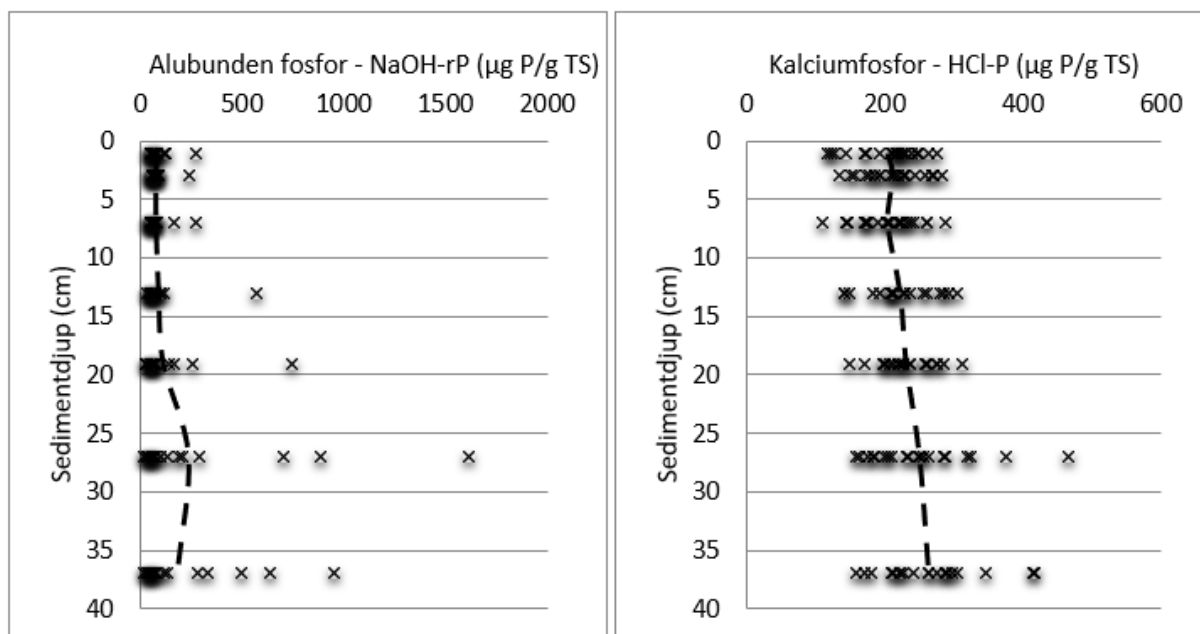
halter aluminiumbunden fosfor, se nedan, i stort sett återfinns vid samma stationer där den järnbundna är förhöjd.



Figur 3a och b. Löst bunden fosfor (vänster) och järnbunden fosfor (höger) i Uttrans sediment, maj 2021. Medelhalter (µg P/g TS) visas som streckad linje.

**Aluminiumbunden fosfor** uppmättes i de översta 20 cm sediment i halter kring 80 µg P/g TS och bör spegla den naturliga halten i Uttran (Figur 4a, Bilaga 1). Medelhalten ökar något i djupare sedimentlager till följd av de förhöjda halter som ses för några ovan nämnda kärnors djupare skikt. Någon datering av kärnorna finns ej, men antaget en genomsnittlig sedimentation av 0,5 cm/år så representerar skikten mellan 20 och 40 cm sediment som avsattes mellan 1940 och 1980. Det överensstämmer med den period då kemisk fällning infördes i många lokala avloppsreningsverk och förluster vid bräddning ansamlas på botten.

**Kalciumbunden fosfor** håller för regionen typiska halter kring 200 µg P/g TS och representerar postglaciala leror från avrinningsområdet (Figur 4b, Bilaga 1). En något ökande halt med ökande sedimentdjup är också typiskt och kan visa på en bildning av inerta fosforformer som extraheras som kalciumbunden fosfor.



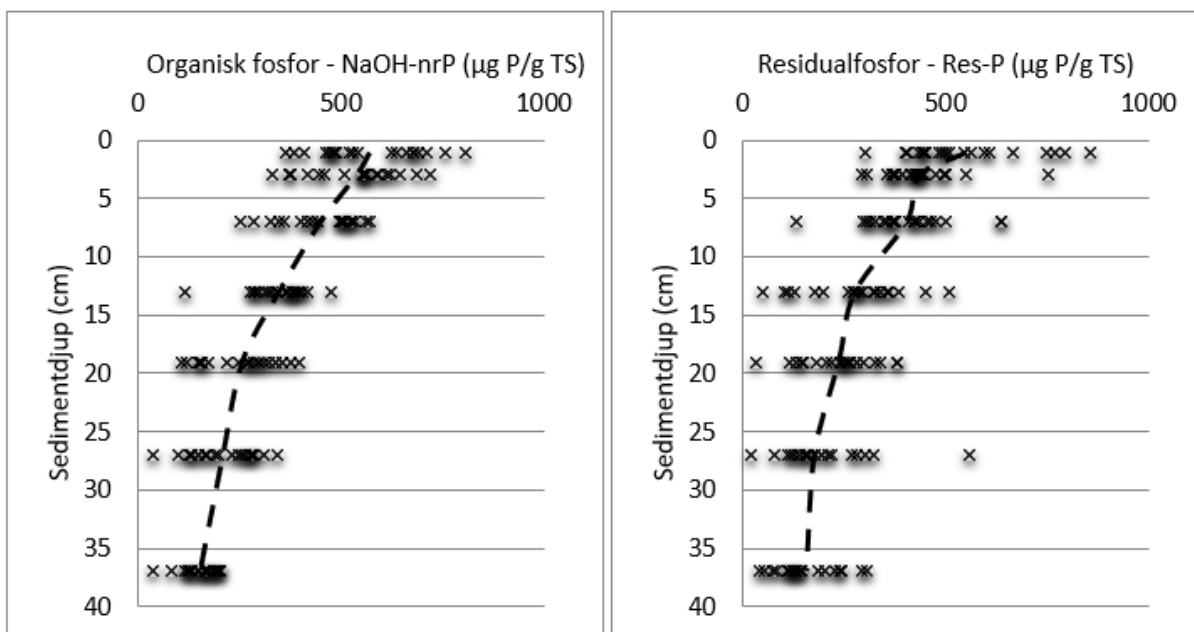
Figur 4a och b. Aluminiumbunden fosfor (vänster) och kalciumbunden fosfor (höger) i Uttrans sediment, maj 2021. Medelhalter (µg P/g TS) visas som streckad linje.

