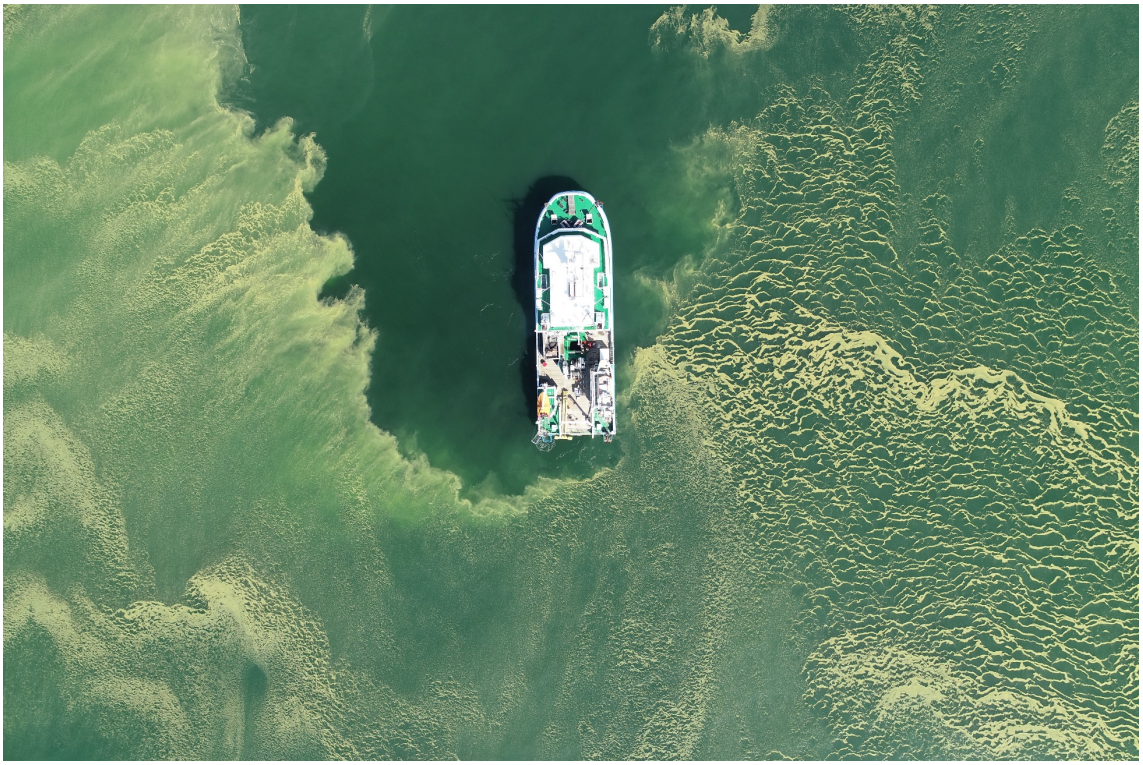
Fosfor och andra grundämnen i kust- och utsjösediment

Sarah Josefsson, Olof Larsson & Oscar Törnqvist

april 2020

SGU-rapport 2020:05

Diarie-nr: 35-1243/2019



SGU Sveriges geologiska undersökning

Havs och Vatten myndigheten

Omslagsbild: Övergödning leder till ökad algblomning, här fotograferad i Östersjön i slutet av juli 2019.
Fotograf: Patrik Rosendal Larsson, SGU

Författare: Sarah Josefsson, Olof Larsson & Oscar Törnqvist
Granskad av: Johan Norrlin
Ansvarig enhetschef: Lovisa Zillén Snowball

Redaktör: Johan Sporrong

Sveriges geologiska undersökning
Box 670, 751 28 Uppsala
tel: 018-17 90 00
e-post: sgu@sgu.se

www.sgu.se

INNEHÅLL

Sammanfattning 5
Abstract 9
Inledning 13
Bakgrund 13
Projektbeskrivning och projektmål 13
Undersökningar och analyser 15
Hydroakustiska mätningar 16
Prover och provtagning 16
Provsättning 16
Provtagning 16
Analyser 20
Syrgashalter 20
Fosfor 21
Totalt organiskt kol och kväve 23
Metaller och andra grundämnen 23
Kornstorleksfördelning 23
Sedimentackumulationshastighet 23
Röntgen 24
Statistik och beräkningar 24
Datatillgänglighet 24
Resultat och diskussion 25
Redoxstatus och sedimentparametrar 25
Syrgashalt och vattendjup 25
Röntgen och laminering 25
Beggiatoa 29
Kornstorleksfördelning 29
Organiskt material 31
Sedimentparametrar och redox 32
Grundämnen 35
Halter och mönster 35
Korrelationer till miljöparametrar 40
Bindning till svavel och organiskt material på anoxiska bottnar 41
Fosfor i sediment 43
Fosforhalter i ytsediment 43

Fosformängder i ytsediment 53
Samvariation mellan fosfor och grundämnen i ytsediment 56
Fosforprofiler i sedimentkärnor 57
Fosfor och kväve i bottenvatten 69
Fosfor 69
Kväve 71
Rumslig prediktion av halter och mängder av fosfor i Östersjön 73
Modelleringsmetod 73
Val av prediktorer 73
Förberedande modellering 73
Förberedande hantering av indata 74
Underlagsmodellernas tillförlitlighet 75
Initial modellering av totalfosfor 76
Modellering av Fe-P, Org-P och Rest-P 77
Modell av mängden reaktiv fosfor 78
Modell av halten fosfatfosfor i bottenvatten 79
Brister och förbättringsmöjligheter 79
Slutsatser 90
Referenslista 92
Bilaga 1. Röntgenbilder och sedimenttyp
Bilaga 2. Analysresultat

SAMMANFATTNING

Bakgrund

Övergödning är ett av de största problemen för Östersjöns miljö. Den orsakas av en för stor tillförsel av näringsämnen, främst på grund av läckage från jordbruksmark och utsläpp från reningsverk och industrier. Övergödningen leder till algblomningar. När dessa sjunker till botten och bryts ned förbrukas syre och det kan bli syrebrist. Följden blir att djur och växter som lever på bottnarna dör, och det bildas döda bottnar. Allt större arealer av Östersjöns bottnar lider nu av syrebrist eller är helt syrefria.

Ett näringsämne som orsakar övergödning är fosfor. Stora mängder fosfor har hamnat i Östersjöns sediment. Därifrån kan den frigöras och åter bidra till övergödning, så kallad intern belastning. Sedimenten, och hur mycket av fosforn som läcker ut och hur mycket som begravs, är därför viktiga för fosforcykeln och problemet med övergödning. Fosfor finns som olika former i sedimentet, där en del former lätt löses upp så att fosforn frigörs igen medan andra är mer stabila. Vissa löses upp när sedimenten blir hypoxiska (syrebrist, $O_2 < 2$ mg/l) eller anoxiska (syrefria), och fosforn kan då läcka ut. Därför kan större mängder fosfor bindas i syresatta sediment.

För att få mer information om olika former av fosfor i sediment i Östersjön, vid olika syreförhållanden, provtog Sveriges geologiska undersökning (SGU) på uppdrag av Havs- och vattenmyndigheten under 2019 sediment öster och väster om Gotland samt i Bråviken. Prover togs längs djupprofiler, från syresatta, grundare bottnar till syrefria, djupare bottnar. Extra fokus lades på övergångszonen eftersom bottnar som periodvis är syrefria, till exempel sommartid, skulle kunna läcka ut mycket fosfor. Förutom fosfor kartlades också halterna av olika förorenande grundämnen, samt halterna av fosfor och kväve i bottenvatten. Fosfor analyserades även i prover från olika nivåer i sedimentet.

Fosforfraktioner

Både totalfosfor och olika fraktioner av fosfor analyserades under projektet. De olika fraktionerna är:

- löst bunden fosfor, till exempel fosfat i sedimentets porvatten.
- järnbunden fosfor (Fe-P). Fe-P är fosfor bundet till oxider/hydroxider av främst järn som löses upp om miljön blir syrefri. Detta inträffar till exempel när sedimentpartiklar begravs allt längre ner i sedimentet.
- aluminiumbunden fosfor (Al-P). Al-P inkluderar fosfor bunden till oxider av aluminium och icke-reducerbart järn, och ska således inte påverkas av varierande syreförhållanden.
- organiskt bunden fosfor (Org-P). Org-P frigörs när det organiska materialet den ingår i bryts ned, och fosforn kan då läcka ut från sedimenten eller bindas som exempelvis Fe-P.
- kalciumbunden fosfor (Ca-P), till exempel sådan bunden i mineral som apatit.
- rest- eller residualfosfor (Rest-P). Detta är det fosfor som inte har kunnat extraheras med fraktioneringsmetoden, det vill säga differensen mellan totalfosfor och de fem fraktionerna ovan. Rest-P kan bestå av organiska fosforformer eller inerta oorganiska fosforformer.

Löst bunden P, Fe-P och Org-P är mer reaktiva/mobila fosforformer som lättare kan frigöras från sedimentet och läcka ut till vattenmassan. Al-P och Ca-P betraktas däremot som stabila fosforformer i sediment. Rest-P är stabil om den består av inerta oorganiska former, men det kan också vara en reaktiv fosforform om den innehåller fosfor bundet till organiskt material som kan brytas ned.

Resultat och slutsatser

Fosforhalter i ytsediment

De högsta halterna av totalfosfor i ytsedimentet (0–2 cm) förekommer i Bråviken där det finns ackumulationsbottnar med syresatt, finkornigt sediment. De lägsta halterna förekommer också i syresatta sediment, men på grunda lokaler i utsjön. Där är sedimentet ofta mer grovkornigt och bottnarna kan klassas som erosions- eller transportbottnar. Halterna av totalfosfor i ytsediment på syrefria lokaler i utsjön, det vill säga lokaler på djupare bottnar, är ibland i samma nivå som halterna i Bråviken. Halterna är högre på de syrefria bottnarna än på hypoxiska eller syresatta bottnar i utsjöområdena. Det finns därför inga tecken på att halterna av totalfosfor skulle vara förhöjda i övergångszonen i utsjön.

Av de olika fosforfraktionerna utgör löst bunden fosfor och Al-P försumbara andelar av totalfosfor, som ett medel för de 67 provtagna lokalerna. Den största andelen utgör Ca-P följt av Org-P, Rest-P och Fe-P. Ca-P har relativt jämna halter mellan lokalerna, medan Fe-P, Org-P och Rest-P varierar kraftigt.

Ett tydligt resultat av undersökningen är att fraktionen järnbunden fosfor, Fe-P, endast är viktig i Bråviken och på lokalen närmast kusten på transekten mellan fastlandet och Gotland. För övriga lokaler, även utsjölokaler med syresatt sediment, är halterna och andelen som Fe-P utgör av totalfosfor låga. Detta är kopplat till lägre halter järn i sedimentet på dessa lokaler, och beror troligtvis på att mängden järn som är tillgängligt för att binda fosfor är begränsad. Resultaten från den här undersökningen pekar alltså på att för att kunna binda fosfor som Fe-P krävs inte bara syresatta förhållanden utan även tillräckligt med järn som kan bilda oxider/hydroxider.

På utsjölokalerna dominerar halterna av Org-P och Rest-P. Dessa två fraktioner samvarierar och båda har högre halter på anoxiska lokaler, vilket är rimligt eftersom det där finns högre halter organiskt material. Att även Rest-P är kopplat till innehållet av organiskt material i sedimentet visar att det är en fraktion som till stor del består av organiskt bunden fosfor på de lokaler som provtagits i denna undersökning.

Fosformängder i ytsediment

Halterna av fosfor är, som nämnts, högst i syresatta sediment i Bråviken och i anoxiska utsjösediment, vilket förklaras av höga halter Fe-P i Bråviken och höga halter Org-P och Rest-P i anoxiska utsjösediment. Mängderna, uttryckt per ytenhet sediment (g/m^2), är emellertid alltid högre i Bråviken och i kustnära utsjösediment. Orsaken till detta är att sedimentet på de anoxiska utsjölokalerna innehåller mer vatten och färre partiklar, vilket gör att höga halter per partikel ändå inte blir en stor mängd per ytenhet. De minsta mängderna totalfosfor förekommer därför på anoxiska bottnar. De hypoxiska bottnarna har mängder som är mer lika de anoxiska än de syresatta bottnarna, och det förekommer alltså inte förhöjda mängder i sedimentet i denna övergångszon. De viktigaste fraktionerna för mängden fosfor per ytenhet på syresatta bottnar (främst Bråviken) är Fe-P, Ca-P, Org-P och Al-P, och på anoxiska och hypoxiska bottnar Org-P, Rest-P och Ca-P.

Fosforprofiler i sedimentkärnor

Fosforhalterna brukar vara högre i sedimentets ytlager och avta nedåt på grund av att fosforföreningar bryts ned och fosfor frigörs till vattenmassan. Halterna stabiliseras då vid en så kallad bakgrunds- eller begravningshalt. Skillnaden mellan halterna i ytlagret och de stabiliserade lägre halterna längre ner i sedimentet utgör således den potentiellt remobiliserbara fosforn, det vill säga den fosfor som med tiden kan frigöras och läcka ut till vattenmassan.

I Bråviken har alla lokaler liknande profiler med höga halter totalfosfor vid sedimentytan som sedan hastigt avklingar nedåt. Detta förklaras av höga halter Fe-P vid ytan då sedimentet på alla dessa lokaler har en syresatt yta och även höga halter järn i sedimentet. Även Org-P har något högre halter vid sedimentytan än längre ner, vilket visar att den bryts ned med tiden och kan frigöra fosfor, men skillnaden är liten i jämförelse med haltförändringen för Fe-P. Ca-P förekommer i liknande halter längs hela sedimentkärnan, i kärnor från alla lokaler, vilket visar att denna fraktion är stabil. Längre ner i sedimentet blir det också den dominerande fraktionen på alla lokaler.

I området väster och öster om Gotland är halterna av totalfosfor också högst vid ytan och stabiliseras längre ner i sedimenten, men vid en något lägre halt än i Bråviken. Halterna är dessutom inte lika markant förhöjda vid sedimentytan som i Bråviken, vilket visar att det finns mindre potentiellt remobiliserbar fosfor. Detta beror på att fraktionen Fe-P inte är så framträdande. Istället är Ca-P den dominerande fosforfraktionen genom hela sedimentprofilen på de mest kustnära lokalerna. Det är först längre ut från kusten, där halten organiskt material i sedimentet är högre, som Org-P (följt av Rest-P) blir den dominerande fraktionen i ytlagren. Den bryts dock ned och minskar i halt längre nedåt i sedimentet. Eftersom den organiskt bundna fosforn är en viktig reaktiv fraktion på de anoxiska bottnarna har den ett stort inflytande på hur mycket fosfor som frigörs, och mer information om nedbrytningshastigheten av olika typer av organiskt material under olika syreförhållanden skulle behövas.

Öster om Gotland har de grundaste lokalerna totalfosforprofiler som skiljer sig från övriga undersökta lokaler. Halterna i ytsedimentet är låga, minskar ytterligare nedåt från ytsedimentet till ett minimum, varefter halterna långsamt stiger för att nå högre halter längre ner i sedimentet än i ytlagret. På dessa lokaler dominerar Ca-P.

Fosfor och kväve i bottenvatten

Bottenvattnet provtogs cirka 0,5 m ovanför sedimentytan och analyserades för bland annat fosfatfosfor och ammoniumkväve som fanns löst i vattnet. Halterna av fosfatfosfor var signifikant högre i anoxiska och hypoxiska bottenvatten än vid syresatta bottnar. Det fanns alltså ett tydligt samband mellan låga halter av fosfatfosfor och höga syrgashalter i bottenvattnet, och vice versa. Om man jämför mellan anoxiska och hypoxiska bottnar var halterna signifikant högre vid de anoxiska. Det förekom alltså inte högre halter av fosfatfosfor i vattenmassan ovanför hypoxiska bottnar, vilket i så fall skulle ha kunnat tyda på ökat utflöde av fosfor från dessa. Halterna av löst ammoniumkväve är, liksom fosfathalterna, signifikant högre i bottenvattnet på de anoxiska och hypoxiska lokalerna är på de syresatta lokalerna.

Andra förorenade grundämnen i sedimentet

Även andra grundämnen än fosfor har undersökts på alla lokaler som har provtagits, och det är tydligt att olika ämnen har olika fördelningsmönster i förhållande till syrgashalterna. Grundämnen med högre halter i syrefritt än i syresatt sediment är kadmium, koppar, nickel, zink och arsenik. Detta beror främst på att de bildar eller binder till sulfider i anoxiskt sediment. Även kvicksilver binds som sulfid i anoxiskt sediment, men halterna är förhöjda även i det syresatta sedimentet i Bråviken. Detta tyder på inflytande från lokala källor eller avrinning. Andra undersökta ämnen, som aluminium, järn, mangan, litium och krom, förekommer istället i högre halter i Bråviken och på lokalen som är närmast fastlandet väster om Gotland.

Av de analyserade ämnena är kadmium klassat som ett prioämne enligt EU:s vattendirektiv, och det överskrider sitt gränsvärde i sediment på 21 av 67 lokaler. Det är problematiskt att kadmium så ofta förekommer i halter som överskrider gränsvärdet, men eftersom detta främst är fallet i syrefria sediment innebär det att det inte förekommer någon makrofauna i sedimentet som kan påverkas negativt av de höga kadmiumhalterna. Den omfattande förekomsten av syrefria bottnar

utan liv är således det övergripande problemet. Även bly är klassat som ett prioämne, men överskrider inte sitt gränsvärde på någon av lokalerna. Koppar är klassat som ett särskilt förorenande ämne, och överskrider sin bedömningsgrund på tre av lokalerna.

Rumslig modellering

Ett syfte med projektet var att undersöka samband mellan fosfor och parametrar som till exempel syre-förhållanden, och sedan använda dessa samband för att via rumslig modellering producera utbredningskartor över fosfor. I modelleringsarbetet gjordes först modeller för sediment-ackumulationshastighet, syreförhållanden vid botten, järn i sediment och organiskt material i sediment, som var viktiga underlag för det fortsatta arbetet. Sedan modellerades mängden av de tre reaktiva fosforfraktionerna Fe-P, Org-P och Rest-P, i ytsediment i Östersjön. Av dessa hade modellerna för Fe-P och Org-P hög förklaringsgrad och lågt medelfel, och är användbara relativt, det vill säga man ska inte förlita sig på modellens absoluta värden. Modellen för Rest-P var något sämre och behöver utvecklas ytterligare.

Modellerna har stor potential, och framtida arbete som behöver göras för att förbättra modellerna är: att komplettera med ytterligare dataset med information om fosfor, organisk halt och järn i sediment; ta fram säkrare data för så kallade nollvärden för exempelvis sedimentackumulation (det vill säga göra mätningar även på ställen där man inte förväntar sig positiva resultat, för att få bekräftade nollvärden); och gå igenom varje provtagen lokals fosforprofil i sedimentet för att bestämma den stabila halten längre ner i sedimentprofilen, detta för att kunna avgöra mängden remobiliserbar fosfor och hur mycket som begravs på sikt.

Ytterligare framtida arbete har identifierats genom den rumsliga prediktionen, bland annat behovet att provta i områden där prover i stor utsträckning saknas i nuläget, och att få bättre kunskap om miljöparametrar som styr fosforförekomsterna, till exempel sedimentackumulations-hastigheten. För att få allt bättre modeller över fosfor i Östersjön, som underlag till åtgärder, behöver således inte bara kunskap om fosfor utan även om andra miljöparametrar förbättras.

ABSTRACT

Background

Eutrophication is one of the major environmental problems in the Baltic Sea. It is caused by an excessive supply of nutrients, mainly due to leaching from agriculture and emissions from waste-water treatment plants and industries. Eutrophication leads to algal blooms. When these sink to the bottom and break down, oxygen is consumed. If oxygen is depleted, animals and plants die, leading to the formation of dead zones. Increasingly large areas of the Baltic Sea are now suffering from low levels or a total depletion of oxygen.

One nutrient that causes eutrophication is phosphorus. Large amounts of phosphorus have ended up in the sediments of the Baltic Sea. From there it can be released and once again contribute to eutrophication, so-called internal load. The sediment, and to what extent the phosphorus is re-mobilised or buried, is therefore very important for the phosphorus cycle and the problem of eutrophication. Phosphorus exists as different forms in the sediment, where some forms are easily dissolved so that the phosphorus is released while others are more stable. Some forms dissolve when the sediment becomes hypoxic (oxygen deficiency, $O_2 < 2$ mg/l) or anoxic (totally depleted in oxygen), and as a result, the phosphorus leaches from the sediment. Therefore, larger amounts of phosphorus can be bound in oxygenated sediments.

To obtain more information about different forms of phosphorus in sediments in the Baltic Sea, under different oxygen conditions, the Swedish Geological Survey (SGU) on behalf of the Swedish Agency for Marine and Water Management sampled sediments east and west of Gotland and in the bay Bråviken during 2019. Samples were taken along depth profiles, from oxygenated, shallower bottoms to anoxic, deeper bottoms. Extra focus was placed on the transition zone, as sediments that are periodically oxygen-free, for example during the summer, could potentially release large amounts of phosphorus. In addition to phosphorus, various polluting metals and other elements were also analysed in the sediment, as well as phosphorus and nitrogen in bottom water. Phosphorus was also analysed in samples from different levels in sediment cores.

Phosphorus fractions

Both total phosphorus and various phosphorus fractions were analysed during the project. The different fractions are:

- loosely bound phosphorus, e.g. phosphate in the pore water of the sediment.
- iron-bound phosphorus (Fe-P). Fe-P is phosphorus bound to oxides/hydroxides of mainly iron which dissolve if the environment becomes depleted in oxygen. This occurs, for example, when sediment particles are buried further down in the sediment.
- aluminium-bound phosphorus (Al-P). Al-P includes phosphorus bound to oxides of aluminium and non-reducible iron, and it should therefore not be affected by varying oxygen conditions.
- organic phosphorus forms (Org-P). Org-P is released when the organic material is degraded. The phosphorus can then leach from the sediment or be bound as other forms, e.g. Fe-P.
- calcium-bound phosphorus (Ca-P), for example, bound in minerals such as apatite.
- residual phosphorus (Res-P). This is the phosphorus that could not be extracted by the fractionation method, i.e. the difference between total phosphorus and the five fractions above. Res-P may consist of organic phosphorus forms or inert inorganic phosphorus.

Loosely bound P, Fe-P and Org-P are more reactive/mobile phosphorus forms, that are released more easily from the sediment. Al-P and Ca-P, on the other hand, are considered as stable phosphorus forms. Res-P is stable if it consists of inert inorganic forms, but it can also be a reactive phosphorus form if it contains phosphorus bound to organic matter that can be degraded.

Results and conclusions

Phosphorus levels in surface sediments

The highest levels of total phosphorus in the surface sediment (0–2 cm) occur in Bråviken, where there are accumulation bottoms with oxygenated, fine-grained sediment. The lowest levels also occur in oxygenated sediments, but on shallow offshore stations. The sediments there are often more coarse-grained and can be classified as erosion or transport bottoms. The levels of total phosphorus in surface sediment on anoxic offshore stations, that is, on deeper bottoms, are sometimes equal to the levels in Bråviken. In the offshore areas, levels are higher in anoxic than in hypoxic or oxygenated sediment. Therefore, there is no indication that total phosphorus levels would be elevated in the transition zone.

Of the phosphorus fractions, loosely bound P and Al-P constitute negligible parts of the total phosphorus content, as a mean for the 67 sampled stations. Ca-P constitutes the largest part, followed by Org-P, Res-P and Fe-P. Ca-P has relatively uniform levels between the stations, while Fe-P, Org-P and Res-P vary greatly.

A clear result is that iron-bound phosphorus, Fe-P, is only important in Bråviken and on the station closest to the coast on the transect between the mainland and the island of Gotland. For other stations, including oxygenated offshore sediments, the levels of Fe-P are low, and it constitutes a very small part of the total phosphorus. This is linked to lower levels of iron in the sediment at these sites and is probably due to the limited levels of iron available to bind phosphorus. The results of this study thus indicate that to be able to bind phosphorus as Fe-P, not only oxygenated conditions are needed, but also enough iron that can form oxides/hydroxides.

Org-P and Res-P dominate in levels at anoxic offshore stations. These two fractions co-vary, and both have higher levels at anoxic stations, which is expected as these stations contain higher levels of organic matter. The fact that also Res-P is linked to the content of organic matter in the sediment shows that it is a fraction that largely consists of organic phosphorus at the stations investigated in this study.

Amounts of phosphorus in surface sediments

Phosphorus levels are, as already mentioned, highest in oxygenated sediments in Bråviken and in anoxic offshore sediments, which is explained by high levels of Fe-P in Bråviken and high levels of Org-P and Res-P at anoxic stations. However, the quantities, expressed per unit area of sediment (g/m^2), are always higher in Bråviken and in coastal nearshore sediments. The reason for this is that the sediments at the anoxic stations contain more water and less particles, which means that high levels of phosphorus per particle do not correspond to large amounts. Therefore, the smallest amounts of total phosphorus are found on anoxic stations. The hypoxic stations have amounts that are more similar to the anoxic than the oxygenated stations, and thus there are no indications of elevated amounts in the sediment in the transition zone. The most important fractions for the amount of phosphorus in oxygenated sediments (mainly Bråviken) are Fe-P, Ca-P, Org-P and Al-P, and in anoxic and hypoxic sediments Org-P, Res-P and Ca-P.

Phosphorus profiles in sediment cores

Phosphorus levels tend to be higher in the surface layer of sediment and decrease downwards, due to phosphorus compounds becoming degraded and releasing phosphorus that can reach the water column. The phosphorus in the sediment are thus stabilized at a so-called background or burial level further down in the core. Thus, the difference between the levels in the surface layer and the stabilized lower levels further down the sediment constitutes the potentially mobilizable phosphorus, i.e. the phosphorus which over time can be released back into the water column.

In Bråviken, all stations have similar profiles with high levels of total phosphorus at the sediment surface which then rapidly decay downwards. This is explained by high Fe-P levels in the surface sediments as all the stations in Bråviken have oxygenated surface sediments and high levels of iron in the sediment. Org-P also occurs in slightly higher levels in the surface sediment compared to further down, which shows that it decomposes over time and can release phosphorus, but the difference is small compared to the change in levels of Fe-P. Ca-P occurs at similar levels along the entire sediment core, for cores from all stations, showing that this fraction is stable. Further down in the sediment, it will also become the dominant fraction at all stations.

In the area west and east of Gotland, the total phosphorus levels are also highest in the surface sediments and are stabilised further down in the sediment, but at a somewhat lower level than in Bråviken. Moreover, the levels are not as significantly elevated in the surface sediments as in Bråviken, which shows that there is less potentially mobilizable phosphorus. This is because Fe-P is not a prominent fraction. Instead, Ca-P is the dominant fraction throughout the sediment profile at most coastal stations. It is only further out from the coast, where the content of organic matter in the sediment is higher, that Org-P (followed by Res-P) becomes the dominant fraction in the surface layers. However, it is degraded and decreases in levels further down in the sediment cores. Since the organic phosphorus is an important reactive fraction in anoxic sediments, it has a major influence on how much phosphorus that is released from the sediment. More information on the degradation rate of different types of organic matter under different oxygen conditions is therefore needed.

The shallowest stations to the east of Gotland have total phosphorus profiles that differ from other investigated stations. The levels in the surface sediment are low, decrease downwards from the surface sediment to a minimum, after which the levels slowly rise and become higher further down in the sediment than they are in the surface layer. At all these stations, Ca-P is the dominant fraction.

Phosphorus and nitrogen in bottom water

The bottom water was sampled approximately 0.5 m above the sediment surface and analysed for, among other things, phosphate-phosphorus and ammonium nitrogen which were dissolved in the water. Phosphate phosphorus levels were significantly higher in anoxic and hypoxic bottom waters than in oxygenated bottoms waters. Thus, there was a clear correlation between low levels of phosphate phosphorus and high oxygen levels, and vice versa. When comparing anoxic and hypoxic sediments, the levels were significantly higher at anoxic stations. Thus, there were no indications of higher levels of phosphate phosphorus in the bottom water in hypoxic zones, which in that case could have indicated increased phosphorus fluxes from these sediments. The dissolved ammonium nitrogen levels, like the phosphate levels, are significantly higher in the bottom water at the anoxic and hypoxic stations than at the oxygenated stations.

Other polluting elements in sediments

Elements other than phosphorus have also been investigated at all stations, and it is obvious that different substances have different distribution patterns in relation to oxygen levels. Elements with higher levels in anoxic than in oxygenated sediment are cadmium, copper, nickel, zinc and

arsenic. This is mainly because they form or bind to sulphides in anoxic sediment. Mercury is also bound as a sulphide in anoxic sediment, but the levels are also elevated in the oxygenated sediment in Bråviken. This indicates influence from local sources or runoff. Other investigated substances, such as aluminium, iron, manganese, lithium and chromium, occur in higher levels in Bråviken and at the station closest to the mainland west of Gotland.

Of the analysed substances, cadmium is classified as a priority substance according to the EU Water Directive, and it exceeds its limit value in sediment on 21 of 67 stations. It is problematic that cadmium is so often found in levels that exceed the limit value, but since this is mainly occurring in anoxic sediments, there is no macrofauna in the sediment that can be adversely affected by the high cadmium levels. Thus, the widespread occurrence of anoxic dead zones without life is the overall problem. Lead is also classified as a priority substance but does not exceed its limit value on any of the premises. Copper is classified as a hazardous substance of national concern and exceeds its guidance value on three of the sampled stations.

Spatial modelling

One purpose of the project was to investigate the relationship between phosphorus and parameters such as e.g. oxygen conditions, and then use these relationships in spatial modelling to produce phosphorus distribution maps. Models were first made for sediment accumulation rate, oxygen conditions at the sediment surface, iron in sediment and organic matter in sediment, which was an important basis for the continuation of the modelling. Then, the amount of the three reactive phosphorus fractions Fe-P, Org-P and Res-P in surface sediments in the Baltic Sea was modeled. Of these, the models for Fe-P and Org-P had high explanatory power and low mean error, and they are thus usable for relative evaluations, i.e. one should not rely on the absolute values of the model. The model for Res-P was somewhat less good and needs further development.

The models have great potential, and future work that needs to be done to improve the models is: to include additional datasets with information on phosphorus, organic content and iron in sediments; to generate more reliable data for so-called zero values for, e.g., sediment accumulation rates (i.e. make measurements even in places where no positive results are expected, to get confirmed zero values); and review the phosphorus profiles in each sediment core to determine the stable content further down in the sediment, in order to determine the amount of mobilizable phosphorus and how much phosphorus that is buried.

Further future work has been identified through the spatial modelling, including the need to sample in areas where samples are largely lacking at the moment, and to gain better knowledge of environmental parameters controlling phosphorus deposits, e.g. sediment accumulation rates. Thus, in order to obtain increasingly better models of phosphorus in the Baltic Sea, as a basis for measures, not only knowledge of phosphorus but also of other environmental parameters need to be improved.

INLEDNING

Bakgrund

Övergödning orsakad av för stor tillförsel av näringsämnen är ett av de största problemen för Östersjöns miljö. En mindre del av de näringsämnen som tillförs Östersjön varje år härrör från naturliga källor men den största delen är antropogent orsakad. Framförallt kommer näringsämnena som läckage från jordbruksmark samt utsläpp från reningsverk och industrier. Övergödningen gynnar främst växtplankton och fintrådiga alger och skapar återkommande algblomningar av cyanobakterier under sommaren. När dessa dör sjunker de till botten där de bryts ned, och vid nedbrytningen förbrukas syre. När stora mängder organiskt material bryts ner kommer allt syre att förbrukas, och djur och växter som lever på dessa bottnar dör. Övergödningen leder alltså till döda bottnar utan liv.

Övergödningen gör att stora bottenarealer i Östersjön nu lider av syrebrist. Gränsen för hypoxi, det vill säga syrebrist, har definierats till 2 mg O_2/l även om de flesta marina arter påverkas negativt redan vid syrgashalter ovanför detta värde (Vaquer-Sunyer & Duarter 2008). Anoxi, det vill säga syrefria förhållanden, inträffar när det inte längre finns något syre tillgängligt. Även innan Östersjön påverkades av antropogena utsläpp har det funnits bottenområden med syrebrist som en följd av Östersjöns morfologi, stratifierade vattenmassor och begränsade vattenutbyte med Atlanten (Zillén m.fl. 2008). Arealen bottnar som är hypoxiska eller anoxiska har dock ökat markant under det senaste halvseklet (SMHI 2018).

Fosfor har släppts ut under en lång tid, och stora mängder har hamnat i Östersjöns sediment. Därifrån kan fosforn återcirkulera och vara en bidragande orsak till övergödning, så kallad intern belastning. För närvarande finns det en begränsad mängd data om fosfor från provtagning i sediment i Östersjön, och inte minst en brist på data om olika former av fosfor vid varierande syreförhållanden i sedimentet. En undersökning av geokemiska parametrar i sediment längs gradienter (djup och redoxförhållanden, det vill säga om det är syresatt, syrebrist eller syrefritt) på havsbotten kommer därför att ge värdefull kunskap om halter, mängder och tillgängligheten av fosfor i sediment i Östersjön.

Fosfor anses läcka ut från sediment till vattenmassan under anoxiska och hypoxiska förhållanden, då redoxkänsliga föreningar med fosfor i sedimentet löses upp och fosforn blir tillgänglig. Det kan därför antas att sediment som är under ständig anoxi/hypoxi innehåller låga halter reaktivt fosfor, medan ackumulationsbottnar som är syresatta (O_2 > 2 mg/l) kan innehålla högre halter reaktivt fosfor. Bottnar som periodvis är syrefria, vanligtvis sommartid, är därför av extra intresse då dessa områden kan löpa stor risk för fosforläckage.

Projektbeskrivning och projektmål

Detta projekt har som syften att:

(a) försöka fastslå samband mellan förekomst och tillgänglighet av fosfor och bottenparametrar (bland annat syreförhållanden, djup och substrattyp), samt
(b) använda dessa samband i ett försök att via rumslig modellering producera utbredningskartor över fosfor samt en grov skattning av potentiell internbelastning, i form av reaktiv fosfor.

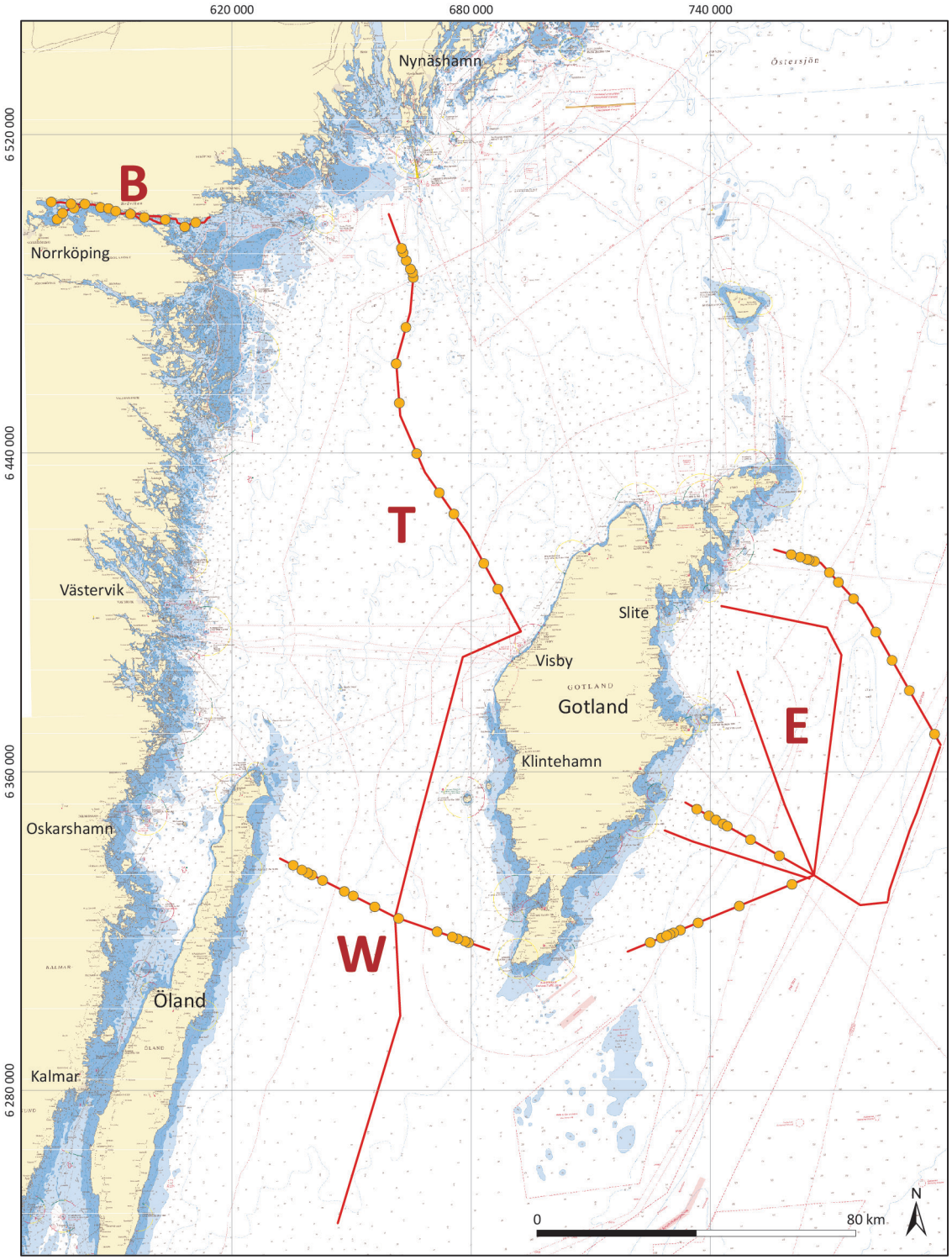
Undersökningarna genomförs i utsjön, vid kusten och längs en transekt från kust till utsjö. Detta möjliggör jämförelser mellan förhållandena i kustzonen och i utsjön. Fokus är att undersöka bottnar längs gradienter av syreförhållanden och djup, vilka är kopplade då anoxi/hypoxi i regel ökar med djupet. Prover tas därför längs djupprofiler, från syresatt till syrefri botten. Av olika

substrattyper bedöms postglacial lera vara mest relevant för potentiellt fosforläckage, men ett mindre antal prover tas i andra bottentyper.

Projektet har också som syfte att kartlägga halter av olika miljöföroreningar. Resultaten från undersökningarna av förorenande grundämnen redovisas i denna rapport medan organiska föroreningar kommer att redovisas i en separat rapport. Projektet har finansierats av Havs- och vattenmyndigheten (diarienummer 1817-2019) med samfinansiering från Sveriges geologiska undersökning (SGU).

UNDERSÖKNINGAR OCH ANALYSER

Fältundersökningarna genomfördes under juni–september 2019 med SGUs fartyg Ocean Surveyor. Undersökningarna delades in i fyra olika områden: B, T, W och E (fig. 1). Efter mätning av havsbotten provtogs sedimentet och proverna analyserades dels ombord på fartyget, dels på olika laboratorier, under sommar/höst/vinter 2019–2020.



Figur 1. Karta över de fyra undersökningsområdena och dess mätlinjer. De gula punkterna är provlokaler, se figur 2 och tabell 2 för mer information.

Hydroakustiska mätningar

Undersökningarna inleddes med hydroakustiska mätningar. Dessa är viktiga för att inför provtagningen få kunskap om bottnens uppbyggnad och sammansättning. Med stöd av denna kunskap kan provlokalerna placeras optimalt för att nå önskat syfte. I de fyra undersökningsområdena lades totalt 14 mätlinjer ut som mättes hydroakustiskt med både multibeamekolod och sedimentekolod (fig. 1). I områdena öster och väster om Gotland utgår linjerna från en nodpunkt placerad på områdets djupaste del. Från denna nodpunkt går sedan flera mätlinjer upp mot grundare områden. Multibeamekolodet ger en tredimensionell bild av havsbotten utefter mätlinjen. Från samma instrument erhålls också en backscatterbild som visar bottenytans hårdhet och ojämnhet. Sedimentekolodet ger en vertikal sektion som visar havsbottens uppbyggnad rakt under båten, från bottenytan och ner genom sedimentlagren tills signalen släcks ut mot morän eller berggrund.

De tre hydroakustiska underlagen användes som stöd för att placera provlokalerna på lämpliga bottnar. Totalt provtogs sju mätlinjer: tre i området öster om Gotland (E), två i området väster om Gotland (W), transekten mellan fastlandet och Gotland (område T) samt Bråviken (område B), se figur 1 och 2.

Prover och provtagning

Provsättning

Målet var att provta utefter hela mätlinjernas längd men placera proverna tätare i övergångszonen där det sker en övergång från anoxiska förhållanden på djupare vatten till syresatta förhållanden på grundare vatten. För att kunna göra det behövdes kännedom om på vilket djup övergångszonen befann sig på när provtagningarna började. Med hjälp av SMHIs regelbundet återkommande syrgasmätningar togs ett GIS-skikt fram som visade skillnaden mellan de bästa vintervärdena och de sämsta sommarvärdena de senaste åren. Detta gav en zon, parallellt med Ölands och Gotlands kust, belägen på mellan 75 och 80 m vattendjup. Detta testades med syrgasmätningar i bottenvattnet vid det angivna djupintervallet på tre av mätlinjerna. Efter att ha fångat in övergången från syresatt via syrefattigt till syrefritt placerades provlokalerna ut, enligt provtagningsstrategin med prover utefter hela mätlinjen men tätare vid övergångszonen (fig. 2 och tabell 1).

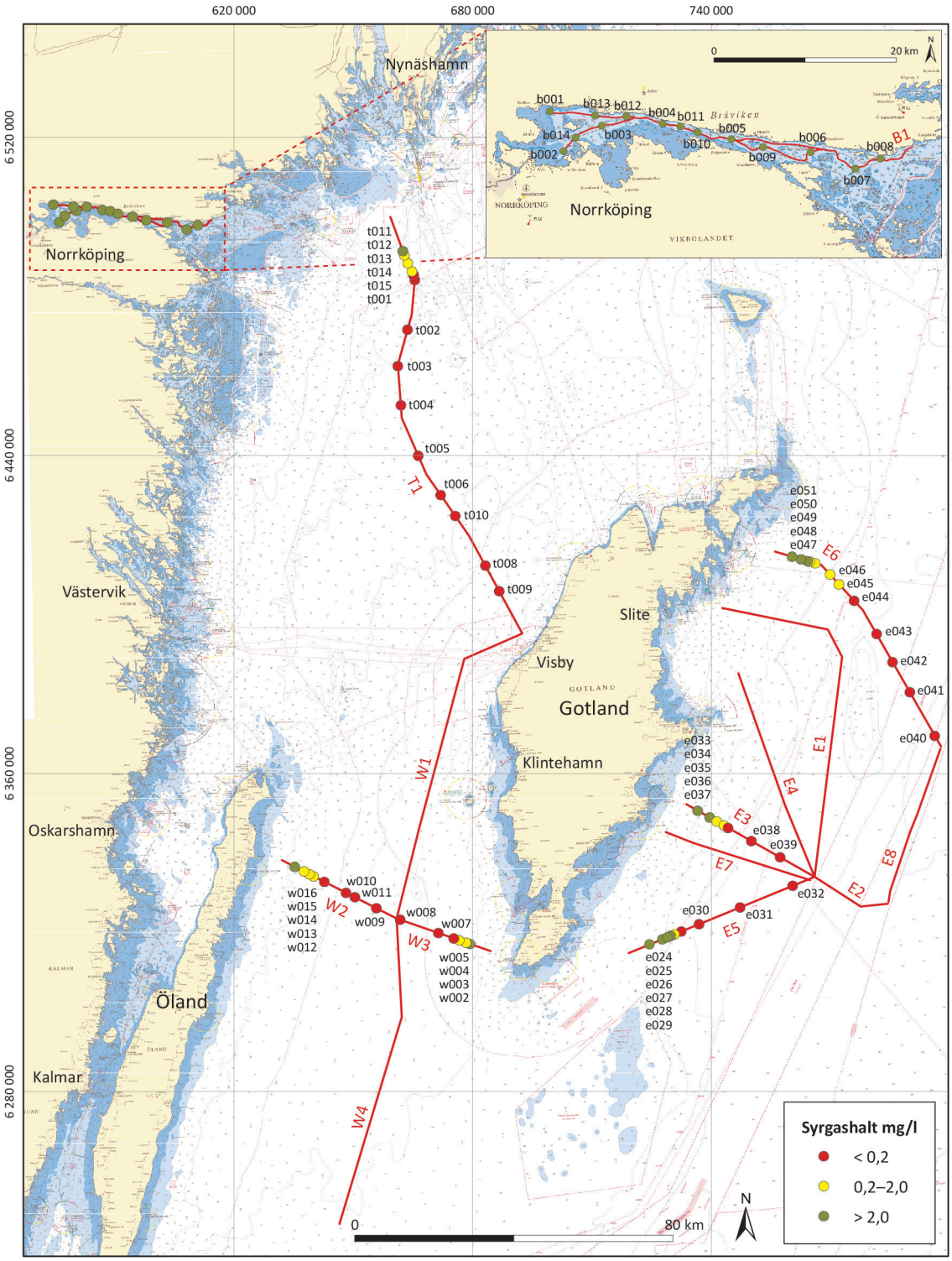
Provtagning

Totalt provtogs 70 lokaler i de fyra områdena (se fig. 1 och 2). Av dessa var det tre lokaler vi efter de inledande proverna, undervattensobservation och stötlod, valde att inte gå vidare med då bottenmaterialet bedömdes vara för grovt för att vara lämpligt att provta. Av de återstående 67 lokalerna var en lokal (b014) ett triplikat, det vill säga provserien upprepades tre gånger på samma plats, och på ytterligare en lokal (e037) togs triplikat av vattenprover.

Följande typer av prover togs:

- **Vattenprov**. Det första prov som togs vid varje lokal var av bottenvattnet. Ruttnerhämtaren var monterad på kameraburen som hängde strax över bottenytan när vattenprovet togs. Anledningen var för att undvika att virvla upp lösa bottensediment. Provet togs således på cirka 0,5 m höjd ovanför sedimentytan; höjden varierade beroende på hur god sikten var och hur strömt det var. Vattnet filtrerades genom 0,45 µm membranfilter innan infrysning.
- **Undervattensobservation: kamera och sensorer**. Efter att vattenprovet tagits om hand sänktes kameraburen åter ner och ställdes på sedimentytan. Området filmades och fotograferades medan sensorer monterade på kameraburen samlade in data (tryck, salthalt, temperatur, strömstyrka och -riktning samt syrgashalt).

- **Stötlod**. Det första sedimentprovet som togs var en upp till 1 m lång sedimentkärna med hjälp av ett så kallat stötlod. Detta gjordes för att få en kärna att fotografera och beskriva geologiskt. Utifrån detta bestämdes det om lokalen var lämplig att gå vidare med provtagning på.
- **Fosfor**. Fosforprovet och alla resterande prover togs med en så kallad GEMAX-provtagare, som provtar upp till 70 cm långa sedimentkärnor. Totalt togs prov ut på 14 nivåer i kärnorna tagna i utsjön och på 20 nivåer i Bråviken, varav 11 respektive 16 analyserades för fosfor (se tabell 2). Prover från nivåer som skulle fosforfraktioneras kylförvarades medan prover från nivåer som enbart skulle analyseras för totalfosfor frysförvarades.
- **Kornstorleksfördelning**. Prov togs på sedimentnivån 0–6 cm och förvarades i plastpåse till analys. Totalt analyserades 12 prover för kornstorleksfördelning, se tabell 1.
- **Cs-137/Pb-210**. För dessa prover snittades en sedimentkärna i encentimetersskikt ner till 30 cm, sedan togs ett encentimetersskikt var femte centimeter. Dessa prover togs på ett urval lokaler (se tabell 1) för att bestämma sedimentationshastigheten i de olika områdena. Proverna analyserades först för Cs-137 ombord på fartyget. Utifrån resultatet skickades ett antal prover sedan iväg för analys av Pb-210.
- **Röntgen**. En sedimentkärna från varje lokal röntgades ombord på fartyget. Vid sulfidsvarta sediment är det ofta svårt att med blotta ögat avgöra om en kärna är bioturberad eller laminerad. Dessa iakttagelser ger information om hur redoxförhållandena har varierat över tiden. Att sedimentet är bioturberat innebär att det har rörts om av organismer, vilket visar att det har varit syresatt. Att det är laminerat innebär att det har tydliga tunna lager, vilket indikerar att det inte har rörts om, något som pekar på att det har varit syrebrist.
- **TOC**. Prov togs på varje lokal för att analysera halten av organiskt kol i ytsedimenten. Provnivån var 0–2 cm i sedimentet.
- **Grundämnen**. Prov togs på varje lokal för att analysera halten av grundämnen i ytsedimenten. Provnivån var 0–2 cm i sedimentet.



Figur 2. Karta över mätlinjer och dess provpunkter. Provlokalernas färgmarkering anger vilken syrgashalt i mg/l som rådde vid provtillfället. Syrgassensorn är monterad på UV-kamerans ena ben och befinner sig cirka 0,5 m över bottenytan när kameraburen har landat på bottenytan.