## Organiska fosforformer

Organiskt bunden fosfor extraheras vid analysen ut i fraktionen organiskt bunden fosfor (NaOH-nrP) och utgör även en del av fraktionen residualfosfor (Res-P). I den förstnämnda fraktionen återfinns majoriteten av den fosfor som med tiden kommer att läcka från sedimenten till vattenmassan. Halterna i ytsedimenten är relativt höga (ca 600 µg P/g TS) och mer än hälften av den organiskt bundna fosfor kommer att frigöras, av haltutvecklingen med ökande sedimentdjup att döma. Den haltminskning som ses med ökande sedimentdjup representerar den mineralisering av den organiskt bundna fosfor som kontinuerligt sker (Figur 5a, Bilaga 1). Den organiskt bundna fosforfraktionen stabiliseras kring 200 µg P/g TS vid cirka 40 cm sedimentdjup. Den organiskt bundna fosfor består av allt att döma av växtplankton och det bakteriesamhälle som bidrar till nedbrytning av det organiska materialet.

Den organiskt bundna fosfor som mäts som Res-P uppvisar stor haltspridning i ytsedimenten med ett medelvärde kring ca 500 µg P/g TS (Figur 5b, Bilaga 1). En tydlig avklingning i halt utmed ses till de djupaste skikten och belyser, liksom för fraktionen ovan, en mineralisering av organiskt bunden fosfor över tid. Res-P fosforfraktionen stabiliseras kring 200 µg P/g TS vid 40 cm sedimentdjup.



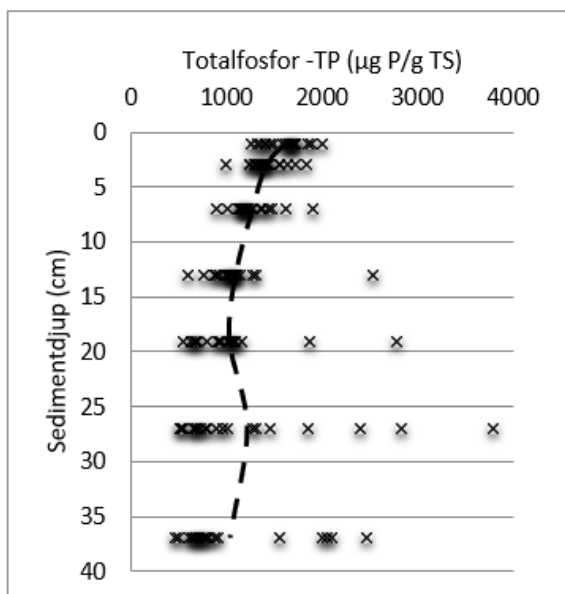


Figur 5a och b. Organiskt bunden fosfor (vänster) och residualfosfor (höger) i Uttrans sediment, maj 2021. Medelhalter (µg P/g TS) visas som streckad linje.

## Totalfosforhalt

Totalfosforhalterna i Uttrans ytsediment låg i medeltal kring 1600 µg P/g TS och klingar långsamt av med ökande sedimentdjup för att ha ungefär halverats i det djupaste skiktet (Figur 6, Bilaga 1), något som reflekterar sjöns begränsade förmåga att binda den fosfor som deponeras på sedimentytan. En handfull kärnor håller förhöjda totalfosforhalter även i de djupare sedimentskikten vilket kan förklaras med förhöjda koncentrationer av järn- och aluminiumbunden fosfor (se avsnitten ovan). Det är i princip enbart organiska fosforformer som står för minskningen i totalfosforhalt, även om också järnbunden fosfor bidrar med en mindre del. Det generella mönstret tyder på att växtplanktonproduktionen i Uttran delvis drivs av fosfor som tillförs från avrinningsområdet, men framförallt genom interna övergödningsprocesser där utsedimenterat planktonmaterial bryts ner varvid fosfor frisätts och återcirkuleras till vattenmassan.

En alternativ förklaring till det mönster som ses skulle kunna vara att fosforbelastningen till sjön har stegrats kraftigt de senaste åren, vilket skulle resultera i den observerade fosforkoncentrationsökningen mot sedimentytan. Men så är sannolikt inte fallet, avklingningen avspeglar av allt att döma en deposition av relativt fosforrikt material och där en andel av fosfor frigörs bland annat genom mineralisering av organiskt material med tiden och diffunderar mot vattenmassan (Carey & Rydin 2011). Det är den läckagebenägna, ekologiskt relevanta, fosforpool som kvantifieras i avsnittet nedan och som behöver bindas för att den interna fosforomsättningen mellan sediment och vattenmassa ska upphöra.



Figur 6. Totalfosforhalt i Uttrans sediment, maj 2021. Medelhalter ( $\mu\text{g P/g TS}$ ) visas som streckad linje.

## Mängd läckagebenägen fosfor

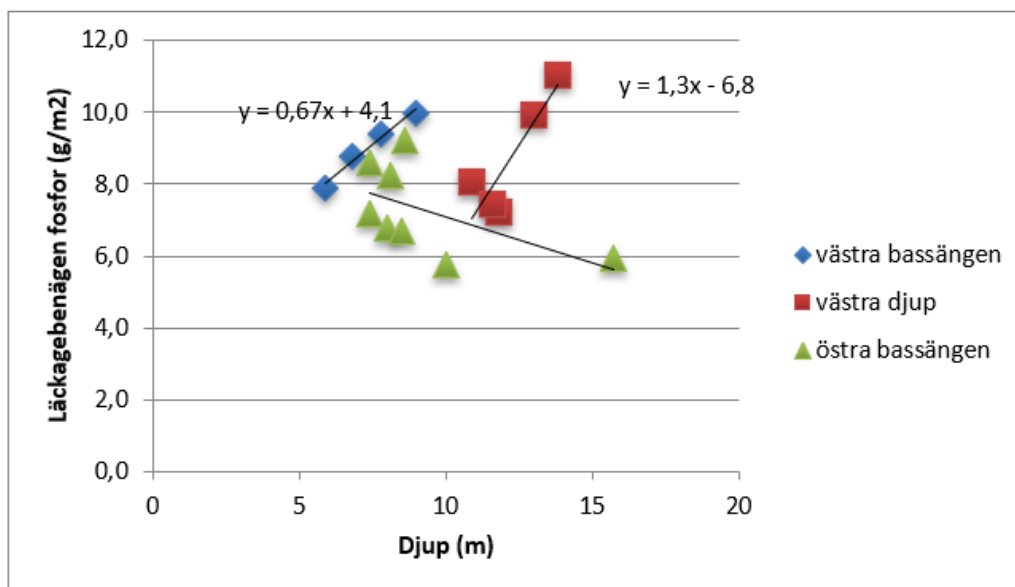
Den mobila, läckagebenägna fosfor som erhöles vid fraktioneringen kan räknas om till mängd per ytenhet efter att respektive bakgrundskoncentration har subtraherats. Då erhöles i genomsnitt 0,5 g löst bunden och järnbunden fosfor samt 7,2 g organiskt bunden fosfor per kvadratmeter (Tabell 4). Förrådet av läckagebenägen fosfor i Uttrans sediment summeras då till i genomsnitt 7,7 g P/ m<sup>2</sup>, vilket är en relativt stor mängd.

Det som utmärker det läckagebenägna fosforförrådet i Uttrans sediment är att det domineras av organiskt bundna fosforformer. Löst bunden och järnbunden fosfor utgör en förvånansvärt liten mängd (Tabell 4). Som jämförelse kvantifierades i Hjälmarens sediment cirka 10 g mobil fosfor/m<sup>2</sup>, vilket är en stor mängd, där hälften var järnbunden och den andra hälften var organiskt bunden (Malmaeus och Rydin 2015), vilket är bland de större mängderna som har uppmätts. Den måttligt näringsrika sjön Erken i håller cirka 5 g P/m<sup>2</sup>, varav 4 g P/m<sup>2</sup> utgör organiskt bunden fosfor (Rydin 2000).



I djupare sjöar som Uttran finns ofta ett positivt samband mellan vattendjup och läckagebenägen fosfor, där näringsrikt, partikulärt material ansamlas och fokuseras till de djupare bottenarna. Men det är först när de olika bassängerna utvärderas var för sig som mönstret framträder för Uttrans båda västra delområden (Figur 8). För de östra bassängerna saknas ett samband mellan läckagebenägen fosfor och vattendjup. För att beräkna det läckagebenägna fosforinnehållet i de olika djupintervallen i respektive bassäng antogs de linjära regressionerna för de två västra bassängerna. Det värde som beräknades för djupintervallet 9-10 m i den västra djupbassängen ( $5,2 \text{ g P/m}^2$ ) antogs vara representativt även för botten mellan 6 och 9 m, i samma område. I den östra bassängen, där ett djupsamband saknades (Figur 8), beräknades ett medelvärde för den mobila fosfor ( $7,3 \text{ g P/m}^2$ , Tabell 5).

Utterkalven håller också mobil sedimentfosfor (se ovan, Tabell 4), men den relativt lilla yta som är djup nog för eventuell behandling ger inte underlag nog för en modell över den mobila fosfors fördelning. Medelvärde för läckagebenägen fosfor baserat på de tre kärnorna tagna i Utterkalven uppgår till  $5,2 \text{ g/m}^2$ .



Figur 8. Läckagebenägen fosfor i respektive bassäng samt ekvationen för den mobila fosfors fördelning i djupled i de två västra bassängerna.

Vi föreslår att åtgärder för reducerad internbelastning fokuserar till botten djupare än 6 meter. Läckagebenägen fosfor finns även på grundare bottenar, men någonstans mellan cirka 6 och 3 m djup, beroende på exponeringsgrad, påverkas sedimentationen av vattenströmmar vilket gör att partikulär fosfor inte ansamlas på de bottenområdena under längre tid utan kommer att fokuseras till djupare, så kallade ackumulationsbottenar. Detsamma gäller tillsatt aluminium, som riskerar att omfördelas från grundare till djupare bottenområden. Behandlas botten djupare än 6 meter



i Uttran innebär det att närmare halva bottenarean (47%) och en majoritet av ackumulationsbottenarean kommer att bli behandlad.

Tabell 5. Läckagebenägen fosfor (g P/m<sup>2</sup>) i Uttrans sediment med fördelning på sjöns huvudbassänger och i djupintervall från 6 meter.

Djupintervall (m)	Östra	Västra	Västra djup
6-7	7,3	8,4	5,2
7-8	7,3	9,1	5,2
8-9	7,3	9,8	5,2
9-10	7,3		5,2
10-11	7,3		6,5
11-12	7,3		7,8
12-13	7,3		9,0
13-14	7,3		10,3
14-15	7,3		
15-	7,3		

## Åtgärder för minskad internbelastning

Tidigare utredningar har visat att den interna fosforbelastningen till Uttran är kraftigt förhöjd och beräknas uppgå till i storleksordningen 800 kg/år, att jämföra med en beräknad extern fosfortillförsel kring 450 kg/år. Sedimentundersökningen som redovisas i denna rapport visar vidare att sjöns botten har ett stort förråd läckagebenägen fosfor, i huvudsak bundet till organiskt material, och att mängderna per ytenhet är högst i sjöns västra delar. Det står alltså klart att åtgärder som syftar till att reducera den interna fosforbelastningen är mycket angelägna. Åtgärderna bedöms vara helt nödvändiga för att Uttran ska ges förutsättningar att uppnå beslutad miljö kvalitetsnorm god ekologisk status 2027, och är även motiverade för att minska fosforbelastningen till nedströms liggande vatten.