Tabell 1. Provtagningslogg. På lokalerna e024, e051 och w016 påbörjades provtagningen men avbröts efter att stötlodet var taget då lokalen bedömdes som olämplig. Anledningen var att det var tydliga erosionsbottnar, med bara ett tunt lager grusig-sandig residual på glacial lera. Prov för fosfor i vatten och sediment, röntgen, TOC och metaller togs på alla lokaler, medan prover för kornstorleksfördelning och Cs-137/Pb-210 togs på ett urval av lokaler vilket redovisas med ett kryss respektive Cs eller Pb i tabellen. Parentesen runt Pb indikerar att mätningarna inte är slutförda eller att provet inte gav resultat som kan omsättas i en sedimentackumulationshastighet. Närvaron av den svaveloxiderande bakterien *Beggiatoa* på lokalerna, utifrån vad som har kunnat observerats på undervattensfoton, har markerats med ett kryss. Lokalernas koordinater finns i tabell 3 i bilaga 2.

Område	Mätlinje	Provlokal	Provtagnings-datum	Vattendjup (m)	Syrgashalt (mg/l)	Beggiatoa	Kornstorleks-fördelning	Cs-137/ Pb-210
E	e5	e024	2019-06-04	49	10,6	-	-	-
E	e5	e025	2019-06-04	59	9,7	-	x	(Pb)
E	e5	e026	2019-06-05	65	4,6	-	-	-
E	e5	e027	2019-06-05	69	3,3	x	-	-
E	e5	e028	2019-06-05	74	1,4	x	x	-
E	e5	e029	2019-06-06	87	0,1	-	x	-
E	e5	e030	2019-06-06	118	0,1	-	-	Pb
E	e5	e031	2019-06-07	144	0,1	-	x	-
E	e5	e032	2019-06-07	173	0,1	-	x	Cs
E	e3	e033	2019-07-08	55	10,0	-	x	-
E	e3	e034	2019-06-25	66	4,0	-	-	-
E	e3	e035	2019-06-09	73	0,6	x	-	-
E	e3	e036	2019-06-10	78	0,4	x	-	-
E	e3	e037	2019-06-08	82	0,1	-	-	(Pb)
E	e3	e038	2019-06-08	118	0,1	-	-	Pb
E	e3	e039	2019-06-08	155	0,1	-	-	-
E	e6	e040	2019-07-24	210	0,1	-	-	-
E	e6	e041	2019-07-24	156	0,1	-	-	Cs, Pb
E	e6	e042	2019-07-25	127	0,1	-	-	-
E	e6	e043	2019-07-25	116	0,1	-	-	-
E	e6	e044	2019-07-25	96	0,1	-	-	-
E	e6	e045	2019-07-25	95	0,3	-	-	Cs, (Pb)
E	e6	e046	2019-07-26	91	0,3	-	-	-
E	e6	e047	2019-07-26	79	0,4	x	-	-
E	e6	e048	2019-07-06	72	0,4	x	-	-
E	e6	e049	2019-07-06	68	3,6	x	-	-
E	e6	e050	2019-07-06	58	7,1	-	x	-
E	e6	e051	2019-07-04	46	8,7	-	-	-
W	w3	w002	2019-06-30	61	6,9	-	x	Cs, (Pb)
W	w3	w003	2019-06-30	67	0,9	x	-	-
W	w3	w004	2019-06-30	77	0,3	x	x	-
W	w3	w005	2019-06-30	84	0,1	-	-	-
W	w3	w007	2019-06-29	94	0,1	-	-	Cs
W	w3	w008	2019-06-29	106	0,1	-	x	Cs, Pb
W	w2	w009	2019-06-29	111	0,1	-	-	-
W	w2	w010	2019-06-28	96	0,1	-	-	Cs, Pb
W	w2	w011	2019-06-28	85	0,1	-	-	-
W	w2	w012	2019-06-28	78	0,1	-	-	-
W	w2	w013	2019-06-26	72	0,4	x	-	-

Område	Mätlinje	Provlokal	Provtagnings-datum	Vattendjup (m)	Syrgashalt (mg/l)	Beggiatoa	Kornstorleks-fördelning	Cs-137/ Pb-210
W	w2	w014	2019-06-26	70	0,7	x	x	-
W	w2	w015	2019-06-26	66	0,9	x	-	-
W	w2	w016	2019-06-26	54	5,4	-	-	-
T	t1	t001	2019-07-29	103	0,1	-	-	Cs, (Pb)
T	t1	t002	2019-08-01	121	0,1	-	-	-
T	t1	t003	2019-08-01	121	0,1	-	-	-
T	t1	t004	2019-07-28	138	0,1	-	-	-
T	t1	t005	2019-07-28	168	0,1	-	-	-
T	t1	t006	2019-07-28	191	0,1	-	-	Cs, (Pb)
T	t1	t008	2019-07-27	98	0,1	-	-	-
T	t1	t009	2019-07-27	105	0,1	-	-	-
T	t1	t010	2019-07-28	143	0,1	-	-	-
T	t1	t011	2019-07-31	62	7,0	-	-	-
T	t1	t012	2019-07-31	67	1,1	-	-	-
T	t1	t013	2019-07-31	72	0,4	-	-	-
T	t1	t014	2019-07-31	79	0,3	-	-	-
T	t1	t015	2019-07-31	92	0,1	-	-	-
B	b1	b001	2019-09-22	14	7,9	-	-	Cs, (Pb)
B	b2	b002	2019-09-22	13	7,9	-	-	Cs
B	b2	b003	2019-09-23	33	8,0	-	-	-
B	b1	b004	2019-09-21	27	8,4	-	-	-
B	b1	b005	2019-09-21	33	8,4	-	-	Cs, (Pb)
B	b3	b006	2019-09-19	33	7,7	-	-	-
B	b1	b007	2019-09-19	34	7,6	-	-	Cs
B	b1	b008	2019-09-20	35	8,1	-	-	-
B	b3	b009	2019-09-19	28	8,3	-	-	-
B	b1	b010	2019-09-21	22	8,4	-	-	-
B	b1	b011	2019-09-21	33	8,4	-	-	-
B	b1	b012	2019-09-22	29	8,3	-	-	-
B	b1	b013	2019-09-22	22	8,3	-	-	-
B	b2	b014a	2019-09-24	19	7,1	-	x	-
B	b2	b014b	2019-09-24	-	-	-	-	-
B	b2	b014c	2019-09-24	-	-	-	-	-

Analyser

Syrgashalter

Syrgashalterna mättes efter vattenprovtagningen på varje lokal, cirka 0,5 m från bottenytan med en optisk syrgassensor (Oxygen optode 4835) placerad på en kamerabur. På kameraburen finns även en CTD-sond som mäter konduktivitet, temperatur och densitet. Optoden mäter partialtrycket av löst syrgas, som sedan korrigeras för salinitet, tryck och temperatur och rapporteras i ml/l. Detta räknades om till mg/l genom att dividera med 0,7. Den lägsta rapporterade halten var 0,1 ml/l, det vill säga 0,1 mg/l, även på bottnar som tydligt var anoxiska (ner till vattendjup större

än 200 m). Sedimentet på lokaler där syrgashalterna är 0,1 mg/l kan därför betraktas som anoxiska i denna undersökning.

Fosfor

Fosfor analyserades på Erkenlaboratoriet, Uppsala universitet, för både sediment och bottenvatten från alla provlokaler.

Analys av fosfor i sediment

För alla inskickade sedimentprover bestämdes totalfosfor, glödförlust (eng. *loss-on-ignition, LOI*) och vattenhalt, medan fosforfraktioner bestämdes för ett urval av dessa. Analyserna gjordes tätare närmare sedimentytan. Vilka sedimentnivåer som analyserades i prover från utsjön respektive Bråviken redovisas i tabell 2. I Bråviken analyserades djupare nivåer i sedimentet på grund av att sedimentackumulationshastigheten bedömdes vara högre där än i de flesta utsjöproverna. Detta medför att sediment från en viss nivå i en sedimentkärna från Bråviken således är yngre än sediment från samma nivå i en sedimentkärna från utsjön.

Proverna som skulle fosforfraktioneras levererades till laboratoriet veckan efter provtagningen och började analyseras inom två veckor efter provtagningen.

Tabell 2. De nivåer i sedimentkärnor från utsjön respektive Bråviken som analyserats för fosfor.

Nivå nedåt från sedimentyta (cm)	Utsjö		Bråviken	
	Fosforfraktioner	Totalfosfor[1]	Fosforfraktioner	Totalfosfor[1]
0-1	x	x	x	x
1-2	x	x	x	x
2-3	x	x	x	x
3-4	x	x		
4-5	x	x	x	x
5-6	x	x		
6-7				x
7-8		x		
8-9			x	x
9-10		x		
10-11				x
12-13			x	x
14-15		x		
16-17				x
19-20	x	x		
20-21			x	x
25-26				x
29-30		x		
30-31			x	x
35-36				x
40-41			x	x
45-46				x
50-51			x	x

[1] I analysen av totalfosfor ingår bestämning av vattenhalt och glödförlust.

Fraktioneringen av olika former av fosfor gjordes med sekventiell extraktion till fem fraktioner: NH_4Cl-P som motsvarar löst bunden fosfor (eller labil fosfor, inklusive fosfat i porvattnet), BD-P som motsvarar järnbunden fosfor (Fe-P), NaOH-P som motsvarar aluminiumbunden fosfor (Al-P), NaOH org-P som motsvarar organiskt bunden fosfor (Org-P) och HCl-P som motsvarar kalciumbunden fosfor (Ca-P). Utifrån differensen mellan totalfosfor och summan av dessa fraktioner räknas en rest eller residualfraktion ut, Rest-P, som således är det fosfor som inte har kunnat extraheras med fraktioneringsmetoden. Analysmetoden för fosforfraktionering bygger på Psenner m.fl. (1988), Hieltjes & Lijklema (1980) och Ahlgren & Ahlgren (1976), men har modifierats av Erkenlaboratoriet. Totalfosfor bestämdes enligt en förbränningsmetod (Andersen 1975) med modifikationer. Vattenhalt bestämdes efter frystorkning och torkning vid 105 °C, och glödförlust efter bränning vid 550 °C i 2 timmar enligt SS 028113. För fraktioneringsanalyserna gjordes varje prov i endast ett replikat, dels för att sedimenten bedömdes vara relativt finkorniga och homogena, dels för att öka antalet lokaler som kunde analyseras (och därmed provtas), eftersom maximalt 100 prover kunde analyseras varje vecka.

Det är viktigt att komma ihåg att fosforfraktionerna är så kallat operationellt bestämda, i olika extraktionssteg. Det betyder att även om olika fraktioner tros motsvara olika former av fosfor i naturen, så motsvarar inte en fraktion helt och hållet formen i naturen. De fosforfraktioner som anses kunna frigöras från sedimentet tillbaka till vattenmassan är löst bunden P, Fe-P och Org-P (se till exempel Rydin 2000).

Fe-P är föreningar mellan fosfor och oxider/hydroxider av främst järn som löses upp om miljön blir syrefri (Lukkari m.fl. 2007). Detta kan inträffa om förhållandena blir reducerande på en plats, men det kan också inträffa när sedimentpartiklar begravs längre ner i sedimentet på grund av pågående sedimentation av nya sedimentpartiklar. Längre ner i sedimentet råder ofta reducerande förhållanden där Fe-P löses upp.

Org-P frigörs långsammare än Fe-P, i takt med att det organiska materialet den ingår i bryts ned. Fosforn kan då övergå till andra fosforformer, till exempel bindas som Fe-P eller läcka ut från sedimenten. Hur snabbt organiska fosforformer bryts ned varierar beroende på strukturen, men en halveringstid på mellan 3 och 16 år har uppskattats för de föreningar där det var möjligt att beräkna en halveringstid; detta för ett sedimentprov från en anoxisk botten i norra Egentliga Östersjön (Ahlgren m.fl. 2006).

Rest-P, det vill säga skillnaden mellan totalfosforhalten och totala halten som kunnat extraheras under fosforfraktioneringen, kan bestå av svårnedbrytbara fosforformer som därmed inte bidrar till läckaget av fosfor från sediment och av inerta oorganiska fosforformer (Rydin 2000). Det kan dock även vara så att restfraktionen innehåller organiska fosforformer som kan brytas ned och där fosforn sedan kan frigöras, och att det således också är en form av reaktiv eller mobil fosfor (till exempel Malmaeus & Karlsson 2012, Rydin m.fl. 2011).

Al-P och Ca-P betraktas generellt som stabila fosforformer i sediment (Rydin 2000). Al-P inkluderar fosfor bunden till oxider av aluminium och icke-reducerbart järn (Lukkari m.fl. 2007), och denna fraktion ska således inte påverkas av varierande redoxförhållanden till skillnad från Fe-P. En antropogen källa till Al-P kan vara utsläpp från reningsverk, där aluminium har använts för att fälla ut fosfor (Emil Rydin, muntlig kommunikation). Ca-P inkluderar främst apatitmineral (Lukkari m.fl. 2007).

Analys av fosfor i vatten

För bottenvatten från varje provlokal bestämdes totalfosfor och fosfatfosfor, samt nitrat-, nitrit- och ammoniumkväve. Eftersom proverna filtrerades genom 0,45 µm membranfilter innan infrysning och senare analys är det de lösta halterna som har bestämts av dessa fem parametrar, till

exempel löst halt totalfosfor. Det var nödvändigt att proverna frystes då det inte var möjligt att snabbt transportera dem till laboratoriet under provtagningen i utsjön. Dessa prover analyserades på Erkenlaboratoriet, Uppsala universitet, med en SEAL AutoAnalyzer.

Totalt organiskt kol och kväve

Ytsedimentets (0–2 cm) innehåll av totalt organiskt kol (TOC) och totalkväve bestämdes för varje provlokal på Mark- och växtlaboratoriet på Institutionen för mark och miljö, SLU, Uppsala. Detta gjordes med torrförbränning vid 1 350 °C följt av elementaranalys, och instrumentet som användes var en TruMac CN. Förbränning vid denna temperatur gör att totalkol och kväve kan bestämmas. Totalt oorganiskt kol bestäms på samma sätt, men proverna bränns då först vid 550 °C för att bränna bort organiskt material. Totalt organiskt kol kan sedan räknas ut genom att korrigera totalkol för oorganiskt kol. Proverna torkades på SGU vid 40 °C innan analys. En torrsubstansbestämning vid 105 °C gjordes sedan på SLU så att resultaten redovisades normaliserade till torrsubstans.

Sedimentdjupet 0–2 cm användes för prover där TOC skulle analyseras. Anledningen till detta var för att kunna korrelera resultaten till halter av grundämnen. Att använda 0–1 cm sedimentdjup skulle ha medfört kraftigt ökad provtagningstid för att få tillräckligt stor sedimentmängd för analyser. För fosforanalyserna användes emellertid encentimeters sedimentlager för att få en noggrann upplösning längs djupprofilen i sedimentet. Dessa prover analyserades för glödförlust vilket är ett mått på organiskt material, det vill säga innefattar mer än bara organiskt kol. Se resultatavsnittet av rapporten för en jämförelse mellan halterna av glödförlust och TOC.

Metaller och andra grundämnen

Grundämnen analyserades i ytsedimentet (0–2 cm) från varje provlokal av ALS Scandinavia AB, Luleå. För arsenik, kadmium, koppar, kobolt, kvicksilver, nickel, bly, svavel och zink upparbetades sedimentproven med upplösning i 7M salpetersyra på värmeblock. För aluminium, järn, mangan och krom skedde upparbetning genom litiumboratsmälta följt av upplösning i salpetersyra. Slutbestämning gjordes med så kallad plasma-sektormasspektrometri (ICP-SFMS) och plasma-emissionsspektrometri (ICP-AES). Proverna torkades vid 50 °C innan analys och ämneshalterna korrigerades till torrsubstans bestämt vid 105 °C.

Kornstorleksfördelning

Tolv prover (0–6 cm; se tabell 1) analyserades på Markfysiklaboratoriet på Institutionen för mark och miljö, SLU, Uppsala, för att bestämma kornstorleksfördelningen i sedimentet. Detta gjordes med så kallad lasersiktning eller laserdiffraktion på ett HORIBA LA-950V2-instrument.

Till varje analys togs ett delprov på 8 g torrt material ut. I det första steget togs organiskt material bort genom kokning i saltsyra och peroxid. Efter det dispergerades materialet i en lösning av natriumkarbonat och natriummetafosfat, och provet fick sedan stå på en magnetomrörare under natten. Från detta togs sedan fyra delprov som analyserades parallellt. Det slutliga resultatet är ett medelvärde från dessa fyra delprov. För vissa prov var denna dispergering inte tillräcklig; istället fick ett delprov behandlas med en ultraljudsstav. De prover som var nödvändiga att behandla med ultraljud var e029, e031, e032, w004 och w008.

Sedimentackumulationshastighet

Tretton kärnor skivades i encentimetersskikt och analyserades för cesium-137 (Cs-137) med gammaspektrometer ombord på undersökningsfartyget. Halterna av Cs-137 ökade kraftigt som en följd av Tjernobylolyckan 1986, och det sedimentlager som har låga eller inte detekterbara halter av Cs-137 precis under den nivå i sedimenten där strålningsintensiteten börjar stiga kan därför sättas till att motsvara 1986. Sedimentackumulationshastigheten kan då utifrån den kända

tjockleken på ovanliggande sedimentlager beräknas i cm/år. Eftersom sedimentet med tiden kompakteras ska detta värde för sedimentackumulationshastighet betraktas som ett minimimått. Av de tretton analyserade kärnorna var fyra belägna i Bråviken och nio i utsjön.

Tretton kärnor analyserades för bly-210 (Pb-210) för att bestämma sedimentackumulations-hastigheten. Detta gjordes vid Universitat Autònoma de Barcelona i Spanien, och beräkningen baserades på en modell som förutsätter 'constant flux constant sedimentation' (CFCS) av Pb-210. En del av de kärnor som analyserades för Pb-210 hade tidigare analyserats för Cs-137 medan en del var kärnor där Cs-137 inte bedömdes kunna ge ett värde på sedimentackumulationshastighet på grund av för lågt nedfall efter Tjernobylolyckan. Vilka kärnor som analyserades med vilken metod finns angivet i tabell 1.

Röntgen

En sedimentkärna från varje lokal röntgades ombord på undersökningsfartyget för att se skikt och strukturer som inte är synliga för blotta ögat. Det ger information om kärnan är laminerad eller om den har varit utsatt för omrörning av bioturberande organismer. Det tidigare indikerar en miljö med syrebrist, och därmed ingen makrofauna, medan det senare indikerar en syresatt miljö. Röntgeninstrumentet som användes är från Cox Analytical Systems (specialbyggt) och är utrustat med ett Ag-röntgenrör samt en optisk kamera. Röntgenbilden processerades i efterhand för att ge två varianter, en *low density* (LD) och en *high density* (HD) bild. Anledningen till detta var den stora densitetsskillnaden mellan den övre laminerade delen av sedimentkärnan, rik på organiskt material, och den nedre mer konsoliderade delen med ett större innehåll av minerogent material. Det var därför inte möjligt att hitta en inställning som passade båda delarna, utan två bilder togs fram. Den ena ger en kontrastrik bild av den övre laminerade delen, men där den nedre mer konsoliderade delen då ofta är helt svart. Den andra visar strukturer i den nedre delen av kärnan, men där den övre laminerade delen av kärnan då ofta är helt överexponerad.

Statistik och beräkningar

För statistiska analyser av resultaten användes programmet JMP, version 14.0.0, från SAS Institute. Dessa analyser omfattade undersökningar av möjliga korrelationer mellan parametrar med olika typer av regressioner, multivariat analys i form av principalkomponentanalys (PCA), och envägs-ANOVA följt av Tukey´s HSD för att utvärdera parvisa skillnader. Gränsen för statistisk signifikans sattes vid $\alpha = 0{,}05$.

För beräkningar av fosforhalter och -mängder för 0–2 cm sedimentnivå togs hänsyn till sedimentets torrdensitet, vilket i sin tur räknades ut från (våt)bulkdensitet och vattenhalt enligt Dadey m.fl. 1992. För bulkdensiteten användes glödförlust på våtviktsbasis och en densitet på 2,6 g/cm^3 för den minerogena delen av sedimentet, enligt Håkansson & Jansson 1983.

För information om modelluppbyggnad och antaganden, se avsnittet *Rumslig prediktion av halter och mängder av fosfor i Östersjön*.

Datatillgänglighet

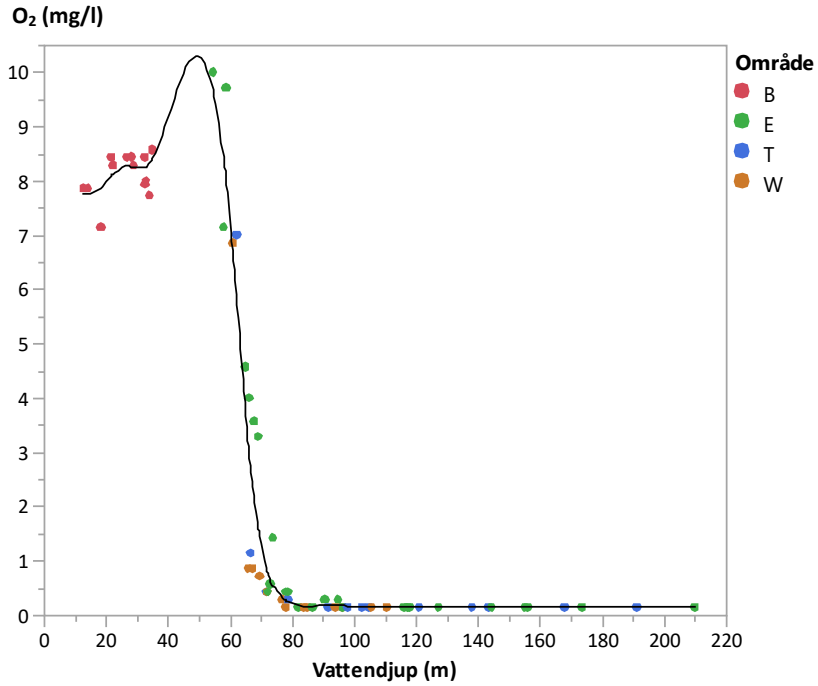
Analysdata framtagna inom projektet finns samlade i bilaga 2 som tillägg till att även rapporteras till aktuella datavärdar. I bilagan anges endast resultat ovanför rapporteringsgränsen medan även resultat mellan detektions- och rapporteringsgräns använts i rapporten. Analysresultaten kan även laddas ner här: http://resource.sgu.se/produkter/sgurapp/s2005-bilaga-2.xlsx (Åtkommen 2020-03-06).

RESULTAT OCH DISKUSSION

Redoxstatus och sedimentparametrar

Syrgashalt och vattendjup

Syrgashalten är högre på grundare lokaler, med högst halter på grunda utsjölokaler (> 9 mg/l på 50–60 m djup; fig. 3). Mellan 60 och 70 m djup i utsjön sjunker halterna snabbt och når hypoxi redan innan 70 m djup. Syrgashalterna i Bråviken är något lägre än de högsta halterna i utsjön trots grundare miljö, och håller sig runt 7–9 mg/l för lokaler på 13–35 m vattendjup. Temperaturen i bottenvattnet på lokalerna i Bråviken är 6–8 °C, medan den är cirka 4 °C på lokalerna i utsjön som har syrgashalter på 7 till 10 mg/l. Det är således inte temperaturen som är orsaken till de lägre syrgashalterna i Bråviken. Möjliga förklaringar kan istället vara provtagning under senare delen av sommaren (september) samt en högre belastning av syretärande ämnen kustnära kombinerat med ett relativt instängt läge med låg vattenomblandning. Vad redoxstatusen är på respektive lokal (syresatt, hypoxisk eller anoxisk) kan ses i figur 2.

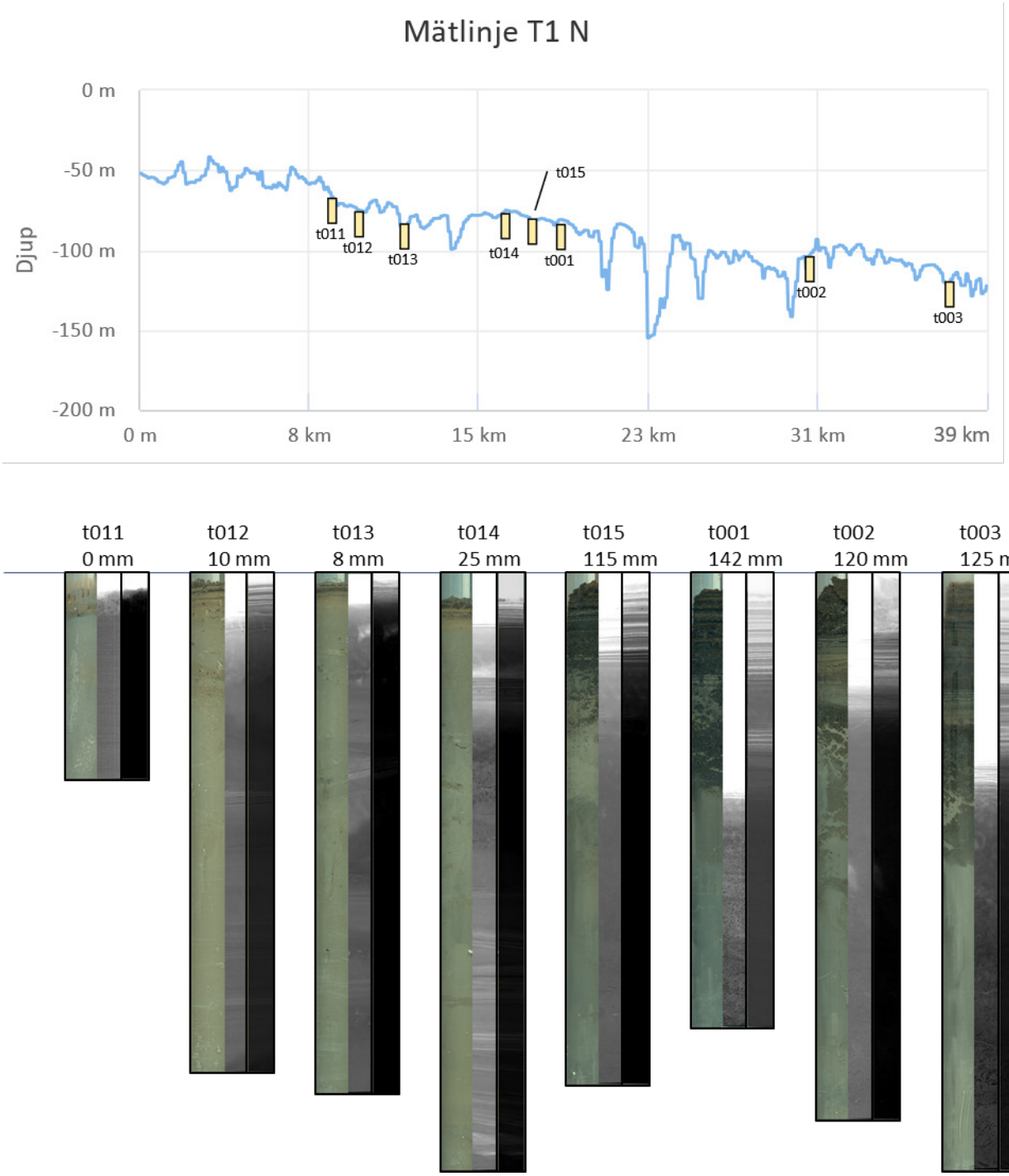


Figur 3. Syrgashalten (O_2, mg/l) i bottenvattnet på de 67 provtagna lokalerna. Linjen illustrerar hur syrgashalten varierar med vattendjupet.

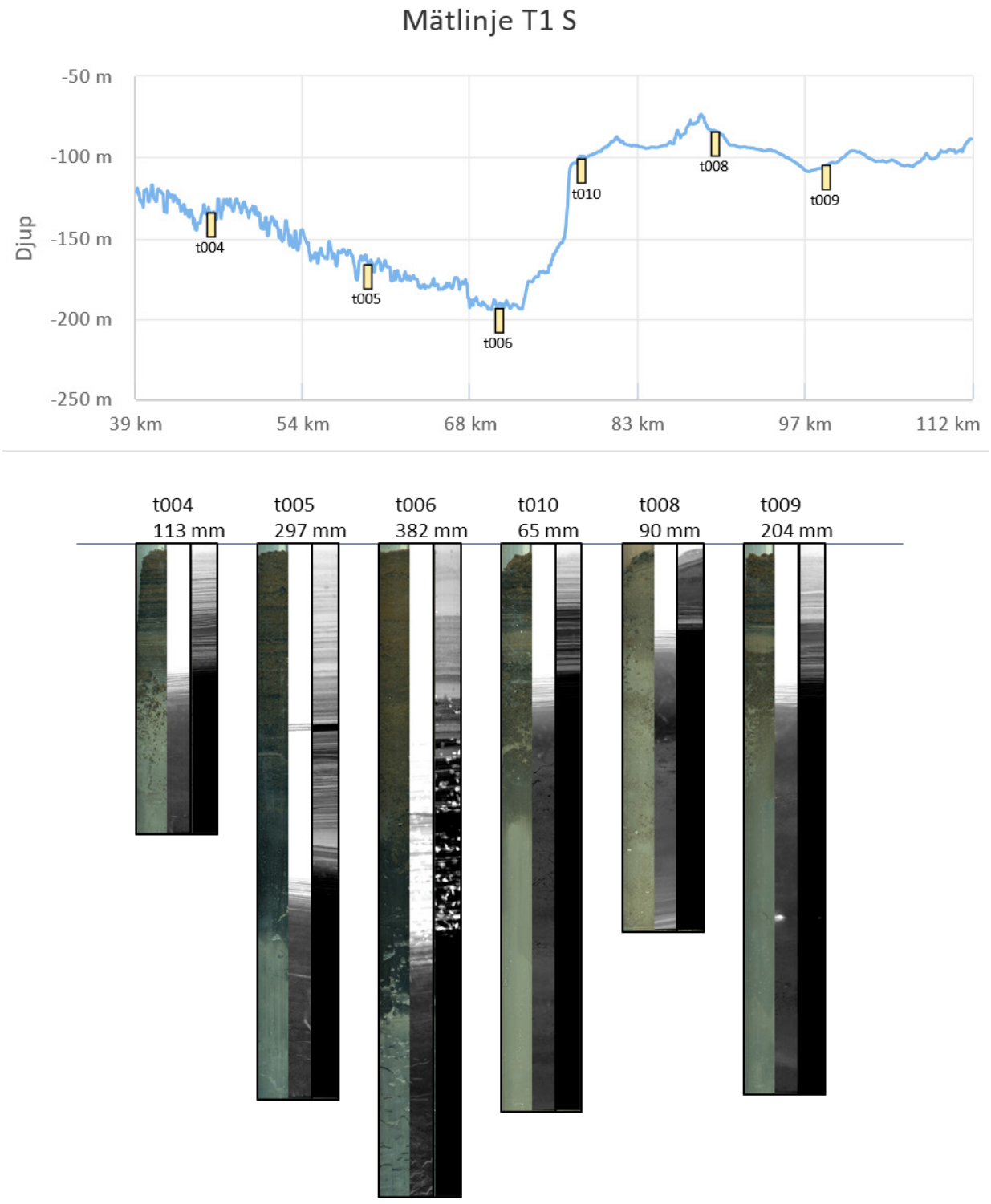
Röntgen och laminering

Laminerade sediment är en indikation på att syrefria förhållanden råder, eller rådde under tiden de laminerade sedimenten avsattes. Det beror på att bottengrävande djur inte kan leva under syrefria förhållanden och då förekommer ingen bioturbation som blandar om i sedimenten. Nivån i kärnorna där de homogena nedre delarna av kärnorna övergår till att vara laminerade representerar tidpunkten då bottenförhållandena övergick från att vara oxiska till anoxiska. Det finns en grov trend utefter mätlinjerna att ju längre ut från land och ner på större vattendjup lokalen ligger, desto mäktigare är den laminerade delen, till exempel enligt röntgenbilderna för område T (fig. 4 och 5) samt fotografierna för en del av lokalerna (fig. 6). En mäktigare laminerad del kan emellertid inte tolkas som att området varit syrefritt under en längre tidsperiod, eftersom

sedimentackumulationshastigheten varierar mellan områdena. För att få en uppfattning om hur länge ett område med laminerade sediment varit syrefritt är det därför viktigt att även ta hänsyn till denna.

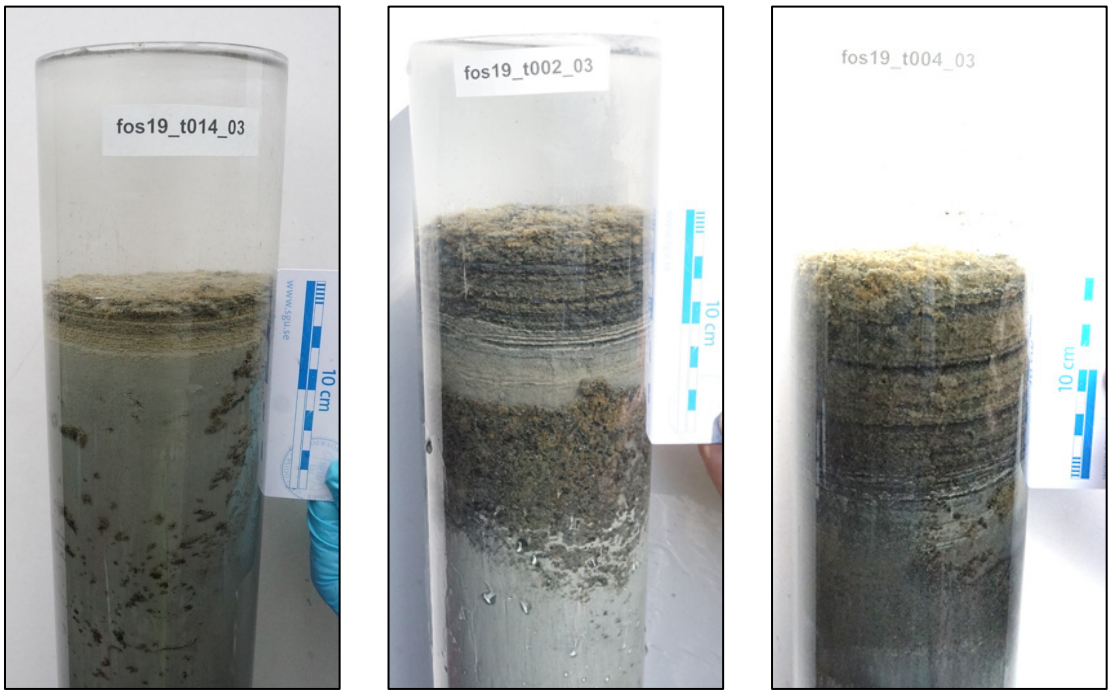


Figur 4. Överst en tvärsektion av bottnen med provlokaler för den norra delen av mätlinje T1. Avstånden på x-axeln räknas från mätlinje T1:s norra ände. Därunder visas bilder av en sedimentkärna från varje provlokal, dels en optisk bild (till vänster), dels två svartvita röntgenbilder (i mitten och till höger). Värdet i mm som anges under provlokalens namn är mäktigheten på det laminerade lagret. Den blå djupsektionen i det övre diagrammet är tagen från EMODnet:s öppet tillgängliga djupdatabas (https://portal.emodnet-bathymetry.eu/).



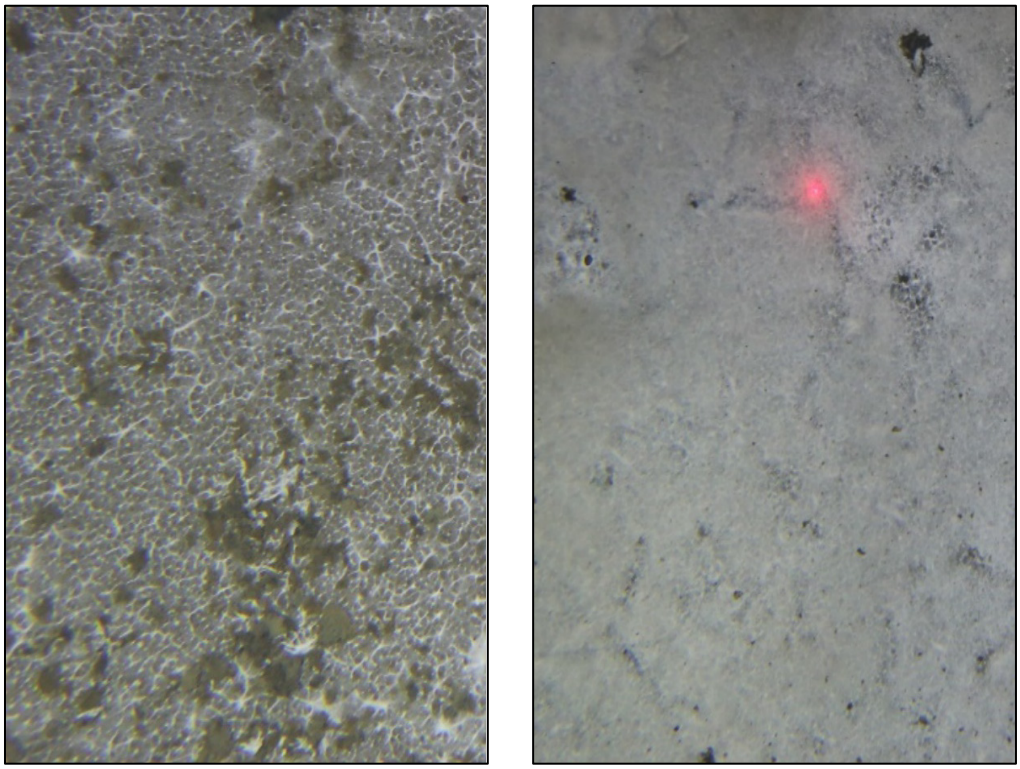
Figur 5. Sektion och röntgenkärnor för den södra delen av mätlinje T1. Avstånden på x-axeln räknas från mätlinje T1:s norra ände. Värdet i mm som anges under provlokalens namn är mäktigheten på det laminerade lagret. Den blå djupsektionen i det övre diagrammet är tagen från EMODnet:s öppet tillgängliga djupdatabas (https://portal.emodnet-bathymetry.eu/).

a)



b)

c)



Figur 6. Bilder på **a)** sedimentkärnor från lokalerna t014, t002 och t004, **b)** sedimentytan på lokal e028 och **c)** sedimentytan på lokal e027. Bilderna på sedimentkärnorna visar exempel på hur mäktigheten på de laminerade avsnitten kan variera i de undersökta sedimenten. Laminering är de omväxlande mörka och ljusa skikten. De indikerar att syrefria förhållanden rådde när de avsattes. Bilderna på sedimentytan visar exempel på *Beggiatoans* typiska nätstruktur bestående av vita trådar förbundna med varandra i nodpunkter (e028, bild b) och den väl utvecklade *Beggiatoan* på lokal e027 (bild c). Man kan här ana den typiska nätstrukturen under ett ytligt fluffigare lager. Denna fluffiga övre del bildas när det oxiska-hypoxiska gränsskiktet höjer sig över sedimentytan och *Beggiatoan* sträcker sig uppåt för att nå den oxiska delen (Fenchel & Bernard 1995). Foto: SGU.

Beggiatoa

I denna undersökning har extra fokus lagts på bottnar i övergångszonen. Dessa bottnar kan periodvis vara syresatta men kan övergå till att bli hypoxiska och kanske även anoxiska under sommaren och hösten. I denna övergångszon förekommer ett släkte av svaveloxiderande bakterier, *Beggiatoa*, som får energi genom att aerobiskt oxidera sulfid till svavel och sedan vidare till sulfat vid god tillgång på syre. Det bildade elementära svavlet kan de lagra internt, vilket syns som det vita i bakterien (Fenchel & Bernard 1995). *Beggiatoa* har förmågan att flytta på sig i höjdled för att hitta rätt nivå i sedimenten, vilket är gränszonen mellan oxiska och anoxiska förhållanden i sedimentet, där de har tillgång till både sulfid och syre (Yekta & Rahm 2011, Jørgensen 1977). Om det är höga syrgashalter kan bakterien bilda en matta nere i sedimenten som inte syns på bottenytan. Om det däremot råder brist på syre sträcker sig bakterien ovanför sedimentytan för att fånga in mer syre. Det bildas alltså vita lager av *Beggiatoa* på sedimentets ytlager när zonen där sulfid och syre överlappar varandra är vid eller ovanför sedimentytan (Fenchel & Bernard 1995).

Vissa arter av *Beggiatoa* kan lagra fosfor i form av polyfosfat, som sedan kan brytas ned och släppas ut som fosfat (Brock & Schultz-Vogt 2011, Brock m.fl. 2012, Dale m.fl. 2013). *Beggiatoa* tar upp fosfat när porvattnet är oxiderat, lagrar det och släpper ut det när det blir hypoxiska förhållanden. På det viset kan stora mängder fosfat frigöras under kort tid, vilket har föreslagits vara en bidragande orsak till att fosfatfluxerna från sedimentet skulle vara högre i den hypoxiska zonen (Noffke m.fl. 2016).

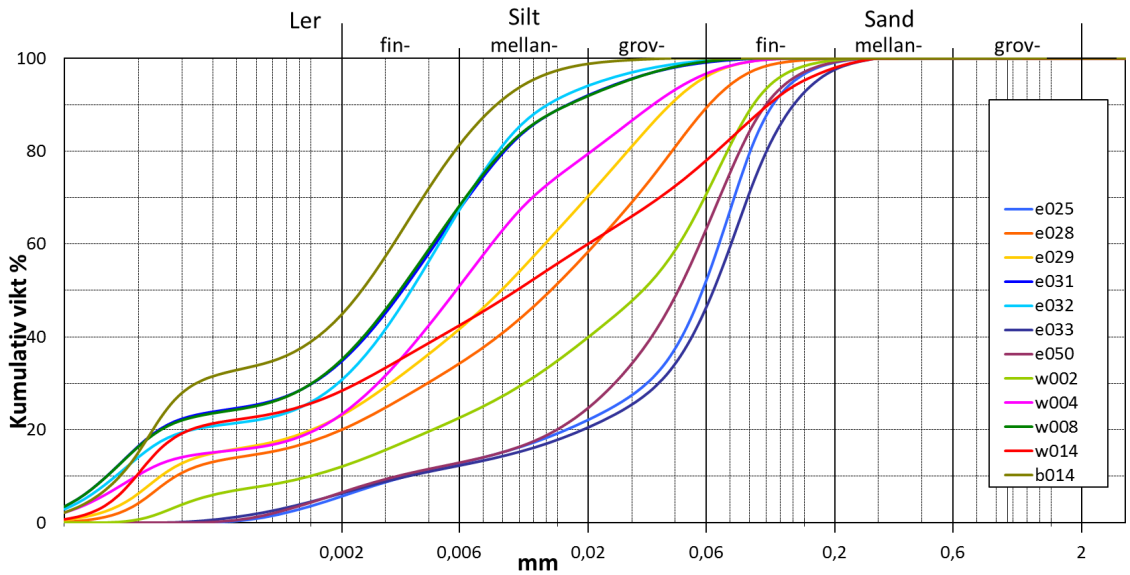
I den här undersökningen kunde *Beggiatoa* konstateras på tolv lokaler. Dessa låg inom ett relativt smalt djupintervall, från 66 till 79 m vattendjup. Detta skiljer sig från en tidigare studie i östra delen av Gotlandsbassängen av Noffke m.fl. (2016), där sedimenten var täckta av mattor av *Beggiatoa* i en zon på cirka 80–120 m vattendjup som kallades den hypoxiska övergångszonen och definierades som området där syrgashalten var mätbar men under 1 mg/l. Bakteriemattorna var mindre täta i områden såväl grundare (vid 75 m, det vill säga i den oxiska zonen på cirka 60–80 m djup) som djupare (vid 140 m, det vill säga i den anoxiska och sulfidiska zonen som förekom på bottnar djupare än cirka 120 m). En del av förklaringen till skillnaden mellan den här undersökningen och studien av Noffke m.fl. skulle kunna vara vara att gränsen mellan oxiska och hypoxiska förhållanden varierar mellan olika platser och mellan olika år, men även i betydligt kortare tidsperspektiv. Exempelvis uppmättes variationer i bottenvattnets syrgashalter på flera mg/l på bara några timmar på en lokal på 80 m djup i studien av Noffke m.fl.

Tio av lokalerna med *Beggiatoa* i den här undersökningen befann sig inom den hypoxiska zonen (< 2,0 mg O_2/l) medan två av de grundaste lokalerna, på 68 m respektive 69 m vattendjup, hade syresatt bottenvatten med syrgashalter på 3,6 respektive 3,3 mg/l. Vid båda dessa lokaler var det 4–5 djupmeter ned till närmaste djupare lokal som befann sig i den hypoxiska zonen. Gränsskiktet mellan den oxiska zonen och den underliggande hypoxiska zonen låg vid provtagningstillfället således strax under dessa två lokaler. Trots det var *Beggiatoan* på sedimentytan på dessa lokaler den mest utvecklade (se figur 6c), vilket motsäger Fenchel & Bernard (1995) där det konstateras att det är vid låga syrgashalter i bottenvattnet som bakterierna sträcker sig ovanför sedimentytan för att fånga in syre. Att det fanns *Beggiatoa* på sedimentet trots att lokalerna befann sig i zonen med syresatt bottenvatten skulle möjligtvis kunna bero på de stora variationerna i syrgashalter som kan förekomma.

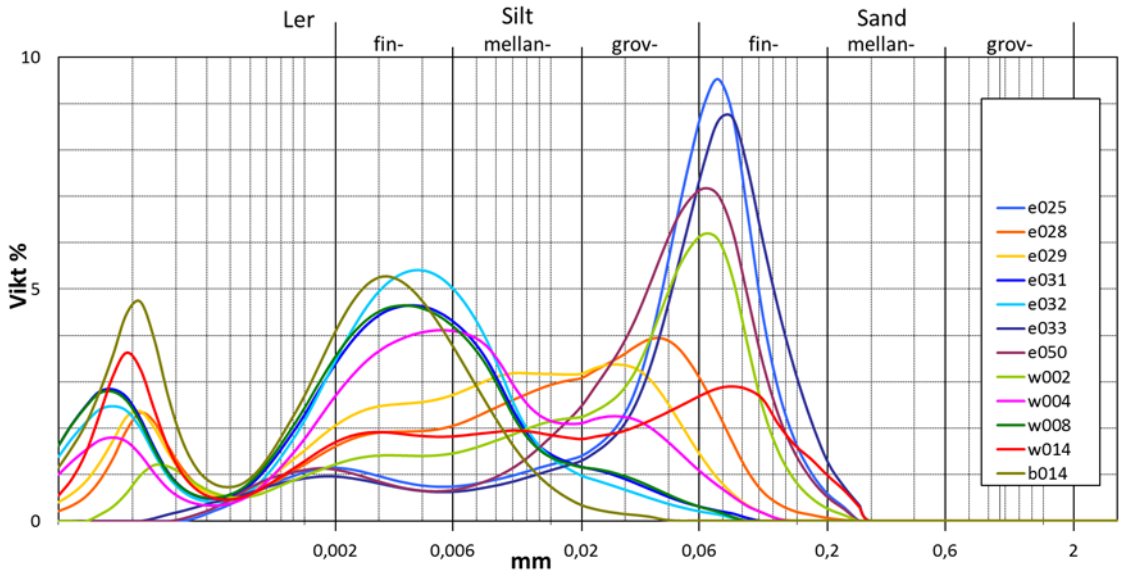
Kornstorleksfördelning

För de tolv lokaler som undersöktes med avseende på kornstorleksfördelning redovisas kumulativa frekvenskurvor och frekvenskurvor i figur 7 och 8. De fyra lokaler som ligger strandnära, w002 (clSi), e025 (saSi), e033 (siSa) och e050 (saSi), grupperar sig med ett frekvensmaximum vid över-

gången mellan grovsilt och finsand (fig. 8). De är något bimodala med en liten population i gränsen mellan lera och silt vid 0,002 mm. De fyra lokalerna benämns som lerig silt (clSi), sandig silt (saSi) eller siltig sand (siSa). På samma sätt grupperar sig de tre lokalerna som ligger längst ut och djupast, e031 (siCl), e032 (siCl) och w008 (siCl), det vill säga alla är siltiga leror. De har sitt tydligaste frekvensmaximum i finsiltfraktionen men de är också bimodala med en mindre population i lerfraktionen. Lokal b014 (Cl) från den inre delen av Bråviken liknar dessa utsjölokaler i sin kornstorleksfördelning även om den är från en helt annan sedimentationsmiljö. Skillnaden är att populationen i lerfraktionen är större än för de tre utsjölokalerna, och den klassas därför som en lera. En tredje grupp är de multimodala lokalerna, e028 (siCl), e029 (siCl) och w004 (siCl) som alla kommer från övergångszonen på 74–87 m djup. De har i likhet med den mer strandnära gruppen en population i lerfraktionen, men i siltfraktionen har de istället två eller fler mixade populationer. Även lokal w014 (siCl), från Ölandssidan av område W, visar en multimodal fördelning men den avviker från de övriga tre multimodala proven genom att ha större populationer i ändarna av sin frekvenskurva. Den har både en större finsandspopulation och en större lerpopulation. När det förekommer olika populationer i en kornstorleksfördelning, som det ofta gör, brukar det tolkas som att det varit två eller flera olika processer inblandade vid avsättningen av sedimentet. Det behöver emellertid inte vara så. Kornstorleksfördelningskurvor som uppvisar en så kallad positiv skevhet med populationer i lerfraktionen, som ovanstående prov gör, kan vara artefakter skapade vid dispergeringen av proven. Flockulerade partiklar som egentligen har sedimenterat som aggregat i siltstorlek delas upp i enskilda partiklar vid dispergeringen och framträder som en avvikande population av finler i diagrammen över kornstorleksfördelning. En alternativ tolkning är att finlerpopulationen härstammar från material som hade hunnit sedimentera under våren innan provtagningen började. Denna fraktion blir dock inte kvar i längden utan kommer att suspenderas av nästa storm och redeponeras i en lugnare miljö på djupare vatten. Emellertid utgör denna finlerpopulation lite väl stor andel av den totala, speciellt med tanke på den låga sedimentackumulationshastigheten i området, för att detta skulle kunna vara den enda förklaringen.