Åtskilliga sjörestaureringsmetoder finns för att komma tillrätta med en förhöjd intern fosforbelastning och/eller effekterna av en sådan. Flera av metoderna har genom åren använts för att åtgärda även andra miljöproblem, så som dåliga syrgasförhållanden och höga halter miljögifter. Åtgärderna omfattar metoder för att öka fastläggningen av fosfor i sedimentet genom tillsats av fosforbindande ämnen (aluminium, järn, kalcium, lantan) eller för att förbättra syrgasförhållandena vid bottenarna (syresättning av bottenvatten, omblandning). Andra åtgärder inriktas mot bortförsel av fosforrika sediment (muddring) eller fosforrikt bottenvatten (avtappning av bottenvatten, utspädning). Ovan nämnda metoder syftar till att ta bort eller binda fosfor i sedimenten och på så vis

minska tillgängligheten av löst fosfor för produktion av plankton och trådalger. Ytterligare en åtgärd som tillämpats är så kallad biomanipulering där ett selektivt reduktionsfiske riktat mot vittfisk (braxen, björkna, mört) och/eller utsättning av rovfisk (gädda, abborre) kan ge positiva effekter på övergödningssymptom och på fosforhalterna i vattenmassan. Bäst fungerar metoden om det finns möjlighet att på ett effektivt sätt fiska ut stora stim av braxen som på olika vis förstärker övergödningseffekterna.

## Fosforbindande ämnen

Vid behandling med fosforbindande medel är aluminium det i särklass vanligaste ämne som används (Huser et al 2016). Metoden har använts sedan lång tid tillbaka i såväl små som stora sjöar, och har fungerat bra i Stockholmstrakten (Agstam-Norlin m fl 2021) även om undantag finns. Aluminium och fosfor bildar en permanent förening som är stabil nog att begravas i sedimenten för gott, även vid syrgasfria förhållanden. En nackdel kan vara att aluminium kan gå i lösning vid uttalat höga respektive låga pH-värden, något som innebär att det är av stor vikt att planera en åtgärd så den utförs under välbuffrade förhållanden. Tänkbara alternativ skulle kunna vara behandling med Phoslock, en lantanberikad bentonitlera, som använts det senaste decenniet men då framförallt i mindre sjöar och utomlands. Ytterligare en möjlighet skulle kunna vara behandling med mörklera, en lerhaltig restprodukt från kalkbrytning. Enligt vår kännedom saknas ännu exempel där metoden visat goda resultat i fullskala.

## Syresättning av bottenvatten

Metoden att syresätta bottenvatten och ytsediment vid annars syrefria stagnationsperioder verkar genom att möjliggöra bildning av järnoxider som effektivt binder löst fosfat. Men även om syretillsättningen lyckas och fosforfastläggningen ökar är det ändå en temporär effekt; erfarenheten visar att när syretillförseln upphör återgår de syrefria förhållandena och järn-fosforkomplexen går i lösning. Att åtgärdens effekt inte är permanent, samt att halterna av järnbunden fosfor var låga även då Uttrans ytsediment var syresatt gör metoden ointressant som åtgärd, är vår bedömning.

## Muddring eller bortledning av bottenvatten

Muddring lämpar sig normalt sett för mindre sjöar eller sjöar där den läckagebenägna fosfor i huvudsak ligger lagrad i ytliga sedimentlager; kriterier som inte uppfylls för Uttran. Bortledning av fosforrikt

bottenvatten kan möjligen vara ett alternativ, men skulle vara en åtgärd som sannolikt skulle behöva genomföras under flera decennier och också förutsätta infiltration på odlingsmark för att inte belasta nedströms liggande vatten. Båda dessa alternativ bedömer vi som mindre realistiska.

## Nollalternativet

Nollalternativet bör också nämnas i sammanhanget. Detta alternativ innebär att ingen åtgärd genomförs för reducerad internbelastning, och att Uttran istället får återhämta sig på naturlig väg. Ett rimligt antagande är att den läckagebenägna fosfor omsätts under en tidsperiod av 10-20 år. En andel av den fosfor som då frigörs från bottarna kommer att transporteras nedströms vilket gör att Uttran på sikt kommer att återgå till ett mindre näringsrikt stadium. Om och hur snabbt detta sker beror på den externa belastningssituationen, det vill säga hur mycket fosfor som tillförs utifrån, och även på flödessituationen. Eftersom en naturlig återhämtning kan väntas ske först inom en tidsperiod av ett antal årtionden, det vill säga långt bortom den tidsfrist som ges av miljö kvalitetsnormen, och dessutom förutsätter fortsatt export av överskottsnäring till nedströms liggande vatten som också behöver avlastas från näringsämnen, är det inte någon framkomlig väg.

## Rekommenderad metod

Eftersom aluminiumbehandling är en mycket välbeprövad metod som permanent binder sedimentfosfor, fungerar bra i skiktade sjöar och är den kanske enda metod som har visat sig fungera i de allra flesta fall är det den metod vi förordar för åtgärd av Uttrans internbelastning. Liksom övriga metoder för ökad fosforbindning har aluminiumbehandling ingen effekt på den nya fosfor som sjunker ner på botten något år efter behandlingen, utan fungerar för att fastlägga den fosfor som frigörs i sedimentlagren under det behandlade ytsedimentet. Det är därför av stor vikt att den externa belastningen reduceras till en nivå där sjön kan nå balans. Om den externa belastningen ligger kvar på en oacceptabelt hög nivå kommer även internbelastningen över tid att öka, och behöva åtgärdas på nytt. Åtgärder för att reducera den interna belastningen är därför normalt sett motiverade först då den externa fosfortillförseln ligger på en nivå som bedöms långsiktigt hållbar.

# Aluminiumbehandling av Uttran

Enligt resonemanget ovan är aluminiumbehandling den metod vi förordar för åtgärd av den förhöjda internbelastningen i Uttran. I detta avsnitt lämnas rekommendationer kring åtgärdens utförande, sett till aluminiumdos och appliceringsmetod.