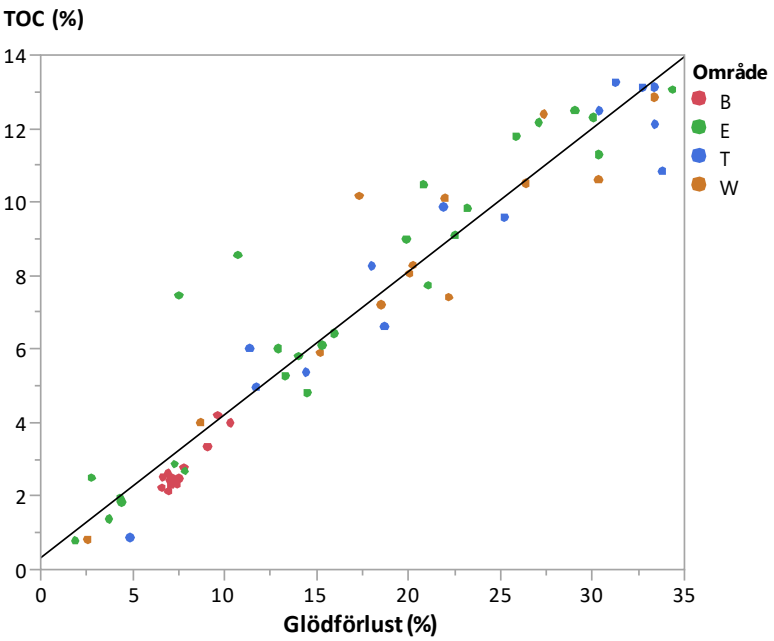
Figur 7. Kumulativt frekvensdiagram som visar kornstorleksfördelningen för de tolv lokaler som analyserades (prov taget på 0–6 cm nivå i sedimentet).



Figur 8. Frekvensdiagram som visar kornstorleksfördelningen för de tolv lokaler som analyserades (prov taget på 0–6 cm nivå i sedimentet) .

Organiskt material

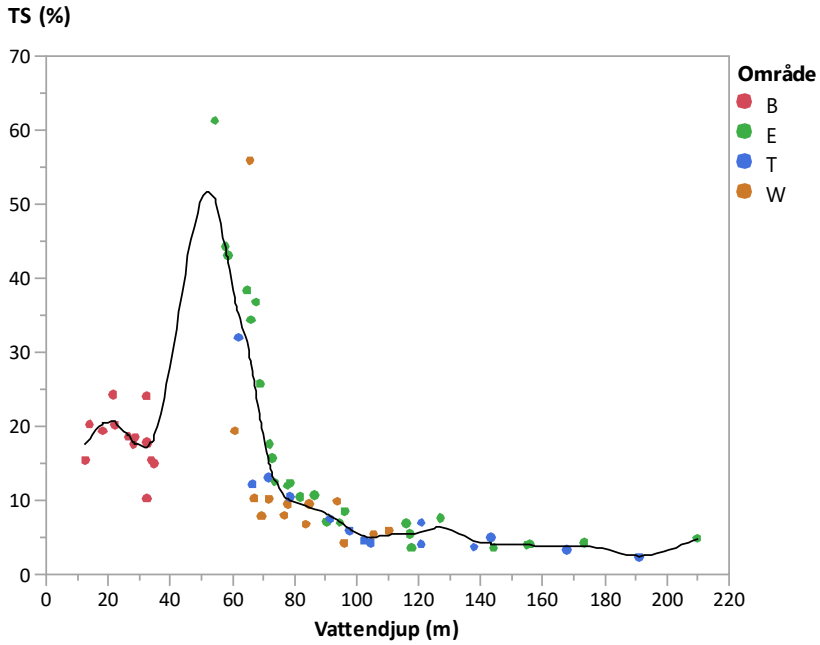
Under projektet analyserades både glödförlust och TOC i sedimentprover, vilka båda är ett mått på organiskt material. Glödförlust bestämdes för alla fosforprover, det vill säga encentimeterslager på olika djup i sedimentet, medan TOC bestämdes för ett prov från sedimentets ytlager (0–2 cm). Glödförlusten räknades om till ett medelvärde för 0–2 cm, viktat för torrdensiteteten i de två encentimeterslagren, innan jämförelse med TOC. Det finns som förväntat ett tydligt linjärt samband mellan de två parametrarna, som följer sambandet TOC = 0,40 × Glödförlust (fig. 9). Detta liknar ett tidigare bestämt samband för recenta finkorniga sediment i Östersjön där lutningskoefficienten på regressionen var 0,35 (Sundqvist m.fl. 2009).



Figur 9. Sambandet mellan TOC (%) och glödförlust (%) uttrycks väl med en linjär regression; TOC = 0,32 + 0,39 × Glödförlust ($p < 0{,}0001$, $r^2_{adj} = 0{,}91$, $n = 67$). En alternativ regression där linjen tvingas genom origo kan uttryckas som TOC = 0,40 × Glödförlust.

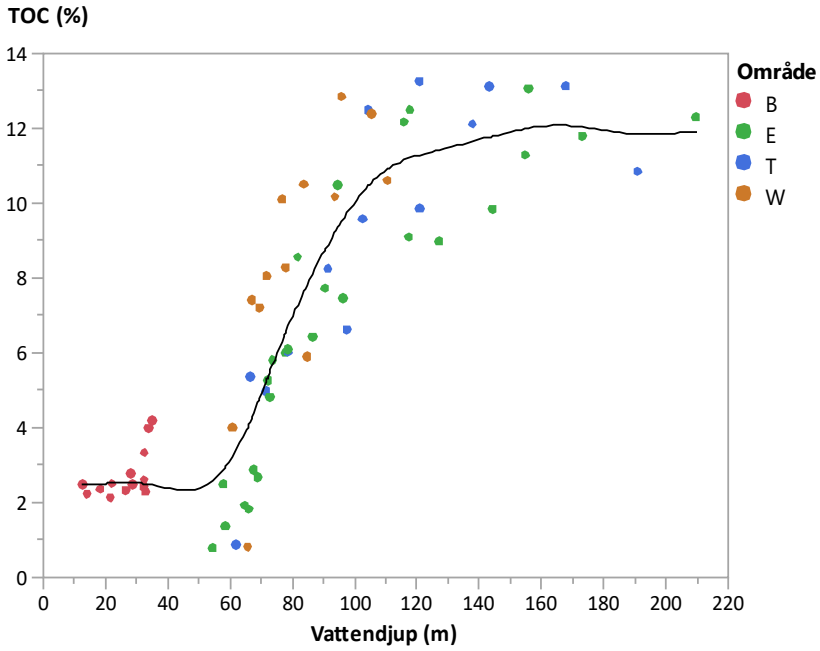
Sedimentparametrar och redox

Även andra sedimentparametrar än syrgashalten ändras med vattendjupet. Torrsubstanshalten minskar med djupet och är under 10 % i prover från bottnar djupare än 90 m och under 5 % i prover från bottnar djupare än 130 m (fig. 10). Sedimenten har således högre vattenhalt på djupare bottnar, vilket är kopplat till en högre halt organiskt material. Proverna från grundare bottnar i utsjön har högre andel torrsubstans, vilket beror på en högre sedimentdynamik som skapar erosions- eller transportbottnar. I dessa miljöer ackumuleras inte organiskt material. I Bråviken är torrsubstanshalterna däremot lägre än i de kustnära utsjöproverna då detta område är mer skyddat och har ackumulationsbottnar även på grundare områden, jämfört med vad fallet är i utsjön.

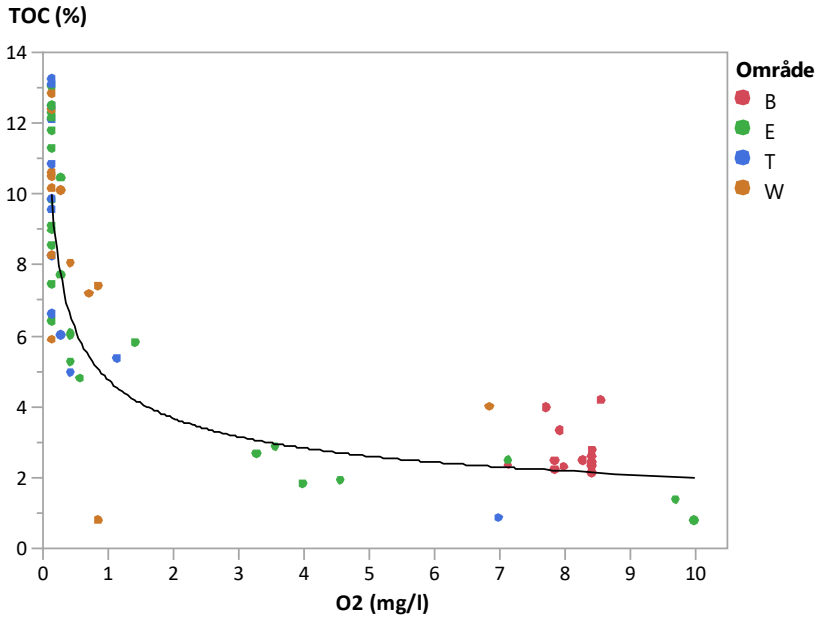


Figur 10. Torrsubstanshalten (TS, % av våtvikt) i sedimentets ytlager (0–2 cm) på de 67 provtagna lokalerna. Linjen illustrerar hur torrsubstanshalter varierar med vattendjupet.

Halten organiskt material är högre på djupare bottnar, som en följd av att mer organiskt material sedimenterar på ackumulationsbottnar (fig. 11). När det organiska materialet bryts ner konsumeras syre och syrebrist uppstår, vilket i sin tur leder till en minskad nedbrytning av det organiska materialet. Det finns alltså ett samband mellan halten organiskt material och syrgashalten (fig. 12), med TOC-halter mellan 5,8 och 13 % på anoxiska bottnar (O_2 < 0,2 mg/l) och lägre TOC-halter på syresatta bottnar (0,8 till 4,2 % vid O_2 > 2 mg/l).

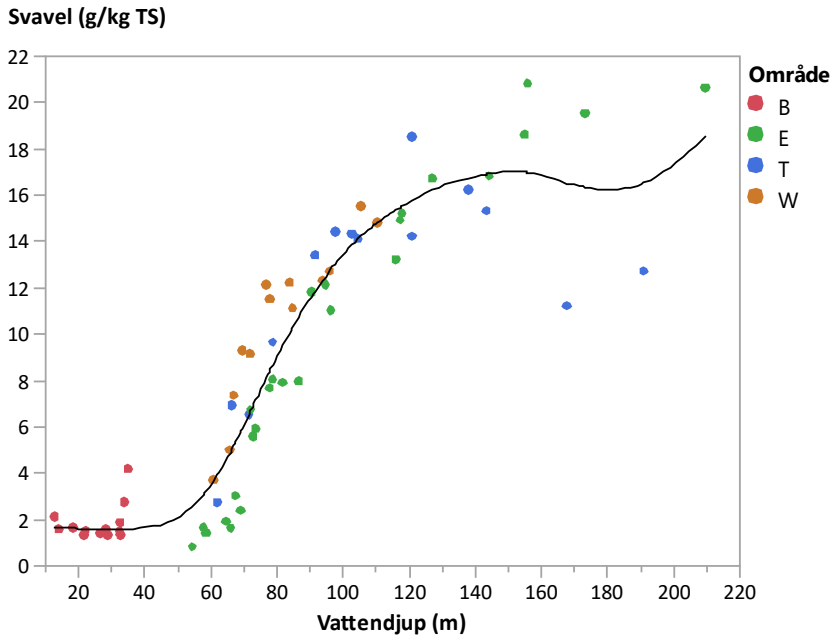


Figur 11. TOC-halter (% av torrsubstans) i sedimentets ytlager (0–2 cm) på de 67 provtagna lokalerna. Linjen illustrerar hur TOC-halterna varierar med vattendjupet.

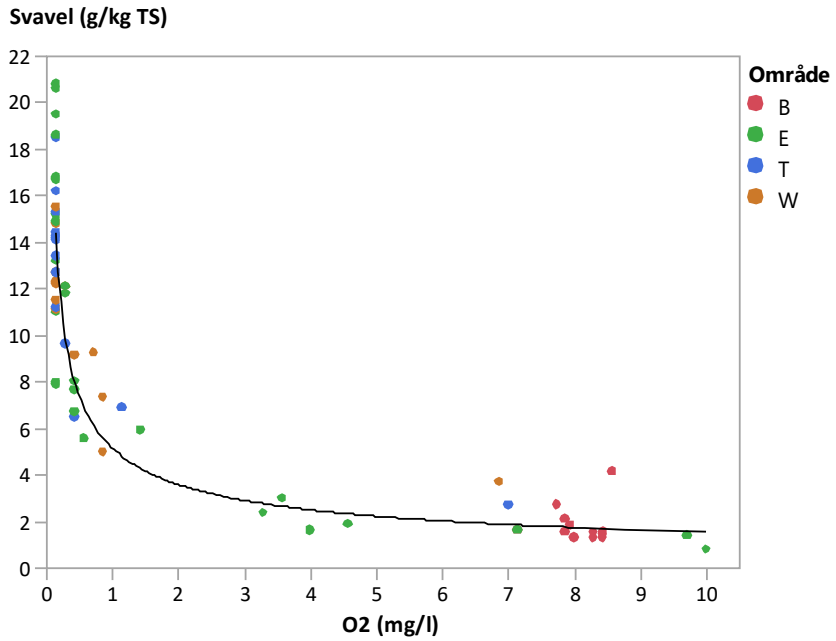


Figur 12. TOC-halter (% av torrsubstans) i sedimentets ytlager (0–2 cm) som en funktion av bottenvattnets syrgashalt (O_2, mg/l): ln TOC = 1,56 - 0,38 ln O_2 (p < 0,0001, r^2_{adj} = 0,75, n = 67).

Ytterligare en parameter som har en tydlig koppling till syrgashalterna är svavelhalterna i sedimentet. Halterna av svavel ökar med vattendjupet (fig. 13) eftersom svårlösliga sulfider bildas när det råder syrebrist. Det finns därför ett tydligt negativt samband mellan svavelhalter och syrgashalter (fig. 14). Eftersom både svavel och organiskt material har högre halter vid syrebrist förekommer ett positivt samband mellan dessa.



Figur 13. Svavelhalterna (g/kg TS) i sedimentets ytlager (0–2 cm) på de 67 provtagna lokalerna. Linjen illustrerar hur svavelhalterna i sedimentet varierar med vattendjupet.



Figur 14. Svavelhalterna (g/kg TS) i sedimentets ytlager (0–2 cm) på de 67 provtagna lokalerna har ett signifikant samband med syrgashalterna (mg/l) i bottenvattnet: ln S = 1,64 - 0,53 × Ln O_2 (p < 0,0001, r^2_{adj} = 0,92, n = 67).

Grundämnen

Halter och mönster

Fjorton grundämnen, inklusive svavel, analyserades i prover från alla 67 lokaler. Sedimentlagret som provtogs var 0–2 cm. För lokalen b014 provtogs tre replikat som analyserades separat, så det totala antalet prover för grundämnesanalys var 69 stycken. I resultatanalysen har dock medelvärdet för lokal b014 använts. Den relativa standardavvikelsen (RSD; standardavvikelsen i procent av medelvärdet) för triplikatet var mellan 1,2 och 7,9 % för de olika grundämnena. För kvicksilver var dock RSD högre, 13 %. En högre variation är rimligt med tanke på de låga halterna av detta ämne. För kvicksilver hade 18 av 69 prover halter under laboratoriets rapporteringsgräns på 0,04 mg/kg TS. Dessa värden ersattes med halva rapporteringsgränsen, det vill säga 0,02 mg/kg TS, för resultatanalysen. För alla övriga ämnen hade alla prover halter över rapporteringsgränserna.

Det är tydligt att de olika grundämnen har olika fördelningsmönster när de sätts i relation till syrgashalterna i bottenvattnet (fig. 15a–n). En del ämnen, till exempel kadmium (fig. 15c), har tydligt förhöjda halter i sediment med syrebrist och låga halter i syresatta sediment, inklusive i Bråviken (område B). Mönstret är således påfallande likt mönstret för svavel (fig. 15m). Detta kan illustreras genom att jämföra halterna av kadmium i sedimentet med syrgashalten i bottenvattnet (fig. 16) respektive svavelhalterna i sedimentet (fig. 17). Även arsenik, koppar, nickel och zink visar på liknande mönster. Att halterna av dessa ämnen är högre i syrefritt sediment kan beror på att de binder som sulfider samt till organiskt material, eftersom halten av organiskt material också är högre i syrefritt sediment.

Av de analyserade ämnena är kadmium och bly klassade som prioämnen och har effektbaserade gränsvärden för sediment enligt Havs- och vattenmyndigheten (2019). Gränsvärdet för kadmium är 2,3 mg/kg TS och det överskrids på 21 av 67 lokaler. Av dessa är alla lokaler med anoxiskt bottenvatten förutom e045, där en halt på 0,3 mg O_2/l uppmättes. Det är problematiskt att kadmium så ofta förekommer i halter som överskrider gränsvärdet, men att detta främst är fallet i syrefria sediment innebär att det inte förekommer någon makrofauna i sedimentet som kan påverkas negativt av de höga kadmiumhalterna. Den omfattande förekomsten av syrefria bottnar utan liv är således det övergripande miljöproblemet.

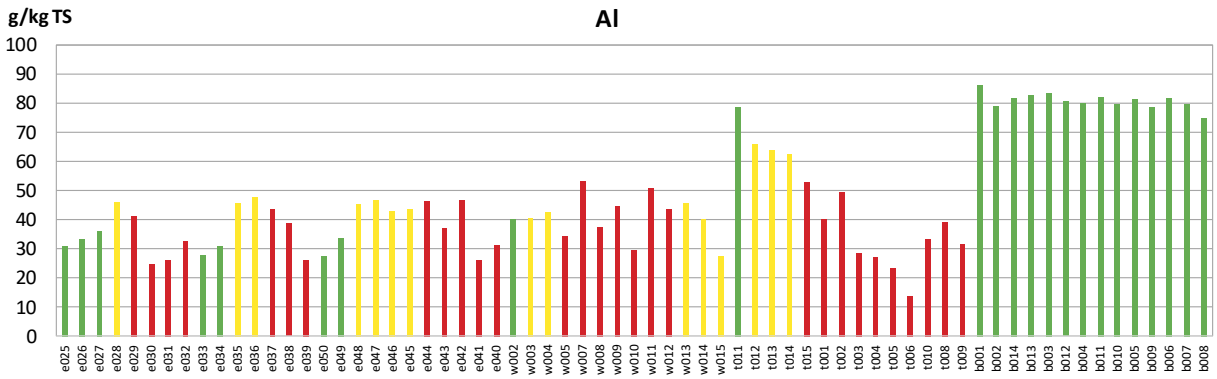
Bly har ett gränsvärde på 120 mg/kg TS och det överskrids inte på någon av de undersökta lokalerna. Detta överensstämmer med resultat från den nationella miljöövervakningen i utsjösediment, där kadmium överskred gränsvärdet på fyra av sex stationer i Egentliga Östersjön, medan bly aldrig förekom i halter som översteg gränsvärdet vid den senaste provtagningen 2014 (Josefsson & Apler 2019).

Koppar är klassat som ett särskilt förorenande ämne (SFÄ) och har en bedömningsgrund för sediment på 52 mg/kg TS, men den naturliga bakgrundshalten ska subtraheras från den uppmätta halten innan jämförelse med bedömningsgrunden (Havs- och vattenmyndigheten 2019). Detta bör göras med platsspecifika bakgrundshalter, men i brist på detta används istället det nationella jämförvärdet som antas representera förindustriella halter (15 mg/kg TS; Naturvårdsverket 1999). Bedömningsgrunden gäller för ett sediment med 5 % organiskt kol, så korrigering måste göras för detta genom att multiplicera halterna med 5/uppmätt kolhalt (%) innan jämförelse med bedömningsgrunden. När dessa två steg har gjorts är det tre lokaler som har kopparhalter som överskrider bedömningsgrunden. Lokalerna e042 och t008 ligger på anoxiska bottnar, och de överskrider precis bedömningsgrunden (53 mg/kg TS i korrigerade värden). Lokal t011 överskrider värdet med större marginal, vilket beror på en relativt hög halt koppar och en låg halt TOC (< 1 %). Eftersom detta är en lokal med syresatt bottenvatten kan det finnas bentisk fauna som påverkas av kopparhalterna. Av de övriga analyserade grundämnena är kvicksilver och nickel klassade som prioämnen och arsenik, krom och zink som SFÄ (Havs- och vattenmyndigheten 2019). Alla saknar dock effektbaserade bedömningsgrunder för sediment.

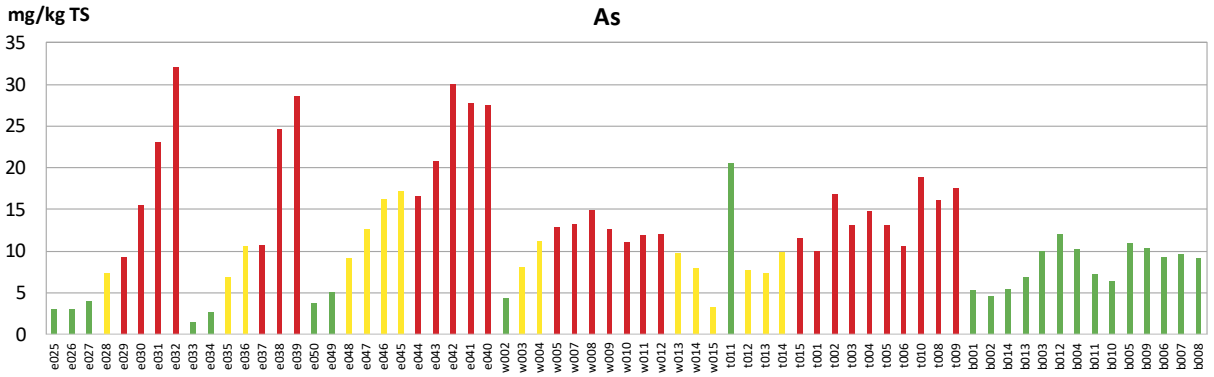
Mangan förekommer i en mycket hög halt på 4,3 g/kg TS i e040 medan alla övriga utsjöprover har halter under 1 g/kg TS. Detta värde har verifierats med två olika upparbetningsmetoder (litiumsmälta respektive lakning med 7 M HNO_3) och beror troligtvis på att detta är den djupaste lokalen som har undersökts, större än 200 m vattendjup. Den höga halten mangan i sedimentet skulle kunna bero på bildning av mangankarbonat eller möjligtvis mangansulfid (Sternbeck & Sohlenius 1997, Lepland & Stevens 1998).

Figur 15a–n nedan och på följande tre sidor:

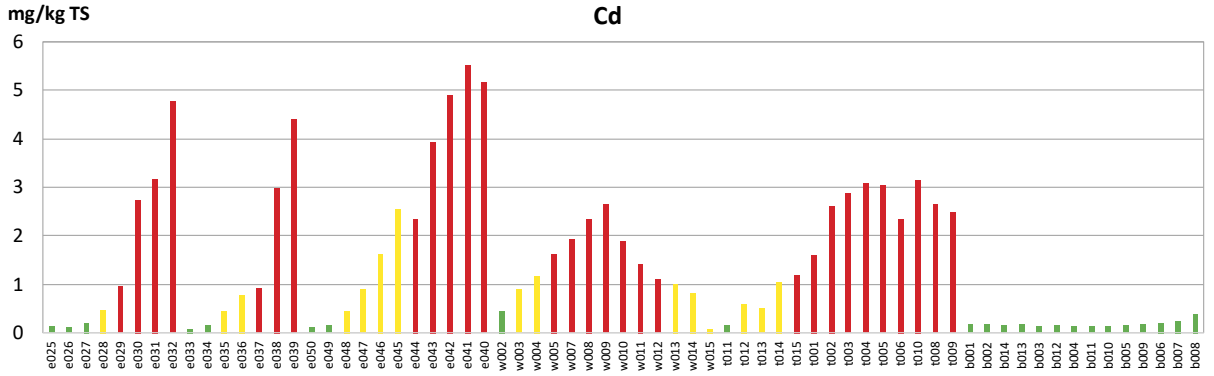
a)



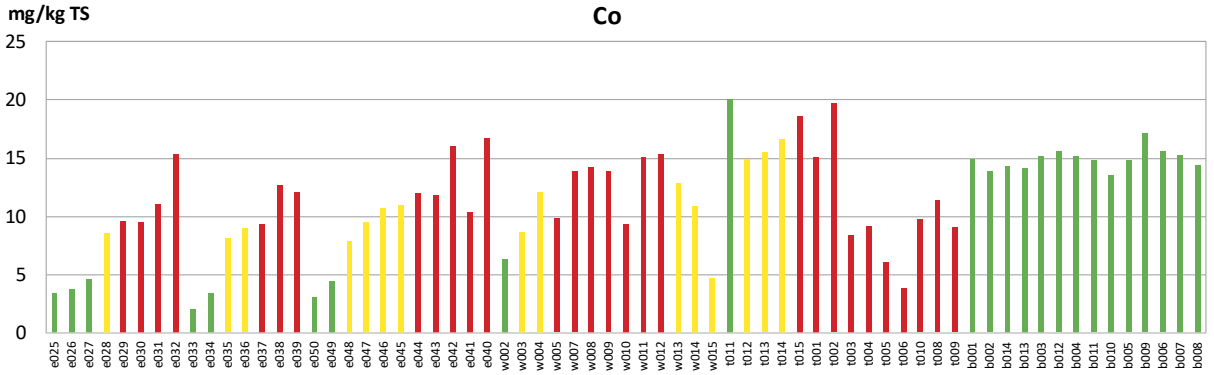
b)



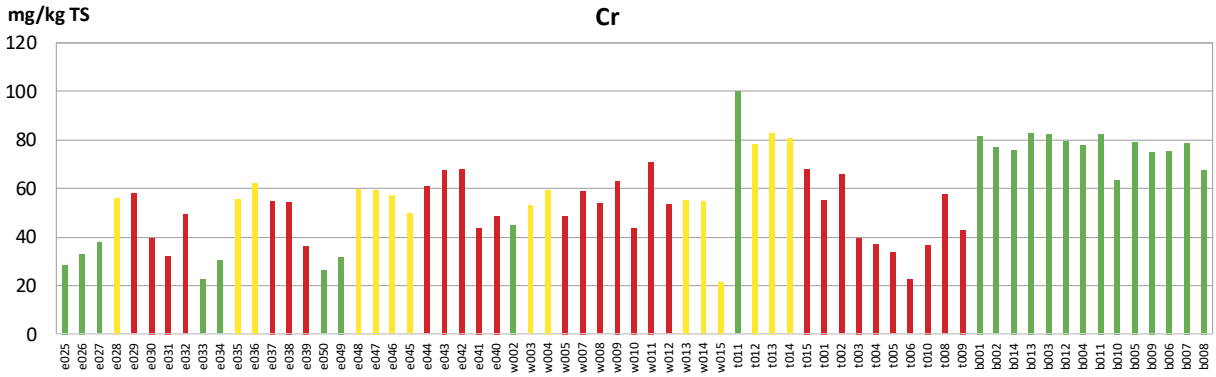
c)



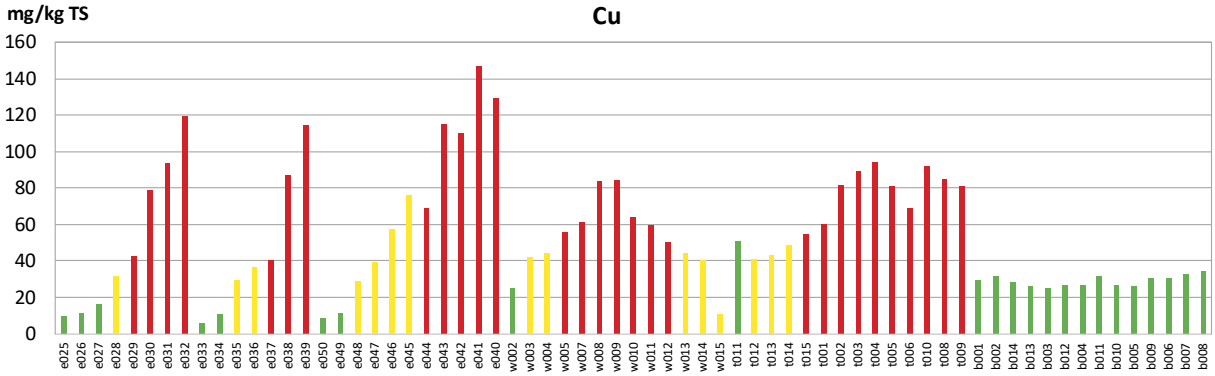
d)


mg/kg TS
Co
25
20
15
10
5
0
e025 e026 e027 e028 e029 e030 e031 e032 e033 e034 e035 e036 e037 e038 e039 e050 e049 e048 e047 e046 e045 e044 e043 e042 e041 e040 w002 w003 w004 w005 w007 w008 w009 w010 w011 w012 w013 w014 w015 t011 t012 t013 t014 t015 t001 t002 t003 t004 t005 t006 t010 t008 t009 b001 b002 b014 b013 b003 b012 b004 b011 b010 b005 b009 b006 b007 b008

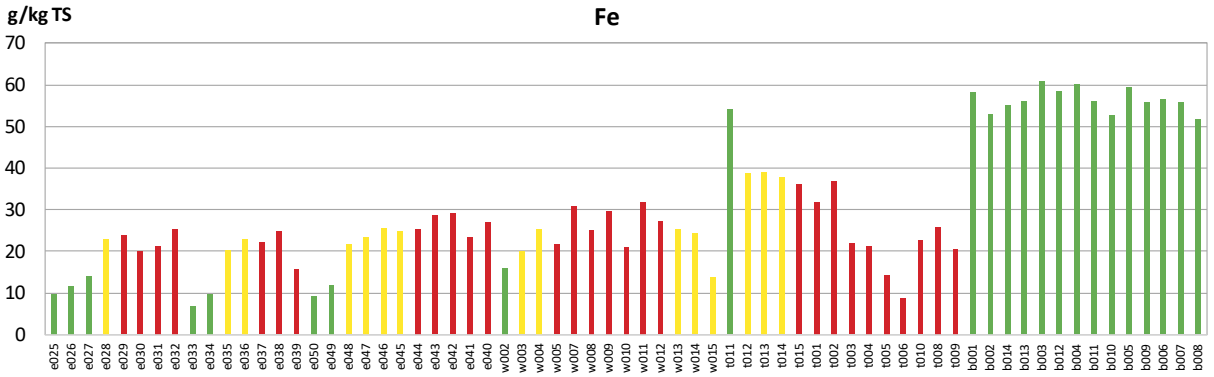
e)


mg/kg TS
Cr
120
100
80
60
40
20
0
e025 e026 e027 e028 e029 e030 e031 e032 e033 e034 e035 e036 e037 e038 e039 e050 e049 e048 e047 e046 e045 e044 e043 e042 e041 e040 w002 w003 w004 w005 w007 w008 w009 w010 w011 w012 w013 w014 w015 t011 t012 t013 t014 t015 t001 t002 t003 t004 t005 t006 t010 t008 t009 b001 b002 b014 b013 b003 b012 b004 b011 b010 b005 b009 b006 b007 b008

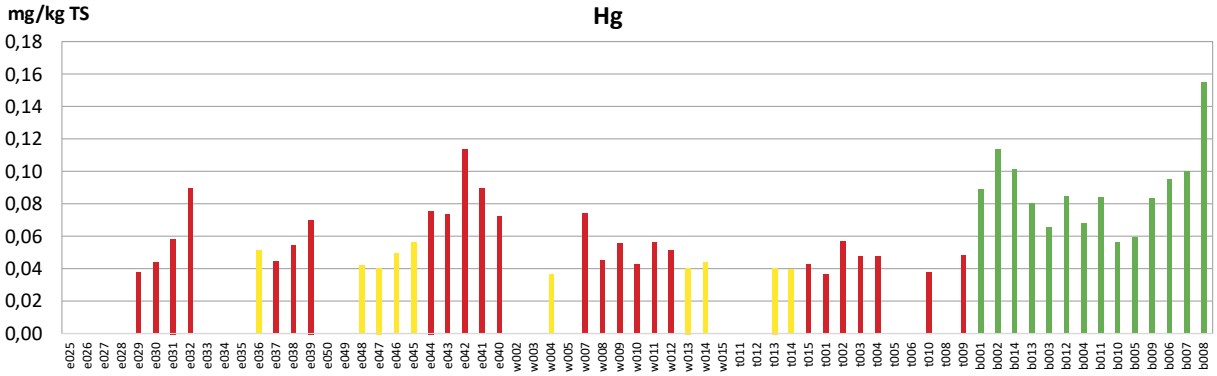
f)


mg/kg TS
Cu
160
140
120
100
80
60
40
20
0
e025 e026 e027 e028 e029 e030 e031 e032 e033 e034 e035 e036 e037 e038 e039 e050 e049 e048 e047 e046 e045 e044 e043 e042 e041 e040 w002 w003 w004 w005 w007 w008 w009 w010 w011 w012 w013 w014 w015 t011 t012 t013 t014 t015 t001 t002 t003 t004 t005 t006 t010 t008 t009 b001 b002 b014 b013 b003 b012 b004 b011 b010 b005 b009 b006 b007 b008

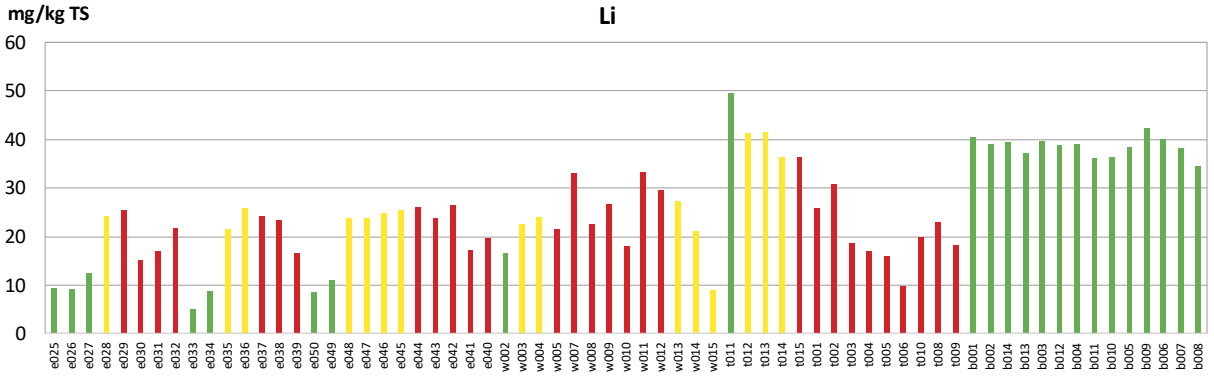
g)


g/kg TS
Fe
70
60
50
40
30
20
10
0
e025 e026 e027 e028 e029 e030 e031 e032 e033 e034 e035 e036 e037 e038 e039 e050 e049 e048 e047 e046 e045 e044 e043 e042 e041 e040 w002 w003 w004 w005 w007 w008 w009 w010 w011 w012 w013 w014 w015 t011 t012 t013 t014 t015 t001 t002 t003 t004 t005 t006 t010 t008 t009 b001 b002 b014 b013 b003 b012 b004 b011 b010 b005 b009 b006 b007 b008

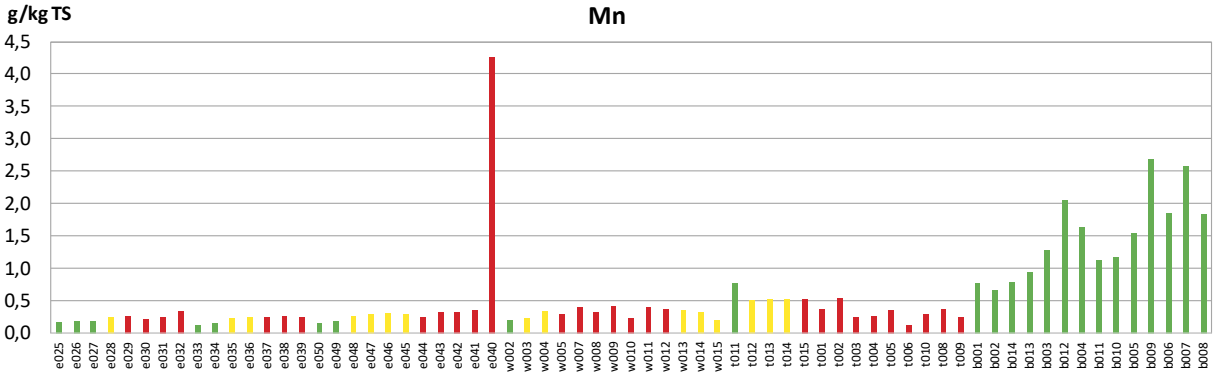
h)


mg/kg TS
Hg
0,18
0,16
0,14
0,12
0,10
0,08
0,06
0,04
0,02
0,00
e025 e026 e027 e028 e029 e030 e031 e032 e033 e034 e035 e036 e037 e038 e039 e050 e049 e048 e047 e046 e045 e044 e043 e042 e041 e040 w002 w003 w004 w005 w007 w008 w009 w010 w011 w012 w013 w014 w015 t011 t012 t013 t014 t015 t001 t002 t003 t004 t005 t006 t010 t008 t009 b001 b002 b014 b013 b003 b012 b004 b011 b010 b005 b009 b006 b007 b008

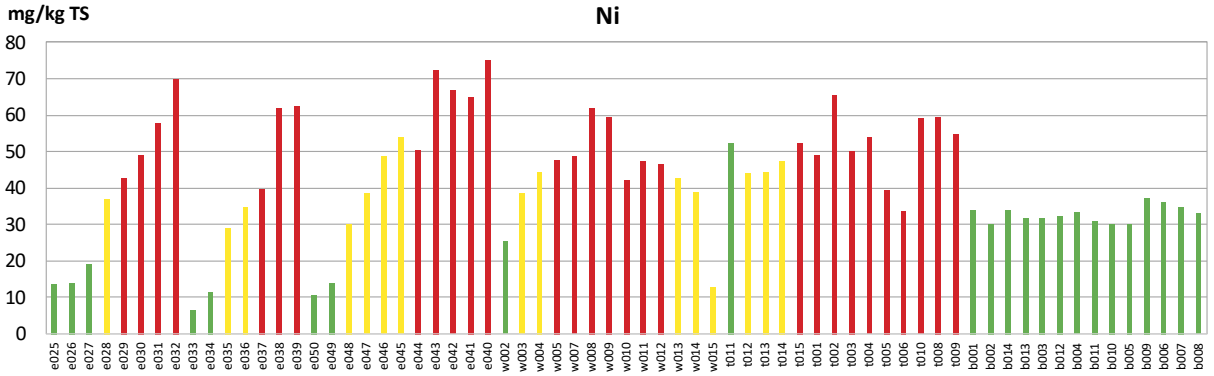
i)


mg/kg TS
Li
60
50
40
30
20
10
0
e025 e026 e027 e028 e029 e030 e031 e032 e033 e034 e035 e036 e037 e038 e039 e050 e049 e048 e047 e046 e045 e044 e043 e042 e041 e040 w002 w003 w004 w005 w007 w008 w009 w010 w011 w012 w013 w014 w015 t011 t012 t013 t014 t015 t001 t002 t003 t004 t005 t006 t010 t008 t009 b001 b002 b014 b013 b003 b012 b004 b011 b010 b005 b009 b006 b007 b008

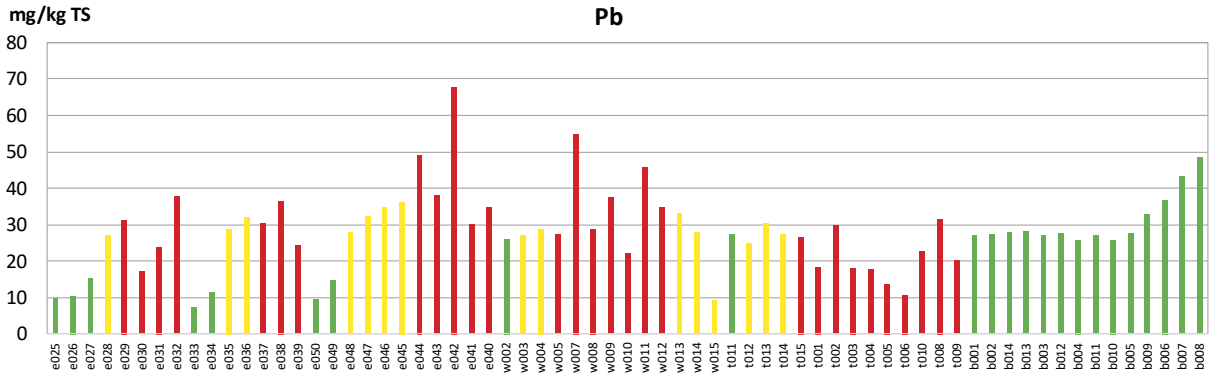
j)


g/kg TS
Mn
4,5
4,0
3,5
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
e025 e026 e027 e028 e029 e030 e031 e032 e033 e034 e035 e036 e037 e038 e039 e050 e049 e048 e047 e046 e045 e044 e043 e042 e041 e040 w002 w003 w004 w005 w007 w008 w009 w010 w011 w012 w013 w014 w015 t011 t012 t013 t014 t015 t001 t002 t003 t004 t005 t006 t010 t008 t009 b001 b002 b014 b013 b003 b012 b004 b011 b010 b005 b009 b006 b007 b008

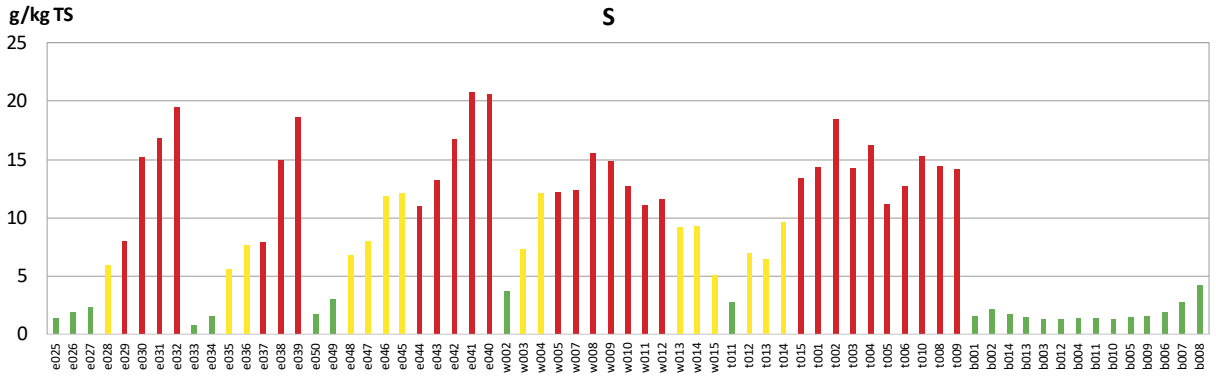
k)


mg/kg TS
Ni
80
70
60
50
40
30
20
10
0
e025 e026 e027 e028 e029 e030 e031 e032 e033 e034 e035 e036 e037 e038 e039 e050 e049 e048 e047 e046 e045 e044 e043 e042 e041 e040 w002 w003 w004 w005 w007 w008 w009 w010 w011 w012 w013 w014 w015 t011 t012 t013 t014 t015 t001 t002 t003 t004 t005 t006 t010 t008 t009 b001 b002 b014 b013 b003 b012 b004 b011 b010 b005 b009 b006 b007 b008

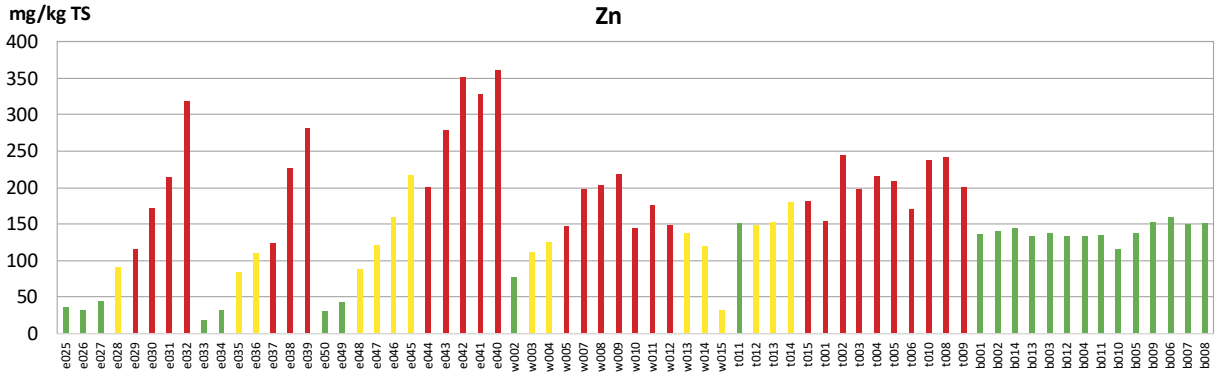
l)



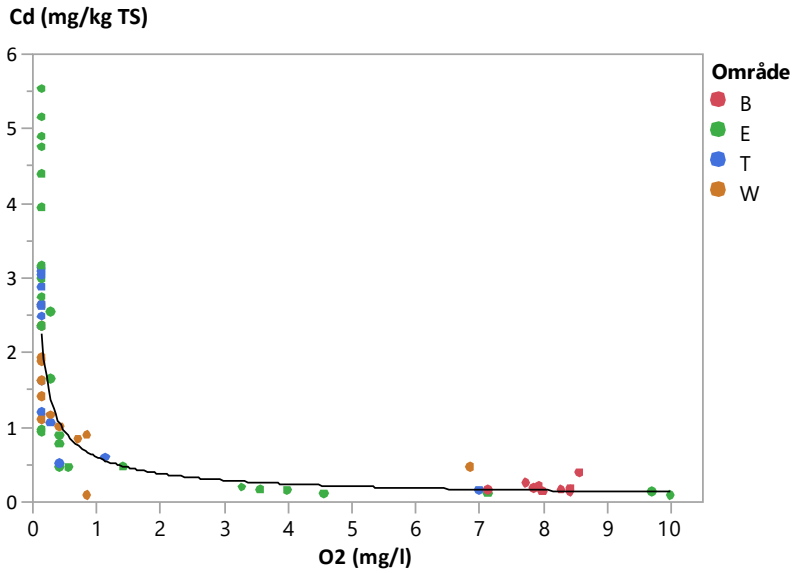
m)



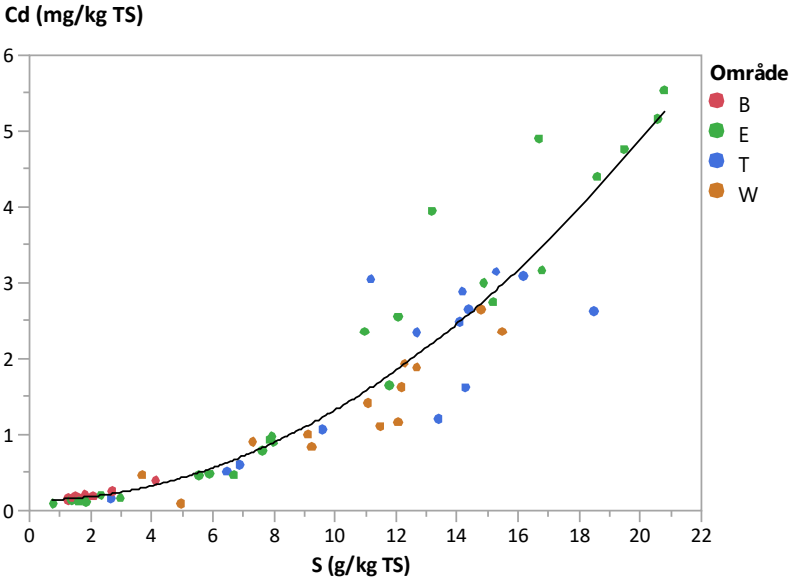
n)



Figur 15. Halterna av grundämnen i ytsediment (0–2 cm) på de 67 lokalerna: **a)** aluminium (Al, g/kg TS), **b)** arsenik (As, mg/kg TS), **c)** kadmium (Cd, mg/kg TS), **d)** kobolt (Co, mg/kg TS), **e)** krom (Cr, mg/kg TS), **f)** koppar (Cu, mg/kg TS), **g)** järn (Fe, g/kg TS), **h)** kvicksilver (Hg, mg/kg TS), **i)** litium (Li, mg/kg TS), **j)** mangan (Mn, g/kg TS), **k)** nickel (Ni, mg/kg TS), **l)** bly (Pb, mg/kg TS), **m)** svavel (S, g/kg TS) och **n)** zink (Zn, mg/kg TS). Staplarna är färgsatta utifrån syrgashalten i bottenvattnet, där grönt är > 2 mg O_2/l, gult är 0,2–2 mg O_2/l, och rött är < 0,2 mg O_2/l. Lokalerna är placerade enligt ordningen längs respektive mätlinje, se figur 2.



Figur 16. Halterna av kadmium (Cd; mg/kg TS) i ytsediment (0–2 cm) avtar snabbt med ökande syrgashalt i bottenvattnet. Sambandet beskrivs väl ($p < 0{,}0001$, $r^2_{adj} = 0{,}84$, $n = 67$) med ekvationen ln Cd = - 0,52 - 0,68 ln O_2. Även lokalerna i Bråviken följer detta samband.



Figur 17. Halterna av kadmium (Cd; mg/kg TS) i ytsediment (0–2 cm) ökar med ökande svavelhalt. Sambandet beskrivs väl ($p < 0{,}0001$, $r^2_{adj} = 0{,}89$) med ekvationen Cd = 0,13 + 0,0118 S^2. Även lokalerna i Bråviken följer detta samband.

Korrelationer till miljöparametrar

I vilken utsträckning de olika grundämnena, inklusive svavel, samvarierar med syrgashalt, vattendjup och TOC undersöktes med principalkomponentanalys (PCA; fig. 18). Det är tydligt att det finns ett positivt samband mellan svavel och TOC, med syrgashalt på motsatt sida längs den första principalkomponenten som förklarar nästan 50 % av variationen i datat. En hög syrgashalt har alltså ett negativt samband med svavel och TOC. Kadmium är det ämne som har mest samvariation med svavel och TOC, följt av koppar, arsenik, nickel och zink. Andra undersökta ämnen, som aluminium, järn, mangan, litium och krom, uppvisar inte samma samband med högre halter på syrefria bottnar som har högre halter svavel och TOC. PCA:n visar snarare på ett motsatsförhållande mellan vattendjup och dessa grundämnen (fig. 18). De förekommer istället i

högre halter i Bråviken, vilket är ett område med syresatta ytsediment och låg halt av svavel och TOC (se fig. 15). De mest kustnära lokalerna på transekten mellan fastlandet och Gotland (område T, det vill säga t011 och vidare) tenderar också att ha förhöjda halter av dessa ämnen i likhet med Bråviken.

Aluminium och järn förekommer i stabila och högre halter i Bråviken och på t011 än på övriga lokaler, i nivåer på 70–90 och 50–65 g/kg TS för aluminium respektive järn (fig. 15a och 15g). Mangan förekommer också i högre halter i Bråviken och på t011 än på övriga lokaler, med undantag för den tidigare nämnda e040 (fig. 15j). Halterna är dock inte lika genomgående stabila som för aluminium och järn, utan varierar mellan 0,5 och 3,0 g/kg TS. Även krom och litium har förhöjda halter i Bråviken och på t011(fig. 15e och i), men inte i lika hög grad som aluminium, järn och mangan. För dessa två ämnen är det dessutom t011 som uppvisar de högsta halterna.

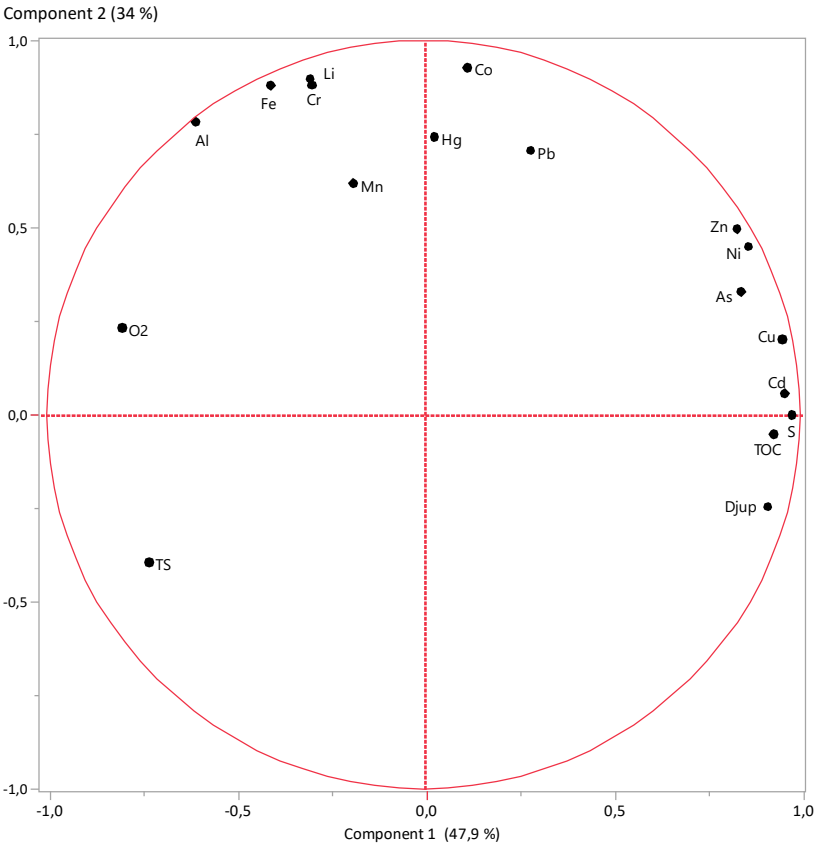
Kobolt, kvicksilver och bly bildar en egen grupp, genom att varken utmärka sig genom höga halter i anoxiska sediment (till skillnad från till exempel kadmium) eller genom höga halter i sediment i Bråviken (till skillnad från till exempel aluminium; fig. 18). Kobolt har överlag förhöjda halter i Bråviken och i början av område T, men lika höga halter förekommer även på en del anoxiska och hypoxiska utsjöstationer (fig. 15d). Kobolt brukar anrikas i syresatt sediment genom binding till oxider och hydroxider av järn eller mangan, även om det även kan bindas till sulfider; en bindning som dock är mindre stark än för exempelvis koppar eller zink (Swanner m.fl. 2014).

Kvicksilver visar tendenser till höga halter på anoxiska utsjöstationer medan halterna överlag är lägre eller till och med under detektionsgränsen på de hypoxiska och syresatta utsjöstationerna (fig. 15h). Detta är rimligt, eftersom kvicksilver kan bilda sulfider i syrefattigt sediment (Ankley m.fl. 1996). Halterna i det syresatta sedimentet i Bråviken är förhöjda vilket kan tyda på inflytande från lokala källor eller avrinning. Halterna är däremot inte förhöjda på stationerna närmast kusten i område T.

Bly uppvisar halter som ökar kontinuerligt vid Bråvikens öppning ut mot Östersjön, men de högsta halterna förekommer i område E och W (fig. 15l). Bly bildar sulfider i anoxiskt sediment, i likhet med exempelvis kadmium, koppar, nickel, zink och kvicksilver (Ankley m.fl. 1996), men i den här undersökningen varierar halterna avsevärt även mellan anoxiska utsjöstationer i samma område, och det är därför svårt att dra slutsatser om vad som styr blyhalterna i sediment på de undersökta lokalerna.

Bindning till svavel och organiskt material på anoxiska bottnar

Eftersom de syrefria bottnarna har höga halter av både svavel och TOC kan det vara svårt att avgöra vad som är det mest avgörande för halterna av kadmium och övriga undersökta ämnen i anoxiskt sediment. Linjära regressioner mellan de olika ämnena och svavel respektive TOC för endast lokaler på syrefria bottnar (O_2 < 0,2 mg/l; n = 29) visar dock på bättre positiv korrelation, i form av signifikant lutning på regressionslinje och högre r^2, till svavel än till TOC (tabell 3). Detta är fallet för arsenik, kadmium, koppar, kvicksilver, nickel och zink, och pekar på att bindningen som sulfider dominerar över bindningen till TOC. Ett motsatt förhållande, med signifikanta negativa korrelationer till TOC men inga signifikanta korrelationer till svavel, gällde för aluminium, järn, krom, litium och bly. En möjlig orsak till den negativa korrelationen till TOC, åtminstone för en del av grundämnena, kan vara att en ökad mängd TOC späder ut den minerogena delen av sedimentet. Bly bör, som redan nämnts, bindas som sulfider i anoxiskt sediment (Ankley m.fl. 1996) men det är inte påtagligt i data från den här undersökningen. Kobolt hade ingen signifikant korrelation mot vare sig TOC eller svavel, och inte manganhalterna heller när det extrema värdet för mangan på lokal e040 uteslöts.



Figur 18. Scoreplot från principalkomponentanalys (PCA) som visar samvariationen mellan grundämnen och andra parametrar (syrgashalt (O_2), torrsubstans (TS), TOC och vattendjup) på de 67 lokalerna. Principalkomponent 1 och 2 beskriver tillsammans 82 % av variationen i datasetet. PCA är en statistisk metod för att visualisera likheter och skillnader mellan parametrar genom att reducera data till ett mindre antal principalkomponenter. Scoreplotten visar hur varje enskild parameter bidrar till principalkomponenterna. En parameter som befinner sig långt ut längs en komponent bidrar alltså starkt till variationen längs den komponenten medan en parameter som befinner sig i mitten av komponenten (runt 0) inte gör det.

Tabell 3. Ekvationer för signifikanta linjära regressioner mellan olika ämnen (mg/kg TS) och svavel (g/kg TS) i syrefritt sediment (lokaler där O_2 i bottenvatten är < 0,2 mg/l).

Ämne	Ekvation	Signifikans lutning	r^2_{adj}
Arsenik	As = -5,74 + 1,59*S	$p < 0,001$	0,58
Kadmium	Cd = -1,83 + 0,318*S	$p < 0,001$	0,67
Koppar	Cu = -15,2 + 6,79*S	$p < 0,001$	0,72
Kvicksilver	Hg = 0,00495 + 0,00336*S	$p = 0,007$	0,21
Nickel	Ni = 18,9 + 2,48*S	$p < 0,001$	0,59
Zink	Zn = -16,9 + 16,1*S	$p < 0,001$	0,65

Fosfor i sediment

Fosforhalter i ytsediment

Halter och mönster

Halterna av totalfosfor och olika fosforfraktioner i ytsedimentet (0–2 cm) på varje lokal har undersökts för att se hur fosforhalterna varierar geografiskt och om halterna kan förklaras av miljöparametrar som till exempel syrgashalt. Observera emellertid att halterna i ytsedimentet inte är ett direkt mått på det som är potentiellt remobiliserbart, det vill säga det fosfor som kan frigöras och åter röra sig ut till vattenmassan. Det senare beror också på hur stor del av fosforn i ytsedimentet som begravs längre ner i sedimentet istället för att läcka ut till vattnet.

Halterna av totalfosfor i ytsedimentet varierar mellan 340 och 1 990 mg/kg TS, med både de lägsta och de högsta halterna i syresatt sediment (fig. 19, lokal e033 respektive b005). Halterna är överlag högre i Bråviken än i utsjöproverna. Lokal e033 är en siltig sand (se avsnittet *Kornstorleksfördelning*) och är således inte en ackumulationsbotten, medan sedimentet i Bråviken generellt kan klassas som lera och ackumulationsbotten (se lokal b014 i avsnittet *Kornstorleksfördelning*). Det är rimligt att fosforhalterna är högre i finkornigt sediment på en ackumulationsbotten än i mer grovkornigt sediment på en erosions- eller transportbotten.

För utsjöproverna är halterna av totalfosfor generellt högre i syrefria sediment (O_2 < 0,2 mg/l i bottenvattnet) än i hypoxiska eller syresatta sediment. Halterna i ytsedimentet på dessa syrefria lokaler är ibland jämförbara med halterna i Bråviken. Halterna av totalfosfor är således inte förhöjda i hypoxiskt sediment i utsjön jämfört med anoxiskt sediment. De är inte heller förhöjda i syresatt utsjösediment till skillnad från vad fallet är i syresatt sediment i Bråviken.

Hur mycket olika fosforfraktioner utgör av totalfosforhalterna varierar kraftigt mellan de olika lokalerna (fig. 20). I medel för de 67 lokalerna utgör löst bunden fosfor endast 2 % och Al-P 6 % av totalfosforhalterna. Den största fraktionen är Ca-P, som i medel utgör 31 % av totalfosforhalterna, följt av Org-P (27 %), Rest-P (23 %) och Fe-P (12 %).

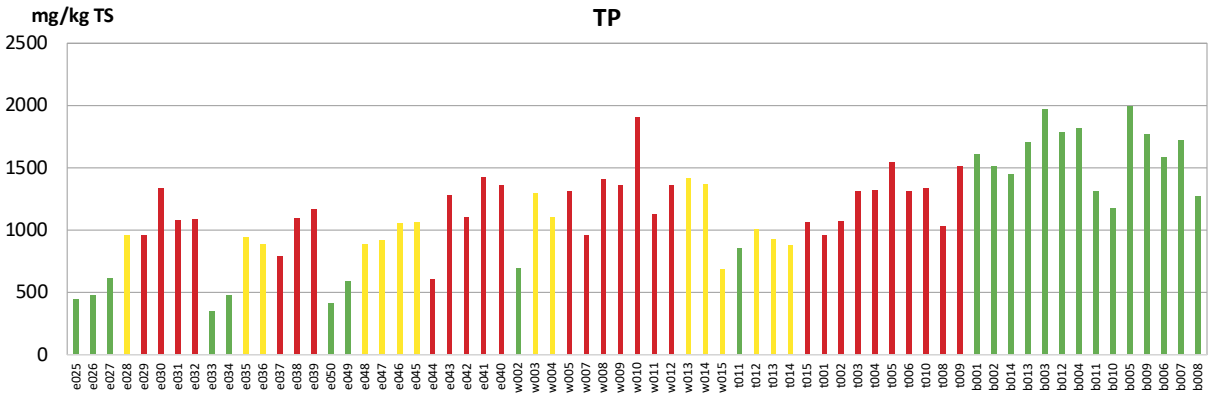
Det är tydligt att fosfor bundet till järnoxider/hydroxider (Fe-P) utgör en stor del av totalfosforn i ytsedimentet för lokaler i Bråviken. För utsjölokalen närmast kusten och Bråviken, t011, utgör Fe-P fortfarande en betydande del av totalfosforn i ytsedimentet (20 %). Observera dock att för övriga utsjölokaler utgör Fe-P under 10 % av totalfosfor. Om man ser på halterna av Fe-P, inte bara dess andel av totalfosfor, är halterna inte höga på utsjölokalerna med oxiderat sediment (fig. 21b). Att varken halterna Fe-P eller andelen som denna fraktion utgör av totalfosfor är höga kan vara relaterat till de låga halterna av järn här, enligt vad som har uppmätts med en totalmetod (det vill säga inte bara löst bundet järn; se fig. 15g). Kvoten av löst Fe/P är lägre i marina miljöer än limniska, och en kvot under två försvårar bildningen av Fe-P (Blomqvist m.fl. 2004). För vidare analyser av hur halterna Fe-P varierar med halterna Fe, se figur 26.

Al-P samvarierar med Fe-P och utgör en större del av totalfosfor i Bråviken och på lokal t011 än på övriga lokaler. Detta skulle kunna återspegla förhållanden i miljön, men en tidigare studie har även nämnt att det skulle kunna bero på extraktionsmetoden, det vill säga att rester av vätskan använd under Fe-P-extraktion finns kvar när nästa extraktionssteg startas (Rydin m.fl. 2011).

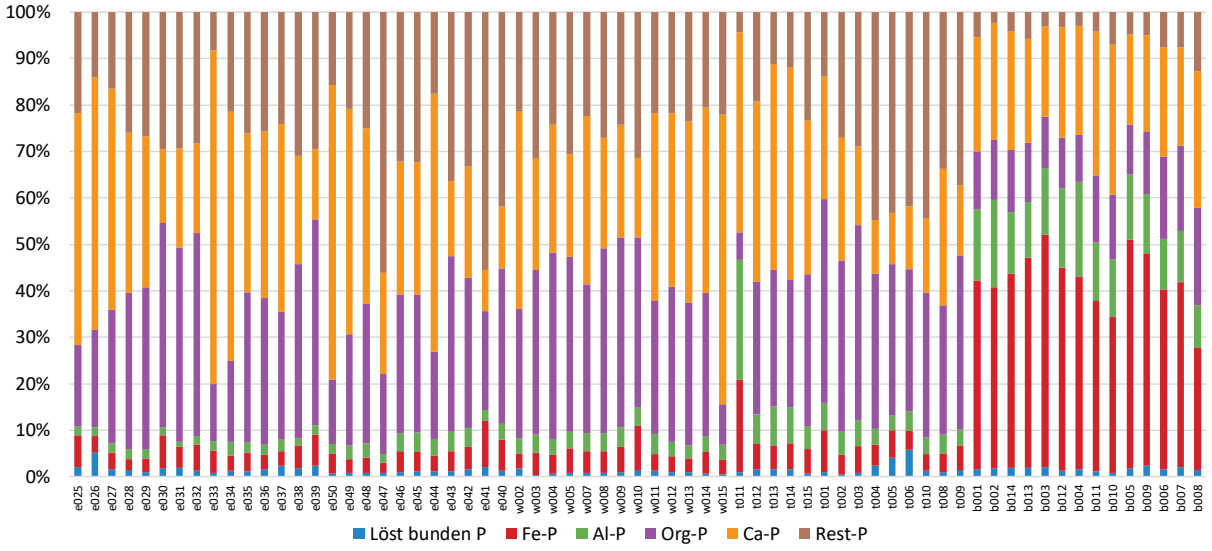
För utsjölokaler utgör fosfor bundet till organiskt material (Org-P) och Rest-P betydande delar av totalfosfor. Dessa två fraktioner samvarierar och båda har ökande andel på anoxiska lokaler, vilket är rimligt eftersom det där finns högre halter organiskt material. Det verkar således som att Rest-P, den del av totalfosforn som inte kan förklaras av de fraktioner som extraheras under

fosforfraktioneringen, till stor del är förknippat med organiskt material på de lokaler som provtagits i denna undersökning. Att Org-P är en viktig fraktion på anoxiska bottnar överensstämmer med vad som iakttagits i en tidigare studie på den bottentypen i Östersjön (Mort m.fl. 2010).

Ca-P, det vill säga fosfor bundet till kalcium inklusive apatit, utgör en högre andel vid de kustnära utsjölokalerna, till exempel e025, e033, e050 och w015. Detta är lokaler som har en låg halt av totalfosfor överlag (fig. 19). Ca-P förekommer således inte i höga halter utan har relativt jämna halter mellan lokalerna i jämförelse med de andra fosforfraktionerna (fig. 21e). Halterna är dock förhöjda på lokalerna närmast Öland i område W och i någon mån även på lokalerna i Bråviken.

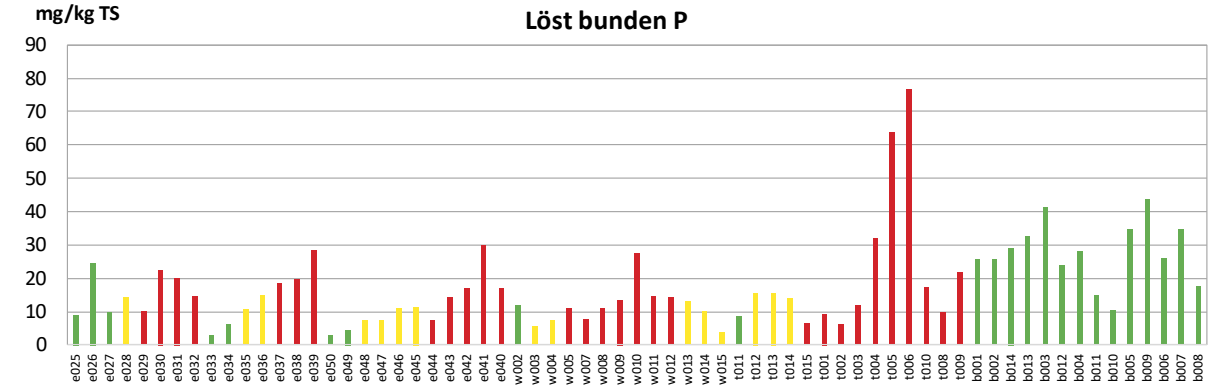


Figur 19. Halterna av totalfosfor (TP, mg/kg TS) i ytsediment (0–2 cm) på respektive lokal. Staplarna är färgsatta utifrån syrgashalt, där grönt är > 2 mg O_2/l, gult är 0,2–2 mg O_2/l, och rött är < 0,2 mg O_2/l. Lokalerna är placerade enligt ordningen längs respektive mätlinje, se figur 2.

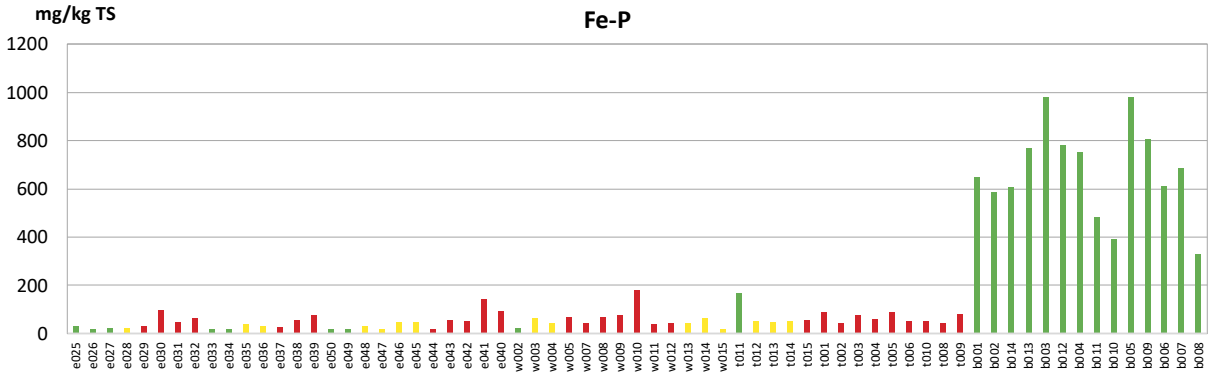


Figur 20. Fördelningen (i %) av vad de olika fosforfraktionerna utgör av totalfosfor i ytsediment (0–2 cm) på respektive lokal.

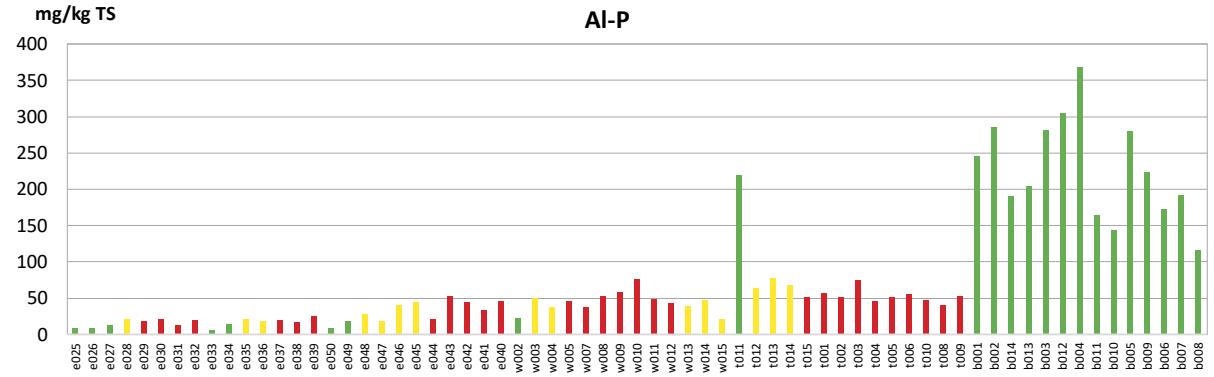
a)


mg/kg TS
Löst bunden P
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
e025 e026 e027 e028 e029 e030 e031 e032 e033 e034 e035 e036 e037 e038 e039 e050 e049 e048 e047 e046 e045 e044 e043 e042 e041 e040 w002 w003 w004 w005 w007 w008 w009 w010 w011 w012 w013 w014 w015 t011 t012 t013 t014 t015 t001 t002 t003 t004 t005 t006 t010 t008 t009 b001 b002 b014 b013 b003 b012 b004 b011 b010 b005 b009 b006 b007 b008

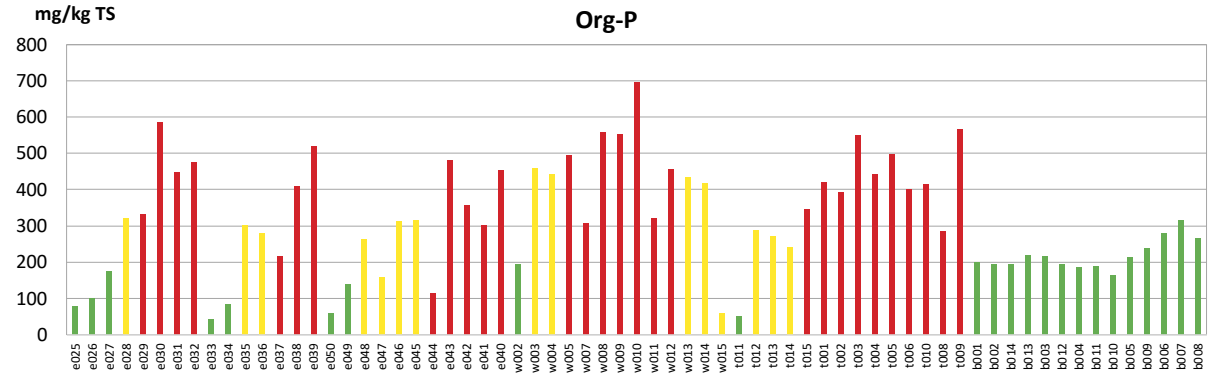
b)


mg/kg TS
Fe-P
1200
1000
800
600
400
200
0
e025 e026 e027 e028 e029 e030 e031 e032 e033 e034 e035 e036 e037 e038 e039 e050 e049 e048 e047 e046 e045 e044 e043 e042 e041 e040 w002 w003 w004 w005 w007 w008 w009 w010 w011 w012 w013 w014 w015 t011 t012 t013 t014 t015 t001 t002 t003 t004 t005 t006 t010 t008 t009 b001 b002 b014 b013 b003 b012 b004 b011 b010 b005 b009 b006 b007 b008

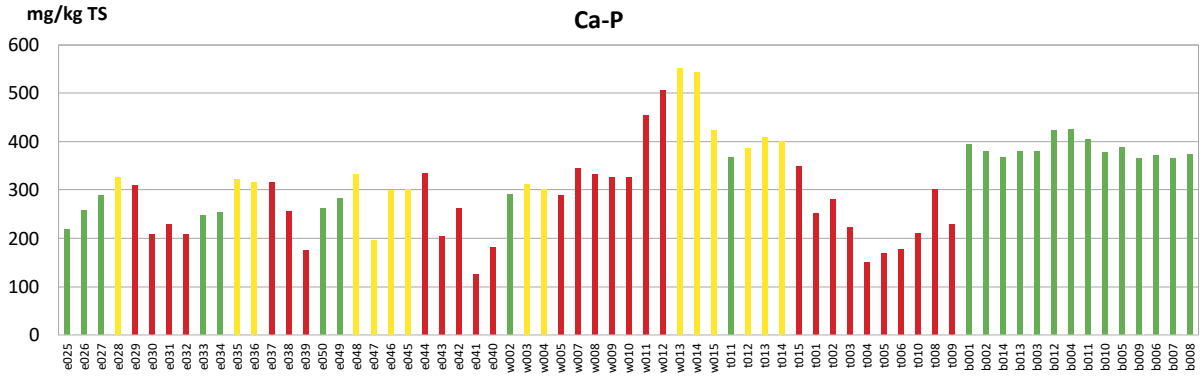
c)


mg/kg TS
Al-P
400
350
300
250
200
150
100
50
0
e025 e026 e027 e028 e029 e030 e031 e032 e033 e034 e035 e036 e037 e038 e039 e050 e049 e048 e047 e046 e045 e044 e043 e042 e041 e040 w002 w003 w004 w005 w007 w008 w009 w010 w011 w012 w013 w014 w015 t011 t012 t013 t014 t015 t001 t002 t003 t004 t005 t006 t010 t008 t009 b001 b002 b014 b013 b003 b012 b004 b011 b010 b005 b009 b006 b007 b008

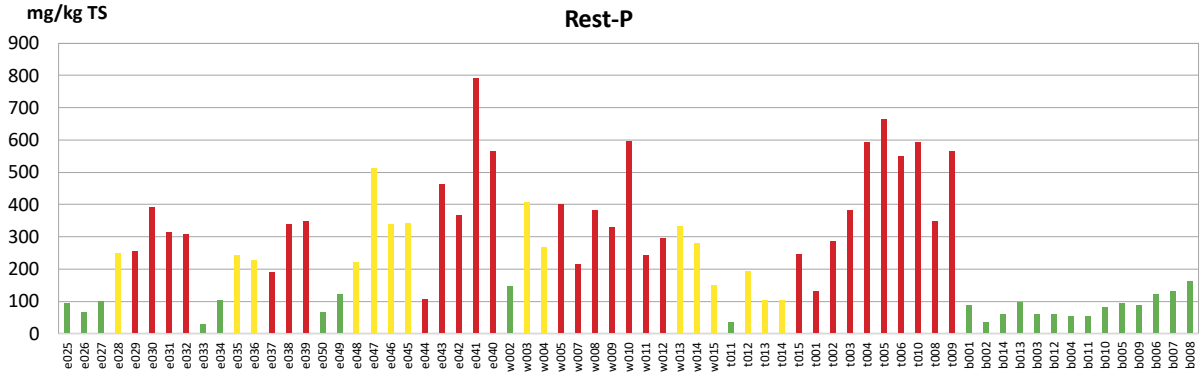
d)


mg/kg TS
Org-P
800
700
600
500
400
300
200
100
0
e025 e026 e027 e028 e029 e030 e031 e032 e033 e034 e035 e036 e037 e038 e039 e050 e049 e048 e047 e046 e045 e044 e043 e042 e041 e040 w002 w003 w004 w005 w007 w008 w009 w010 w011 w012 w013 w014 w015 t011 t012 t013 t014 t015 t001 t002 t003 t004 t005 t006 t010 t008 t009 b001 b002 b014 b013 b003 b012 b004 b011 b010 b005 b009 b006 b007 b008

e)



f)



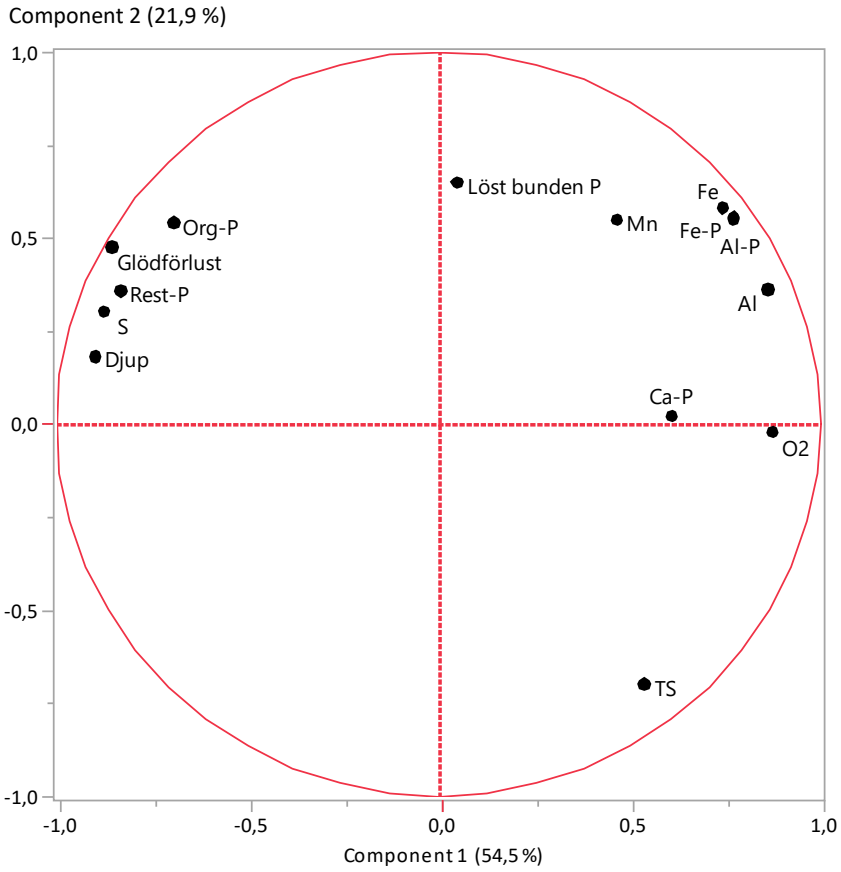
Figur 21. Halterna av fosforfraktioner (mg/kg TS) i ytsediment (0–2 cm) på de 67 lokalerna: **a)** löst bunden P, **b)** Fe-P, **c)** Al-P, **d)** Org-P, **e)** Ca-P, och **f)** Rest-P. Staplarna är färgsatta utifrån syrgashalt, där grönt är > 2 mg O_2/l, gult är 0,2–2 mg O_2/l, och rött är < 0,2 mg O_2/l. Lokalerna är placerade enligt ordningen längs respektive mätlinje, se figur 2. Observera att skalan på y-axeln skiljer sig mellan de olika fraktionerna, t.ex. förekommer löst bunden P i mycket lägre halter än Fe-P.

Korrelationer mellan fosfor och olika miljöparametrar

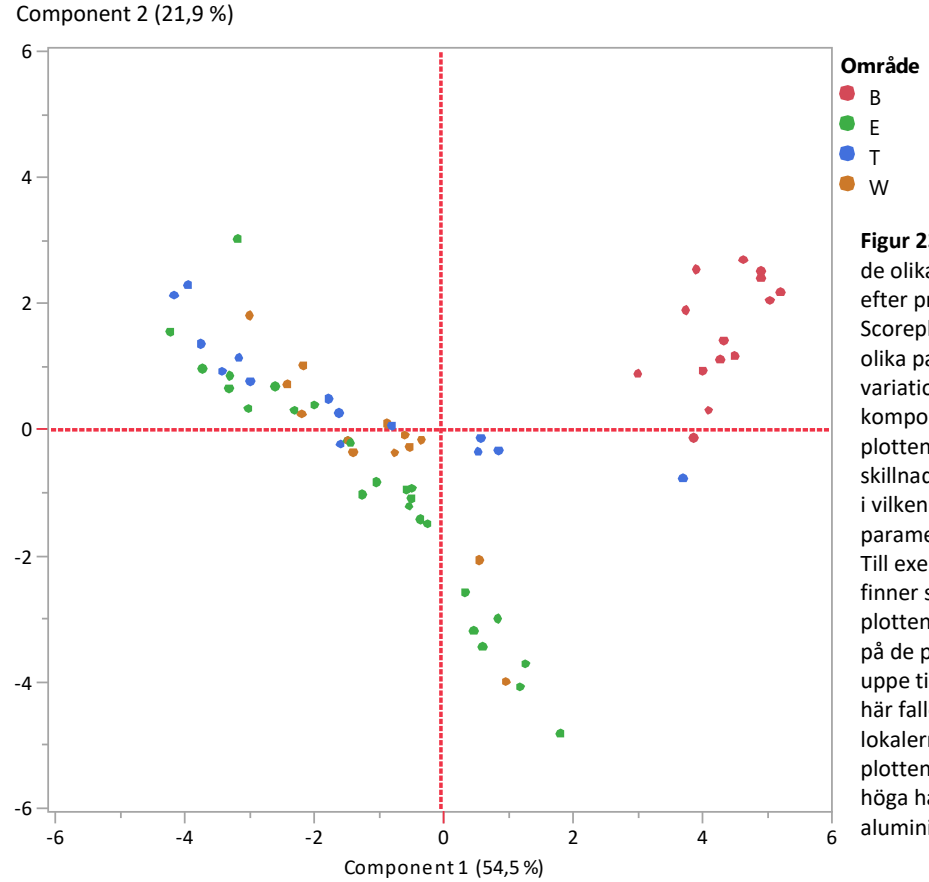
De olika fosforfraktionernas samvariation med syrgashalt, vattendjup, glödförlust, torrsubstans och grundämnen som förekommer i högre halter i sedimenten (Fe, Al, Mn, S) undersöktes med principalkomponentanalys (PCA; fig. 22). Att undersöka samvariationen/korrelationen är viktigt för att försöka fastslå samband mellan fosfor och olika miljöparametrar. Detta gör att vi får mer förståelse för vad som styr fosforhalterna, vilket i sin tur gör att vi kan skapa underbyggda modeller för att rumsligt prediktera förekomsten av olika fosforformer utifrån miljöparametrar.

Analysen visar att Org-P och Rest-P grupperar sig med glödförlust, svavel och vattendjup (i den övre vänstra delen av scoreplotten; fig. 22), vilket innebär att dessa parametrar samvarierar. Fe-P och Al-P är nära grupperade med varandra och med järn i den övre högra delen. De är mer förknippade med halterna av järn än med syrgashalterna, vilket illustrerar att det förekommer låga halter av Fe-P och Al-P på syresatta utsjölokaler där även halterna av järn var låga. Org-P och Rest-P varierar omvänt mot syrgashalten, det vill säga de har högre halter när syrgashalterna är lägre. Ca-P är den fraktion som har mest positiv samvariation med syrgashalten, medan fraktionen är mindre väl korrelerad till övriga undersökta parametrar.

På motsvarande loadingplot, som visar hur de olika lokalerna har bidragit till den variation som framgår av scoreplot, fördelar sig utsjölokalerna längs en kontinuerlig linje från det övre vänstra hörnet till det lägre högra, vilket pekar på att de skiljer sig åt främst genom skillnader i parametrarna Org-P och Rest-P, glödförlust, svavel och djup å ena sidan och TS och syrgashalt i bottenvattnet å andra sidan (fig. 23). Bråvikenlokaler och t011 fördelar sig däremot mer i den övre högra delen av PCA:n, vilket pekar på deras högre halter av Fe-P och Al-P.



Figur 22. Scoreplot från principalkomponentanalys (PCA) som visar samvariationen mellan halterna av fosforfraktioner och utvalda grundämnen (Fe, Al, Mn, S) samt glödförlust och torrsubstans (TS) i ytsediment (0–2 cm) på de 67 lokalerna. Även syrgashalt i bottenvatten (O_2) och vattendjup har inkluderats. Det avvikande värdet för mangan på lokal e040 är inkluderat. Principalkomponent 1 och 2 förklarar tillsammans 76,4 % av variationen i datasetet.



Figur 23. Loadingplot som visar hur de olika lokalerna fördelar sig utefter principalkomponent 1 och 2. Scoreplotten (fig. 22) visar hur de olika parametrarna bidrar till variationen i data längs principalkomponenterna, medan loadingplotten beskriver likheter eller skillnader mellan provlokalerna, och i vilken grad de olika provlokalernas parametrar bidrar till variationen. Till exempel, en provlokal som befinner sig uppe till höger i loadingplotten har generellt högre värden på de parametrar som befinner sig uppe till höger i scoreplotten. I det här fallet grupperar sig Bråvikenlokalerna i den övre högra delen av plotten, och de kännetecknas av höga halter av bland annat järn, aluminium, Fe-P och Al-P .

Halterna av de olika fosforfraktionerna i ytsediment jämfördes med glödförlust, syrgashalt (O_2), vattendjup, torrsubstans, järn, aluminium och svavel för att undersöka möjliga prediktorer för fosforfraktionernas halter. Både järn och aluminium inkluderades även om järn är den parameter som har en bättre samvariation med Fe-P och Al-P enligt PCA:n, och halterna av järn och aluminium är väl korrelade (linjär regression, $p < 0{,}0001$, $r^2_{adj} = 0{,}90$, $n = 67$; jämför även fig. 15a och g). Löst bunden P utelämnades från korrelationsundersökningarna eftersom det endast utgör en mycket lite del av totalfosfor. Möjliga korrelationerna för totalfosfor och en summa av de mer reaktiva fosforfraktionerna (Fe-P, Org-P och Rest-P) undersöktes däremot. I denna summa inkluderades inte den löst bundna fosforn och Al-P då de endast utgör mindre fraktioner, och inte heller Ca-P då den kan betraktas som en icke-reaktiv fraktion.

Org-P korrelerade väl med glödförlust (fig. 24; $r^2_{adj} = 0{,}80$). Denna fraktion visade även en positiv korrelation till svavel, men med lägre förklaringsgrad (linjär regression, $r^2_{adj} = 0{,}56$), och en negativ korrelation till torrsubstans, också den med lägre förklaringsgrad (ln-ln, $r^2_{adj} = 0{,}73$).

Även Rest-P uppvisade en god korrelation till glödförlust (fig. 25, $r^2_{adj} = 0{,}81$). Liksom Org-P var den även positivt korrelerad till svavel och negativt korrelerad till torrsubstans, men med lägre förklaringsgrad. Halterna av Org-P och Rest-P är också korrelerade till varandra (linjär regression, $p < 0{,}001$, $r^2_{adj} = 0{,}51$, $n = 67$).

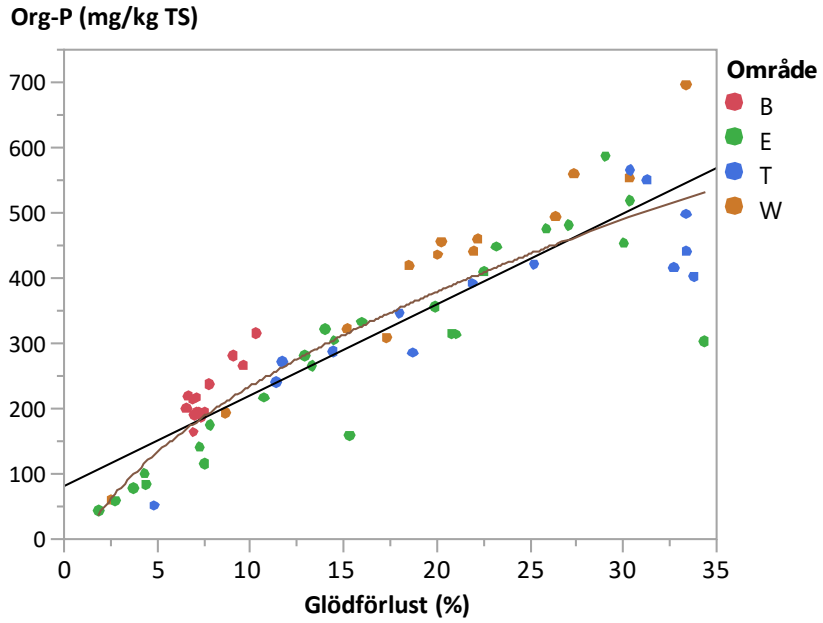
Halterna av Fe-P var korrelerade till halterna av järn, i det att halterna Fe-P var markant högre i sediment med höga järnhalter (fig. 26). Halterna av Fe-P var således inte förhöjda i alla syresatta sediment, utan endast i de med höga halter av järn, över 40–50 g/kg TS. Korrelationen mellan Fe-P och järnhalter är snarlik en korrelation observerad av Karlsson m.fl. (2009) för sediment med järnhalter över 48 g/kg TS i Stockholms skärgård. Det fanns även samband mellan halterna Fe-P och aluminium, men med lägre förklaringsgrad än för järn.

Al-P visar liknande korrelationer som Fe-P till järn (fig. 27) och aluminium. Detta är inte förvånande eftersom dessa två fosforfraktioner är väl korrelerade ($r^2_{adj} = 0{,}86$).

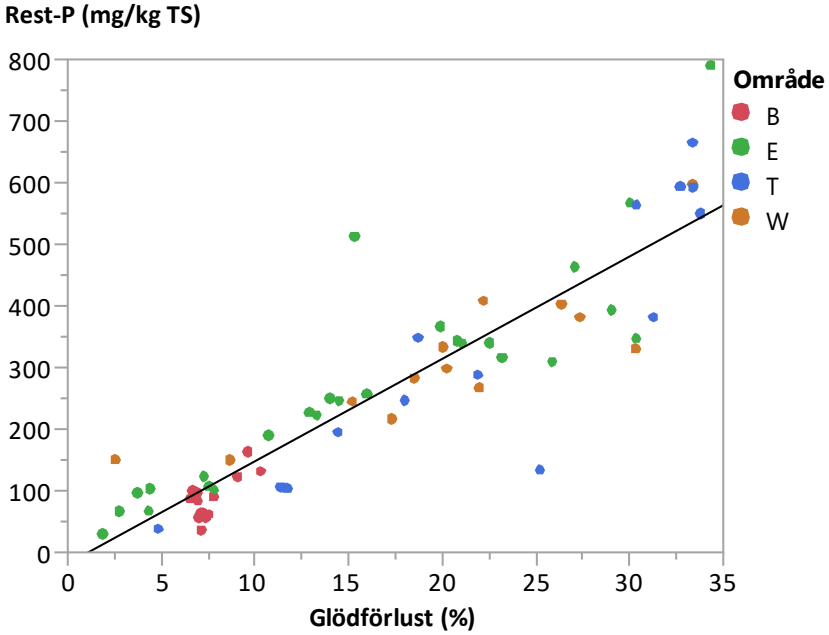
Halterna av Ca-P är, som nämnts, relativt stabila mellan lokalerna i jämförelse med Fe-P, Al-P, Org-P och Rest-P. Halterna är visserligen signifikant positivt korrelerade med järn och aluminium och negativt korrelerade med glödförlust, men med låg förklaringsgrad (linjär regression, $r^2_{adj} = 0{,}27$, 0,38 respektive 0,24). Den prediktor som har bäst förklaringsgrad är vattendjupet, och här är det tydligt att halterna är förhöjda i område W i förhållande till övriga områden (fig. 28).

Summahalterna av de mer reaktiva fosforfraktionerna (Fe-P + Org-P + Rest-P) var väl korrelerade till glödförlust för utsjölokalerna (fig. 29), men Bråvikenlokalerna avvek markant och kunde inte inkluderas i regressionen. Detta beror på de höga halterna Fe-P som inte kan förklaras av glödförlusten.

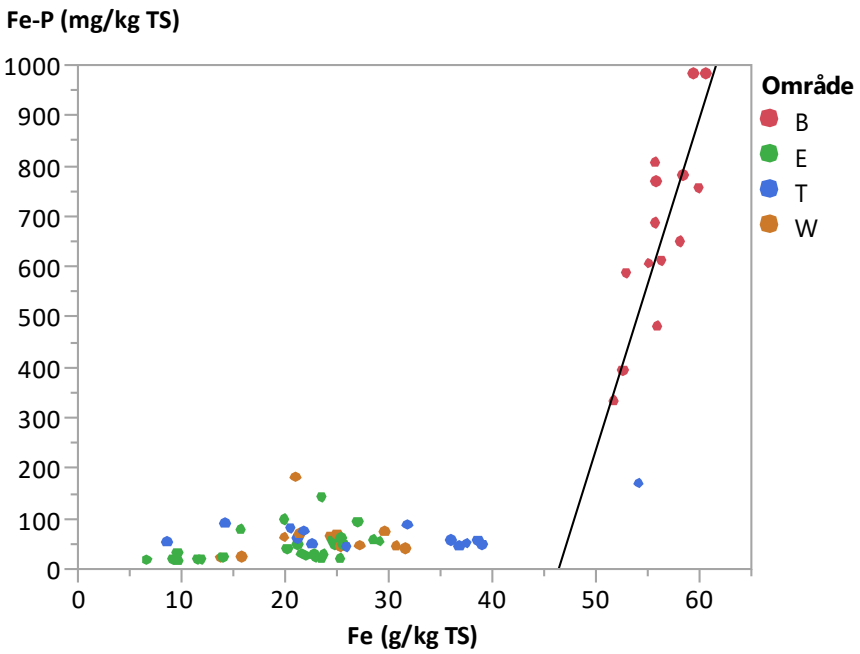
Totalfosfor har en liknande fördelning mot glödförlust som Fe-P+Org-P+Rest-P, vilket är rimligt eftersom dessa utgör de tre stora fraktionerna, förutom Ca-P. Inte heller för denna korrelation kan Bråvikenlokalerna inkluderas, och regressionerna har lägre förklaringsgrad (fig. 30).



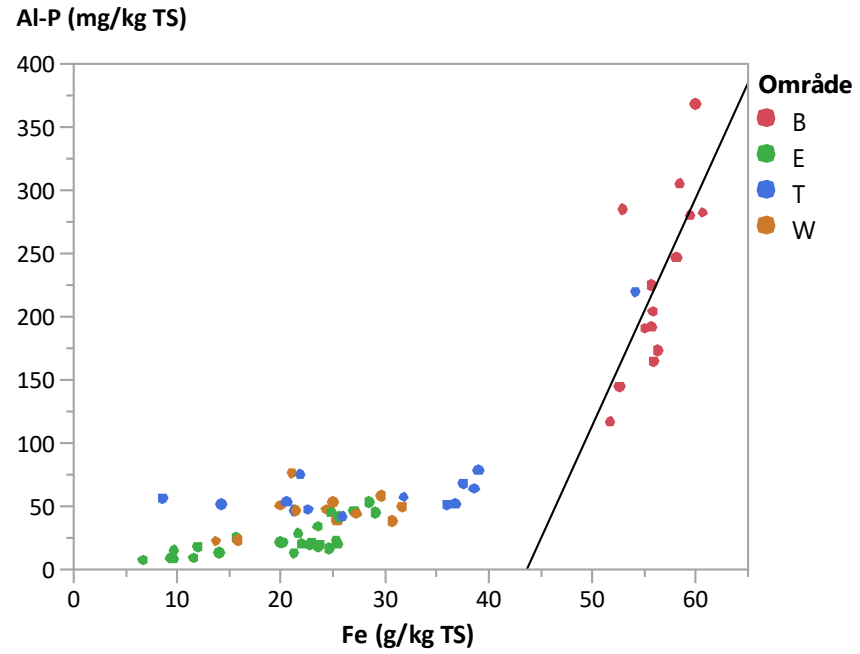
Figur 24. Korrelation mellan halterna av Org-P (mg/kg TS) och glödförlust (%) i ytsediment (0–2 cm). Korrelationen beskrivs väl med linjär regression (svart linje, Org-P = 80,2 + 13,9 × Glödförlust, $p < 0{,}0001$, $r^2_{adj} = 0{,}80$, $n = 67$) och även Bråviken-lokalerna följer korrelationen relativt väl. Den linjära regression ger dock en överskattning av halterna Org-P vid låga halter organiskt material (Glödförlust < 5 %) så istället kan en regression användas där ökningen av Org-P avtar vid hög glödförlust, och vice versa (brun linje, Org-P = -117 + 110 × √Glödförlust; $p < 0{,}0001$, $r^2_{adj} = 0{,}83$, $n = 67$).