## Aluminiumdos

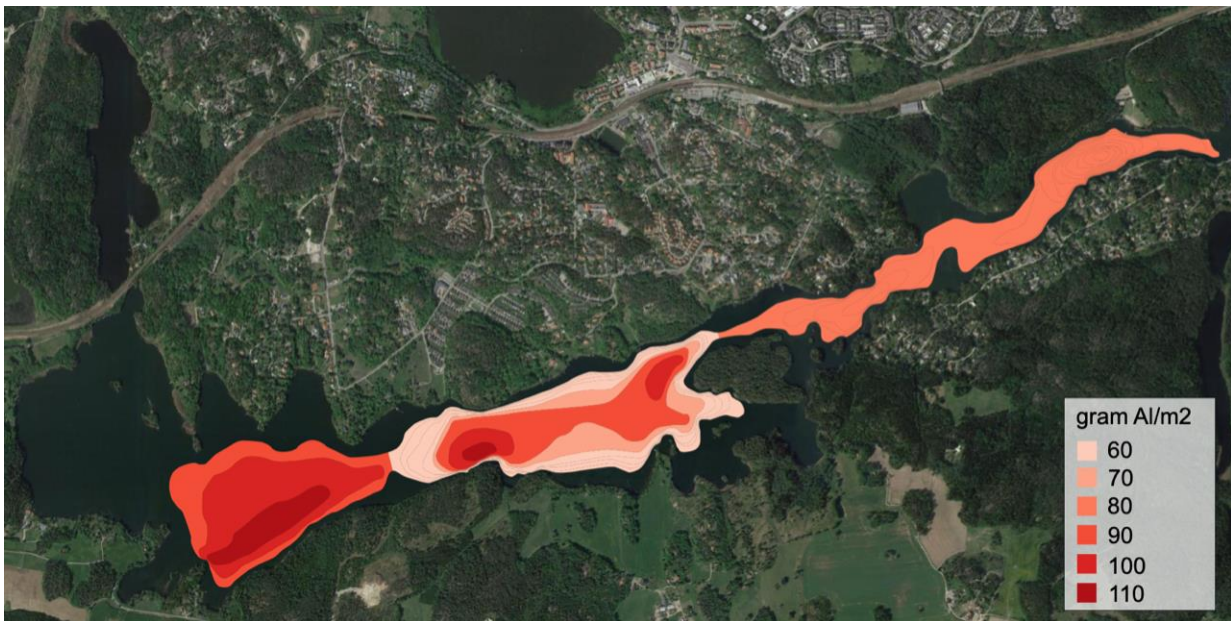
För en så kostnads- och miljöeffektiv behandling som möjligt baserar sig doseringen av aluminium på de mängder av läckagebenägen fosfor som indikeras av sedimentundersökningen. Baserat på att cirka 11 gånger mer aluminium behövs på viktsbasis för att binda en given mängd fosfor (Rydin m fl. 2000), krävs en aluminiumdos på 85 g Al/m<sup>2</sup> för att binda den genomsnittliga mobila fosforpoolen på 7,7 g P/m<sup>2</sup> i Uttrans sediment. Eftersom den läckagebenägna fosfor inte fördelade sig jämnt vare sig mellan sjöns delbassänger eller med vattendjupet beräknades en aluminiumdos för varje djupintervall i de tre huvudbassängerna (Tabell 6, Figur 9). För Utterkalven där den behandlingsbara ytan är liten rekommenderas ingen åtgärd. Beräknade doser, 60-110 g Al/m<sup>2</sup>, ligger i det övre spannet av de tillsatser på mellan 50 och 100 g Al/m<sup>2</sup> som normalt används av företaget Vattenresurs AB för att binda läckagebenägen sedimentfosfor i relativt välbuffrade sjöar (Agstam-Norlin m fl. 2021).

Den totala aluminiumtillsats som krävs vid behandling av Uttran beräknades till 88 ton (Tabell 7). Aluminiumtillsatsen beräknades i likhet med mängden läckagebenägen sedimentfosfor genom att bestämma ytorna för olika djupintervall i sjöns bassänger (Bilaga 2).

Tabell 6. Aluminiumdos (g Al/m<sup>2</sup>) för Uttrans huvudbassänger och för bottendjup större än 6 m. Dosen beräknades baserat på sedimentens läckagebenägna fosformängder och avrundades till närmaste tiotal.

Djupintervall (m)	Östra	Västra	Väst djup
6-7	80	90	60
7-8	80	100	60
8-9	80	110	60
9-10	80		60
10-11	80		70
11-12	80		90
12-13	80		100
13-14	80		110
14-15	80		
15-	80		





Figur 9. Underlag för aluminiumdosering (g Al/m<sup>2</sup>) till Uttrans sediment vid åtgärd av intern fosforbelastning. För Utterkalven som ligger utanför kartbilden, åt nordost, rekommenderas ingen åtgärd.

Tabell 7. Mängd aluminium (ton) vid tillsats enligt rekommenderad dos.

Djupintervall (m)	Östra	Västra	Väst djup
6-7	8,7	9,8	2,3
7-8	5,9	16,1	2,1
8-9	3,2	5,9	2,6
9-10	1,6		3,1
10-11	0,8		6,5
11-12	0,6		12,4
12-13	0,5		3,9
13-14	0,4		0,8
14-15	0,4		
15-	0,2		
summa	22	32	34

## Appliceringsmetod

Vid aluminiumbehandling kan dosen tillföras som granuler, eller numera som lösning direkt i vattenmassan alternativt genom injicering i sedimenten. Den senare metoden har utvecklats av företaget Vattenresurs AB och innebär att koncentrerad polyaluminiumklorid injiceras i sedimenten tillsammans med sjövattnet vilket resulterar i en flockbildning i själva bottenmaterialet (Schütz m fl 2017). Behandling genom sedimentinjicering har både för och nackdelar jämfört med en behandling där hela dosen läggs i vattenmassan. Den stora fördelen med den förra metoden är att avsedd aluminiumdos tillförs direkt till de sedimentlager där den läckagebenägna fosfor ligger och mobiliseras över tid. Vid dosering i vattenmassan är risken stor att strömmar för bort den flock som

bildats i vattnet och sedimenterat ut på botten, innan den efter ett par år har börjat införlivats i de översta centimetrarna sediment och där har effekt. En annan fördel med sedimentinjicering är att en större giva kan läggas utan att tillsatsen behöver buffras, eftersom sedimentens buffrande förmåga till viss del kan nyttjas. Till nackdelarna med sedimentbehandling hör högre kostnader och att det är osäkert om miljögifter i sedimenten mobiliseras vid behandling. Den frågan har belysts tidigare inför behandling av en kustvattenförekomsten Brunnsviken, Stockholm (Rydin m fl 2016).