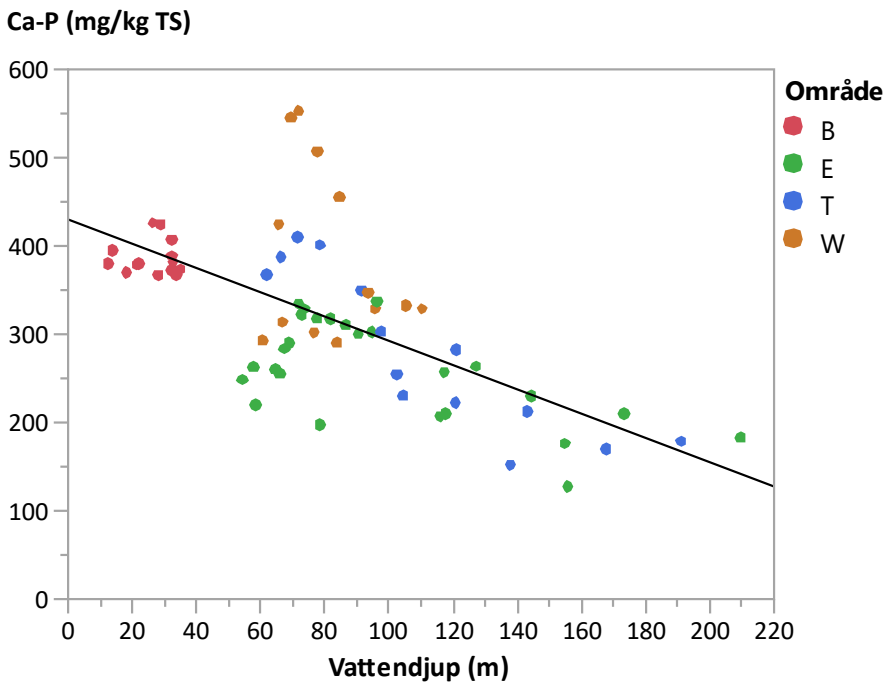
Figur 25. Korrelation mellan halterna av Rest-P (mg/kg TS) och glödförlust (%) i ytsediment (0–2 cm). Korrelationen beskrivs väl med linjär regression (Rest-P = -19,7 + 16,6 × Glödförlust, $p < 0{,}0001$, $r^2_{adj} = 0{,}81$, n = 67), inklusive Bråvikenlokalerna.



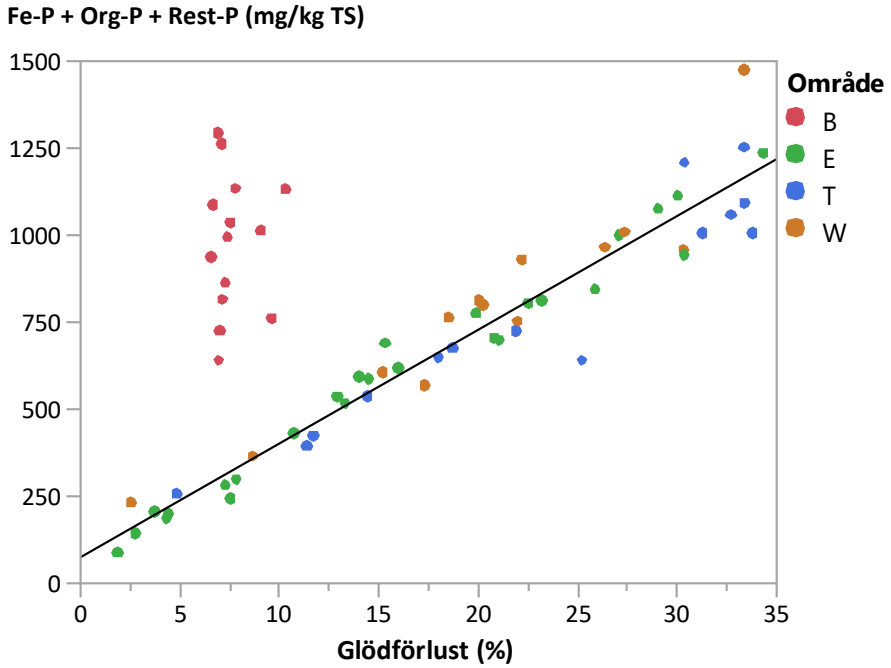
Figur 26. Korrelation mellan halterna av Fe-P (mg/kg TS) och järn (mg/kg TS) i ytsediment (0–2 cm). Om lokalerna delas upp i två grupper finns det ett linjärt samband för lokalerna med höga Fe-halter (> 50 g/kg TS): Fe-P = -3050 + 66 × Fe (p = 0,0006, r^2_{adj} = 0,58, n = 15). Detta liknar en korrelation för sediment i Stockholms inre skärgård observerad av Karlsson m.fl. (2009) på FeP = -3880 + 80 × Fe (omräknad från enhet mg/g TS för Fe-P). I gruppen med låga Fe-halter (< 40 g/kg TS) förekom inget siginfikant samband mellan halterna av Fe-P och av järn, däremot korrelerade halterna för dessa prover med glödförlust (Fe-P = 3,06 + 2,51 × Glödförlust; p < 0,0001, r^2_{adj}= 0,59, n = 52; regression visas inte i figur).



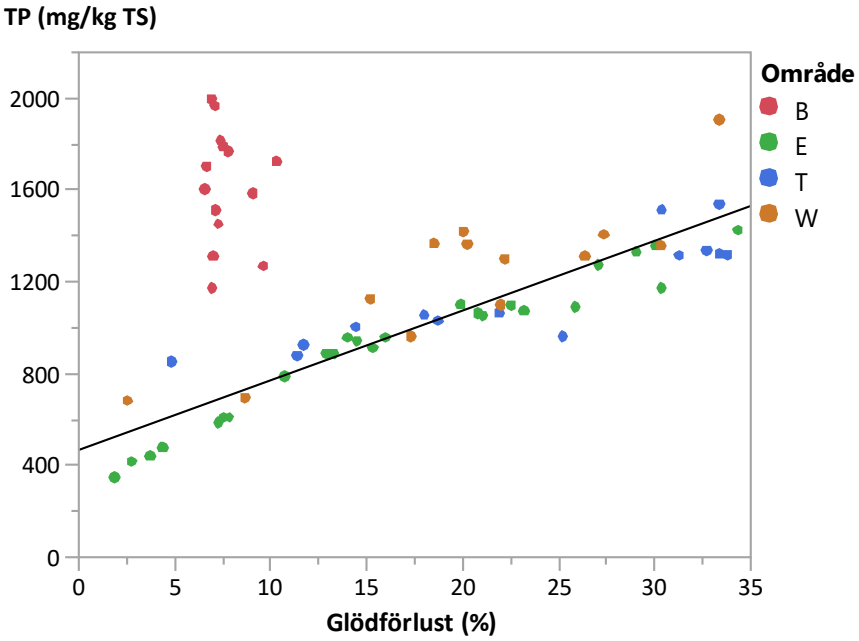
Figur 27. Korrelation mellan halterna av Al-P (mg/kg TS) och järn (mg/kg TS) i ytsediment (0–2 cm). Om lokalerna delas upp i två grupper, med Fe-halter < 40 g/kg TS respektive > 50 g/kg TS, finns det ett linjärt samband mellan halterna för lokalerna med höga Fe-halter: Al-P = -789 + 18,0 × Fe men med sämre förklaringsgrad än för Fe-P (p = 0,0026, r^2_{adj} = 0,48, n = 15).



Figur 28. Korrelation mellan halterna av Ca-P (mg/kg TS) i ytsediment (0–2 cm) och vattendjup (m). Korrelationen kan beskrivas med linjär regression även om förklaringsgraden är låg (Ca-P = 429 - 1,38*Vattendjup (p < 0,0001, r^2_{adj} = 0,44, n = 67)).



Figur 29. Korrelation mellan halterna av reaktiva fosforfraktioner (Fe-P + Org-P + Rest-P; mg/kg TS) och glödförlust (%) i ytsediment (0–2 cm). Dessa fraktioner har slagits ihop även tidigare och kallats för till exempel mobila (Malmaeus & Karlsson 2012). Korrelationen för utsjölokalerna beskrivs väl med linjär regression (Fe-P+Org-P+Rest-P = 69,1 + 32,7 × Glödförlust; p < 0,0001, r^2_{adj} = 0,93, n = 53).



Figur 30. Korrelation mellan halterna av totalfosfor (mg/kg TS) och glödförlust (%) i ytsediment (0–2 cm). Om Bråviken-lokalerna utesluts kan korrelationen beskrivas med linjär regression (TP = 465 + 30,4 × Glödförlust; $p < 0{,}0001$, $r^2_{adj} = 0{,}80$, $n = 53$).

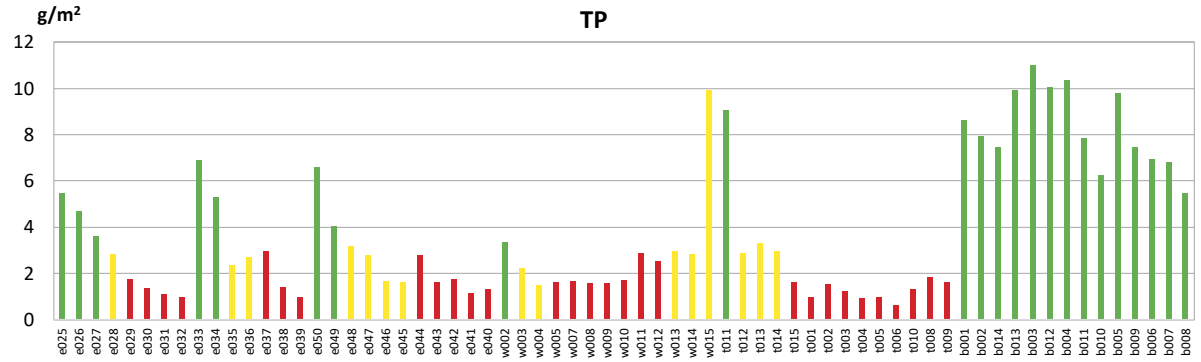
Fosformängder i ytsediment

Även om halterna fosfor är höga i vissa sediment och låga i andra, innebär det inte att mängderna per ytenhet följer samma mönster. Halterna uttryckta på torrviktsbasis (till exempel mg P/kg TS) måste korrigeras för vattenhalten i sedimentet för att uttrycka en mängd som g/m^2 sedimentyta. Sediment med hög vattenhalt, till exempel utsjösediment med hög halt organiskt material, kan därför få låga mängder fosfor per ytenhet även om halterna i sedimentet på torrviktsbasis är höga. För att göra en ungefärlig uppskattning av mängderna på varje lokal har mängderna i de översta 2 centimetrarna i sedimentet integrerats med hänsyn taget till sedimentets torrdensitet (se avsnittet *Statistik och beräkningar*). Observera att detta är en beräkning av mängden i ytsedimentet, vilket inte är samma sak som den fosfor som är potentiellt remobiliserbar.

Det är tydligt att det finns större mängder totalfosfor per ytenhet sediment på syresatta lokaler, det vill säga grunda bottnar (fig. 31). Alla lokaler med mängder över 4 g/m^2 sedimentyta förekommer på bottnar grundare än 67 m och är syresatta, med undantag för w015 som har hypoxiskt bottenvatten (0,9 mg/l). Denna lokal har inte märkbart höga fosforhalter i mg/kg TS sediment, men sedimentet har en hög torrsubstanshalt, över 50 %, och mängden fosfor per ytenhet blir därför stor. De minsta mängderna totalfosfor per ytenhet sediment förekommer på anoxiska bottnar, och det är också tydligt att de hypoxiska bottnarna har mängder som är mer lika de anoxiska än de syresatta bottnarna. Det förekommer således inte några märkbart förhöjda mängder på hypoxiska bottnar. Även den fraktion som tenderar att vara dominerande i halt på anoxiska bottnar med stora mängder organiskt material, Org-P, förekommer inte i störst mängder per ytenhet i denna typ av bottnar utan på syresatta bottnar (fig. 32d, jämför med fig. 21d). Skillnaden mellan bottentyper är dock mycket mindre för denna fraktion än till exempel för Fe-P, där det är extrem skillnad i mängden per ytenhet sediment för de syresatta sedimenten i Bråviken jämfört med de anoxiska utsjösedimenten (fig. 32b).

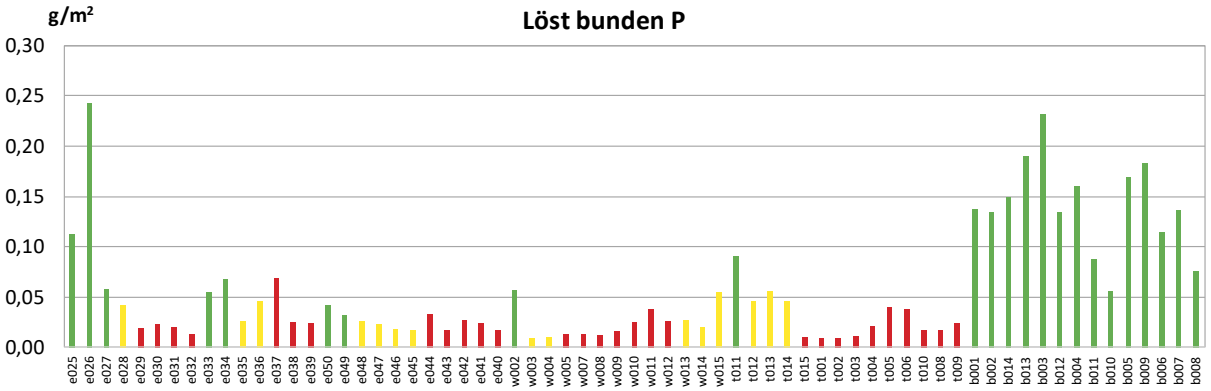
Den fosforfraktion som bidrar mest till mängden totalfosfor per ytenhet sediment är Fe-P, med runt 3 g/m^2 i de syresatta och järnrika sedimenten i Bråviken och på t011 men märkbart lägre på övriga lokaler (fig. 32b). Al-P har en liknande fördelning men står för en mindre mängd, runt 1 g/m^2 i Bråviken (fig. 32c). Ca-P, som är en relativt oreaktiv fraktion, har en jämnare fördelning mellan de olika lokalerna och står i medel för 1,3 g/m^2 sedimentyta, även om mängden är större på syresatta och delvis även på hypoxiska lokaler än på anoxiska lokaler (fig. 32e). Org-P och Rest-P står för i medel runt 0,8 respektive 0,6 g/m^2 sedimentyta (fig. 32d och f). Fördelningen mellan lokalerna är relativt jämn för dessa två fosforfraktioner, även om Org-P förekommer i större mängder på syresatta och hypoxiska lokaler än på anoxiska lokaler, och Rest-P också förekommer i något större mängder på syresatta och hypoxiska lokaler i utsjön, men däremot inte i Bråviken. På lokal w015, som hade stora mängder totalfosfor, består den främst av Ca-P (fig. 32e) och Rest-P (fig. 32f). Rest-P är, som redan nämnts, den fosfor som är differensen mellan totalfosfor och de övriga fraktionerna, och således inte har kunnat extraheras. Den förefaller bestå till större delen av organiskt bunden fosfor, att döma av korrelationen till organiskt material, men innehåller också andra svårextraherade fosforformer.

Sett utifrån syresättningsgrad är de viktigaste fraktionerna för mängden fosfor per ytenhet på anoxiska bottnar Org-P, Rest-P och Ca-P, på hypoxiska bottnar Ca-P, Org-P och Rest-P, och på syresatta bottnar, främst Bråviken, Fe-P, Ca-P, Org-P och Al-P.

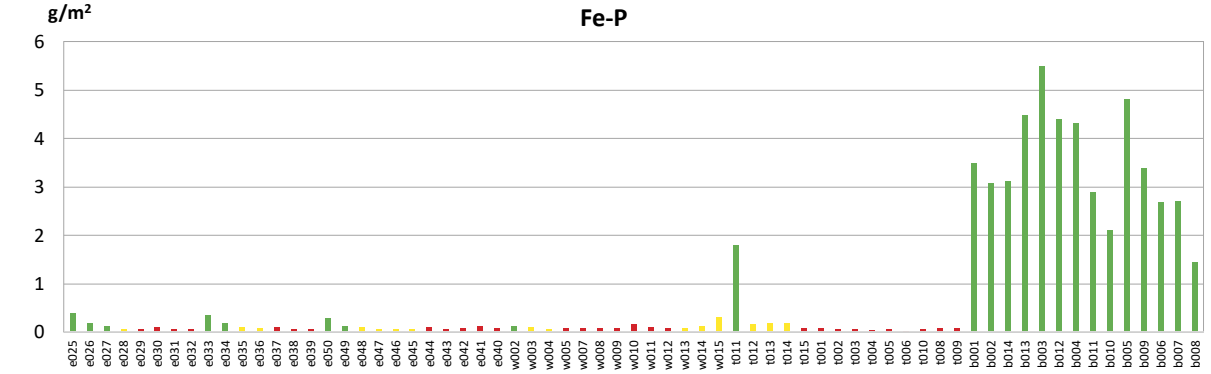


Figur 31. Mängderna av totalfosfor i de översta 2 cm av sedimentet per ytenhet (TP, g/m²) på respektive lokal. Staplarna är färgsatta utifrån syrgashalt, där grönt är > 2 mg O_2/l, gult är 0,2–2 mg O_2/l, och rött är < 0,2 mg O_2/l. Lokalerna är placerade enligt ordningen längs respektive mätlinje, se figur 2.

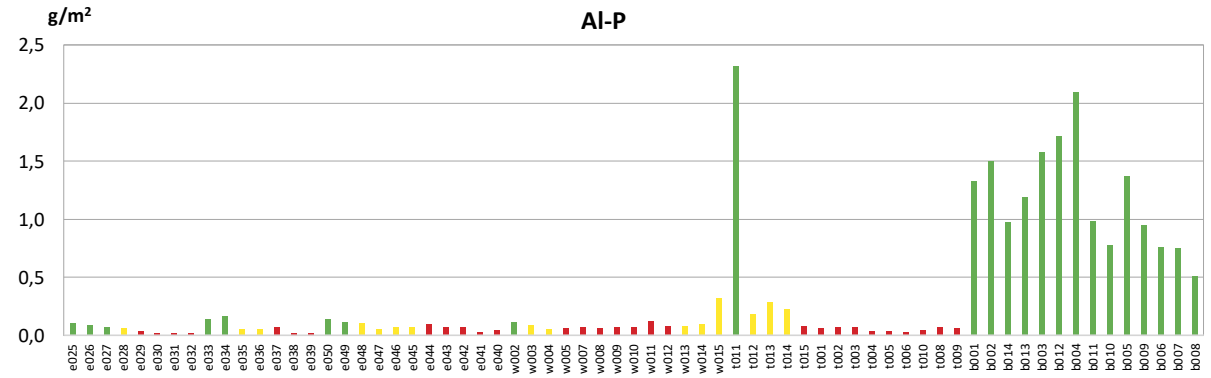
a)



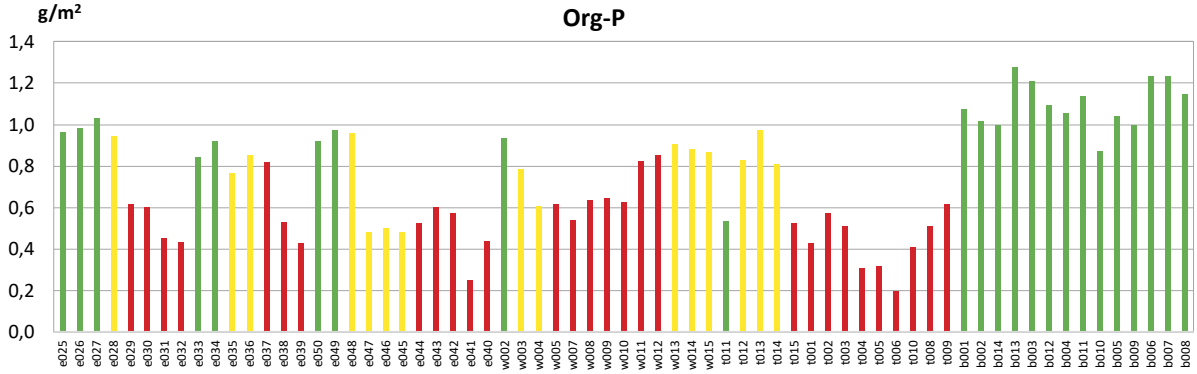
b)



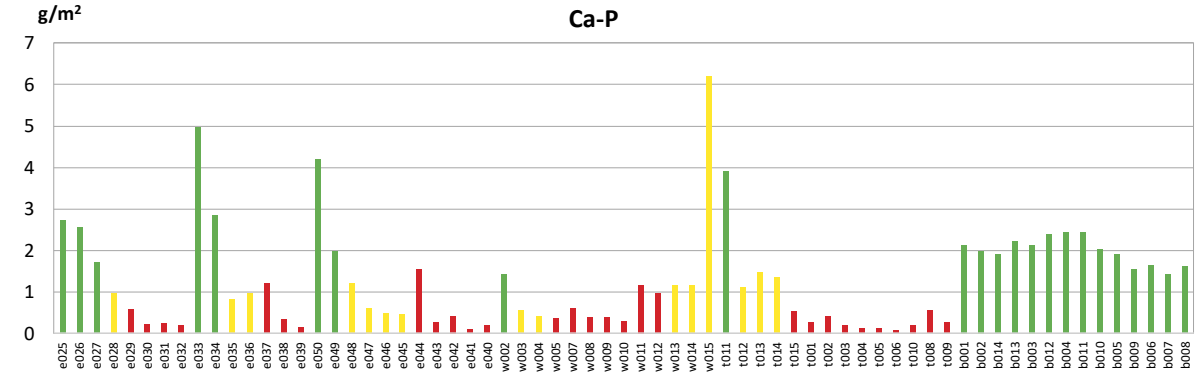
c)



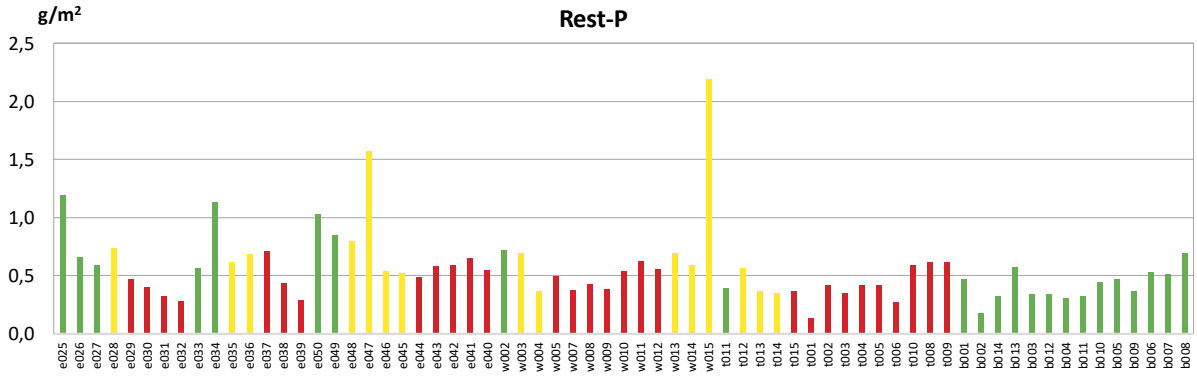
d)



e)



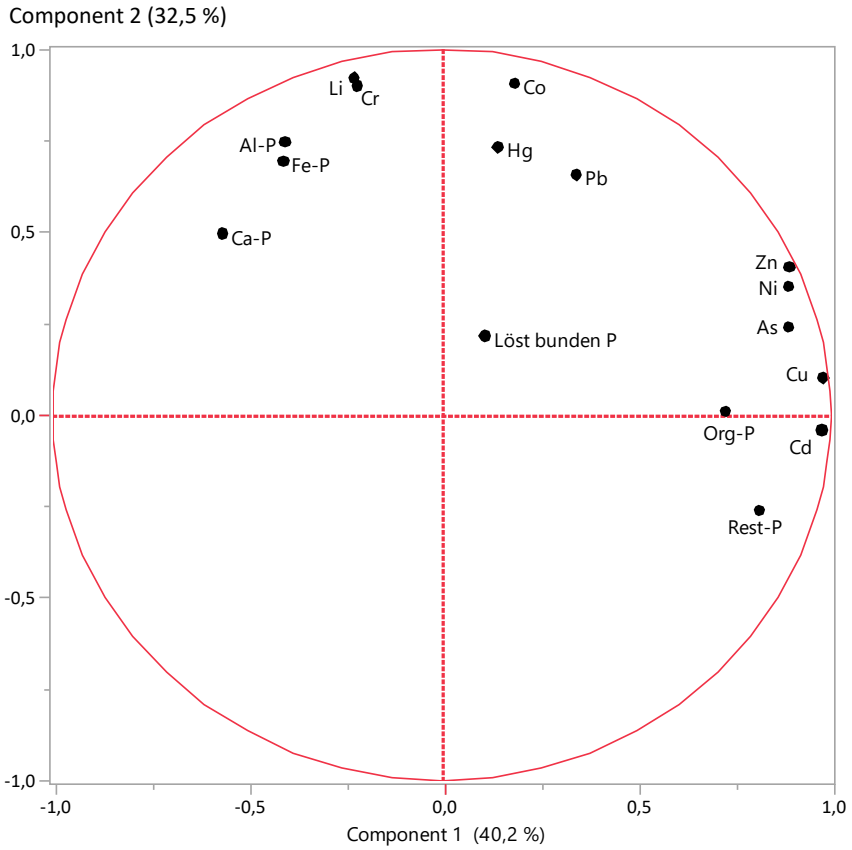
f)



Figur 32. Mängderna av fosforfraktioner i de översta 2 cm av sedimentet per ytenhet (TP, g/m^2) på de 67 lokalerna: **a)** löst bunden P, **b)** Fe-P, **c)** Al-P, **d)** Org-P, **e)** Ca-P, och **f)** Rest-P. Staplarna är färgsatta utifrån syrgashalt, där grönt är > 2 mg O_2/l, gult är 0,2–2 mg O_2/l, och rött är < 0,2 mg O_2/l. Lokalerna är placerade enligt ordningen längs respektive mätlinje, se figur 2. Observera att skalan på y-axeln skiljer sig mellan de olika fraktionerna; till exempel förekommer löst bunden P i mycket lägre mängder per ytenhet än Fe-P.

Samvariation mellan fosfor och grundämnen i ytsediment

En del grundämnen förekommer i höga halter på bottnar där det också finns höga halter av olika fosforfraktioner. Som väntat tenderar grundämnena som företrädesvis bildar sulfider i anoxiskt sediment att förekomma i höga halter på samma lokaler där Org-P och Rest-P förekommer i högre halter, det vill säga kadmium, koppar, arsenik, nickel och zink (fig. 33). Ingen tydlig samvariation kunde ses för kobolt, kvicksilver och bly, medan litium och krom tenderade att förekomma i högre halter i sediment som också hade högre halter av Fe-P och Al-P, företrädesvis i Bråviken.



Figur 33. Scoreplot från principalkomponentanalys (PCA) som visar samvariationen mellan halterna (mg/kg TS) av fosforfraktioner och grundämnen i ytsediment (0–2 cm) på de 67 lokalerna. Endast grundämnen som förekommer i spårhalter har inkluderats, det vill säga inte Fe, Al, Mn och S (se fig. 22 för dessa).

Fosforprofiler i sedimentkärnor

Totalfosfor och olika fosforfraktioner mättes även nedåt i sedimenten genom att sedimentkärnor skivades i encentimetersskivor innan analys. Detta gjordes på varje provtagen lokal men i rapporten redovisas exempel från område B, område T, och en mätlinje i område E.

Fosforhalterna brukar vara högre i sedimentets ytlager och avta nedåt på grund av att fosforföroreningar bryts ned och fosfor frigörs till vattenmassan. Halterna stabiliseras då vid en så kallad bakgrunds- eller begravningshalt. Skillnaden mellan halterna i ytlagret och de stabiliserade lägre halterna längre ner i sedimentet utgör således den potentiellt remobiliserbara fosforn, som med tiden kan läcka ut till vattenmassan. Denna utgörs främst av Fe-P och organiska fosforformer. Mängden fosfor som begravs per tidsenhet kan således räknas ut med hjälp av bakgrundshalterna kombinerat med sedimentackumulationshastigheten.

Bråviken

Halterna av totalfosfor i sedimentkärnor provtagna i Bråviken, där alla lokaler har syresatt bottenvatten med O_2-halter på 7,1–8,4 mg/l, visar på relativt liknande profiler för alla kärnor (fig. 34). Det är tydligt att halterna är som högst i ytsedimentet (0–1 cm), med halter som varierar från cirka 1 400 mg/kg TS på lokal b010 till 2 700 mg/kg TS på lokal b003. Halterna avtar snabbt nedåt i kärnan och når generellt en stabil nivå på runt 800–1 000 mg/kg TS redan vid 5 cm djup i sedimentkärnorna. För en del lokaler ökar halterna sedan långsamt nedåt i sedimentet, till exempel på lokal b012 som har en totalfosforhalt på cirka 1 300 mg/kg TS på 50 cm djup i sedimentet. På de lokaler som är belägna längre ut mot Östersjön eller till och med utanför Bråvikens mynning (b008, b007, b006 och b009) ökar halterna däremot inte nedåt i sedimentet utan är stabila och relativt låga. Det är möjligt att de svagt ökande halterna nedåt i sedimentet (det vill säga med ökande ålder) under minimihalten vid nivån 5 cm på många av lokalerna längre in i Bråviken är relaterade till en högre belastning under tidigare decennier. Detta kan bero på en högre belastning via avrinning från land, till exempel på grund av jordbruk, och påverkan från avloppsreningsverk och andra punktkällor längre in i Bråviken.

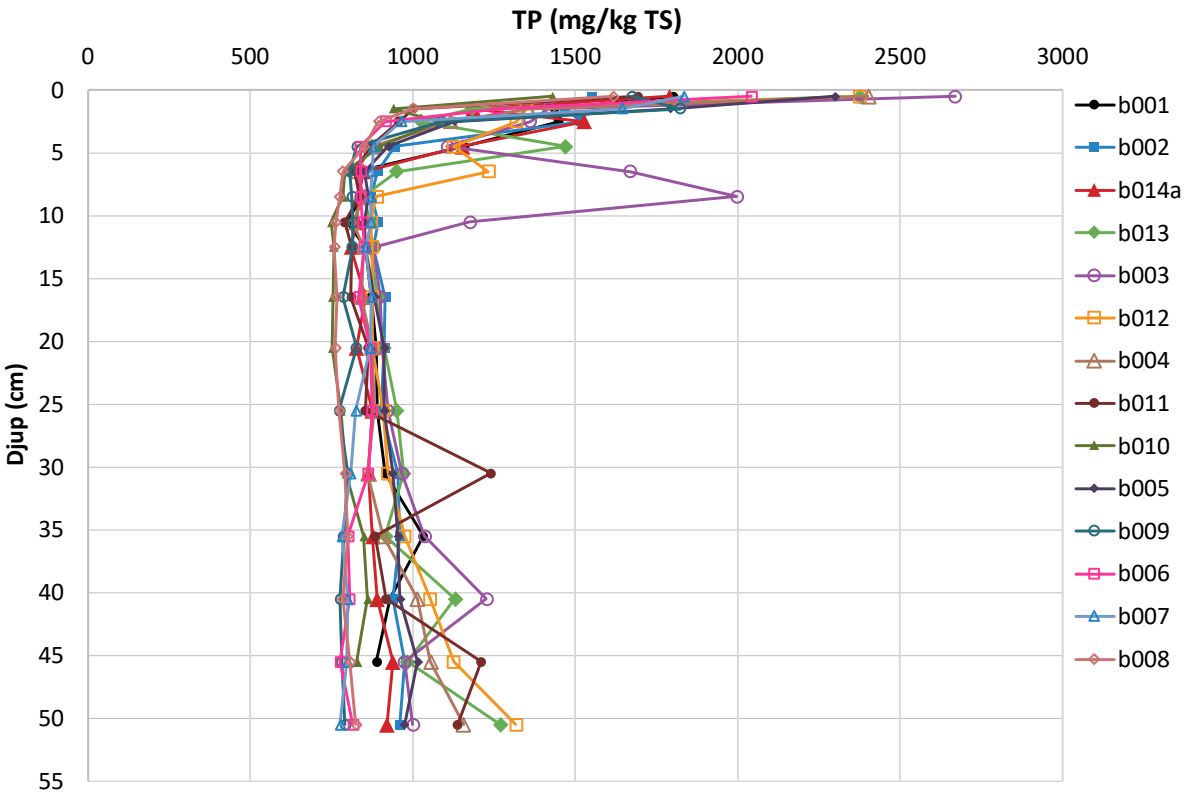
Tidigare mätningar av Cs-137 på lokalerna b001, b002 och b005 gav sedimentackumulationshastigheter på 11, 17 respektive 9 mm/år (Klingberg 2002). När dessa mätningar upprepades 2019 var det inte möjligt att få exakta värden eftersom sedimentnivån där halten Cs-137 börjar öka nu befinner sig för långt ner i sedimentet (> 40 cm ner i b001 och b005 och > 45 cm ner i b002). För b002 var toppen så långt ner att den var nedanför den nivå i sedimentet som provtagaren kunde ta upp. För b001 och b005 kunde sedimentackumulationshastigheten bestämmas till cirka 12–13 mm/år vilket är i liknande storleksordning som värdena uppmätta 2002. Cs-137 mättes även på lokal b007 och gav där en sedimentackumulationshastighet på 4 mm/år, vilket är rimligt då denna lokal befinner sig längre ut mot Östersjön. Genom de bestämda ackumulationshastigheterna framgår det att lagret på 50 cm-nivån motsvarar en ålder av mer än 100 år vid b007, cirka 50 år vid b001 och b005, och cirka 30 år vid b002.

För att granska hur halterna av de olika fosforfraktionerna varierar nedåt i sedimentkärnan valdes fem lokaler ut längs en gradient från längst inne i viken till utanför vikens mynning (fig. 35a–e). Alla lokaler har liknande profiler med höga halter totalfosfor vid sedimentytan som sedan hastigt avklingar nedåt. Detta förklaras av höga halter Fe-P vid ytan då sedimentet på alla dessa lokaler har en oxiderad yta och även höga halter järn i sedimentet (se fig. 15g). De högsta halterna av Fe-P, > 1 500 mg/kg TS, förekommer i ytsedimentet på lokal b003. Djupprofilen för Al-P följer i regel Fe-P men uppvisar avklingande halter i de allra översta sedimentlagren för en del av lokalerna (b001, b005, b007). Anledningen till detta är oklar. Att även totalfosforhalterna minskar nedåt i

sedimentkärnan, parallellt med halterna av Fe-P, visar att Fe-P inte omvandlas till andra fosforformer utan frigörs och rör sig uppåt och kan läcka ut i vattenmassan.

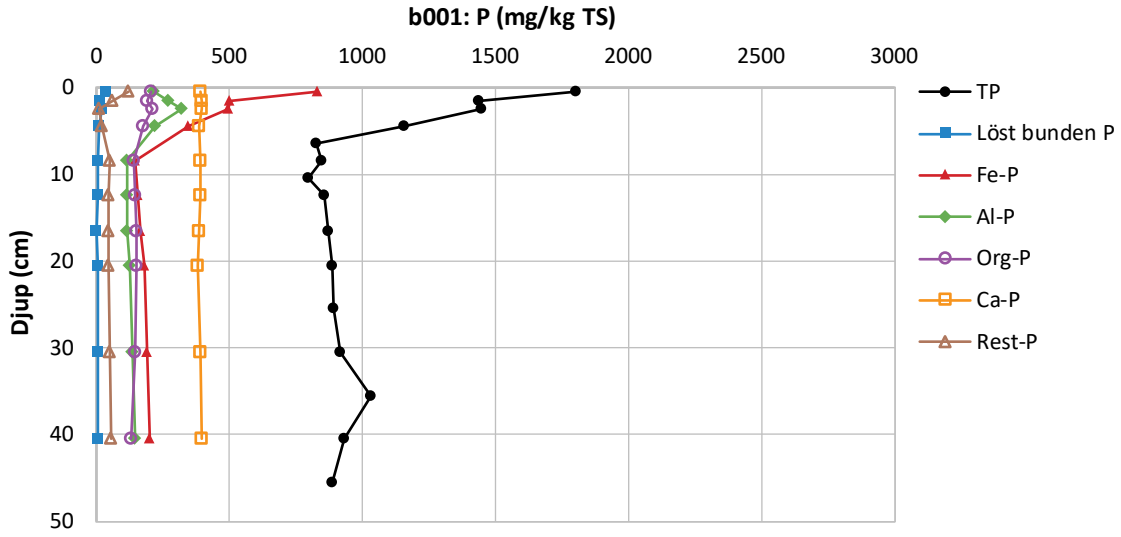
Lokal b003 har en störning mellan 5 och 10 cm sedimentdjup. Denna störning visar sig både i halten totalfosfor (fig. 34) och för fosforfraktionerna (fig. 35b). Bland fosforfraktionerna är det Fe-P och Al-P som påverkas av störningen vilket skulle kunna peka på att tidigare ytsediment har begravts här, men utan att förhållandena skulle ha blivit reducerande så att Fe-P lösts upp. Ingen störning kan emellertid ses vid detta sedimentdjup i röntgenbilden från denna lokal (se bilaga 1), vilket indikerar att det inte är muddrat material från annan plats, som avviker från sedimentet på b003, som har avsatts.

Ca-P förekommer i liknande halter längs hela sedimentkärnan, i kärnor från alla lokaler, runt 400 mg/kg TS. Detta illustrerar hur stabil denna fraktion är. Längre ner i sedimentet blir det också den dominerande fosforfraktionen på alla lokaler. Org-P har något högre halter vid sedimentytan än längre ner, vilket visar att den bryts ned med tiden och kan bidra med fosfor som kan frigöras till vattenmassan, men skillnaden är liten i jämförelse med haltförändringen för Fe-P. Längre ner i sedimentprofilen förekommer Org-P generellt i liknande, om än något lägre, halter än Fe-P förutom på lokal b007 vid Bråvikens mynning. Detta kan bero på att halten organiskt material i sedimentet här är något högre än på övriga lokaler (glödförlust 6–10 % i sedimentprofilen jämfört med 5–8 % för övriga lokaler). Rest-P följer ofta samma trend som Org-P, dock med lägre halter. Rest-P och Löst bunden P utgör överlag försumbara fraktioner av halten totalfosfor på lokalerna i Bråviken.

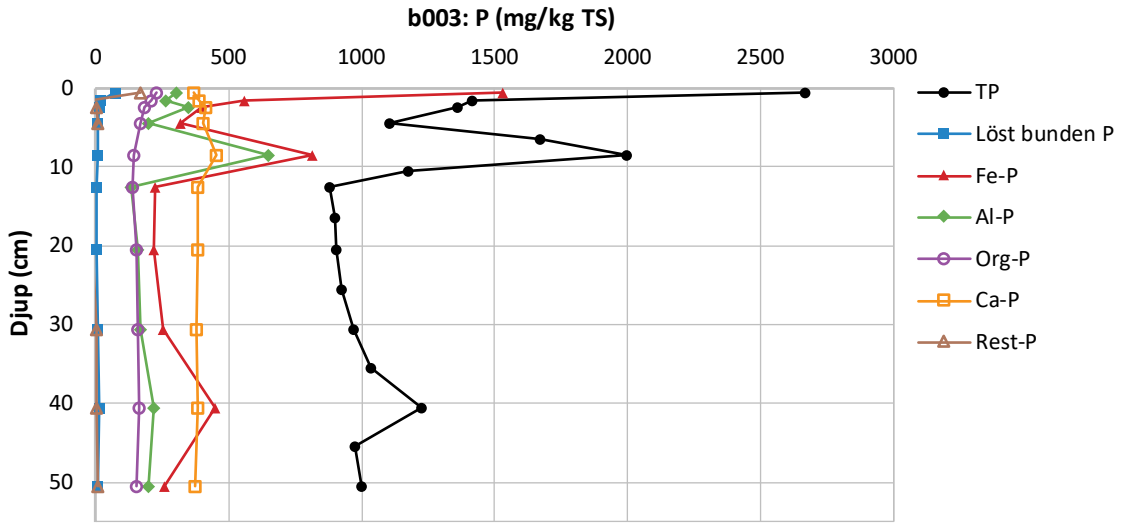


Figur 34. Totalfosfor (mg/kg TS) i sedimentprofiler från Bråviken. Lokalerna är ordnade i en gradient från längst inne i Bråviken (b001, b002) till utanför vikens mynning (b007, b008). Alla lokaler har syresatt bottenvatten på 7,1 till 8,4 mg O_2/l. Lokal b003 har en avvikande profil med en topp vid 8–9 cm djup, se även figur 35b.

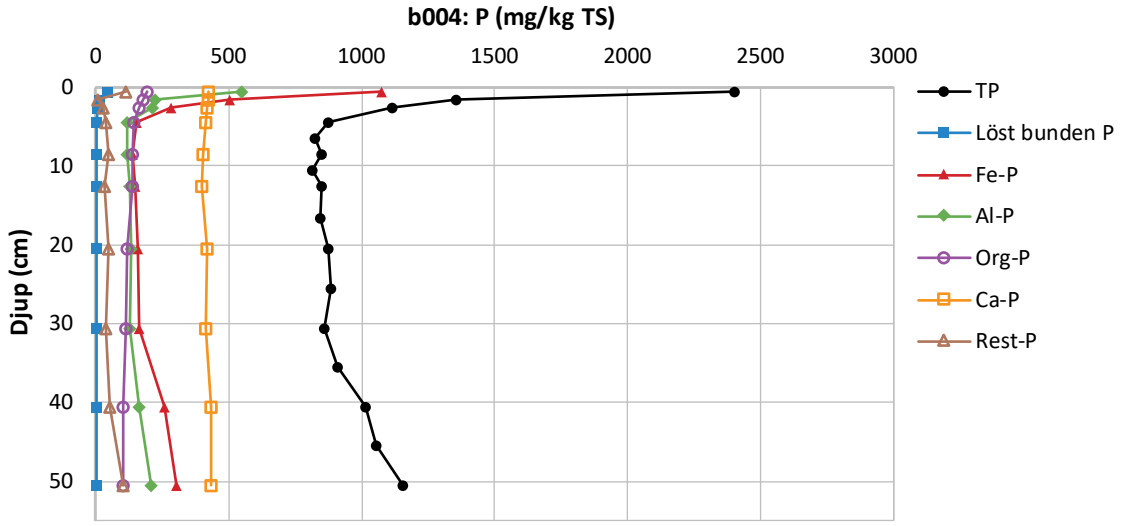
a)


b001: P (mg/kg TS)
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
0
10
20
30
40
50
Djup (cm)
TP
Löst bunden P
Fe-P
Al-P
Org-P
Ca-P
Rest-P

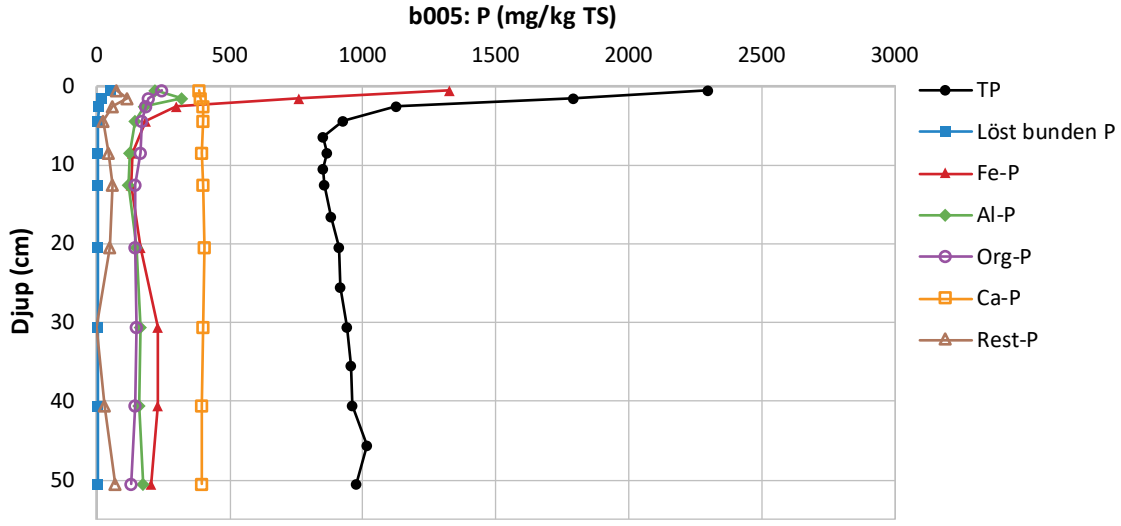
b)


b003: P (mg/kg TS)
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
0
10
20
30
40
50
Djup (cm)
TP
Löst bunden P
Fe-P
Al-P
Org-P
Ca-P
Rest-P

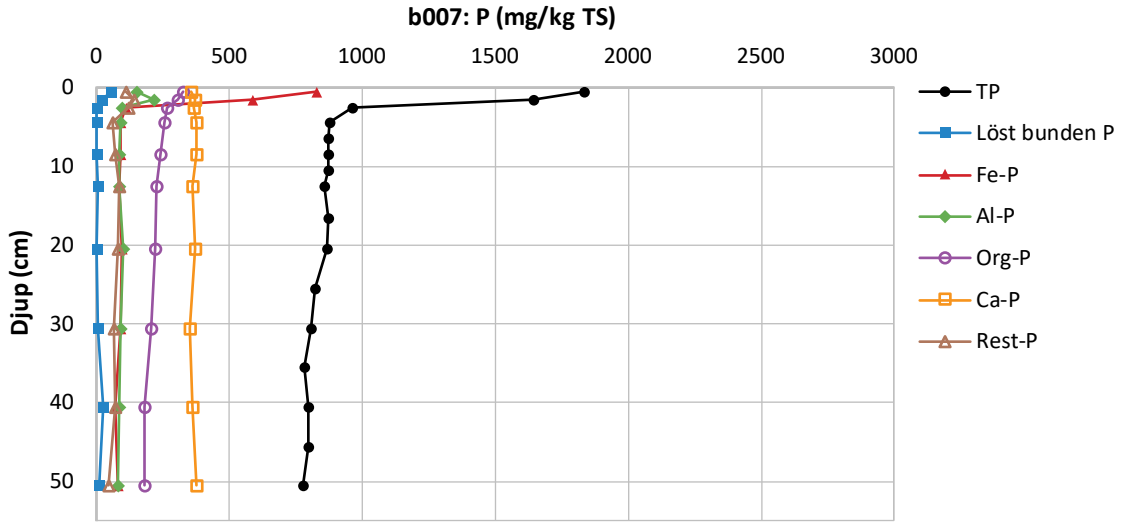
c)


b004: P (mg/kg TS)
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
0
10
20
30
40
50
Djup (cm)
TP
Löst bunden P
Fe-P
Al-P
Org-P
Ca-P
Rest-P

d)



e)



Figur 35. Sedimentprofiler över olika fosforfraktioner samt totalfosfor (TP; mg/kg TS) på utvalda lokaler från Bråviken: **a)** b001, **b)** b003, **c)** b004, **d)** b005 och **e)** b007.

Område T

Område T är transekten som går mellan fastlandet och Gotland, och röntgenbilder av sedimenten från lokaler i område T finns tillgängliga i figur 4 och 5. Dessa visar bland annat hur mäktigt laminerat lager varje sedimentkärna har. Laminerade lager innebär att kärnorna inte har rörts om av bioturberande djur, vilket visar att förhållandena har varit anoxiska när sedimentet har avsatts. Lokal t011 närmast fastlandet har syresatt bottenvatten (7,0 mg O_2/l) och ingen laminering. Lokalerna t012–t014 som har hypoxiskt bottenvatten (0,3–1,1 mg O_2/l) har dock tunna laminerade lager, vilket visar att bottenfaunan i sedimentet är starkt påverkade vid dessa syrgashalter i bottenvattnet. Övriga lokaler har syrgashalter på 0,1 mg O_2/l i bottenvattnet, det vill säga anoxiskt.

Halterna av totalfosfor på lokalerna i område T har inte lika homogena djupprofiler i sedimentet som fallet är för lokalerna i Bråviken (fig. 36; jämför fig. 34). Detta är förväntat med tanke på att lokalerna skiljer sig åt mer vad gäller bland annat syreförhållanden, kornstorleksfördelning, vatteninnehåll och halt organiskt material. Lokalerna t005 och t006 har kraftigt avvikande profiler jämfört med andra lokaler men liknar varandra till viss del. Båda dessa lokaler är placerade på relativt djupa bottnar, innan vattendjupet börjar minska vid övergången till kalkstensplatån som Gotland vilar på (se fig. 5). Lokal t005 och t006 befinner sig på drygt 1 mils avstånd från varandra vilket visar att det inte bara är en störning på en specifik lokal utan omfattar ett större område.