När fällningsmedlet (polyaluminiumklorid, ex. Kemira kemi XL 100) tillsätts genom injicering i sedimenten och den fosforbindande flokken bildas åtgår hydroxidjoner. För att undvika en pH-sänkning som resultat av detta behöver hänsyn tas till buffertförmågan.

Aluminiumbehandlingarna av Växjösjön och Södra Bergundasjön genom sedimentinjicering innebar att man behövde ta hänsyn till både höga pH-värden i vattenmassan under högsommaren när produktionen var hög, och låga pH-värden när doseringen hade varit för stor under en period. Växjö kommuns erfarenheter av behandlingarna är väldokumenterade (Hedrén 2021). Även om polyaluminiumklorid inte har samma försurande effekt som exempelvis aluminiumsulfat, och doser på mellan 50 och 100 g Al/m<sup>2</sup> har fungerat bra i välbuffrade slättlandssjöars sediment, så kan buffertförmågan mycket väl vara en reglerande faktor för vilken dos som kan tillsättas Uttran vid ett behandlingstillfälle. Av stor vikt är således att utföraren tar ansvar för att behandlingen utförs under välbuffrade förhållanden.

## Budgererad kostnad

Med det underlag som presenteras ovan vad gäller doser och behandlingsområden, och under förutsättning att aluminiumbehandlingen genomförs genom sedimentinjicering beräknar Vattenresurs AB att åtgärden kostar 8,7-9,3 Mkr (personlig kommunikation, Göran Andersson, Vattenresurs AB).

## Osäkerheter och förutsättningar

Avsaknaden av järnbunden fosfor i ytskiktet i Uttrans botten avviker från det normala mönstret i skiktade sjöar. Sedimentprovtagningen utfördes i maj då bottenvattnet och ytsedimenten vid samtliga stationer utom en (Utterkalvens djuphåla) var syresatta och oxiderade efter våromblandningen. Miljön för att anrikning av järnbunden fosfor bör alltså ha varit den rätta. Det kan inte uteslutas att en kemisk/fysikalisk miljö råder i Uttrans ytsediment som inte gynnar bildning av järnbunden fosfor. Det väcker frågan om även bildning av aluminiumbunden fosfor av

någon anledning skulle fungera sämre i Uttran än i andra sjöar i Mälardalen. Även om risken sannolikt är liten, kan det vara värt att överväga att börja med att behandla en del av sjön och utvärdera resultaten innan man går vidare med fullskalig åtgärd. Som underlag för uppföljning av åtgärdens effekt rekommenderas också inför åtgärd ett utökat vattenkemiskt kontrollprogram som undersöker fosforhalter i profiler från yta till botten i Uttrans olika bassänger.

Denna utredning fokuserar på att kvantifiera den sedimentfosfor som med tiden kommer att mobiliseras i Uttrans sediment och beräkna den aluminiumdos som behövs för att binda denna fosfor innan den frigörs till vattenmassan och bidrar till övergödning. Även om en framgångsrik bottenbehandling väntas innebära att fosforhalterna i vattenmassan reduceras, behöver också den externa belastningen åtgärdas till en nivå som är acceptabel med hänsyn till miljö kvalitetsnormen god ekologisk status 2027. Om den externa fosfortillförseln tillåts ligga kvar på en förhöjd nivå kommer nya förråd av läckagebenägen fosfor byggas upp i Uttrans botten vilket medför att internbelastningen på sikt kommer att öka igen.

# Referenser

Agstam-Norlin, O., Lannergård, E., Rydin, E., Futter, M. Huser, B. 2021. A 25-year retrospective analysis of factors influencing success of aluminum treatment for lake restoration. *Water Research* <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117267>

Carey, C & Rydin, E. 2011. Lake trophic status can be determined by the depth distribution of sediment phosphorus. *Limnol. Oceanogr.*, 56(6): 2051–2063.

Hedrén, A. 2021. Genomföranderapport med reflektioner angående miljövillkor och skyddsåtgärder vid aluminiumbehandling av sjösediment. Växjö kommun.

Huser B, Egemose S, Harper H, Hupfer M, Jensen H, Pilgrim K, Reitzel K., Rydin E, Futter M. 2016. Longevity and effectiveness of aluminum addition to reduce sediment phosphorus release and restore lake water quality, *Wat. Res.* 97. 122-132

Malmaeus, M & Rydin, E. 2015. Sedimentundersökning i Hjälmarén. Resultat från provtagning maj 2015. IVL rapport C 136.

Olofsson H 2003. Detaljerad sedimentundersökning i Uttran 2003. Alcontrol Laboratories 2003-11-06.

Psenner, R., Boström, B., Dinka, M., Pettersson, K., Pucsko, R. & M. Sager. 1988. Fractionation of phosphorus in suspended matter and sediments. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.* 30: 98-109.

Rydin, E. 2000. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment. *Water Research* 34(7):2037-2042.

Rydin, E, Huser, B. & E. Welch. 2000. Amount of phosphorus inactivated by alum treatments in Washington lakes. *Limnology and Oceanography* 45(1):226-230.

Rydin, E., P. Jonsson, M. Karlsson & A. Gustafsson. 2016. Läckagebenägen fosfor i Brunnsvikens sediment. Underlag för lokalt åtgärdsprogram. Naturvatten AB, Rapport 2016:34.

Rydin, E. Waldetoft, H. Rydstedt, A. & M Karlsson. 2021. Mobil fosfor och miljöfarliga ämnen i sediment från ostkustens skärgårdar. HAV Rapport.



Schütz, J., Rydin, E., & Huser, B. 2017. A newly developed injection method for aluminum treatment in eutrophic lakes: Effects on water quality and phosphorus binding efficiency. *Lake and Reservoir Management* 1-11. 10.1080/10402381.2017.1318418.

# Bilaga 1. Sedimentanalyser

I tabellen nedan redovisas vattenhalt, glödningsförlust, fosforfraktioner och totalfosforhalt i samtliga sedimentskikt från Uttran. Provtagning ägde rum i maj 2021. Analyser utfördes av Erkenlaboratoriet, ackrediterade av SWEDAC (nr 1239).

Station	TS %	LOI %	NH4Cl-P µg/g TS	BD-P µg/g TS	NaOH-P µg/g TS	NaOH org-P µg/g TS	HCl-P µg/g TS	Rest-P µg/g TS	TP µg/g TS
Uttran 1 0-2 cm	93	25	18	85	55	409	264	484	1316
Uttran 1 2-4 cm	92	43	22	80	55	370	270	501	1299
Uttran 1 6-8 cm	90	25	10	40	51	346	288	422	1158
Uttran 1 12-14 cm	86	21	8	28	55	366	286	177	919
Uttran 1 18-20 cm	82	17	7	32	52	152	285	151	679
Uttran 1 26-28 cm	82	18	2	38	40	127	256	194	657
Uttran 1 36-38 cm	82	19	2	40	36	115	287	126	605
Uttran 2 0-2 cm	93	25	26	86	53	464	230	492	1351
Uttran 2 2-4 cm	92	25	26	81	58	459	269	433	1325
Uttran 2 6-8 cm	91	25	10	54	58	401	230	455	1209
Uttran 2 12-14 cm	88	22	8	32	54	313	281	323	1012
Uttran 2 18-20 cm	80	16	3	41	51	157	275	131	657
Uttran 2 26-28 cm	81	18	1	46	45	131	285	161	669
Uttran 2 36-38 cm	80	18	1	43	41	125	289	146	645
Uttran 3 0-2 cm	93	26	21	101	61	489	275	452	1399
Uttran 3 2-4 cm	93	26	16	58	61	509	258	393	1296
Uttran 3 6-8 cm	92	26	12	52	56	431	262	372	1186
Uttran 3 12-14 cm	89	23	10	33	51	344	261	362	1060
Uttran 3 18-20 cm	85	18	6	38	57	218	262	207	788
Uttran 3 26-28 cm	80	15	3	58	54	166	251	127	659
Uttran 3 36-38 cm	81	18	1	51	47	133	287	132	652
Uttran 4 0-2 cm	94	28	24	75	54	519	220	564	1457
Uttran 4 2-4 cm	93	28	22	77	62	553	244	475	1433
Uttran 4 6-8 cm	92	27	19	44	56	500	241	499	1358
Uttran 4 12-14 cm	90	24	15	38	54	385	256	358	1105
Uttran 4 18-20 cm	87	21	12	56	54	298	258	239	916
Uttran 4 26-28 cm	83	17	1	76	59	197	249	142	724
Uttran 4 36-38 cm	80	17	1	93	59	166	262	129	710
Uttran 5 0-2 cm	95	29	61	135	59	691	238	500	1683
Uttran 5 2-4 cm	94	27	23	64	54	555	215	443	1355
Uttran 5 6-8 cm	92	26	33	50	56	524	225	366	1254
Uttran 5 12-14 cm	90	24	11	70	56	392	226	326	1082
Uttran 5 18-20 cm	87	22	6	106	60	324	236	282	1014
Uttran 5 26-28 cm	85	19	42	1388	1610	308	465	-25	3788
Uttran 5 36-38 cm	77	13	12	869	950	169	416	52	2468
Uttran 6 0-2 cm	95	29	39	166	114	663	209	303	1495
Uttran 6 2-4 cm	94	28	45	121	90	614	227	307	1404
Uttran 6 6-8 cm	92	26	30	74	62	534	202	328	1230
Uttran 6 12-14 cm	91	24	15	93	57	398	213	293	1068
Uttran 6 18-20 cm	89	22	8	150	75	354	199	262	1047
Uttran 6 26-28 cm	85	18	5	440	194	247	205	220	1311
Uttran 6 36-38 cm	79	14	2	242	136	184	228	115	906
Uttran 7 0-2 cm	95	30	68	155	70	624	218	545	1681

Uttran 7 2-4 cm	94	28	35	77	63	556	230	418	1380
Uttran 7 6-8 cm	93	27	30	48	51	443	208	425	1205
Uttran 7 12-14 cm	90	23	22	55	49	366	229	275	997
Uttran 7 18-20 cm	88	21	8	85	54	308	226	239	921
Uttran 7 26-28 cm	84	17	2	104	62	230	232	156	785
Uttran 7 36-38 cm	79	16	1	84	72	173	262	111	703
Uttran 8 0-2 cm	95	29	55	113	66	757	211	507	1710
Uttran 8 2-4 cm	94	28	48	85	56	557	192	438	1375
Uttran 8 6-8 cm	93	27	28	58	57	506	206	357	1212
Uttran 8 12-14 cm	91	23	17	95	59	369	211	293	1044
Uttran 8 18-20 cm	88	21	9	130	70	338	226	257	1030
Uttran 8 26-28 cm	85	17	6	425	203	257	233	155	1278
Uttran 8 36-38 cm	80	14	3	241	116	199	212	113	884
Uttran 9 0-2 cm	96	32	63	178	76	806	220	664	2007
Uttran 9 2-4 cm	94	28	33	88	62	591	193	446	1413
Uttran 9 6-8 cm	92	26	33	67	51	417	221	410	1198
Uttran 9 12-14 cm	91	25	11	94	57	381	213	340	1097
Uttran 9 18-20 cm	89	23	8	129	59	272	219	381	1068
Uttran 9 26-28 cm	87	20	38	1263	885	344	374	-82	2822
Uttran 9 36-38 cm	80	15	12	916	493	194	415	72	2104
Uttran 10 0-2 cm	92	23	25	132	75	386	245	399	1263
Uttran 10 2-4 cm	90	22	14	62	59	332	229	292	988
Uttran 10 6-8 cm	88	20	7	34	46	253	238	316	893
Uttran 10 12-14 cm	81	16	2	29	33	116	293	129	603
Uttran 10 18-20 cm	79	15	2	28	33	109	261	115	548
Uttran 10 26-28 cm	84	18	1	41	37	128	263	78	548
Uttran 10 36-38 cm	77	13	1	42	29	83	305	39	499
Uttran 11 0-2 cm	96	34	65	73	52	544	123	857	1714
Uttran 11 2-4 cm	95	34	51	97	62	588	172	751	1722
Uttran 11 6-8 cm	94	33	22	54	65	496	173	636	1447
Uttran 11 12-14 cm	91	28	24	41	56	383	183	451	1139
Uttran 11 18-20 cm	89	24	20	51	59	267	199	340	935
Uttran 11 26-28 cm	83	19	3	64	55	169	200	211	702
Uttran 11 36-38 cm	85	25	2	57	51	165	209	226	709
Uttran 12 0-2 cm	96	34	93	89	58	679	126	609	1655
Uttran 12 2-4 cm	95	34	65	87	62	646	152	415	1427
Uttran 12 6-8 cm	94	32	28	46	55	525	145	475	1273
Uttran 12 12-14 cm	92	30	34	47	55	420	149	384	1088
Uttran 12 18-20 cm	90	27	23	77	69	378	170	382	1099
Uttran 12 26-28 cm	88	23	8	254	133	287	209	559	1449
Uttran 12 36-38 cm	84	19	9	529	278	201	242	295	1555
Uttran 13 0-2 cm	95	33	55	139	70	638	224	594	1720
Uttran 13 2-4 cm	95	33	60	137	83	718	185	375	1557
Uttran 13 6-8 cm	94	33	22	105	73	561	173	434	1368
Uttran 13 12-14 cm	91	29	24	102	74	406	193	101	900
Uttran 13 18-20 cm	88	23	20	78	70	285	212	33	699
Uttran 13 26-28 cm	84	21	3	130	55	149	186	268	792
Uttran 13 36-38 cm	85	27	3	134	46	148	222	201	754
Uttran 14 0-2 cm	95	33	54	106	55	530	170	747	1662
Uttran 14 2-4 cm	95	33	32	119	71	561	177	430	1389
Uttran 14 6-8 cm	94	32	26	82	67	526	176	134	1010
Uttran 14 12-14 cm	90	26	23	121	70	287	210	51	761
Uttran 14 18-20 cm	86	22	6	95	54	172	207	145	679
Uttran 14 26-28 cm	81	18	3	53	31	101	325	20	532
Uttran 14 36-38 cm	44	3	1	51	12	37	276	83	460