Liksom i Bråviken är halterna av totalfosfor som högst vid ytan, och stabiliseras längre ner i sedimenten runt en halt på 750 mg/kg TS. Detta är lägre än i Bråviken, där halten tenderade att vara runt 800–1 000 mg/kg TS. Det är svårt att avgöra vid vilken nivå i sedimentet som halterna börjar bli stabila i område T eftersom det skiljer sig avsevärt mellan lokalerna, men på många lokaler förefaller det ske runt 5 cm-nivån eller ännu högre upp i sedimentet. På lokal t006 är det emellertid svårt att observera en stabilisering av halterna nedåt i sedimentkärnan. Överlag är skillnaden mellan halterna i ytsedimentet och de stabiliserade halterna längre ner i sedimentet lägre i område T än i område B (jämför fig. 36 och fig. 34), vilket visar att halten potentiellt remobiliserbar fosfor är lägre i område T.

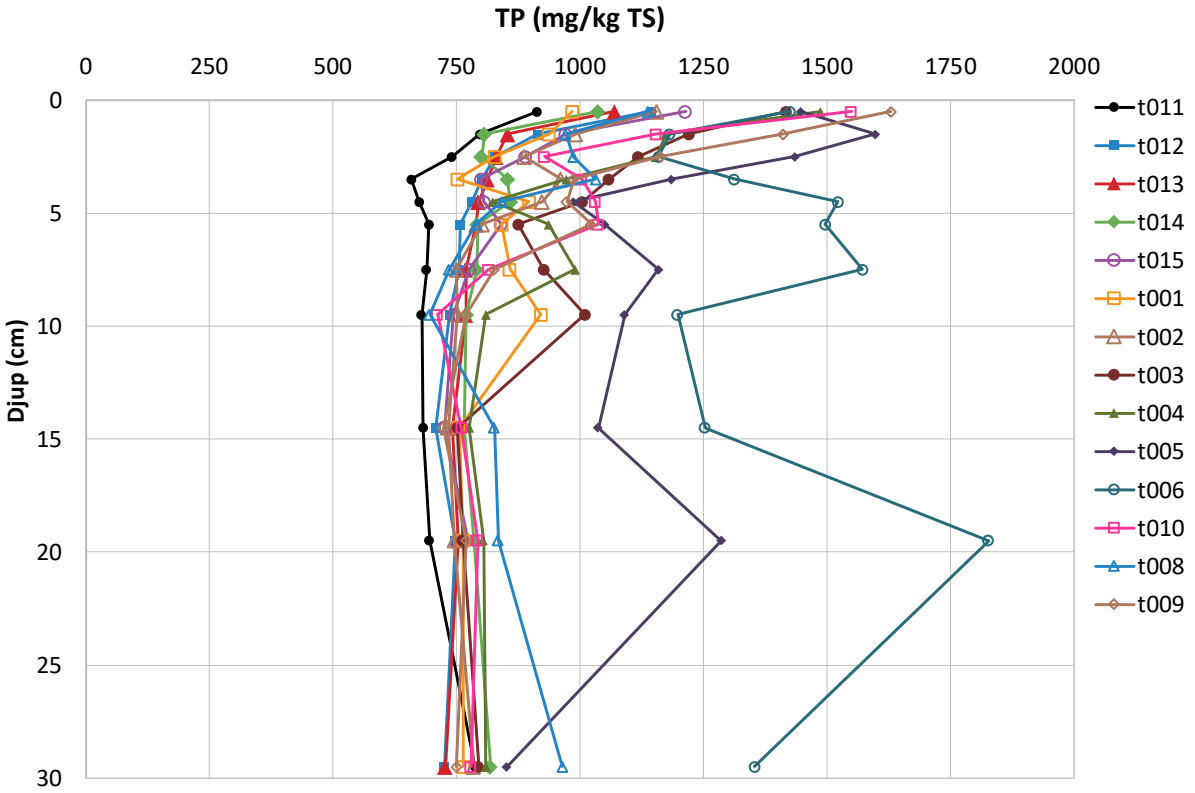
Mätningar av Cs-137 gjordes på två lokaler längs profilen, t001 och t006. På t006 uppmättes aldrig Cs-137 i halter över detektionsgränsen, men på t001 kunde ett svagt maximum mätas. Detta gjorde att sedimentackumulationshastigheten här kunde beräknas till 3 mm/år. Lokal t001 var den enda av nio utsjölokaler där ett maximum av Cs-137 kunde mätas, medan övriga lokaler antingen aldrig hade värden över detektionsgränsen eller bara enstaka värden som inte bildade ett maximum i sedimentprofilen. På två lokaler i område W, det vill säga längre söderut, har sedimentackumulationshastigheten bestämts genom analys av Pb-210 till 1,2 ± 0,1 mm/år (lokal w008) respektive 1,7 ± 0, 2 mm/år (lokal w010). Detta är således något lägre än på lokal t001, vilket överensstämmer med en övergripande modell över sedimentackumulationshastigheten i Östersjön (se avsnittet *Rumslig prediktion av halter och mängder av fosfor i Östersjön*, fig. 50). På lokal t001 uppvisar halten av totalfosfor ett minimum vid 3,5 cm-nivån i sedimentet innan det ökar igen längre ner i profilen, och detta minimum motsvarar således en ålder på cirka 12 år. Varför halten totalfosfor ökar går inte att avgöra, men det motsvaras av en bred diffus anomali utan laminering runt 8–11 cm djup enligt röntgenbilden (se fig. 5), vilket kan tyda på syresatta förhållanden.

Fem lokaler valdes ut för en närmare granskning av hur halterna av de olika fosforfraktionerna varierar nedåt i sedimentkärnan (fig. 37a–e). Alla lokaler har högst totalfosforhalter vid sedimentytan som sedan minskar nedåt i sedimentkärnorna, men halterna är inte lika markant förhöjda vid sedimentytan som på Bråvikenlokalerna (jämför fig. 34). Detta beror på att fraktionen Fe-P inte är lika dominerande. På lokal t011, som har oxiderat bottenvatten, finns det i likhet med Bråviken en förhöjning av Fe-P i de ytligaste sedimentlagren. Halten Fe-P är dock under 250 mg/kg TS i ytlagret, vilket kan jämföras med halter som till och med överskrider 1 500 mg/kg TS i Bråviken

(lokal b003). Al-P förekommer i högre halter än Fe-P genom hela profilen på t011, och det är dessa två fraktioner som har förhöjda halter i de ytligaste sedimentlagren. Lokal t011 har generellt låga nivåer av fosfor jämfört med övriga lokaler i detta område (se fig. 36), vilket kan bero på att lokalen är placerad på en erosionsbotten med bara ett tunt postglacialt lerlager ovanpå glacial lera.

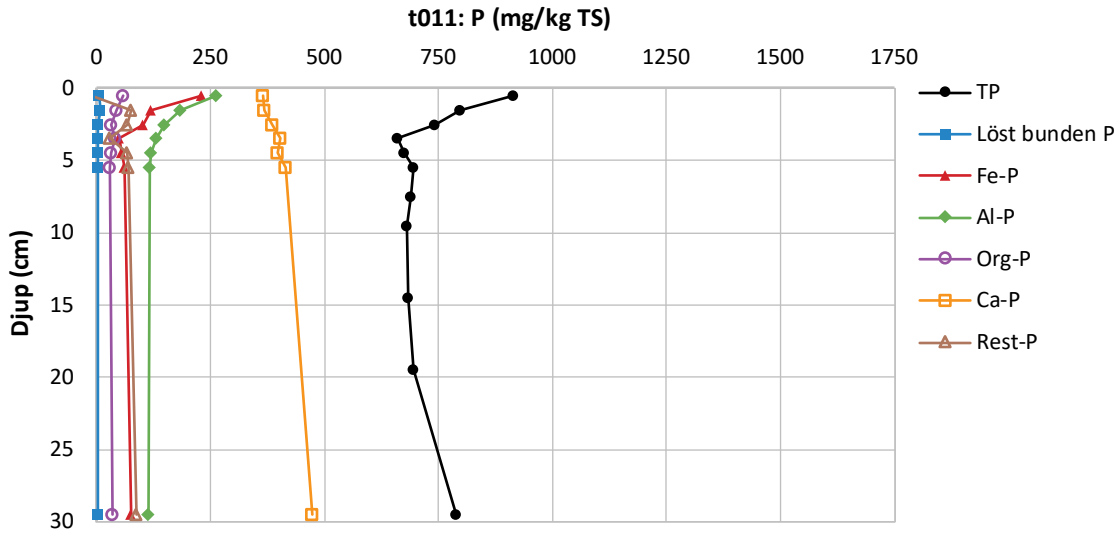
Halten organiskt material är mycket låg på lokal t011, med en glödförlust på 3–5 % i sediment-kärnan, vilket inte är förvånande med tanke på att sedimentet mestadels består av glacial lera, och halterna av Org-P och Rest-P är låga. Ca-P är istället den dominerande fosforfraktionen genom hela sedimentprofilen, både på lokal t011 och t012. Det är först på lokal t001 som Org-P blir den dominerande fraktionen i ytlagren istället för Ca-P. Ännu längre ut, på lokal t005 och t009, blir även Rest-P en större fraktion än Ca-P i sedimentets ytlager. Att halterna av Org-P och Rest-P ökar längre ut från fastlandet är rimligt, eftersom även halten organiskt material är högre på dessa lokaler. Också i tidigare studier av fosforfraktioner i anoxiskt sediment i Östersjön är Org-P en viktig fraktion både vad gäller halter i ytsediment och i det som begravs (Mort m.fl. 2010, Malmaeus & Karlsson 2016). Det är antingen den dominerande fraktionen (Mort m.fl. 2010) eller den näst dominerande fraktionen (Malmaeus & Karlsson 2016), beroende på fraktioneringsmetod. Det är också tydligt, åtminstone på lokalerna t012, t005 och t009, att Rest-P inte är inert utan bryts ned och minskar i halt nedåt i sedimentprofilen.

Ca-P har en tendens att förekomma i lägre halter i ytlagren i sedimentprofilen och sedan öka något nedåt, till skillnad från i Bråviken. Halterna är också generellt lite lägre än i Bråviken, till exempel är halten Ca-P alltid under 250 mg/kg TS på lokal t001. Lokal t005 har för övrigt en mycket avvikande profil för Fe-P, med kontinuerligt ökade halt nedåt i sedimentet, och orsaken till detta är oklar.

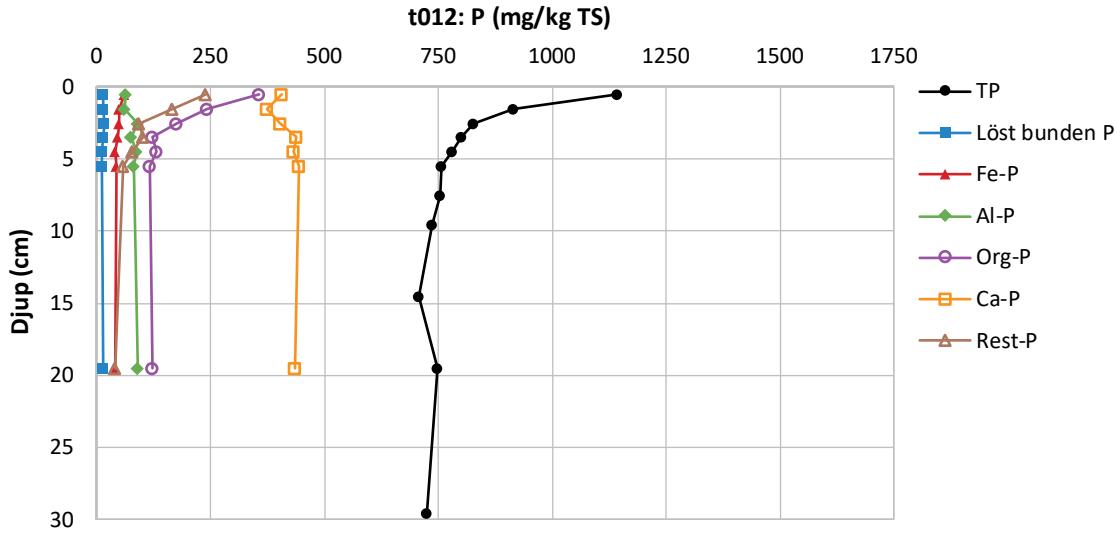


Figur 36. Totalfosfor (mg/kg TS) i sedimentprofiler från område T, transekten mellan fastlandet och Gotland. Lokalerna är ordnade i en gradient från närmast fastlandet och Bråviken (t011) till närmast Visby (t009). Lokal t011 har syresatt botten-vatten med 7,0 mg O_2/l, medan t012, t013 och t014 har hypoxiskt bottenvatten, med 1,1, 0,4 respektive 0,3 mg O_2/l. På övriga lokaler är syrgashalten 0,1 mg O_2/l, det vill säga anoxiskt bottenvatten.

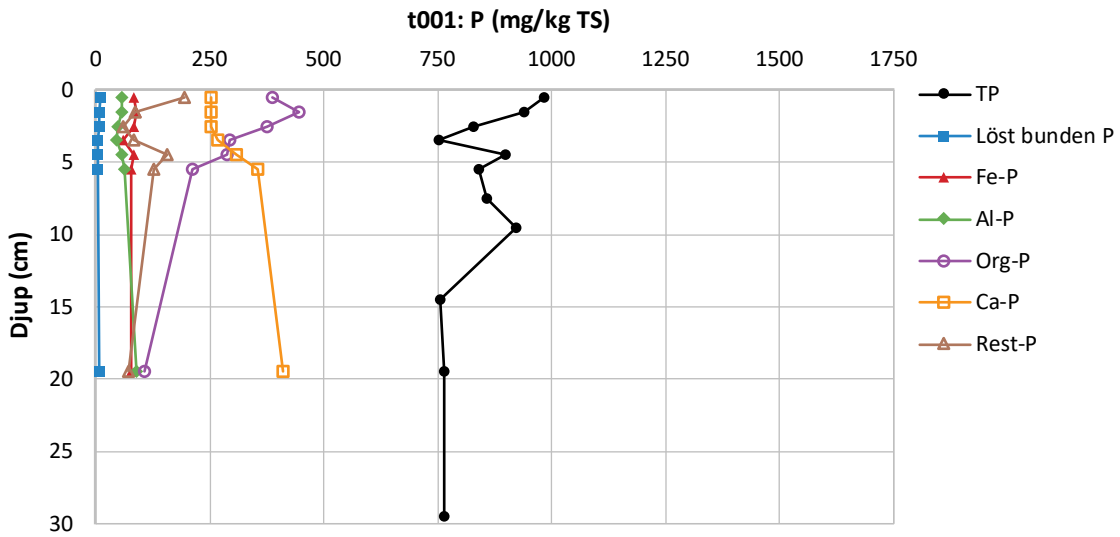
a)


t011: P (mg/kg TS)
0
250
500
750
1000
1250
1500
1750
Djup (cm)
0
5
10
15
20
25
30
TP
Löst bunden P
Fe-P
Al-P
Org-P
Ca-P
Rest-P

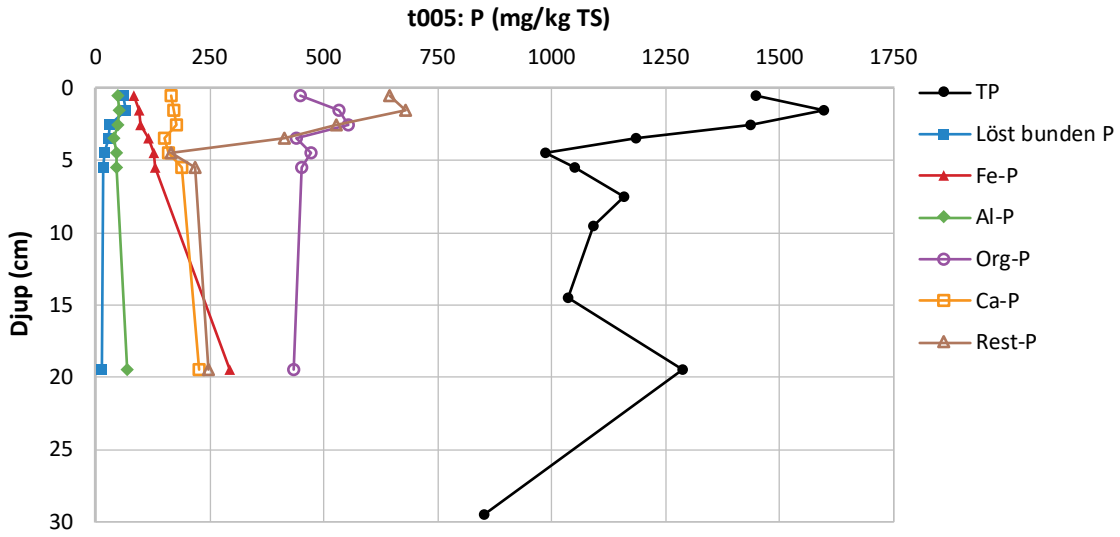
b)


t012: P (mg/kg TS)
0
250
500
750
1000
1250
1500
1750
Djup (cm)
0
5
10
15
20
25
30
TP
Löst bunden P
Fe-P
Al-P
Org-P
Ca-P
Rest-P

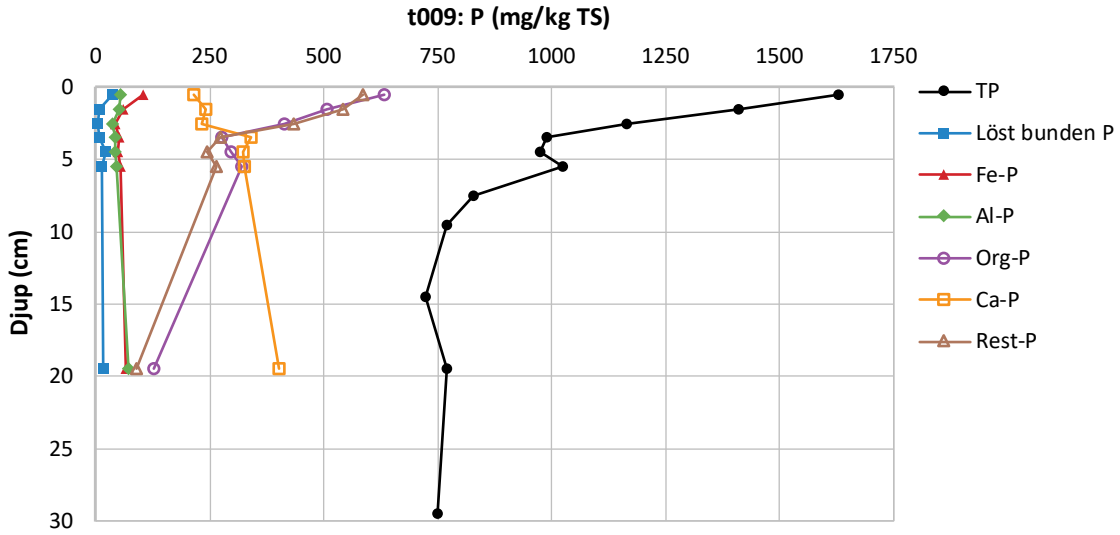
c)


t001: P (mg/kg TS)
0
250
500
750
1000
1250
1500
1750
Djup (cm)
0
5
10
15
20
25
30
TP
Löst bunden P
Fe-P
Al-P
Org-P
Ca-P
Rest-P

d)



e)



Figur 37. Sedimentprofiler över olika fosforfraktioner samt totalfosfor (TP; mg/kg TS) på utvalda lokaler från område T, i en transekt från fastlandet till Gotland: **a)** t011, **b)** t012, **c)** t001, **d)** t005 och **e)** t009. Bottenvattnet ovanför sedimentytan på lokal t011 har en syrgashalt på 7,0 mg O_2/l och på lokal t012 1,1 mg O_2/l. De tre övriga lokalerna har anoxiskt bottenvatten (0,1 mg O_2/l).

Område E

I området öster om Gotland valdes den sydligaste linjen, mätlinje E5, ut för att illustrera hur totalfosfor och fosforfraktioner ändras nedåt i sedimentkärnorna. Av de åtta lokaler som provtogs längs linjen har de tre grundaste syresatt bottenvatten (3,3–9,7 mg O_2/l), och det är tydligt att de har totalfosforprofiler som skiljer sig från övriga lokaler på mätlinjen och från område B och T (fig. 38). Halterna minskar nedåt från ytsedimentet till ett minimum runt 2–3 cm-nivån, varefter halterna långsamt stiger för att nå högre halter längre ner i sedimentet än i ytlagret. Halterna i ytsedimentet är låga, runt 500 till 700 mg/kg TS. Även e028, en lokal med hypoxiskt bottenvatten (1,4 mg O_2/l), har ett tydligt minimum i totalfosforhalter på 4–6 cm-nivån i sedimentkärnan. En liknande trend med ett minimum och sedan lätt ökande halter vidare nedåt i kärnan finns även för ytterligare ett par lokaler, dock utan att halten längre ner i sedimentet överskrider halten i ytsedimentet.

Lokalerna med anoxiskt bottenvatten har de högsta halterna av totalfosfor i ytlagren, vilket är kopplat till höga halter organiskt material i sedimentet på dessa lokaler. Lokal e030 till e032 har halter av organiskt material på 24–30 % i det översta sedimentlagret, medan e028 och e029 har halter på 15–17 %. Lokal e029, som hade anoxiskt vatten vid provtagningstillfället, var således mer lik den hypoxiska lokalen e028 än de övriga anoxiska lokalerna.

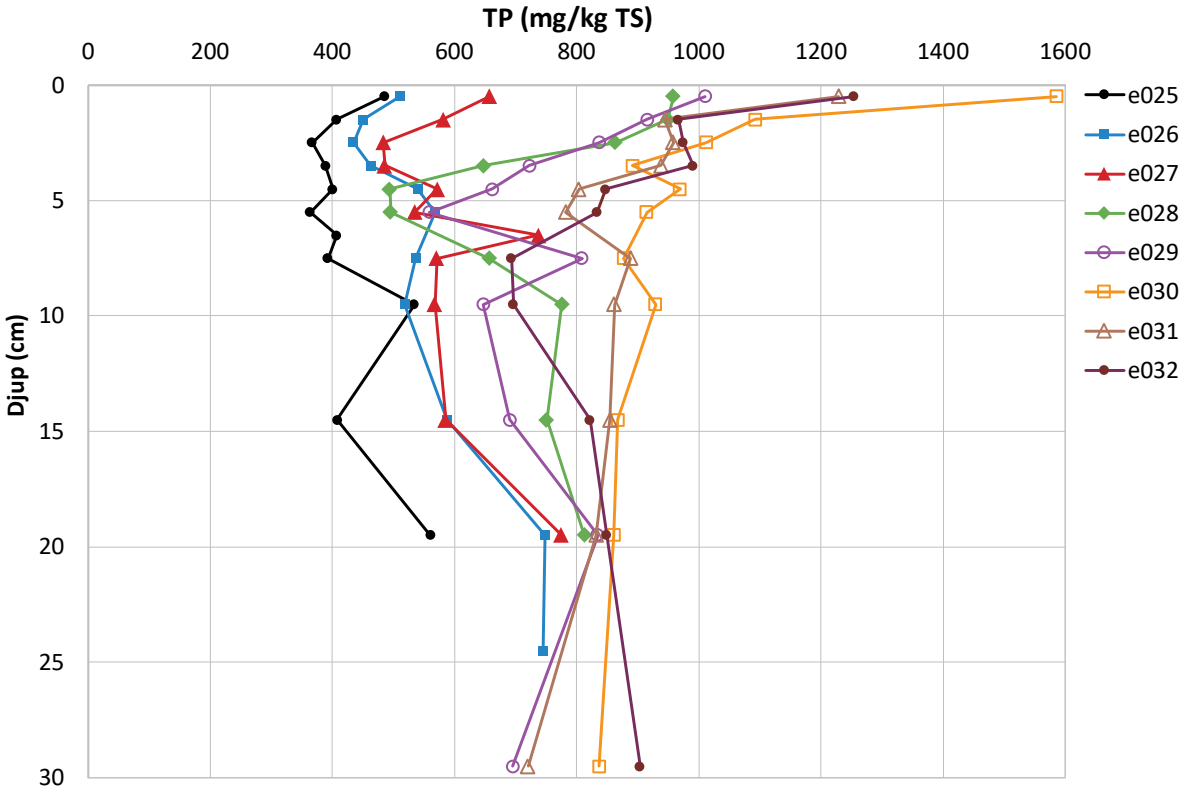
På lokal e030 mättes Pb-210 och sedimentackumulationshastigheten kunde bestämmas till 0,93 ± 0,08 mm/år. På lokal e032 mättes Cs-137 i sedimentkärnan, men inga lager gav signaler ovanför detektionsgränsen. Lokalen ligger emellertid endast 5 km från en station i den nationella miljöövervakningen av utsjösediment, SE-7. Sedimentackumulationshastigheten har där bestämts av Strålsäkerhetsmyndigheten genom mätningar av Pb-210 till 0,8 ± 0,1 mm/år och genom mätningar av Cs-137 till 0,2 ± 0,5 mm/år, det vill säga mindre än 1 mm per år (Josefsson & Apler 2019). Detta är således ett område med relativt låg ackumulation av sedimenterande material från vattenmassan. Längre norrut, på lokaler som är belägna på samma vattendjup som e030 eller ännu djupare, bestämdes sedimentackumulationshastigheterna i denna undersökning med Pb-210 till 0,55 ± 0,06 mm/år (e038) respektive 0,70 ± 0,05 mm/år, det vill säga överlag ännu lägre än på den sydligaste mätlinjen i område E.

Det är svårt att avgöra var totalfosfornivåerna stabiliseras i sedimentprofilen från lokal e032, men halterna är relativt stabila runt 2,5 cm-nivån, vilket i så fall motsvarar en ålder på mer än 25 år, för att sedan minska ytterligare och nå ett minimum runt 8 cm. Det senare skulle motsvara sediment som ackumulerat för mer än 80 år sedan. På lokal e030 finns det en tydlig stabilisering runt 3,5 cm ner i sedimentprofilen utan ytterligare minskning i halten totalfosfor nedåt i sedimentet, vilket skulle motsvara en ålder på drygt 35 år.

Bland de olika fosforfraktionerna dominerar Ca-P på de mest kustnära lokalerna (e025, e027 och e028, fig. 39). På e028 börjar Org-P förekomma i samma halter som Ca-P i ytsedimentet, för att sedan bli dominerande istället för Ca-P i ytsedimentet på lokalerna e030 och e032. Ca-P har inte lika stabila halter som i Bråviken, utan ökar snarast i halt nedåt i sedimentprofilen och är en bidragande orsak till de nedåt ökande totalfosforhalterna. Denna ökande trend för Ca-P nedåt i sedimentkärnorna överensstämmer med område T. Halterna av Ca-P är överlag under 400 mg/kg TS, och således lägre än på Bråvikenlokalerna. Rest-P har generellt liknande profil som Org-P på de olika lokalerna.

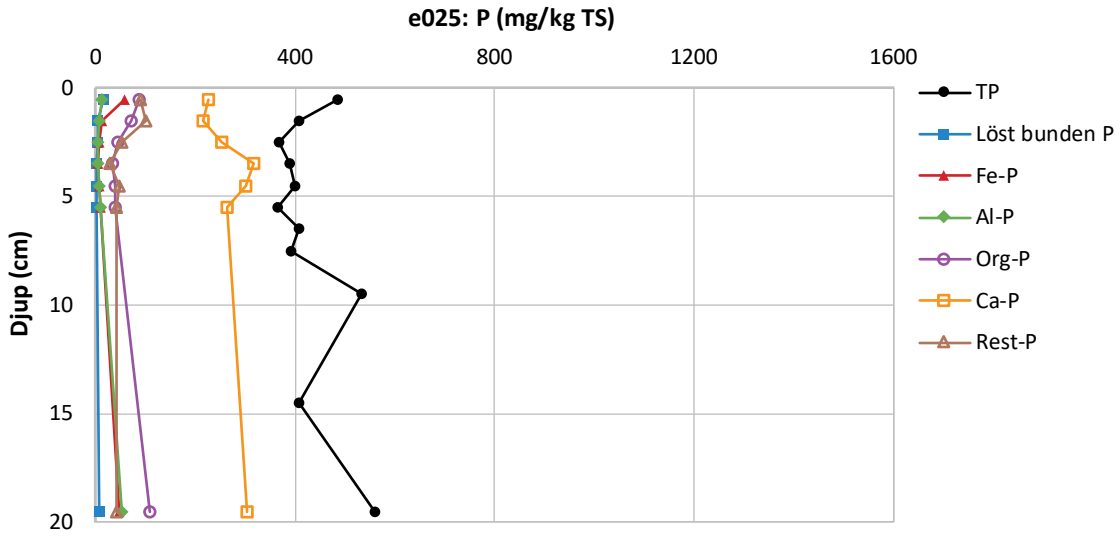
Löst bunden P, Al-P och Fe-P förekommer i väldigt låga och försumbara halter längs hela sedimentkärnan på alla lokalerna, även om halterna Fe-P överraskande är något högre på e030 och e032. En förklaring till den förhöjda nivån av Fe-P i ytlagret kan vara att det första extraktionssteget under fraktioneringen sker under oxiderande förhållanden. I anoxiska sediment där järn

finns tillgängligt skulle då löst bunden P kunna bindas som Fe-P, och leda till en överskattning av denna fraktion och en underskattning av den löst bundna fosforn (Lukkari m.fl. 2007, Rydin m.fl. 2011). Detta verkar rimligare än en faktisk förekomst av Fe-P i ytsedimentet på dessa anoxiska lokaler.

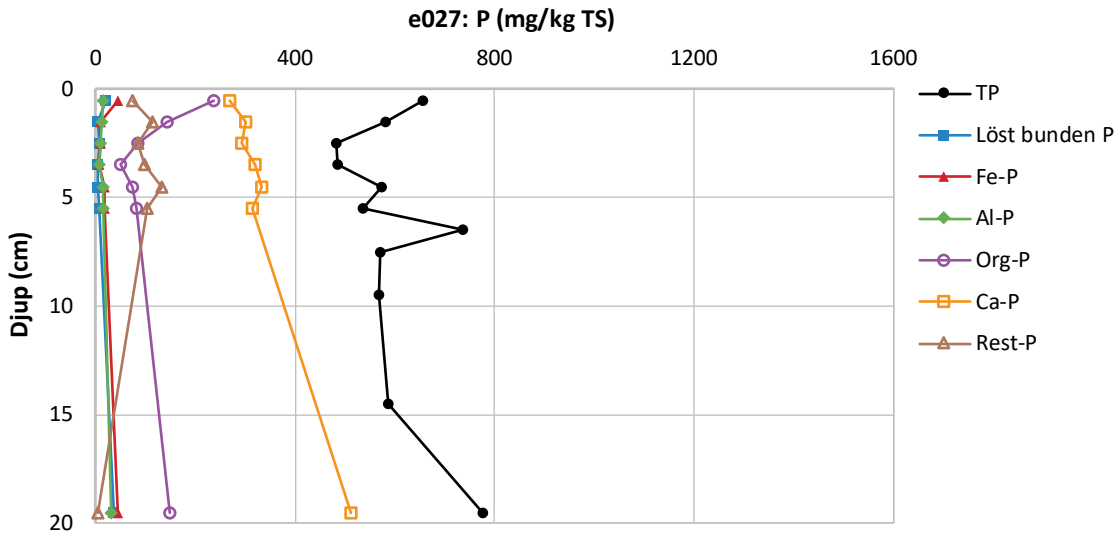


Figur 38. Totalfosfor (mg/kg TS) i sedimentprofiler från den sydligaste mätlinjen i område E. Lokalerna är ordnade i en gradient från närmast Gotland (e025) till utsjön (e032). Lokalerna e025, e026 och e027 har syresatt bottenvatten med 9,7, 4,6 respektive 3,3 mg O_2/l, medan e028 har hypoxiskt bottenvatten (1,4 mg O_2/l). Övriga lokaler har syrgashalter på 0,1 mg O_2/l i bottenvattnet, det vill säga anoxiskt.

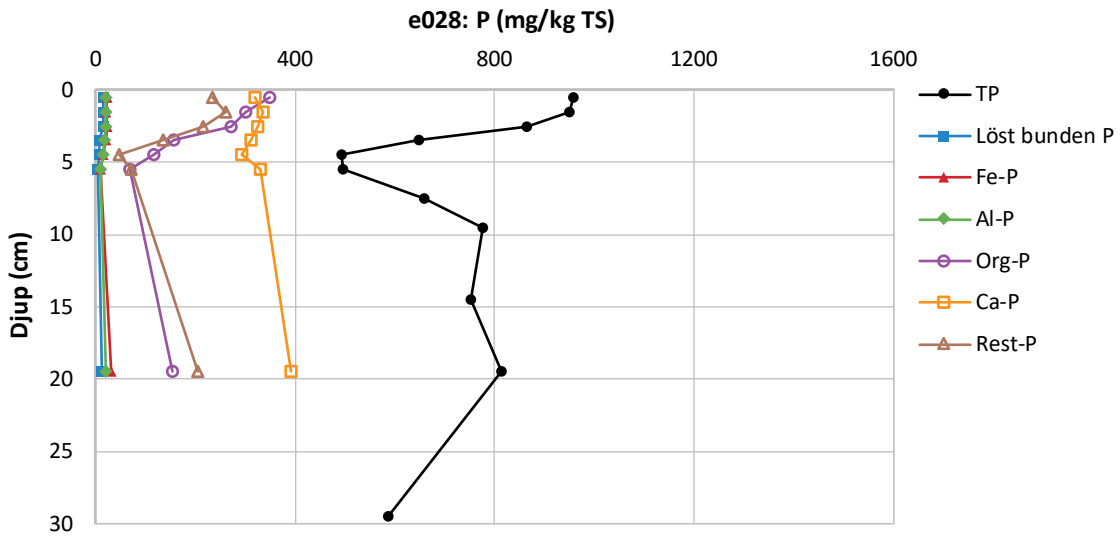
a)


e025: P (mg/kg TS)
0
400
800
1200
1600
0
5
10
15
20
Djup (cm)
TP
Löst bunden P
Fe-P
Al-P
Org-P
Ca-P
Rest-P

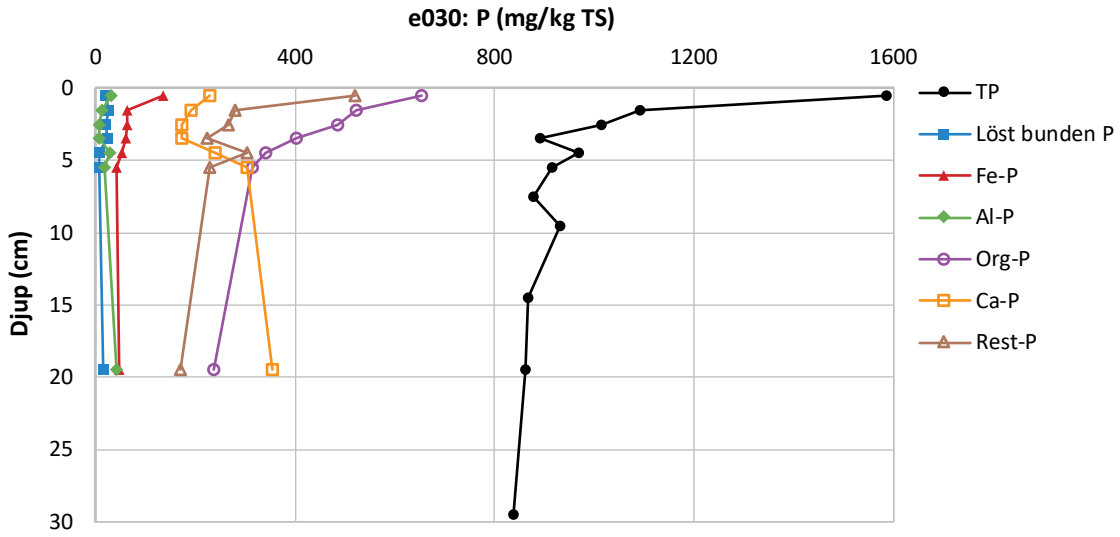
b)


e027: P (mg/kg TS)
0
400
800
1200
1600
0
5
10
15
20
Djup (cm)
TP
Löst bunden P
Fe-P
Al-P
Org-P
Ca-P
Rest-P

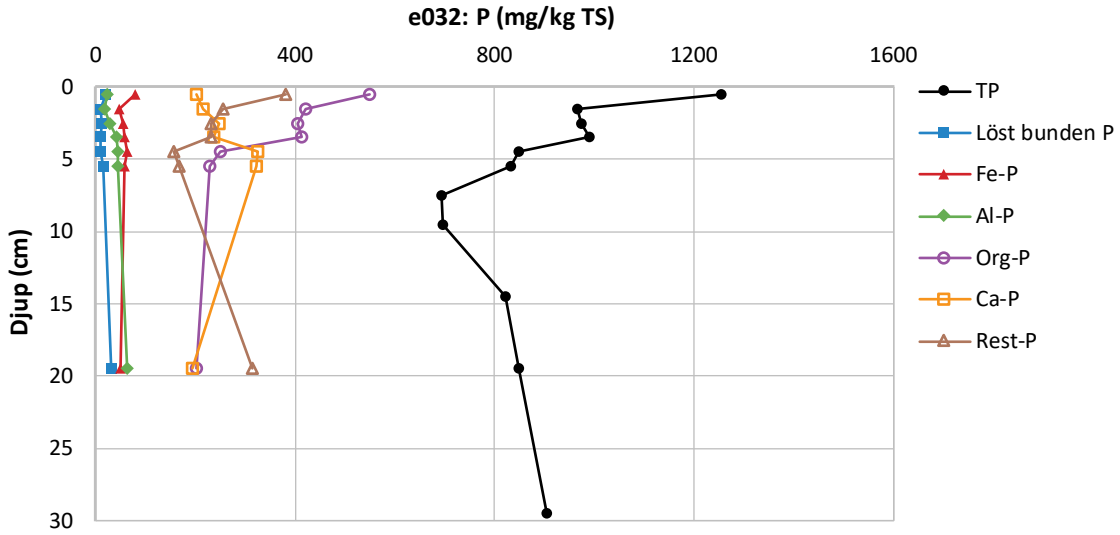
c)


e028: P (mg/kg TS)
0
400
800
1200
1600
0
5
10
15
20
25
30
Djup (cm)
TP
Löst bunden P
Fe-P
Al-P
Org-P
Ca-P
Rest-P

d)



e)



Figur 39. Sedimentprofiler över olika fosforfraktioner samt totalfosfor (TP; mg/kg TS) på utvalda lokaler från den sydligaste mätlinjen i område E, öster om Gotland. Lokalerna är i ordningsföljd från Gotland och österut i utsjön: **a)** e025, **b)** e027, **c)** e028, **d)** e030 och **e)** e032. Bottenvattnet ovanför sedimentytan på lokalerna e025 och e027 är syresatt, med en syrgashalt på 9,7 respektive 3,3 mg O_2/l. Lokal e028 har hypoxiskt bottenvatten (1,4 mg O_2/l) medan e030 och e032 har syrgashalter på 0,1 mg O_2/l i bottenvattnet, det vill säga anoxiskt.

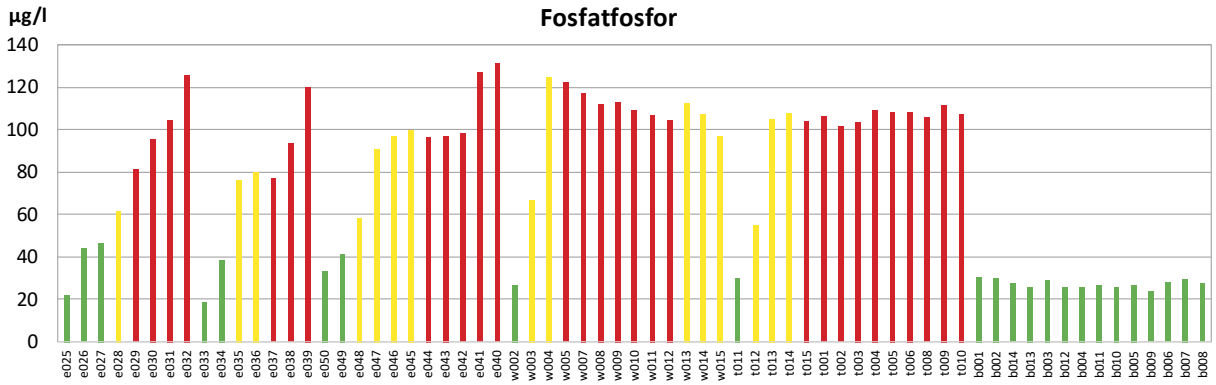
Fosfor och kväve i bottenvatten

Bottenvattnet, som provtogs strax ovanför sedimentytan, analyserades för fosfatfosfor, totalfosfor, ammoniumkväve, nitritkväve och nitratkväve. Det var den lösta fraktionen som analyserades eftersom provet filtrerades innan infrysning i väntan på analys. Även för totalfosfor är det således den lösta fraktionen som har analyserats. På två lokaler provtogs vattenprover i triplikat, e037 och b014. Den relativa standardavvikelsen för fosfatfosfor var låg på båda lokalerna, 1 respektive 2 %, och något högre för ammoniumkväve, 5 respektive 12 %. För nitrit- och nitratkväve, som förekom i lägre halter, var variationen mellan replikaten större. För e037 var den relativa standardavvikelsen 31 % för nitrit- och 33 % för nitratkväve, medan halterna på b014 var så låga att de i en del av triplikaten var under rapporteringsgränsen. För totalfosfor var den relativa standardavvikelsen 15 % på e037 och 6 % på b014, det vill säga relativt låg.

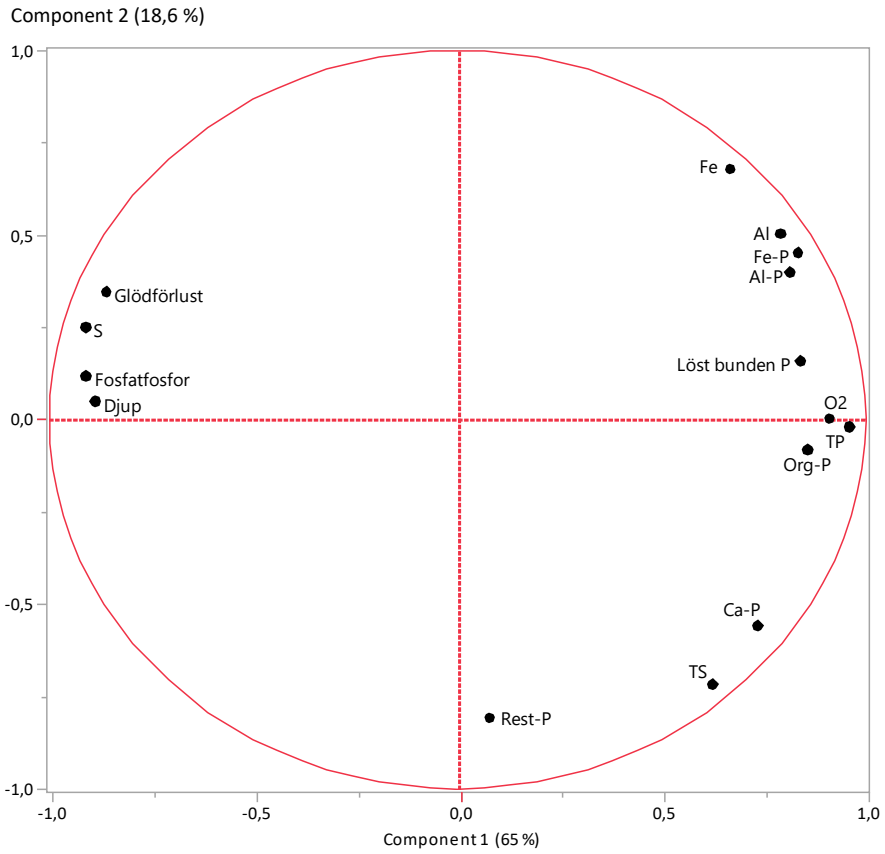
Fosfor

Halterna av fosfatfosfor i bottenvattnet är tydligt högre i anoxiska (O_2 < 0,2 mg/l) eller hypoxiska (O_2 = 0,2–2 mg/l) än i syresatta miljöer (O_2 > 2 mg/l, fig. 40). Även om halterna kan vara liknande mellan anoxiska och hypoxiska bottnar är skillnaden i medelvärde ändå statistiskt signifikant: anoxiska bottnar 107 ± 12 µg/l (medel ± stdav; n = 29) och hypoxiska bottnar 89 ± 22 µg/l (n = 15). Båda halterna är signifikant högre än fosfatfosfor-halterna ovanför de syresatta bottnarna: 29,7 ± 6,8 µg/l (n = 23).

För att undersöka samvariationen av fosfatfosfor med andra parametrar gjordes en principalkomponentanalys. Observera att mängder av fosfor i ytsedimentet (0–2 cm) används istället för halter eftersom mängderna bör vara mer relevanta för de lösta halterna i bottenvattnet. Fosfatfosfor är placerat långt till vänster i PCA:n tillsammans med parametrar som svavel, glödförlust och vattendjup, vilket visar att det finns en positiv samvariation med dessa (fig. 41). I motsatt ände längs den första komponenten, som förklarar 65 % av variationen i datat, förekommer syrgas i bottenvattnet. Detta visar på att höga halter fosfatfosfor i bottenvattnet är kopplade till låga halter syrgas och låga mängder totalfosfor och Org-P i sedimentet. Den parameter som bäst förklarade halterna av fosfatfosfor i bottenvattnet, vid parvisa jämförelser, var syrgashalterna (fig. 42) medan övriga parametrar hade lägre förklaringsgrad. Denna parameter ligger således till grund för den rumsliga prediktion av fosfatfosforhalter i bottenvatten som har gjorts (se avsnittet *Rumslig prediktion av halter och mängder av fosfor i Östersjön*, fig. 56).



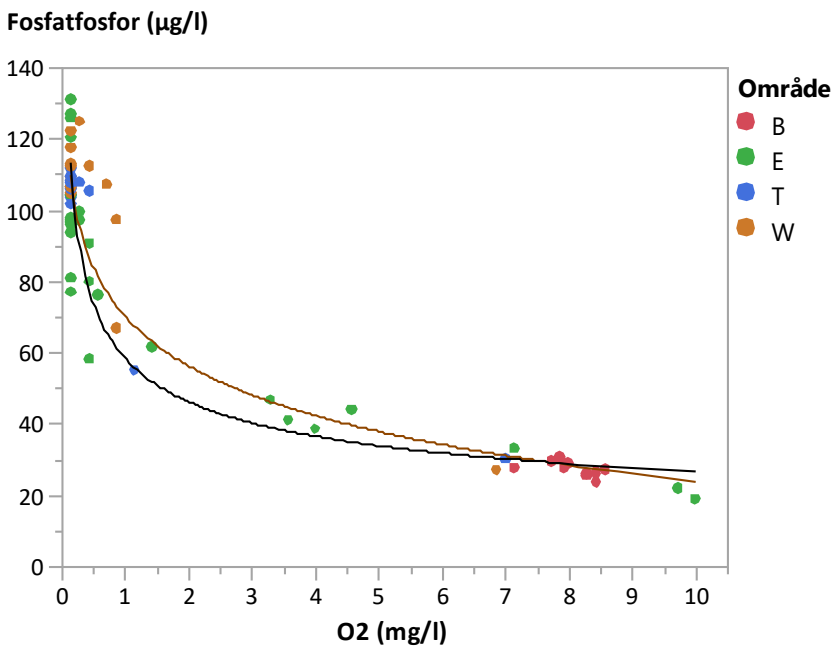
Figur 40. Fosfatfosfor i bottenvattnet på de 67 olika lokalerna. Staplarna är färgsatta utifrån syrgashalt, där grönt är > 2 mg O_2/l, gult är 0,2–2 mg O_2/l, och rött är < 0,2 mg O_2/l. Lokalerna är placerade enligt ordningen längs respektive mätlinje, se figur 2.



Figur 41. Scoreplot från principalkomponentanalys (PCA) som visar samvariationen mellan halterna av fosfatfosfor i bottenvattnet och en rad olika parametrar, inklusive halter av utvalda grundämnen (Fe, Al, S), glödförlust och torrsubstans (TS) i ytsediment (0–2 cm) på de 67 lokalerna. Även syrgashalt i bottenvatten (O_2) och vattendjup (m) har inkluderats samt mängderna i g/m² av olika fosforfraktioner i ytsediment.

En tidigare studie av bland annat fosfatfluxer från sediment har visat på något högre flux i den zon som var täckta av mattor av den svaveloxiderande bakterien *Beggiatoa* vilket motsvarade zonen mellan ungefär 80 och 120 m vattendjup (Noffke m.fl. 2016). Detta motsvarar den övre delen av den anoxiska zonen under våra fältmätningar (se fig. 3). Även om fosfatfluxerna var något högre i denna zon jämfört med bottnar längre ner med kraftigt anoxiska bottnar, ökade fosfathalten i vattnet ändå kontinuerligt nedåt i vattendjupet (Noffke m.fl. 2016). Detta överensstämmer med resultaten i den här mätningen, det vill säga att det inte var högre halter av fosfatfosfor i vattenmassan ovanför hypoxiska bottnar än ovanför anoxiska bottnar. En annan studie beräknade också sediment-till-vatten-fluxerna av fosfat att vara som högst på tidvis hypoxiska lokaler i Öresund och södra Östersjön, med lägre fluxer på anoxiska lokaler eller permanent syresatta lokaler (Mort m.fl. 2010). Ytterligare en studie, i ett område öster om Gotland, har däremot pekat på högre fluxer av löst oorganisk fosfor på djupare, anoxiska bottnar (120–210 m djup) än på grundare bottnar (75–90 m djup; Viktorsson m.fl. 2013).