Uttran 15 0-2 cm	95	33	63	179	60	473	144	771	1690
Uttran 15 2-4 cm	95	34	43	141	64	553	210	424	1435
Uttran 15 6-8 cm	94	33	31	71	54	509	170	300	1135
Uttran 15 12-14 cm	90	28	21	73	57	323	212	197	883
Uttran 15 18-20 cm	78	13	5	26	26	119	198	247	622
Uttran 15 26-28 cm	55	6	1	22	19	37	321	120	520
Uttran 15 36-38 cm	75	13	4	82	47	190	346	142	811
Uttran 16 0-2 cm	95	34	92	119	63	710	174	434	1590
Uttran 16 2-4 cm	94	32	58	147	77	621	157	495	1555
Uttran 16 6-8 cm	92	27	41	364	168	440	146	463	1622
Uttran 16 12-14 cm	91	24	15	432	119	330	141	262	1299
Uttran 16 18-20 cm	89	23	20	843	258	298	148	297	1864
Uttran 16 26-28 cm	86	21	17	946	285	266	162	178	1856
Uttran 16 36-38 cm	83	19	16	1110	331	126	158	307	2048
Uttran 17 0-2 cm	97	41	76	155	68	678	117	792	1886
Uttran 17 2-4 cm	96	40	48	147	68	688	134	549	1635
Uttran 17 6-8 cm	95	39	44	58	58	569	111	636	1476
Uttran 17 12-14 cm	94	36	41	51	50	477	142	508	1269
Uttran 17 18-20 cm	92	32	47	56	58	397	277	327	1162
Uttran 17 26-28 cm	90	29	17	59	58	282	176	300	893
Uttran 17 36-38 cm	87	30	4	67	59	201	181	246	758
Uttran 18 0-2 cm	91	24	29	505	273	362	229	448	1846
Uttran 18 2-4 cm	89	23	24	538	243	377	284	371	1837
Uttran 18 6-8 cm	87	22	21	722	275	325	261	305	1910
Uttran 18 12-14 cm	85	21	23	1237	568	288	305	110	2531
Uttran 18 18-20 cm	83	20	17	1337	742	148	313	217	2775
Uttran 18 26-28 cm	82	20	39	1080	699	188	287	109	2403
Uttran 18 36-38 cm	77	16	10	747	640	124	299	185	2004
Uttran 19 0-2 cm	94	27	24	346	121	480	248	404	1624
Uttran 19 2-4 cm	94	28	9	142	90	416	220	367	1245
Uttran 19 6-8 cm	92	26	9	111	79	358	218	349	1124
Uttran 19 12-14 cm	88	24	9	136	97	277	237	274	1030
Uttran 19 18-20 cm	84	19	8	244	167	249	221	184	1073
Uttran 19 26-28 cm	90	32	6	128	74	276	159	321	964
Uttran 19 36-38 cm	83	24	2	82	70	149	222	144	670
Uttran 20 0-2 cm	95	27	17	193	84	482	193	441	1409
Uttran 20 2-4 cm	94	26	10	132	78	447	210	357	1234
Uttran 20 6-8 cm	91	26	7	154	78	284	191	375	1178
Uttran 20 12-14 cm	88	24	6	134	99	300	211	285	1035
Uttran 20 18-20 cm	86	23	7	161	139	273	236	264	1080
Uttran 20 26-28 cm	89	31	7	167	96	281	182	282	1014
Uttran 20 36-38 cm	87	41	4	134	74	164	171	241	790

## Bilaga 2. Bottenareor

Tabell 1. Bottenareans (ha) fördelning i djupintervall (m).

Djupintervall	Kalven	Östra	Västra	Väst djup	Totalsumma
0-2	4,0	3,5	5,5	3,4	16,4
2-3	4,3	3,6	7,7	5,4	21,0
3-4	4,2	4,8	17,6	4,4	31,0
4-5	0,6	3,8	19,3	3,3	27,0
5-6	0,6	7,4	18,6	4,5	31,1
6-7	0,5	10,9	10,8	3,8	26,1
7-8	0,3	7,4	16,1	3,5	27,4
8-9		4,0	5,4	4,4	13,8
9-10		2,0		5,1	7,2
10-11		1,0		9,3	10,4
11-12		0,8		13,8	14,6
12-13		0,7		3,9	4,6
13-14		0,5		0,7	1,2
14-15		0,5			0,5
15-		0,2			0,2
Summa	14,5	51,1	100,9	65,7	232,2