Fosfatfosfor utgör den övervägande delen (90%) av totalfosforhalterna i bottenvattnet, vilket är rimligt då proverna har filtrerats och totalfosfor således endast omfattar lösta fosforformer, inte partikulära. Ovanför de syresatta bottnarna är andelen fosfatfosfor något lägre (83%) än ovanför de anoxiska eller hypoxiska bottnarna (93% för respektive bottentyp).

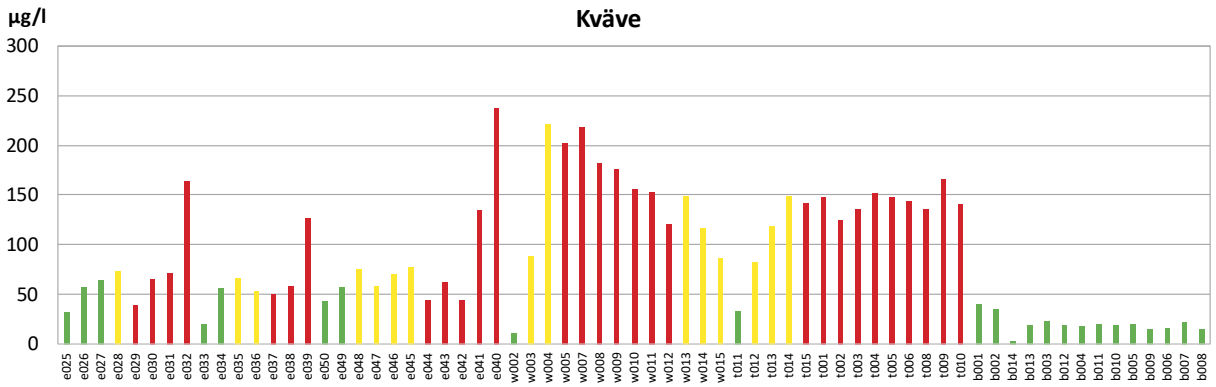


Figur 42. Förhållandet mellan halten fosfatfosfor (µg/l) och syrgashalten (mg/l) i bottenvattnet kan beskrivas med regressionen ln Fosfatfosfor = 4,07 - 0,340 × ln O_2 (svart linje, $p < 0{,}0001$, $r^2_{adj} = 0{,}93$, $n = 67$), eller med regressionen Fosfatfosfor = 70,1 - 20,1 × Ln O_2 som har en något lägre förklaringsgrad (brun linje, $p < 0{,}0001$, $r^2_{adj} = 0{,}90$, $n = 67$).

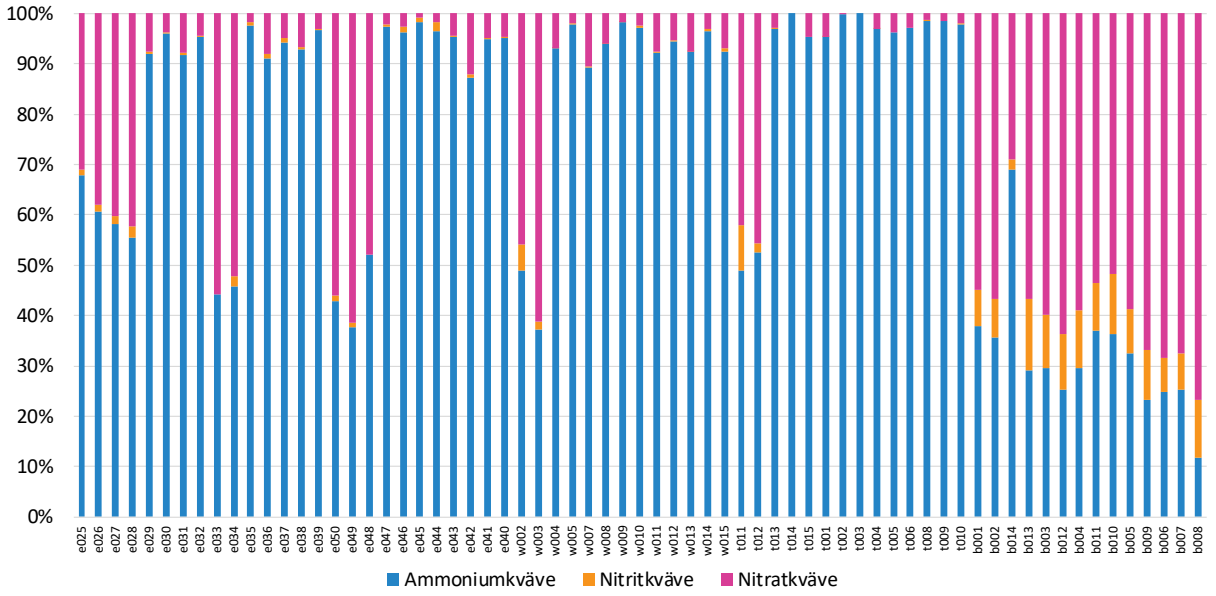
Kväve

Halterna av löst kväve i bottenvattnet, som en summa av ammonium-, nitrit- och nitratkväve, skiljer sig märkbart mellan de olika lokalerna (fig. 43). Halterna är högst på de anoxiska (129 ± 54 µg/l (medel ± stdav), $n = 29$) och hypoxiska (99 ± 45 µg/l, $n = 15$) lokalerna, medan halterna är signifikant lägre på de syresatta lokalerna (29 ± 17 µg/l, $n = 23$).

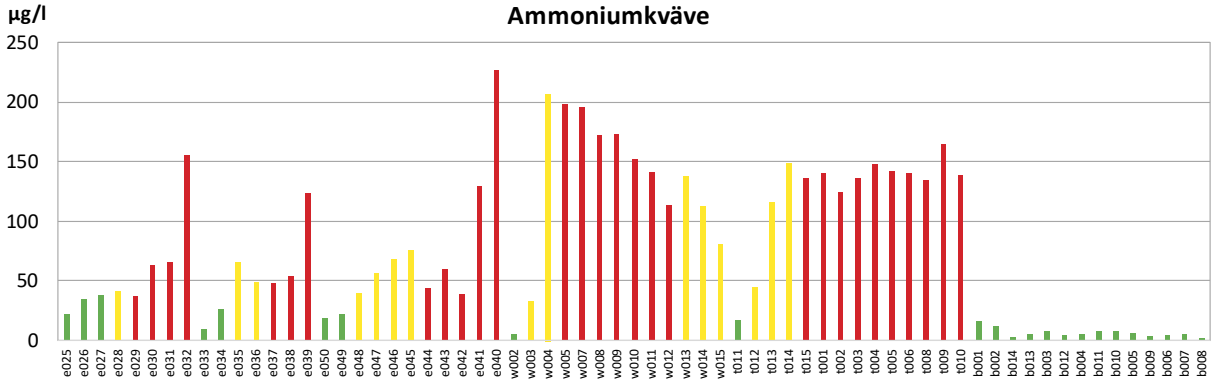
Kvävet i bottenvattnet utgörs främst av ammoniumkväve, men nitrifikation äger rum på de grunda lokalerna med högre syrgashalt, till exempel i Bråviken (fig. 44). Ammoniumjonerna omvandlas då via nitrit- till nitratjoner. Om man bara ser på ammoniumkväve är halterna därför ännu mer förhöjda i bottenvattnet på lokaler med syrebrist än på lokalerna som är syresatta (fig. 45). Halterna av ammoniumkväve på de anoxiska och hypoxiska lokalerna är 124 ± 52 µg/l ($n = 29$) respektive 85 ± 50 µg/l ($n = 15$), medan de är signifikant lägre på de syresatta lokalerna (12 ± 10 µg/l, $n = 23$). Variationen mellan lokalerna (standardavvikelsen) är relativt hög, och det är tydligt att halterna av ammoniumkväve och kväve på de anoxiska och hypoxiska lokalerna är högre i område W och T än i område E. Anledningen till detta är oklar. Halterna är högre i W och T trots liknande vattendjup, syrgashalt och glödförlust i sedimentet som i område E. Detta gäller för lokaler mellan 65 och 150 m vattendjup; på de få lokalerna som har vattendjup större än 150 m märks inga skillnader mellan områdena. Område W och T har i genomsnitt provtagits senare under sommarhalvåret än område E (se tabell 1) men med överlappning. Två av linjerna i område E (e5 och e3) provtogs till övervägande del i början av juni medan område W provtogs i slutet av juni. Efter detta, i slutet av juli, provtogs till övervägande del den långa linjen i område E (lokal e040-e047) följt av område T. Eftersom e040-e047 har liknande halter som andra jämförbara lokaler i område E medan område W och T har förhöjda halter, och eftersom det inte finns någon genomgående skillnad i fosfathalter mellan områdena (se fig. 40), är det inte troligt att provtagningsdatum har haft en inverkan. En möjlighet är därför att närheten till fastlandet, där det förekommer till exempel läckage av kväve från åkermark och utsläpp från avlopp, har påverkat de högre halterna av kväve och mer specifikt ammoniumkväve i bottenvattnet i område W och T jämfört med område E.



Figur 43. Löst kväve (som en summa av ammonium-, nitrit- och nitratkväve; µg/l) i bottenvattnet på de 67 olika lokalerna. Staplarna är färgsatta utifrån syrgashalt, där grönt är > 2 mg O_2/l, gult är 0,2–2 mg O_2/l, och rött är < 0,2 mg O_2/l. Lokalerna är placerade enligt ordningen längs respektive mätlinje, se figur 2.



Figur 44. Fördelning (%) av de olika kväveformerna lösta i bottenvattnet på de 67 lokalerna.



Figur 45. Löst ammoniumkväve (µg/l) i bottenvattnet på de 67 olika lokalerna. Staplarna är färgsatta utifrån syrgashalt, där grönt är > 2 mg O_2/l, gult är 0,2–2 mg O_2/l, och rött är < 0,2 mg O_2/l. Lokalerna är placerade enligt ordningen längs respektive mätlinje, se figur 2.

Rumslig prediktion av halter och mängder av fosfor i Östersjön

En rumslig modellering, så kallad prediktion, gjordes för att försöka skatta förekomst av fosfor, med avseende på halt och mängd, i sediment i Östersjön baserat på statistiska metoder och maskininlärning. De fosforfraktioner som modellerades var Fe-P, Org-P och Rest-P, det vill säga de fraktioner som har en större förändring i halt nedåt i en sedimentkärna och därmed kan sägas vara mer reaktiva (se avsnittet *Fosforprofiler i sedimentkärnor*). Dessutom gjordes en modellering av halten totalfosfor. Sedimentprover med angivna halter av fosfor i olika fraktioner förelåg dels från utsjön i Egentliga Östersjön samt från Bråviken inom nuvarande projekt, dels från Mellansveriges skärgårdsområden (via Emil Rydin, Stockholms universitets Östersjöcentrum).

Modelleringsmetod

Som metod för rumslig prediktering valdes maskinlärning via ”generalized boosted regression models” (gbm), realiserat med språket R (Elith m.fl. 2008, Chiu 2015, s. 262ff) och verktygslådan Caret (Kuhn 2008). Med denna metod kan yttäckande prediktioner av parametrar skapas, givet att man har tillräckligt många prediktorer (miljövariabler i form av rasterdata) som är yttäckande och fångar de viktigaste bestämmande faktorerna bakom den analyserade parameterns värden. För att göra en rumslig modellering av en parameter som fosfor i ytsediment blir det med denna metod därmed nödvändigt att först skapa olika heltäckande datalager, prediktorer, som fångar in naturmiljöns karaktär.

Val av prediktorer

Genom korrelationsanalyser och en mer övergripande diskussion fastslogs att följande miljövariabler var viktiga när det gäller att beräkna olika typer av fosfat i ytsediment, antingen genom rumslig korrelation eller genom kausala samband:

- Djup- och strömförhållanden, viktiga för substrat, närings-, partikel- och sedimenttransport
- Sedimentationsförhållanden, ackumulation av näringsämnen, partiklar och sediment, delvis beroende av ovanstående, kanske särskilt avgörande för organisk fosfor
- Sediment, delvis beroende av ovanstående, och då i synnerhet mjukbottnar
- Syreförhållanden som påverkar de kemiska processerna
- Innehåll av järn, som utgör en faktor bakom järnbunden fosfor (Fe-P)

Genom att ta fram heltäckande dataskikt eller modeller över dessa miljövariabler kan sedan, med dessa som utgångspunkt, modeller över fosfor tas fram (”predikteras”). För att kunna ta fram prediktorer inom dessa områden var det nödvändigt att göra ett antal förberedande analyser. Dessa beskrivs nedan.

Förberedande modellering

Som grund för den rumsliga prediktionen skapades en modell över Östersjöns fysiska karaktär med bästa möjliga upplösning, med hänsyn taget till sekretess gällande data över vattendjup och ytsubstrat på havsbotten. Följande parametrar, data och metoder användes för att skapa heltäckande prediktorer:

1. **Djupdata**. En djupmodell skapades med 100 x 100 m upplösning baserat på punktdata från EMODnet (2018), som interpolerades till raster. Till detta lades bästa tillgängliga data från området utanför territorialvattnet från olika källor, framförallt SGU och Sjöfartsverket. Enhet: m.
2. **Morfologi**. Från djupmodellen togs olika mått på havsbottnens morfologi fram, i form av fyra olika topografiska index (se till exempel Weiss 2001, Seif 2014) som visar uppstickande

och nedsänkta partier, med sökradien 500, 1 000 och 7 500 m, samt en summa av dessa tre. Enhet: m.

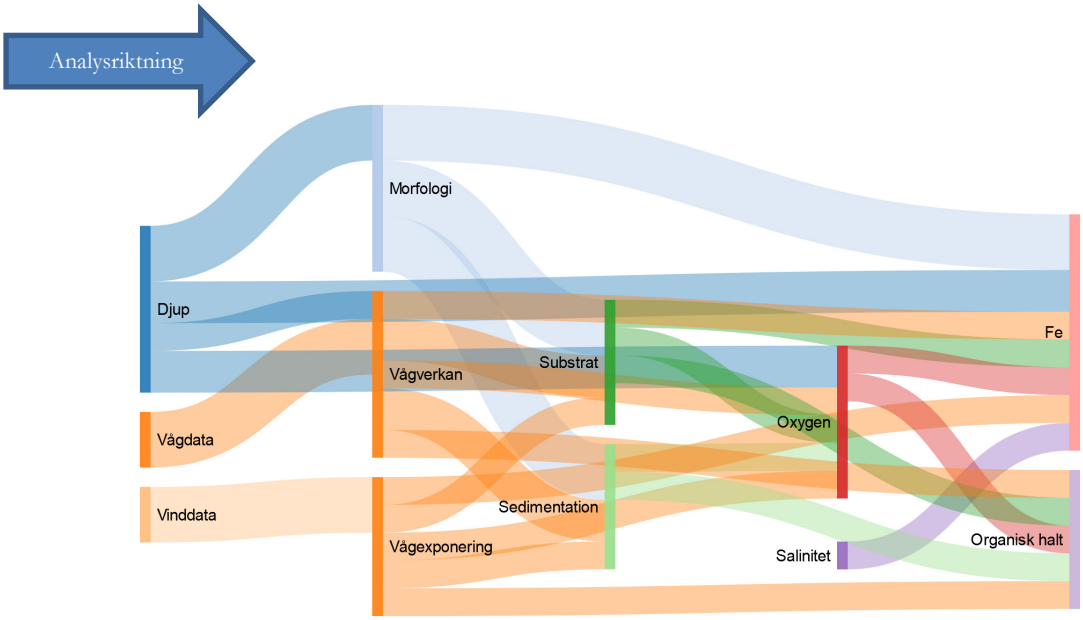
3. **Vågverkan**. Med utgångspunkt från data från SMHI, lagrat på Copernicus (http://marine.copernicus.eu/) gällande signifikant våghöjd och våglängd samt bottenströmmar för samtliga dagar under år 2016 (Tuomi & Alari 2018), togs en modell fram för vattenrörelser vid botten (U_0, orbitalhastighet), med utgångspunkt från djupmodellen och linjär vågteori (Soulsby 2006). Modellen räknar ut orbitalhastighet vid botten med hänsyn taget till medelvärdet av årets medelvågor och årets maximala vågor, till vilket adderats bottennära strömmar. Enhet: m/s.
4. **Generell vågexponering i ytzonen**. Med utgångspunkt från en analys av vindens stryklängd över Östersjön och dominerande vindar (”SWM”, se Wikmark & Isæus 2010) togs en modell fram över generell vågexponering i ytzonen, speciellt lämpad för analys av vågverkan i skärgårdsområden, genom att via regressionsekvationen i Wikmark & Isæus (2010) och medelvågor enligt punkt 3 ovan räkna ut motsvarande SWM. Till detta fogades, genom en mosaik-operation, kustnära SWM-värden från tidigare vågmodell som håller en hög noggrannhet i kustzonen (Naturvårdsverket 2006). Enhet: m^2/s.
5. **Substrat**. Baserat på tillgängliga observationer av bottnarnas beskaffenhet och parametrarna ovan togs modeller fram med sannolikhet för förekomst av hårdbotten, grus-stenbotten, sandbotten och mjukbotten. Enhet: procent sannolikhet.
6. **Sedimentackumulationshastighet**. Utifrån till EMODnet (2019) inrapporterade data om ackumulationshastighet i Östersjöområdet togs en modell fram, avseende pågående ackumulation av fina sediment, med utgångspunkt från ovanstående parametrar. Enhet: cm/år.
7. **Syreförhållanden**. Med utgångspunkt från parametrarna ovan och observationer av bottennära syrgas från databasen Svenskt havsarkiv (SHARK, se SMHI 2020) samt AquaBiota (Virtanen m.fl. 2019), gällande Finlands skärgårdar, togs en modell fram med medelvärde av syre i det bottennära skiktet. Enhet: mg/l.
8. **Järn i ytsediment**. Baserat på halter av järn i prover som rapporterats in till SGUs datavärdskap för föroreningar i sediment (SGU 2015) togs, med utgångspunkt i de ovanstående parametrarna, en modell fram för halten järn i ytsediment. Enhet: g/kg TS.
9. **Halten organiskt material.** Baserat på data från den regionala miljöövervakningen och projektets data togs en modell fram med andelen organiskt material i ytsedimenten. För denna användes glödförlust och i andra hand en omräkning av TOC till glödförlust (LOI) genom en schematisk multiplikation med faktorn 2,5, enligt förhållandet TOC=0,40 * LOI (se fig. 9). Enhet: procent.

Förberedande hantering av indata

Grundläggande data sammanställdes och klipptes med Östersjöområdets vattenyta i 100 m upplösning. Grundläggande rasterdata (parameter 1–4 ovan) togs fram via GIS-analys medan mer komplicerade (parameter 5–9) togs fram via rumslig modellering. Inom denna rumsliga modellering (med metod gbm/Caret enligt ovan) användes djupdata, morfologi och vågverkan samt vågexponering för att ta fram modellen över substrat, det vill säga sedimentbottentyp. Efterföljande modeller för sedimentationshastighet använde samma prediktorer plus substratmodellen. Modellerna för bottennära syreförhållanden, järn i ytsediment och organisk halt i sediment byggde på dessa resultat enligt figur 46 nedan.

För att komplettera faktiskt uppmätta värden för parameter 6–9 ovan har ett antal infererade nollpunkter införts slumpvis i existerande observationer (träningsdata), exempelvis nollvärden för fosfor i erosiva hårdbottnar. Detta var nödvändigt då de uppmätta värdena ofta representerar en

begränsad del av miljöns fullständiga gradienter och för att maskininlärningen skall kunna bestämma värden i intervallet noll eller högre måste nollvärden kunna knytas till rätt miljövariabler. Exempelvis har prover för att kartlägga ackumulationshastighet endast tagits i områden med ackumulation och det var därför nödvändigt att komplettera dessa med nollvärden där ingen ackumulation förekommer, så som vågexponerade grunda bottnar.



Figur 46. Flödesdiagram över hur prediktorer (vertikala streck i diagrammet) tagits fram baserat på existerande data och prediktorer. Vid respektive vertikalt streck (dataskikt, prediktor) införs dessutom träningsdata till modellen i form av observationer av substrat, syre, järn osv. Diagrammet skall läsas så att prediktorer till vänster används för att ta fram nya prediktorer till höger, där utgångspunkten därmed är djup, vågor och vindar och de mest förädlade prediktorerna är Fe i sediment och halten organiskt material i sediment.

Underlagsmodellernas tillförlitlighet

För att modellerna ska kunna få relevans över hela Östersjön, över bredare miljögradienter, har enligt stycket ovan vissa träningsdata lagts till. Dessa kommer oundvikligen att inverka negativt på modellresultaten. För utvärdering av modellerna har mått på klassningsnoggrannhet (accuracy), medelfel (MAE), determinationskoefficient (R^2) och kappa valts.

- **Accuracy** anger andelen rätt klassindelade observationer (0–1) vid validering av tematisk modell, i detta fall bottensubstrat.
- **Medelfelet** (MAE) är det absoluta medelfelet, uttryckt i aktuell enhet och storhet, till exempel cm/år eller g/kg osv. MAE beror av indata och bör bedömas mot krav på noggrannhet men ett riktvärde skulle kunna vara att modellen är tillförlitlig om den i detta sammanhang inte har ett medelfel som är större än 10 % av de predikterade värdena.
- **R^2** anger styrkan (0–1) i sambandet mellan prediktorn och det predikterade. Låga värden indikerar en brusig modell med lågt förklaringsvärde. Ett riktvärde kan vara att en modell är meningsfull vid ungefär 0,5, god vid 0,75 och mycket god över 0,9.
- **Kappa** (0–1) används främst vid modeller som inte följer en normalfördelning och anger i vilken grad accuracy är starkare än slumpen, det vill säga om modellens styrka är verklig eller bara en effekt av indatats skevhet. Som exempel: om hela Östersjön bestod av sand skulle en modell över sandiga substrat bli 100 % korrekt, oavsett hur den gjordes. Där skulle ett lågt värde på kappa avslöja att en sådan modell inte är bättre än slumpen. En riktlinje kan vara 0,3 för en moderat överensstämmelse, 0,5 för god och 0,75 för mycket god.

Vid utvärdering av modellerna erhölls följande mått på tillförlitlighet:

1. För substratmodellen (parameter 5), som består av en binär prediktion (närvaro/frånvaro) av substratklasser uttryckt i procent, erhölls accuracy 0,68 och kappa 0,30 för grus- och stenbottnar, accuracy 0,80 och kappa 0,48 för hårdbottnar, accuracy 0,73 och kappa 0,73 för sand samt accuracy 0,75 och kappa 0,50 för mjukbottnar. Baserat på accuracy och kappa bedöms samtliga modeller utom grus- och stenbottnar ge goda resultat.
2. För sedimentackumulationshastigheten (parameter 6) erhölls $R^2 = 0,55$ och medelfel 0,1 cm/år. Detta resultat bedöms som ganska osäkert i områden med lägre ackumulationshastighet, där felet 0,1 cm/år kan vara helt avgörande för förekomst av ackumulation eller ej. Modellen pekar dock effektivt ut mer utpräglade ackumulationsbottnar.
3. För syrehalten (parameter 7) erhölls $R^2 = 0,70$ och medelfel 1,0 mg/l. Detta resultat bedöms som ganska gott eftersom syregradienten varierar mellan ungefär 0 och 10.
4. För järnhalt i sediment (parameter 8) erhölls $R^2 = 0,59$ och medelfel 7,8 g/kg TS. Detta resultat bedöms som användbart då Fe varierar mellan 2 och 150 men medel bara uppgår till 39,5.
5. För halten organiskt material i sediment (parameter 9) erhölls $R^2 = 0,71$ och medelfel 1,1 %. Detta resultat bedöms som gott då halten varierar mellan 0 och 85, och medelvärdet ligger på 7,7 %.

För parameter 6–9 (punkt 2–5 ovan) kan sägas att inga av dataseten som ligger till underlag för dessa analyser har tillräcklig homogen täckning över Östersjön. Speciellt är det nollvärden som saknas, och värden i miljöer där ingen provtagning sker. Den form av rumslig prediktion som metoden bygger på (gbm) behöver hundratals eller helst tusentals punkter slumpmässigt fördelade över hela analysdomänen, ett förhållande som inte föreligger. Med tanke på att R^2 trots dessa brister ligger nära 0,7 finns en relevans hos modellerna och även en potential att förbättra dem ytterligare.

För substratmodellen (punkt 1 ovan) är det snarast skalproblematik som begränsar tillförlitligheten. I synnerhet sand- och grusbottnar är svåra eller omöjliga att identifiera och skilja åt i den skala på vilken modellen bygger, det vill säga pixlar om 100 m. Likaså kommer det inom varje pixel att förekomma flera typer av substrat, vilket drar ner modellens valideringsvärde, även om modellen ändå fångar upp den övergripande miljöns karaktär.

De nyutvecklade och för projektet viktiga underlagsmodellerna för sedimentackumulationshastighet, syreförhållanden vid botten, järn i sediment samt organiskt material i sediment visas i figur 47–50.

Initial modellering av totalfosfor

För att få en initial kartläggning av fosforns utbredning i ytsedimenten (0–2 cm) gjordes en prediktion av halter av totalfosfor, Tot-P. Eftersom värden för denna parameter även fanns i datasetet från Östersjöcentrum slogs dessa datamängder samman. Då de styrande faktorerna bakom Tot-P var oklara valdes att inkorporera ett stort antal prediktorer i modellen. De som valdes var totalt 11 inom fyra kategorier:

- Morfologi (fyra topografiska index samt djup enligt beskrivning ovan)
- Vågverkan och generell vågexponering vid ytan
- Bottensubstrat (fyra klasser; sand, mjukbotten, sten och grus samt hårdbotten)
- Sedimentackumulationshastighet

De tre mest förklarande variablerna var mjukbotten (34,9 %), sedimentackumulationshastighet (18 %) och storskaligt terrängindex (radie 7,5 km; 8,2 %), vilket sammantaget visar att totalfosfor förekommer i högst halter i ackumulationsområden, mjukbottnar och sänkor.

Utvärderingen av modellen visade att R^2 = 0,66 och medelfelet (MAE) = 198. Då halten varierar mellan 0 och 8 127 och medelvärdet är 1 539 förefaller modellen ganska god. Resultatet av modellen finns visualiserat i figur 51.

Modellering av Fe-P, Org-P och Rest-P

Tre modeller skapades baserat på beräkningar av dessa fosforfraktioner i ytsediment (0–2 cm). Fraktionerna valdes eftersom det är de fosfortyper som visar mest förändring i halt nedåt i en sedimentkärna. Modelleringen utfördes genom att välja ut de prediktorer som antogs förklara varje fraktion och med gbm prediktera halterna rumsligt. Avgörande för val av prediktorer har följande förberedande analyser varit:

- **För Fe-P**: Samvariation av Fe-P och järn samt Fe-P och O_2. Negativ samvariation med organiskt material (fig. 22).
- **För Org-P**: Samvariation med organiskt material. Stark negativ korrelation med O_2 (fig. 22). Organiskt material korrelerar starkt med sedimentackumulationshastighet vilket gör att även denna prediktor valdes.
- **För Rest-P**: Likt Org-P varierar Rest-P med organiskt material i sediment (varför även sedimentackumulationshastighet valdes) och inverterat mot O_2. Ett rimligt antagande var även att halten Tot-P delvis kan förklara Rest-P, varför denna också valdes som prediktor.

Modelleringsmetoden fastslår förklaringsgraden hos respektive prediktor och väger in dessa i en multivariat modell baserat på regressionsträd (Elith m.fl. 2008). Förklaringsgraden för varje prediktor räknas ut enligt hur mycket den bidrar till reduktion av residualer genom delning av regressionsträden (för mer information, se Friedman 2001).

En viktig kommentar är att givet aktuell modelleringsmetod behöver de prediktorer man väljer inte stå i linjära eller andra direkta kvantitativa samband med det som predikteras, utan man söker efter prediktorer med någon slags samvariation som även kan ha stokastiska drag. Metoden löser ut dessa samband via så kallad 'stochastic gradient boosting' (Friedman 2002). På grund av detta är modellen mindre känslig för tillförsel av irrelevanta prediktorer och det är rent generellt bra med så många prediktorer som möjligt. Det blir emellertid problematiskt när antalet träningspunkter är få, då vissa prediktorer av ren slump kan få alldeles för stor förklaringsgrad. Eftersom det bara föreligger 69 punkter från projektets undersökningar 2019, och för att minimera eventuella problem med beroenden (samvariation, rumslig korrelation) mellan olika prediktorer, begränsades därför prediktorerna enligt beskrivningen nedan. Där beskrivs även modellernas tillförlitlighet.

Enligt projektets syfte skapar metoden en modell över hela Östersjön, även där inga observationsdata (träningsdata för modellen) fanns. När man betraktar resultaten ska man alltså vara försiktig när det gäller att lita på modellen i de områden där inga data existerar. Dessa tomma områden kan däremot användas för att planera ytterligare fältundersökningar så att modellens träningsdata omfattar så mycket som möjligt av de gradienter som finns hos miljön (och därmed hos prediktorerna, i den mån de fångar in miljöns gradienter). Med andra ord bör man ta prover i alla olika bottentyper, djupområden och regioner med olika grad av antropogen belastning för att metoden ska klara av att se samband som täcker in hela Östersjöregionen.

Modell av Fe-P

Valda prediktorer:

- Modell över bottensyre
- Modell över järn i sediment
- Modell över halten organiskt material

Förklaringsgraden hos prediktorerna var för järn i sediment 39,9 %, för organiskt material 35,5 % och för syreförhållanden 24,6 %. Utvärderingen av modellen visade att R^2 = 0,71 och medelfelet = 0,15, varför det föreföll som om modellen är användbar. Resultaten från modellen finns visualiserade i figur 52. Mängderna Fe-P enligt modellen var högst i kustsediment, vilket är rimligt (jämför fig. 32b), förutom ett område i sydöstra Östersjön. De högre mängderna i detta område är troligtvis kopplade till de högre halterna järn i sedimentet här, enligt modellen i figur 49. Det råder emellertid brist på mätdata för att verifiera detta, med bara ett fåtal datapunkter inom detta område för järnhalter i sediment.

Modell av Org-P

Valda prediktorer:

- Modell över sedimentackumulationshastighet
- Modell över bottensyre
- Modell över halten organiskt material

Förklaringsgraden hos prediktorerna var för organiskt material 42,3 %, för syreförhållanden 37,6 % och för ackumulationshastigheten 20,5 %. Utvärderingen av modellen visade att R^2 = 0,67 och medelfelet = 0,12, varför det föreföll som om modellen är användbar. Resultaten från modellen finns visualiserat i figur 53. Mängderna Org-P var högst i kustsediment, vilket överensstämmer med mätningar under projektet (jämför fig. 32d), och även något förhöjda på de kustnära lokalerna i utsjön, vilket kan skönjas öster om Gotland i modellen i figur 53.

Modell av Rest-P

Valda prediktorer:

- Modell över sedimentackumulationshastighet
- Modell över bottensyre
- Modell över halten organiskt material
- Modell över Tot-P

Förklaringsgraden hos prediktorerna var för Tot-P 54,5 %, för syreförhållanden 16,3 %, för ackumulationshastigheten 15,2 % och för organiskt material 14,0 %. Utvärderingen av modellen visade att R^2 = 0,54 och medelfelet = 0,09 (vid medelvärde 0,55), varför det föreföll som om modellen med viss tvekan är användbar och behöver utvecklas. Resultaten från modellen finns visualiserade i figur 54 och verkar relativt rimliga jämfört med mätningarna på provlokalerna som redovisas i figur 32f. Halterna av Rest-P var inte förhöjda på kustnära lokaler som Bråviken, och relativt jämna mellan de olika typerna av undersökta bottnar.

Modell av mängden reaktiv fosfor

Med utgångspunkt från de tre modellerade fosforfraktionerna gjordes en grov beräkning av totala mängden reaktiv fosfor i ytsediment. Mängden av summan av dessa tre fraktioner i de översta 0–2 cm av sedimentet, uttryckt per ytenhet sediment (g/m^2), finns visualiserad i figur 55. För en bestämning av mängden fosfor som faktiskt är potentiellt remobiliserbar hade den stabila koncentrationen av fraktionerna längre ner i sedimentkärnan behövt bestämmas på varje lokal, och dragits ifrån mängden i ytsedimenten. Detta behövs då inte all fosfor bryts ned och remobiliseras till vattenmassan, utan en del begravs djupare i sedimenten. En sådan mer tidskrävande analys rymdes dock inte inom projektet.

Modell av halten fosfatfosfor i bottenvatten

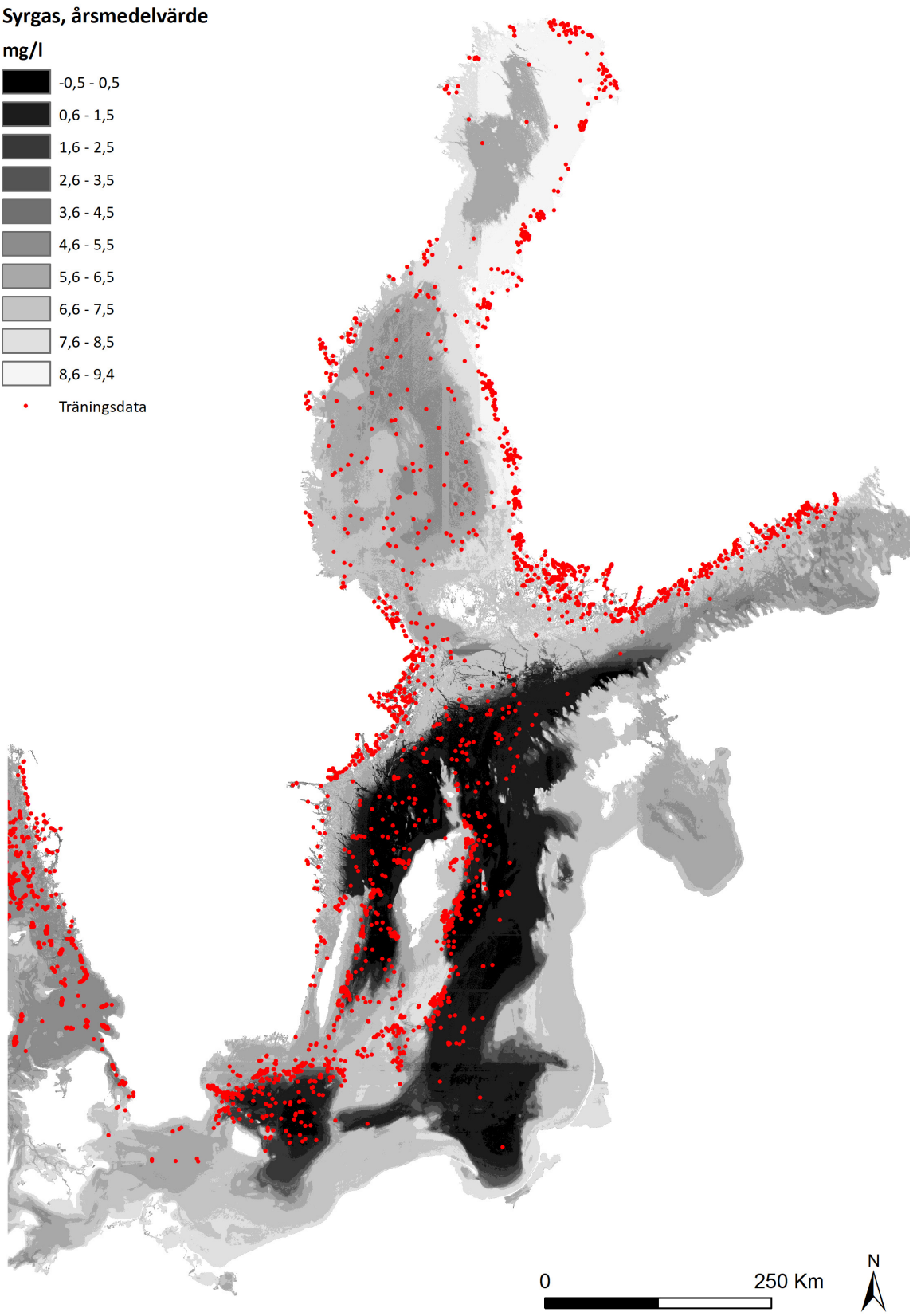
Med utgångspunkt från det etablerade sambandet mellan fosfatfosfor i bottenvattnet och syrgashalten i bottenvattnet (fig. 42; båda parametrarna provtagna respektive mätta cirka 0,5 m ovanför sedimentbottenytan) modellerades den teoretiska halten fosfatfosfor utifrån modellen över syrgas i bottenvatten (fig. 47) genom att räkna om syrgas till fosfatfosfor. Resultatet finns visualiserat i figur 56. Denna teoretiska modell, som visar områden där avgång av fosfor från sediment tycks ske, beroende på syrebrist, bör i framtida arbete integreras i en modell över bottenbunden fosfor där fosfor faktiskt finns och kan avgå.

Brister och förbättringsmöjligheter

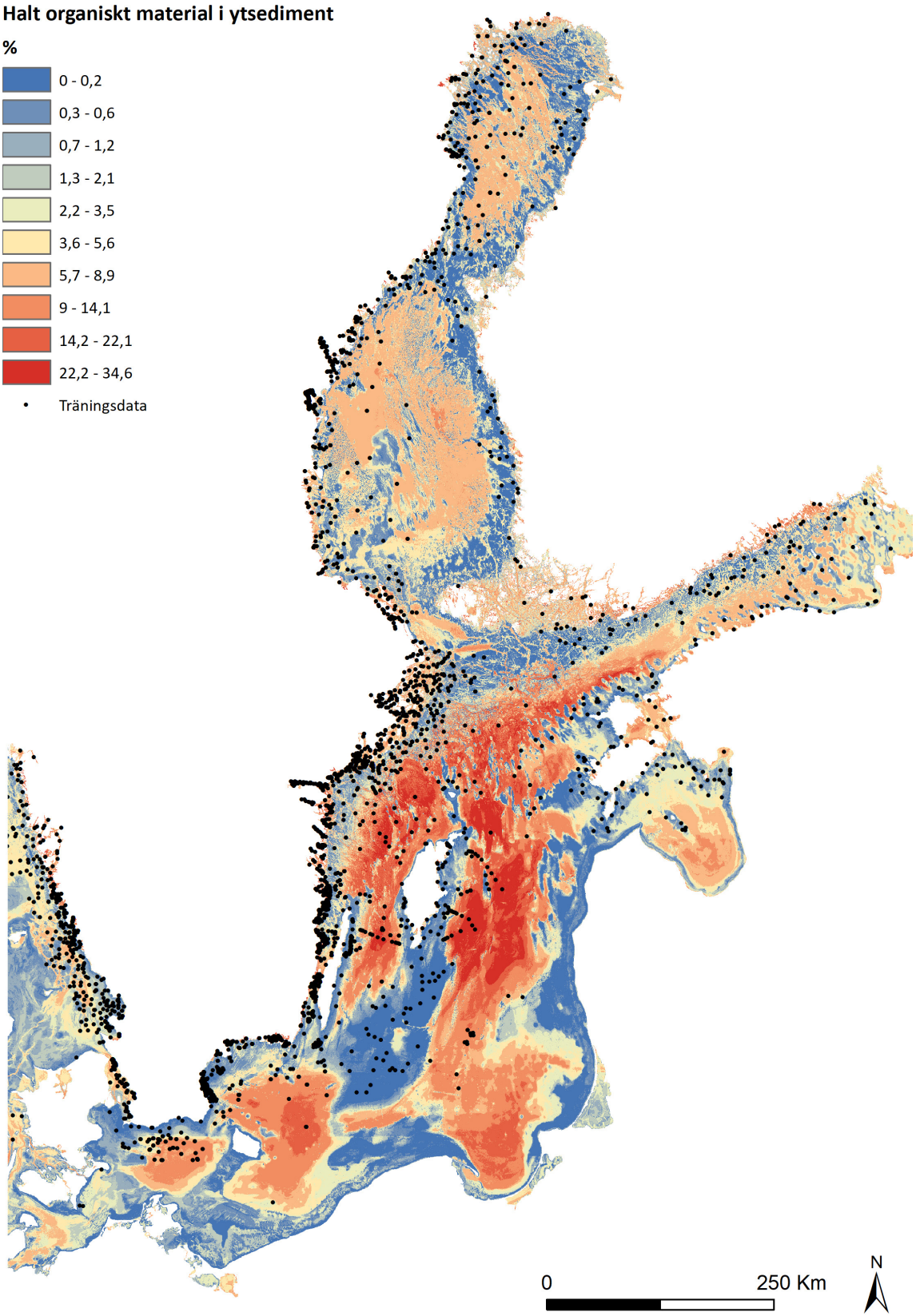
Som framgår av analyserna ovan finns starka korrelationer mellan olika typer av fosfor och naturmiljön. Modellerna är dock inte tillräckligt starka för att man ska förlita sig på modellresultatens precisa värden. Resultaten kan för närvarande användas relativt, som grund för att utforma nya provpunkter, identifiera databrist och ta fram kompletterande prediktorer/miljövariabler.

För att förbättra analysen och resultaten finns flera åtgärder som är relativt enkla att genomföra, och andra som kräver mer arbetsinsats. Nedan beskrivs rekommenderade åtgärder, där de första fyra är mer enkla, om än tidskrävande, och de sista tre är mer komplicerade.

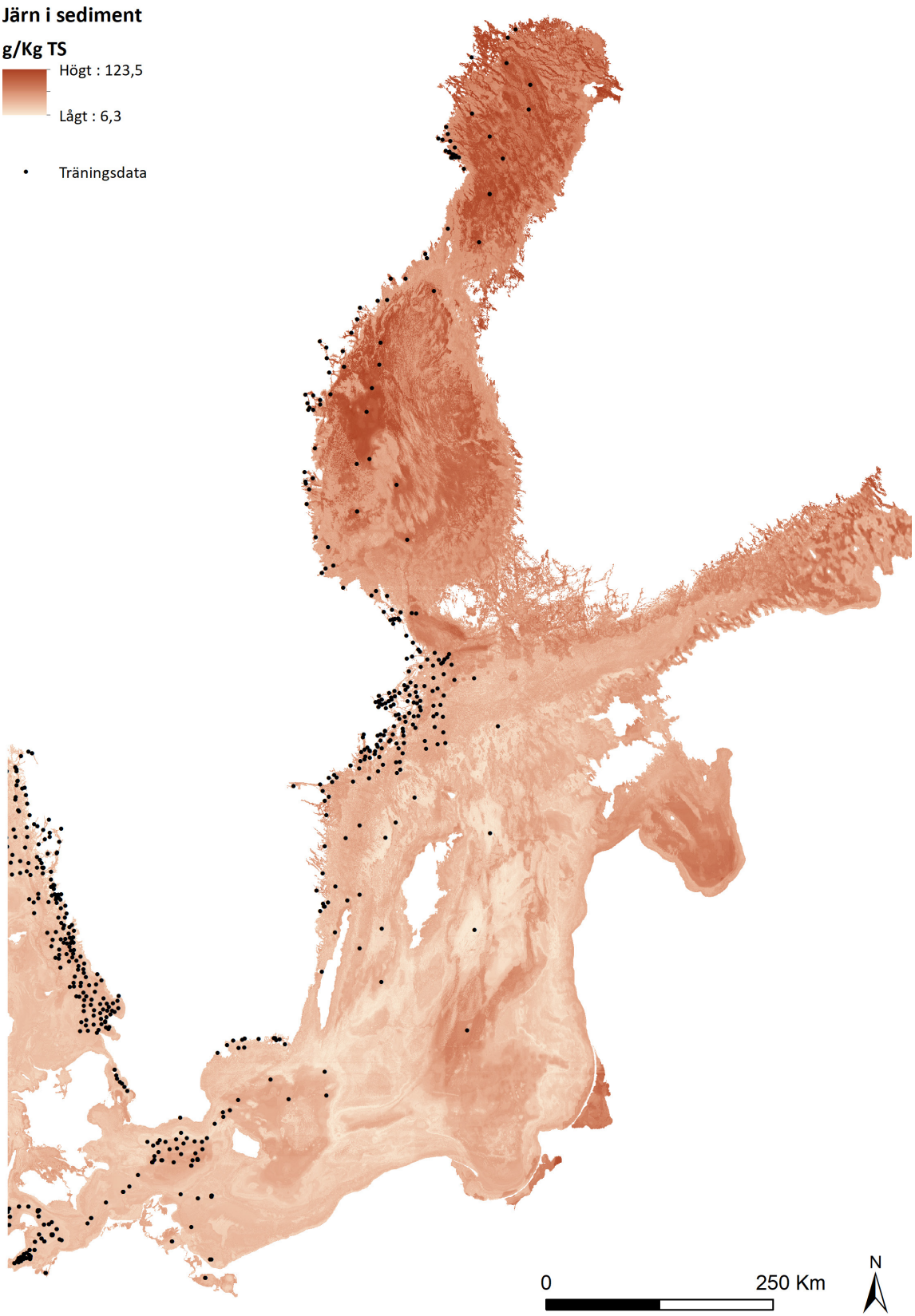
1. Komplettera datasetet med halter av Fe-P, Org-P och Rest-P från pågående kustfokuserat projekt vid Östersjöcentrum som leds av Emil Rydin och som också har finansiering från Havs- och vattenmyndigheten. Dessa data som kan komplettera analyserna från detta projekt, och resultaten för halter av Tot-P har redan inkluderats i analysen ovan. Dessa punkter kan användas för att komplettera maskininlärningen och driva modellen, vilket kommer att väsentligt stärka modellen i grundare miljöer och då i synnerhet i skärgårdsmiljöer.
2. Det finns en stor mängd modelleringsmetoder och miljövariabler att arbeta med. Man bör experimentera med olika modelleringsmetoder, drivande parametrar samt olika kombinationer av prediktorer. Efter att ha utvärderat modellresultaten väljs den bästa modellen.
3. Ta fram bättre och säkrare data för så kallade nollvärden för exempelvis sedimentackumulation, genom olika morfometriska analyser eller analys av den nya nationella substratmodellen. Detta kommer att avsevärt förbättra modellen, i synnerhet i kustnära och grunda områden där olika förhållanden (som noll ackumulation) kan förmodas även om faktiska data (miljöprover) saknas i nuläget.
4. Gå igenom varje provtagen lokals vertikala fosforprofil i sedimentet och bestäm den aktiva zonens djup för respektive fraktion. Detta behövs för att med större säkerhet kunna avgöra mängden remobiliserbar fosfor och hur mycket som begravs på lång sikt. Dessa data kan även användas till att förbättra ackumulationsmodellen och validera resultatet av denna.
5. Ta fram prediktorer som avspeglar antropogen påverkan, exempelvis mått på diffus avrinning från (åker)mark eller närhet till olika punktkällor för utsläpp av fosfor. En utgångspunkt kan vara SMHI:s kustzonsmodell SCM (Swedish Coastal Zone Model).
6. Gå igenom eventuella ytterligare kompletterande dataset med information om fosfor, organisk halt och järn i sediment. Möjliga källor är SHARK, HELCOM, ICES liksom den lokala eller regionala miljöövervakningen.
7. Genomför provtagning i områden med okända egenskaper, även i områden där man inte tror att fosfor ackumuleras i någon stor utsträckning. Fördelningen av redan existerande prover bör vara styrande. En analys av miljögradienter (vattendjup, vågexponering, substrat, ackumulation) gentemot existerande prover kan hjälpa till att peka ut områden lämpliga för komplementär provtagning, så att modellen inte behöver projicera resultat i okänd miljö, vid vilket fall stora fel inträffar i prediktionen.



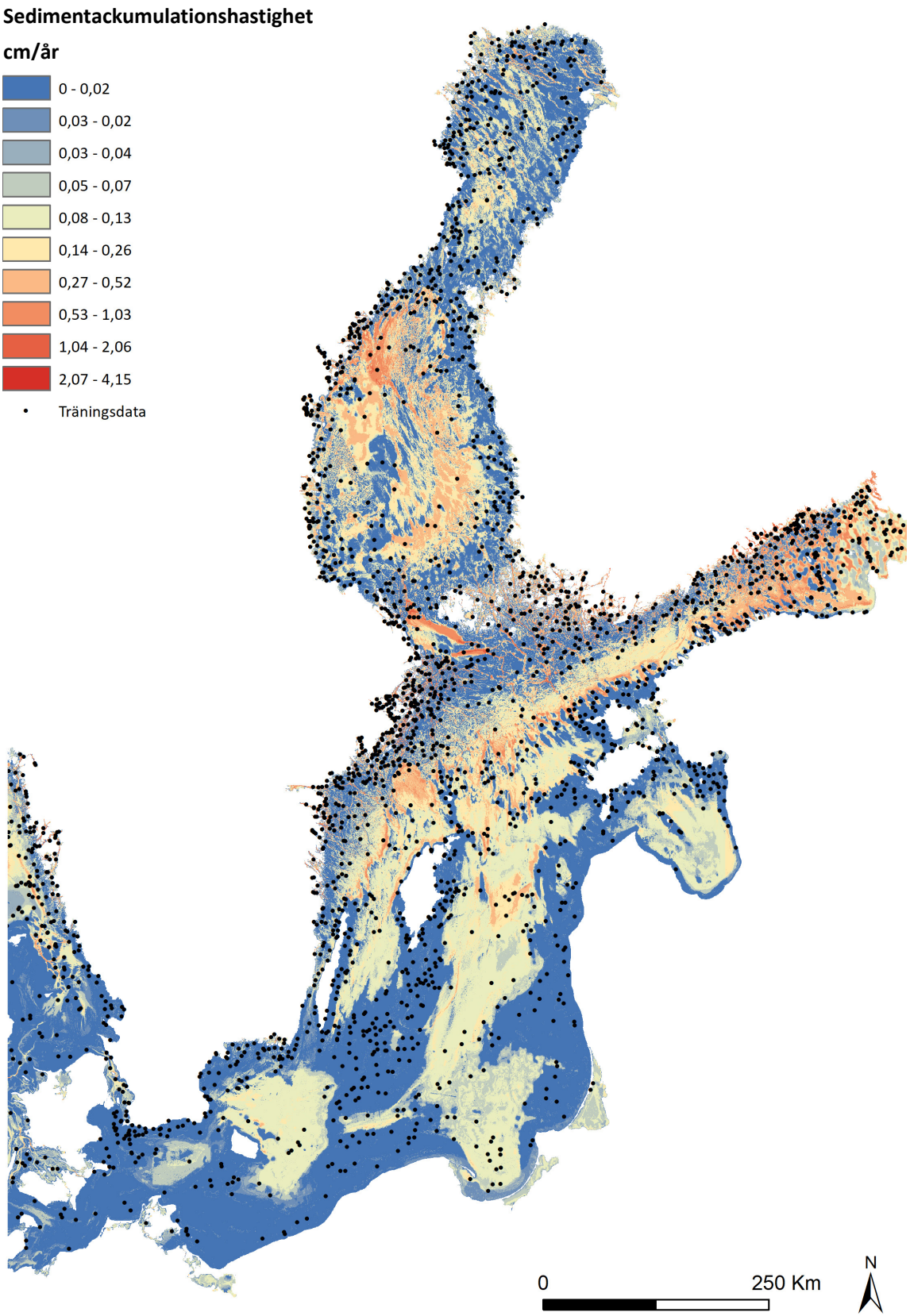
Figur 47. Modell av syreförhållanden vid botten. Medelvärde över året. Medelfelet i modellen är 1,0 mg/l.



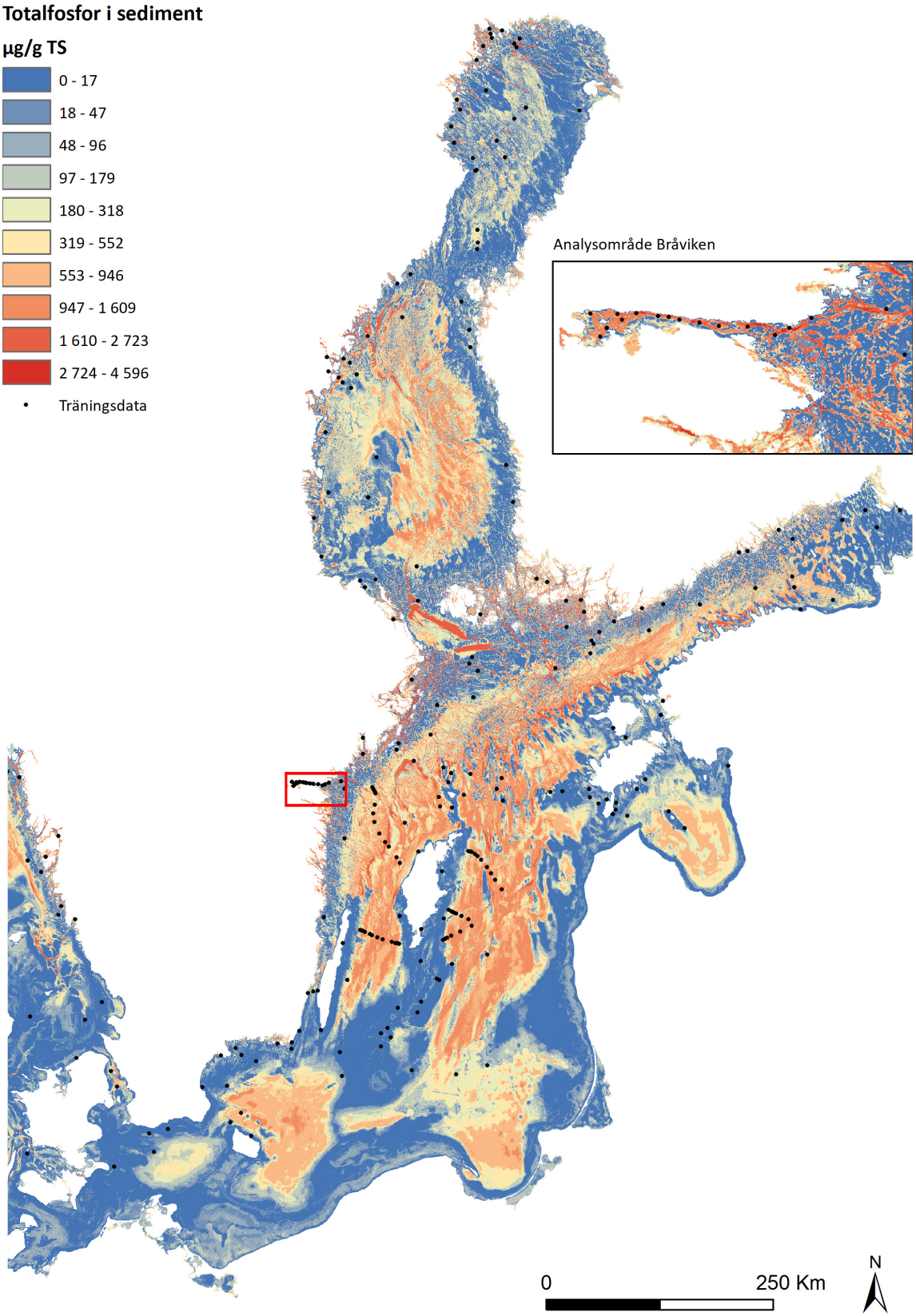
Figur 48. Modell av halten organiskt material i sediment, uttryckt i procent. Medelfelet i modellen är 1,1 procentenheter.



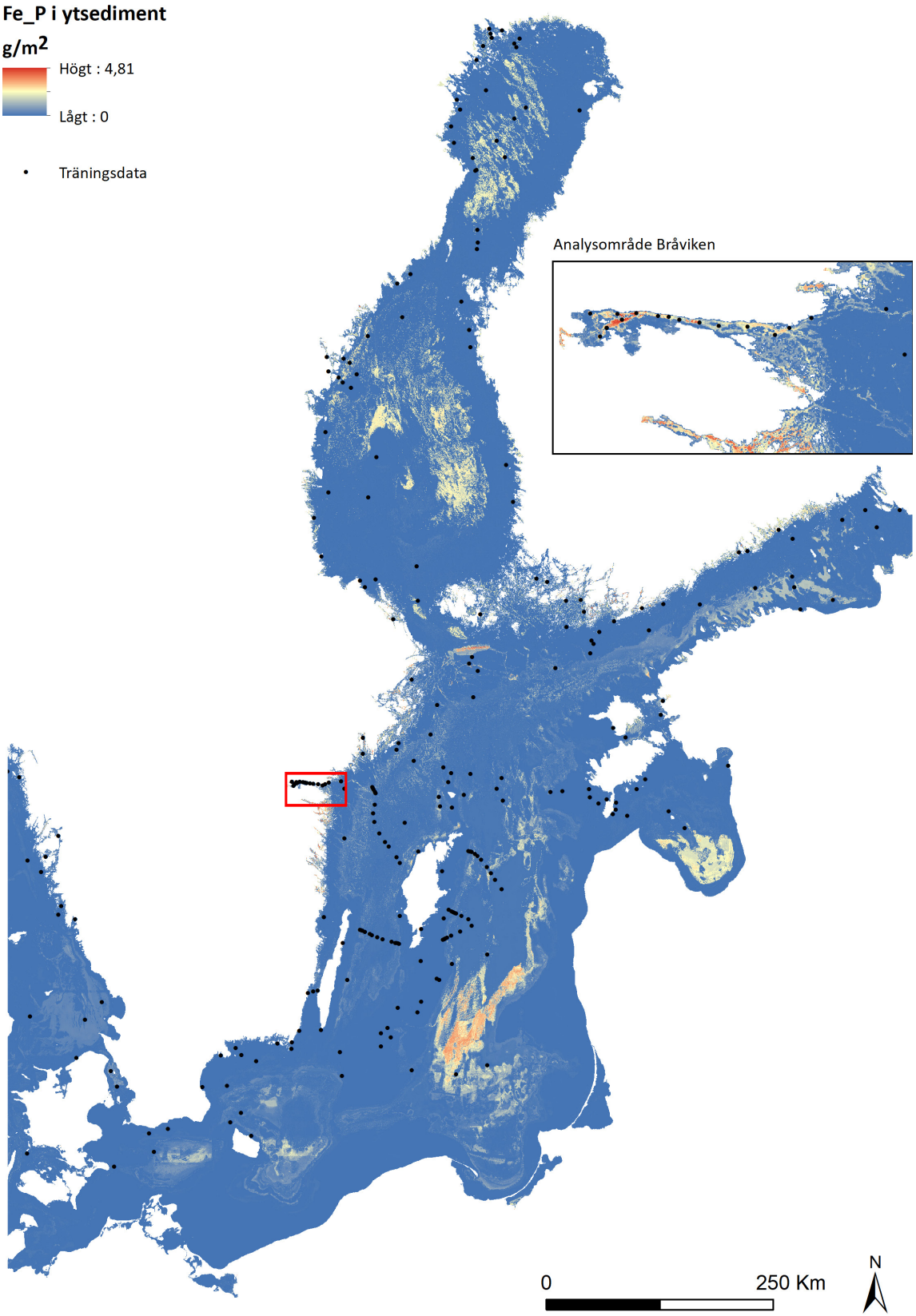
Figur 49. Modell av halter av järn (Fe) i sediment, uttryckt i g/kg torrsubstans. Medelfelet i modellen är 7,8 g/kg.



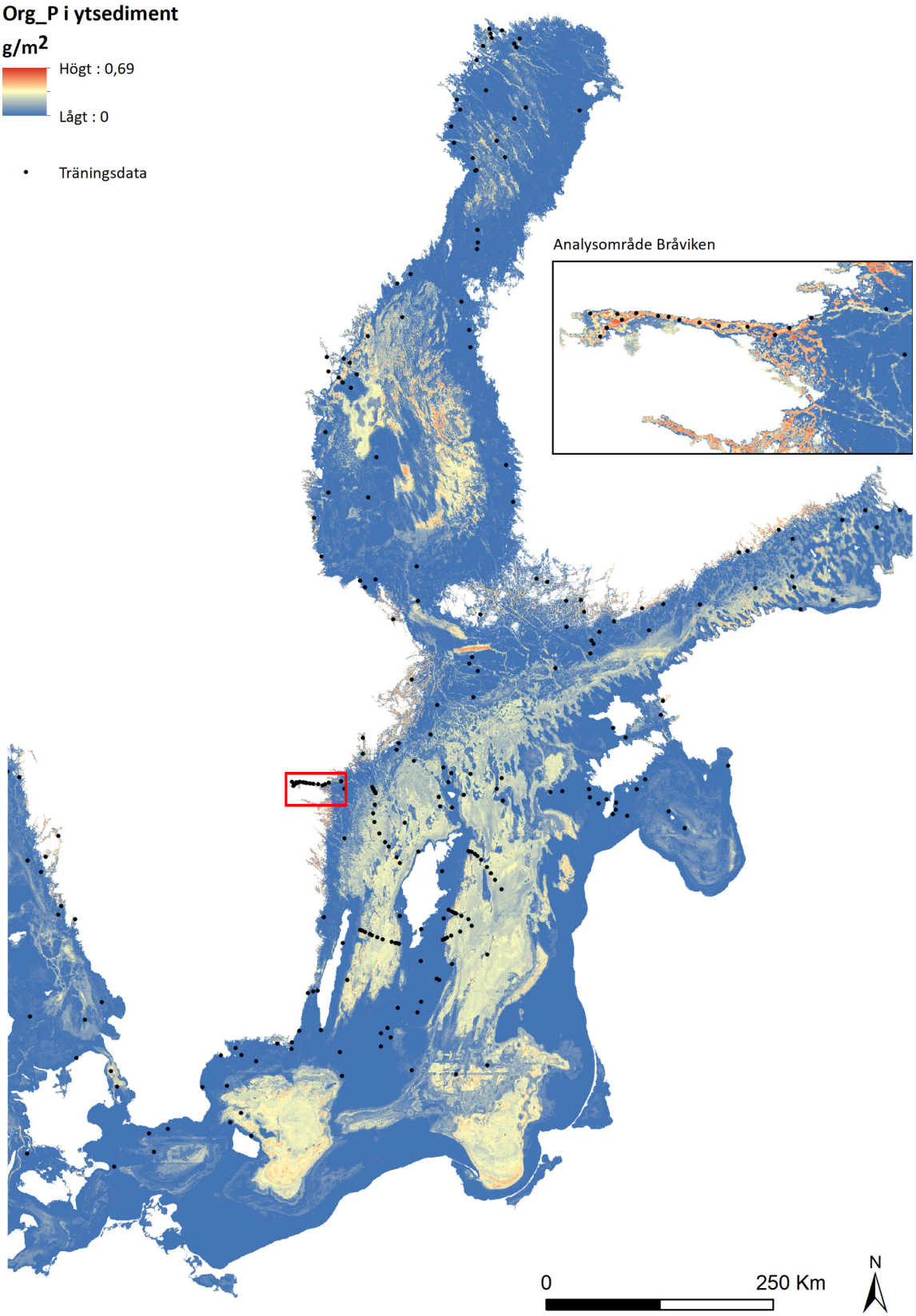
Figur 50. Modell av sedimentackumulationshastighet, det vill säga pågående ackumulation av finkornigt material, uttryckt i cm/år. Medelfelet i modellen är 0,1 cm/år.



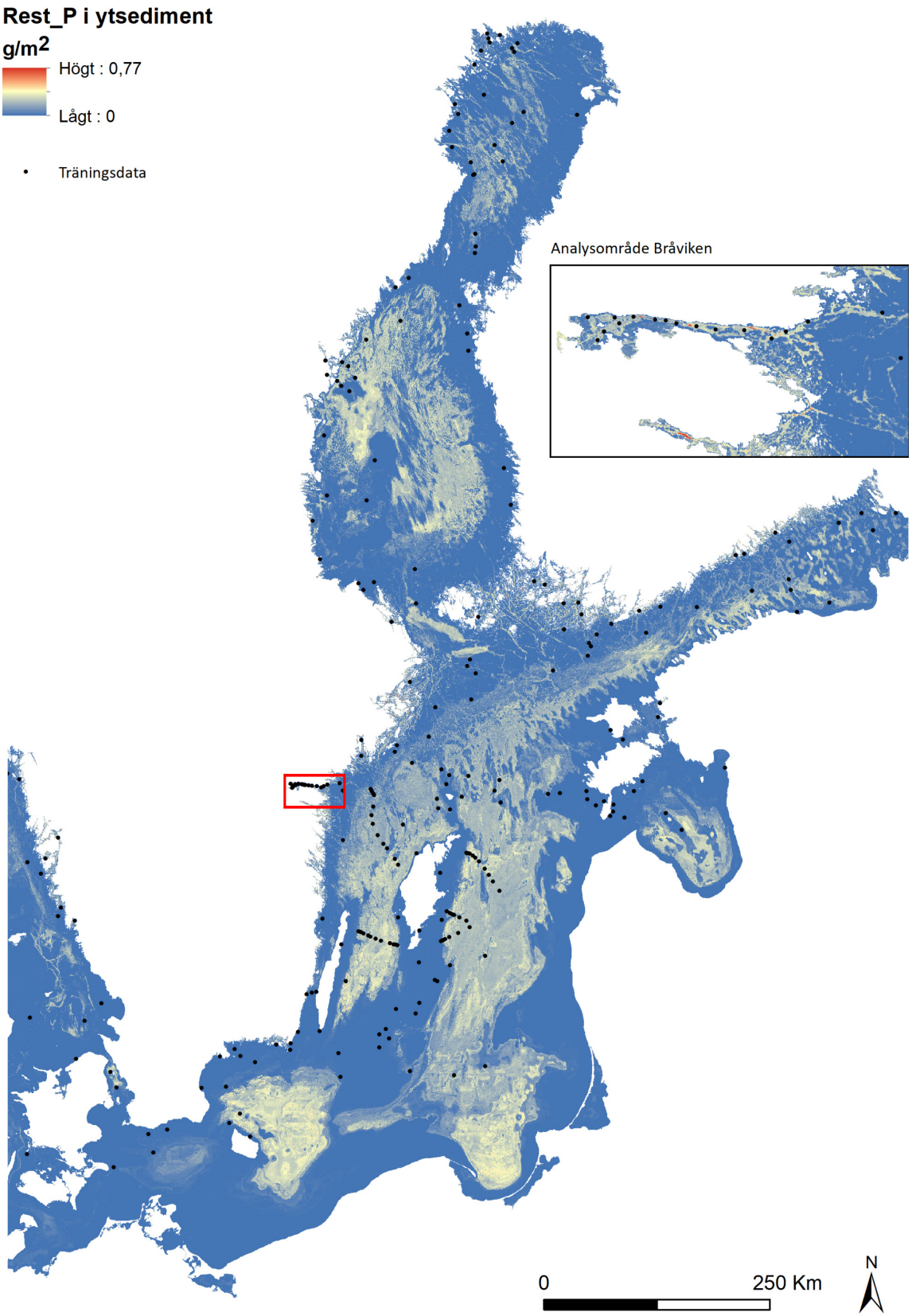
Figur 51. Modell av halten totalfosfor i ytsediment (µg/g TS). Medelfelet i modellen är 198 µg/g TS. Observera att modellen visar modellerade halter av totalfosfor i sediment, inte mängder.



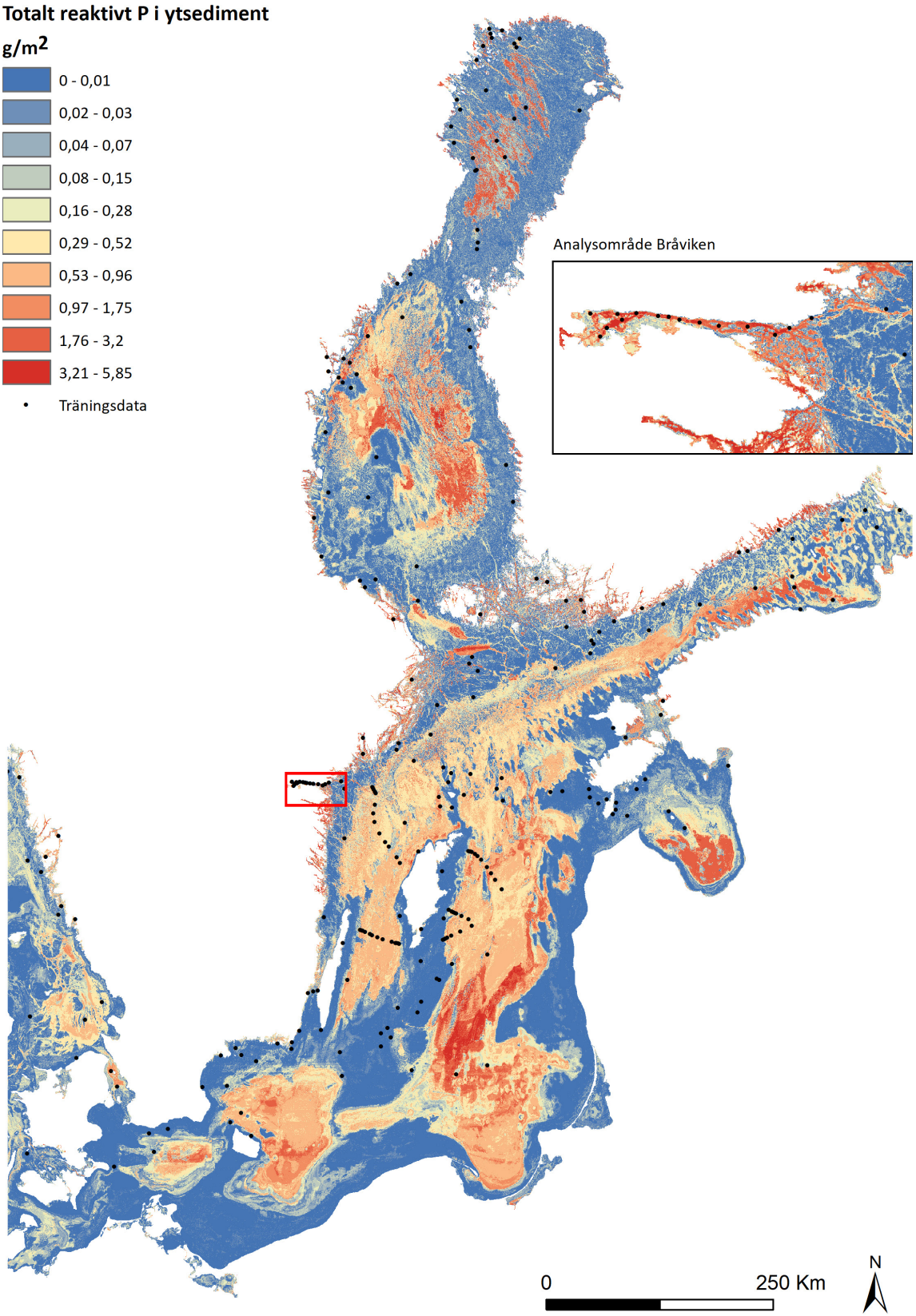
Figur 52. Modell av Fe-P, räknat i g/m^2, och omfattande vad som finns i ytsedimentet (0–2 cm nivå). Medelfel i modellen 0,15 g/m^2.



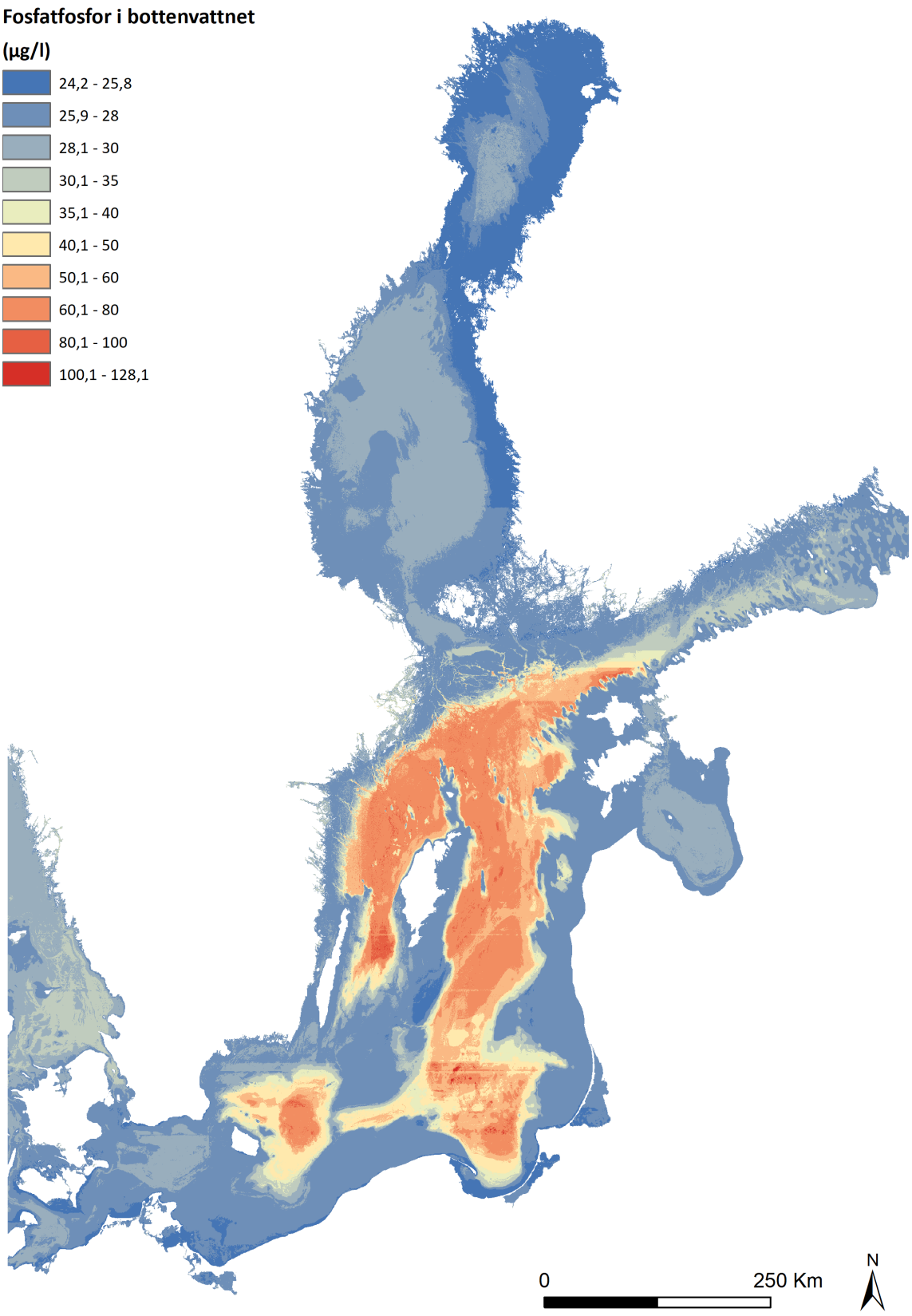
Figur 53. Modell av Org-P, räknat i g/m^2, och omfattande vad som finns i ytsedimentet (0–2 cm nivå). Medelfel i modellen 0,12 g/ m^2.



Figur 54. Modell av Rest-P, räknat i g/m^2, och omfattande vad som finns i ytsedimentet (0–2 cm nivå). Medelfel i modellen 0,09 g/ m^2.



Figur 55. Modell av mängden reaktivt fosfor i sedimentbottnarnas ytzon som den totala mängden av Fe-P, Org-P och Rest-P i nivån 0–2 cm under sedimentytan, uttryckt i g/m^2.



Figur 56. Modell av halterna av fosfatfosfor (µg/l) i bottenvatten.

SLUTSATSER

I det här projektet har fosfor, andra grundämnen och miljöparametrar undersökts i sediment både i Egentliga Östersjöns utsjö och i en större vik. Undersökningarna har gjorts i transekter från grundare, syresatta sediment närmare kusten till djupa, anoxiska sediment i utsjön. Att samma provtagning och analyser har gjorts för så vitt skilda sedimenttyper har möjliggjort jämförelser över stora områden, vilket i sig har varit ett givande resultat av projektet.

Ett tydligt resultat var att fraktionen järnbunden fosfor, Fe-P, endast var viktig i Bråviken och på lokalen närmast kusten på transekten mellan fastlandet och Gotland (se fig. 21b). På övriga utsjölokaler, även de syresatta kustnära lokalerna, var Fe-P inte en viktig fraktion. Detta var kopplat till lägre halter järn i sedimentet på dessa lokaler (< 40–50 g/kg TS; se fig. 15g), och beror troligtvis på att mängden järn som är tillgängligt för att bilda oxider/hydroxider och binda fosfor är begränsad. Resultaten från den här undersökningen tyder således på att ökad syresättning inte automatiskt ger mer bindning som Fe-P, eftersom det också är beroende av tillgången på järn och därmed järnoxider/hydroxider.

De övriga reaktiva fraktionerna, som visade minskade halter nedåt i sedimentkärnor och således bryts ned med tiden och frigör fosfor, var Org-P och Rest-P. Org-P var som väntat kopplat till halterna av organiskt material i sedimentet och dominerade i halter i anoxiska utsjösediment. Rest-P uppvisade liknande mönster som Org-P och verkar således, i den här undersökningen, till stor del bestå av nedbrytbart organiskt material. Eftersom den organiskt bundna fosforn är en viktig reaktiv fraktion på de anoxiska bottnarna, och således bör ha ett stort inflytande på hur mycket fosfor som frigörs från anoxiska bottnar, är det viktigt att kunna göra bra beräkningar av nedbrytningshastigheten för det organiska materialet. En del undersökningar har gjorts, men mer information om nedbrytningshastigheten för olika typer av organiskt material under olika syreförhållanden samt med en bred geografisk täckning behövs.

En idé bakom projektet var att bottnar som periodvis är syrefria skulle kunna löpa stor risk för fosforläckage, vilket är anledningen till att provtagningslokalerna i denna undersökning placerades tätare vid övergångszonen. Inga avvikande halter eller mängder av fosfor kunde dock observeras för de lokaler som klassades som hypoxiska, utan de tenderade att få resultat i mellanläget mellan de syresatta och de anoxiska. Detta kan ses för halter i sediment (mg/kg TS) i figur 19 och 21 och för mängder per ytenhet sediment (g/m^2) i fig. 31 och 32. Inte heller för fosfatfosfor i bottenvatten (cirka 0,5 m från sedimentytan) förekom förhöjda halter på hypoxiska lokaler (se fig. 40). Halterna av fosfatfosfor var istället väl korrelerade till halterna av O_2, i form av högre fosfatfosforhalter vid lägre syrgashalter, det vill säga högst halter fosfatfosfor i bottenvattnet i anoxiska områden. Detta syns tydligt i modellen för Östersjön (se fig. 56) som baserar sig på korrelationen till syrgashalter.

Halterna av fosfor var som högst på syresatta sediment i Bråviken och i anoxiska utsjösediment, vilket förklaras av höga halter Fe-P i Bråviken och höga halter Org-P och Rest-P i anoxiska utsjösediment (se fig. 19 och 21). Mängderna, uttryckt per ytenhet sediment (g/m^2), är emellertid alltid högre i Bråviken och i kustnära utsjösediment (fig. 31 och 32). Orsaken till detta är att sedimentet på de anoxiska utsjölokalerna innehåller mindre halt torrsubstans, det vill säga färre partiklar och mer vatten, vilket gör att höga halter fosfor per gram torrsubstans ändå inte blir en stor mängd per ytenhet. De kustnära utsjölokalerna, däremot, har en högre halt torrsubstans och större mängder fosfor per ytenhet.

Även andra grundämnen har undersökts på alla lokaler som har provtagits, och det är tydligt att olika ämnen har olika mönster i förhållande till syrgashalterna på lokalerna. Detta kan främst förklaras utifrån hur väl de bildar eller binder till sulfider i anoxiskt sediment. Grundämnen med höga halter i syrefritt sediment, och således goda korrelationer till halterna svavel i sedimentet, är kadmium, koppar, nickel, zink och arsenik (se fig. 15). Även kvicksilver binds som sulfid i anoxiskt

sediment, men halterna är förhöjda även i det syresatta sedimentet i Bråviken, vilket kan tyda på inflytande från lokala källor eller avrinning.

I rapporten har mängderna av reaktiv fosfor uppskattats utifrån halter i ytsedimentet. För en mer robust beräkning och rumslig prediktion behöver mängden potentiellt remobiliserbar fosfor och mängden fosfor som begravs uppskattas för varje lokal genom att fastställa vad den stabila halten längre ner i sedimentprofilen är. En observation från projektet var att profilerna av fosforfraktioner och totalfosfor i sedimentkärnor från utsjön dock var betydligt mer ojämna än i Bråviken, vilket gör att mer avvägning krävs för att avgöra vad som begravs respektive potentiellt remobiliseras i utsjön.

Ytterligare framtida arbete har identifierats genom den rumsliga prediktionen, bland annat behovet att provta i områden där prover i stor utsträckning saknas i nuläget. En anledning till att prover saknas kan vara att det är områden där man inte förväntar sig någon ackumulation av fosfor. Ett exempel är sträckan från de grundaste proven i utsjön i den här undersökningen, på runt 60 m vattendjup, och in mot kusten, då denna strandzon till övervägande del består av erosionsbottnar. Modelleringen har också identifierat områden där modelleringsresultaten skulle behöva utforskas mer, till exempel de stora mängderna av Fe-P och relativt höga halterna av järn som modellerna förutspår i sydöstra Östersjön (se fig. 52 och 49).

Det är tydligt att fosforhalterna och mängderna, inte minst den reaktiva fosforn, påverkas starkt av miljöparametrar. Här är det viktigt att ha i åtanke att havsbotten inte är homogen utan att parametrarna kan skilja sig avsevärt mellan och inom olika havsbassänger. Som exempel är sedimentackumulationshastigheten överlag högre i området mellan fastlandet och Gotland jämfört med öster om Gotland enligt modelleringsresultaten, men med avsevärda lokala variationer. Då detta är en viktig parameter är det viktigt att undersöka den ytterligare med provtagning och mätning. För att få allt bättre modeller över fosfor i Östersjön, som underlag till åtgärder, behöver således inte bara kunskap om fosfor utan även om andra miljöparametrar förbättras.

REFERENSLISTA

Ahlgren, J., Reitzel, K., Tranvik, L., Gogoll, A. & Rydin, E., 2006: Degradation of organic phosphorus compounds in anoxic Baltic Sea sediments: A ^{31}P nuclear magnetic resonance study. *Limnology and Oceanography 51*, 2341–2348.

Ahlgren, I. & Ahlgren, G., 1976: *Vattenkemiska analysmetoder: sammanställda för undervisningen i limnologi*. Limnologiska institutionen, Uppsala universitet.

Ankley, G.T., Di Toro, D.M., Hansen, D.J. & Berry, W.J., 1996: Technical basis and proposal for deriving sediment quality criteria for metals. *Environmental Toxicology and Chemistry 15*, 2056–2066.

Blomqvist, B., Gunnars, A. & Elmgren, R., 2004: Why the limiting nutrient differs between temperate coastal seas and freshwater lakes: A matter of salt. *Limnology and Oceanography 49*, 2236–2241.

Brock, J. & Schulz-Vogt, H.N., 2011: Sulfide induces phosphate release from polyphosphate in cultures of a marine Beggiatoa strain. *The International Society for Microbial Ecology Journal 5*, 497–506.

Brock, J., Rhiel, E., Beutler, M., Salman, V. & Schulz-Vogt, H.N., 2012: Unusual polyphosphate inclusions observed in a marine Beggiatoa strain. *Antonie van Leeuwenhoek 101*, 347–357.

Chiu, Y., 2015: *Machine Learning with R Cookbook*. Packt Publishing, Birmingham-Mumbai.

Dadey, K.A., Janecek, T. & Klaus, A., 1992: 37. Dry bulk density: its use and determination. I Taylor, B., Fujioka, K., et al., *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 126*. College Station, Texas.

Dale, A.W., Bertics, V.J., Treude, T., Sommer, S. & Wallmann K., 2013: Modeling benthic–pelagic nutrient exchange processes and porewater distributions in a seasonally hypoxic sediment: evidence for massive phosphate release by Beggiatoa? *Biogeosciences 10*, 629–651.

Elith, J., Leathwick, J.R. & Hastie, T., 2008: A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology 77*, 802–3.

EMODnet 2018., EMODnet Bathymetry Portal. https://www.emodnet-bathymetry.eu/. Åtkommen 2020-02-27.

EMODnet 2019., EMODnet Geology, Data Products. https://www.emodnet-geology.eu/data-products/. Åtkommen: 2020-02-27.

Fenchel, T. & Bernard, C., 1995: Mats of colourless sulphur bacteria. I. Major microbial processes. *Marine Ecology Progress Series 128*, 161–170.

Friedman, J.H., 2001: Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. *The Annals of Statistics 29*, 1189–1232.

Friedman, J.H. 2002: Stochastic Gradient Boosting. *Computational Statistics & Data Analysis 38*, 367–378.

Havs- och vattenmyndigheten, 2019: Havs- och vattenmyndighetens föreskrifter om klassificering och miljökvalitetsnormer avseende ytvatten. *HVMFS 2019:25*.

Hieltjes, A.H.M. & Lijklema, L, 1980: Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments. *Journal of Environmental Quality 9*, 405–407.

Håkansson, L. & Jansson, M., 1983: *Principles of Lakes Sedimentology*. Berlin, New York, Springer-Verlag.

Josefsson, S. & Apler, A., 2019: Miljöföroreningar i utsjösediment – geografiska mönster och tidstrender. *SGU-rapport 2019:06*. Sveriges geologiska undersökning.

Jørgensen, B.B., 1977: Distribution of colorless sulfur bacteria (*Beggiatoa* spp.) in a coastal marine sediment. *Marine Biology 41*, 19–28.

Karlsson, M., Jonsson, P., Malmaeus, M. & Rydin, E., 2009: Sediment studies in the Stockholm archipelago 2008. *IVL Report B1994*. IVL Svenska Miljöinstitutet.

Klingberg, F., 2002: Ackumulationsbottnar i Bråviken. *SGU-rapport 2002:25*. Sveriges geologiska undersökning.

Kuhn, M., 2008: Building Predictive Models in R Using the caret Package. *Journal of Statistical Software 28:5*.

Lepland, A. & Stevens, R.L., 1998: Manganese authigenesis in the Landsort Deep, Baltic Sea. *Marine Geology 151*, 1–25.

Lukkari, K., Leivuori, M. & Hartikainen, H., 2007: Fractionation of sediment phosphorus revisited: II. Changes in phosphorus fractions during sampling and storing in the presence or absence of oxygen. *Limnology and Oceanography: Methods 5*, 445–456.

Malmaues, M. & Karlsson, O.M., 2012: Estimating the pool of mobile phosphorus in offshore soft sediments of the Baltic Proper. *Air, Soil and Water Research 5*, 1–13.

Malmaues, M. & Karlsson, O.M., 2016: Comparing the phosphorus regimes in soft sediments from two sub-systems of the Baltic Sea with different redox conditions. *Vatten – Journal of Water Management and Research 72*, 31–40.

Mort, H.P., Slomp, C:P., Gustafsson, B.G & Andersen, T.J., 2010: Phosphorus recycling and burila in Baltic Sea sediments with contrasting redox conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta 74*, 1350–1362.

Naturvårdsverket, 1999: Bedömningsgrunder för miljökvalitet – Kust och hav. *NV-rapport 4914*.

Naturvårdsverket, 2006: Sammanställning och analys av kustnära undervattensmiljö. *Rapport 5591,* Stockholm.

Noffke, A., Sommer, S., Dale, A.W., Hall, P.O.J. & Pfannkuche, O., 2016: Benthic nutrient fluxes in the Eastern Gotland Basin (Baltic Sea) with particular focuses on microbial mat ecosystems. *Journal of Marine Systems 158*, 1–12.

Psenner, R., Boström, B., Dinka, M., Pettersson, K., Pucsko, R. & Sager, M., 1988: Fractionation of phosphorus in suspended matter and sediment. *Archiv für Hydrobiologie – Ergebnisse der Limnologie 30*, 98–103.

Puttonen, I., Mattila, J., Jonsson, P., Karlsson, M.K., Kohonen, T., Kotilainen, A., Lukkari, K., Malmaeus, J.M. & Rydin, E., 2014: Distribution and estimated release of sediment phosphorous in the northern Baltic Sea archipelagos. *Estuarine, Coastal and Shelf Science 145*, 9–21.

Rydin, E., 2000: Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment. *Water Research 34*, 2037–2042.

Rydin, E., Malmaeus, J.M., Karlsson, O.M. & Jonsson, P., 2011: Phosphorus release from coastal Baltic Sea sediments as estimated from sediment profiles. *Estuarine, Coastal and Shelf Science 92*, 111–117.

Seif, A., 2014: Using Topography Position Index for Landform Classification (Case study: Grain Mountain). *Bull. Env. Pharmacol. Life Sci. 3*, 33–39

SGU, 2015: Produkt: Miljöövervakning, havs- och sjösediment (Öppna data). https://resource.sgu.se/dokument/produkter/oppnadata/miljoovervakning-sediment-oppnadata-beskrivning.pdf. Åtkommen 2020-02-20.

SMHI, 2018: Oxygen survey in the Baltic Sea 2018 – extent of anoxia and hypoxia, 1960-2018. *Report Oceanography No. 65*. Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut.

SMHI, 2020. Marina miljöövervakningsdata. https://www.smhi.se/data/oceanografi/datavardskap-oceanografi-och-marinbiologi/sharkweb. Åtkommen 2020-02-20.

Soulsby, R.L., 2006: Simplified calculation of wave orbital velocities. *Report TR 155,* HR Wallingford.

Sternbeck, J. & Sohlenius, G., 1997: Authigenic sulfide and carbonate mineral formation in Holocene sediments of the Baltic Sea. *Chemical Geology 135*, 55–73.

Swanner, E. D., Planavsky, N. J., Lalonde, S. V, Robbins, L. J., Bekker, A., Rouxel, O. J., Saito, M.A., Kappler, A., Mojzsis, S.J. & Konhauser, K. O., 2014: Cobalt and marine redox evolution. *Earth and Planetary Science Letters 390*, 253–263.

Sundqvist, K., Tysklind, M., Cato, I., Bignert, A. & Wiberg, K., 2009: Levels and homologue profiles of PCDD/Fs in sediments along the Swedish coast of the Baltic Sea. *Environmental Science and Pollution Research 16*, 396–409.

Tuomi, L. & Alari, V., 2018: Product User Manual For Baltic Sea Wave Analysis and Forecasting Product BALTICSEA_ANALYSIS_FORECAST_WAV_003_010. Copernicus Marine Environment Monitoring Service, http://marine.copernicus.eu/ Åtkommen 2020-02-20.

Vaquer-Sunyer, R. & Duarte, C.M., 2008: Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences 105*, 15452–15457.

Viktorsson, L., Ekeroth, N., Nilsson, M., Kononets, M. & Hall, P.O.J, 2013: Phosphorus recycling in sediments of the central Baltic Sea. *Biogeosciences 10*, 3901–3916.

Virtanen, E.A., Norkko, A., Nyström Sandman, A & Viitasalo, M., 2019: Identifying areas prone to coastal hypoxia - the role of topography. *Biogeosciences 16*, 3183–3195.

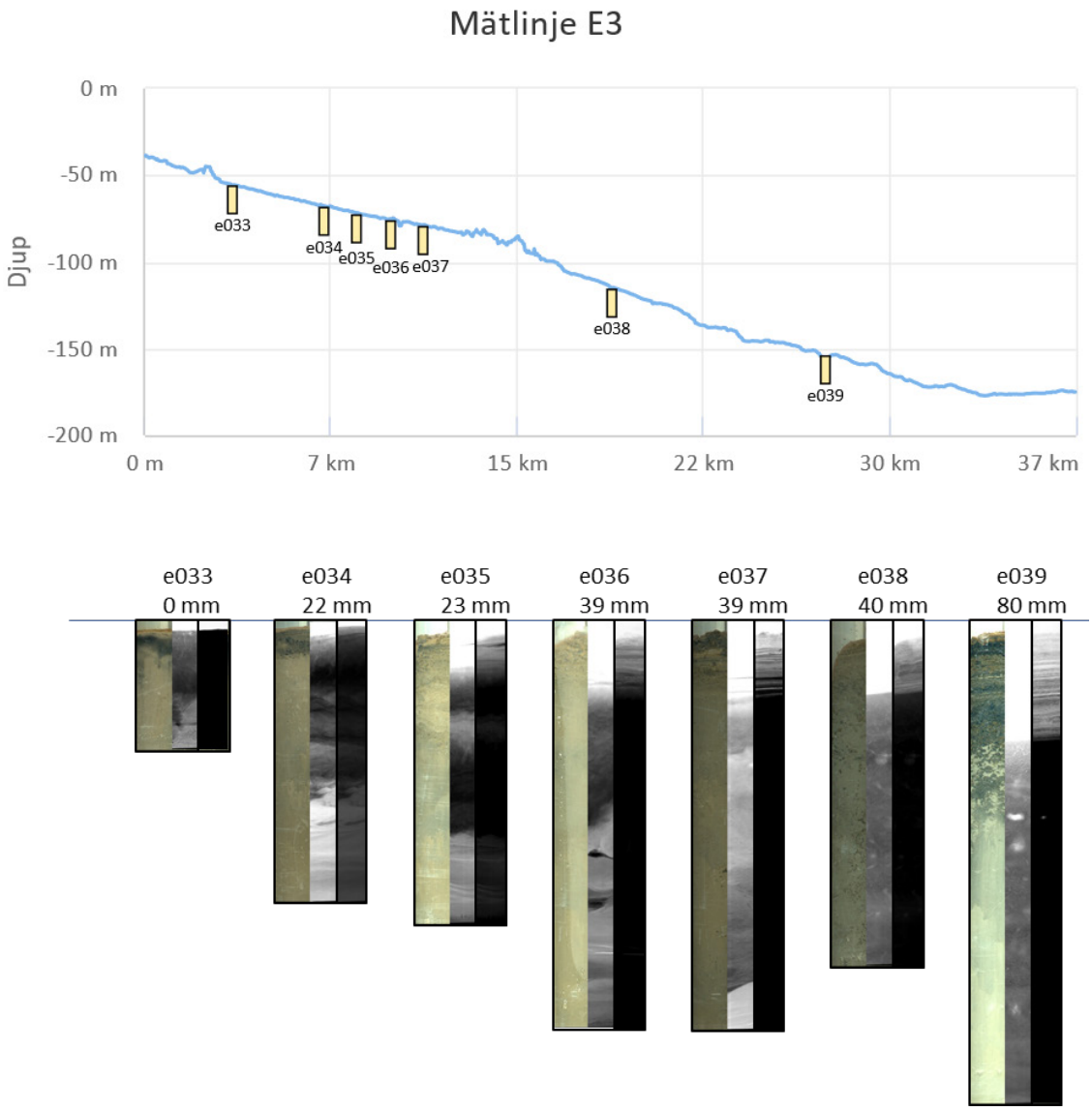
Weiss, A. 2001: Topographic Position and Landforms. The Nature Conservancy. In: Poster presentation, ESRI user conference, San Diego, CA.

Wijkmark, N. & Isæus, M., 2010: Wave exposure calculations for the Baltic Sea. AquaBiota Water Research AB.

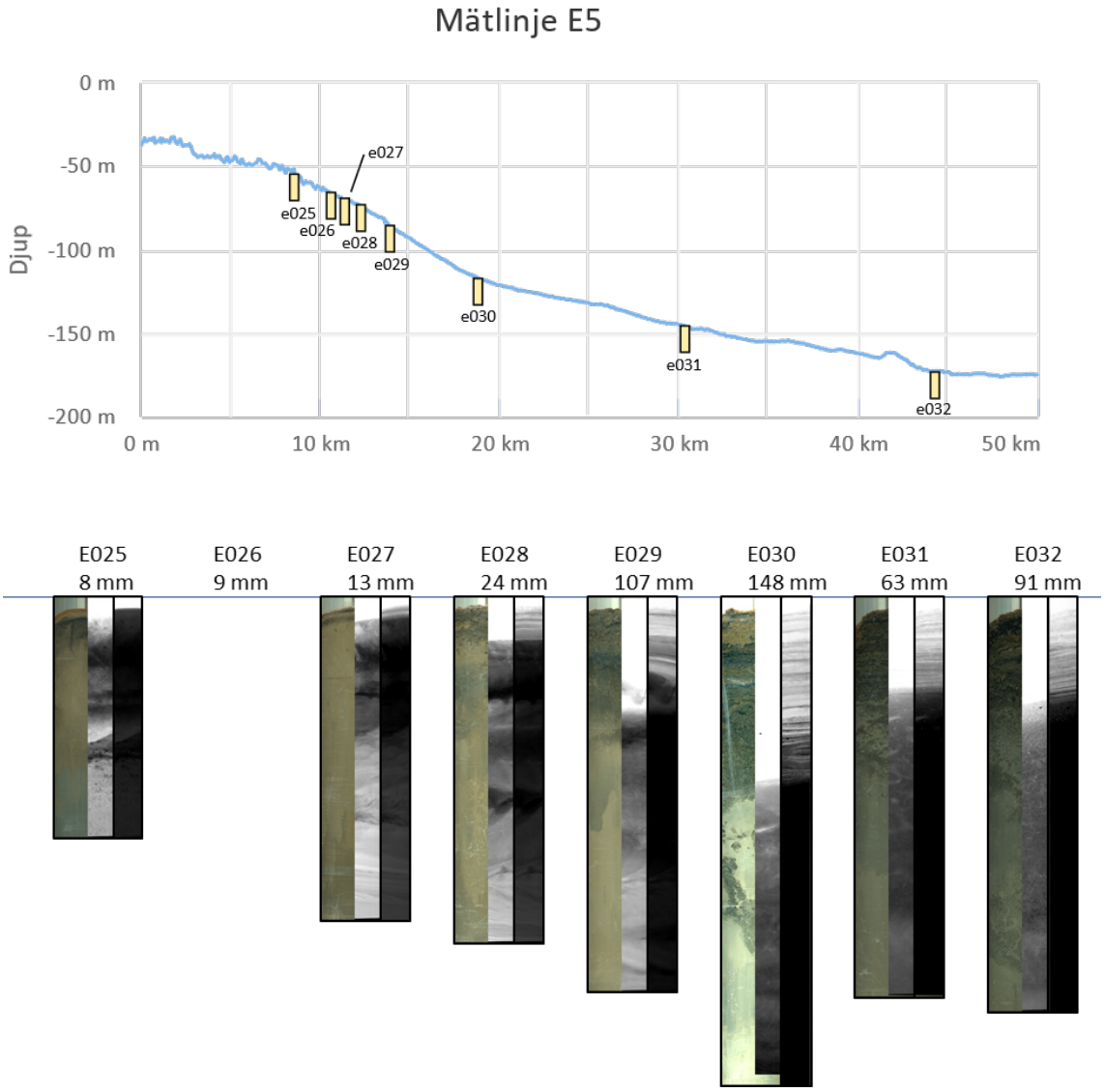
Yekta, S.S. & Rahm, L., 2011: A model study of the effects of sulfide-oxidizing bacteria (*Beggiatoa* spp.) on phosphorus retention processes in hypoxic sediments: Implications for phosphorus management in the Baltic Sea. *Boreal Environment Research 16*, 167–184.

Zillén, L., Conley, D.J., Andrén, T., Andrén, E. & Björk, S., 2008: Past occurences of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact. *Earth-Science Reviews 91*, 77–92.

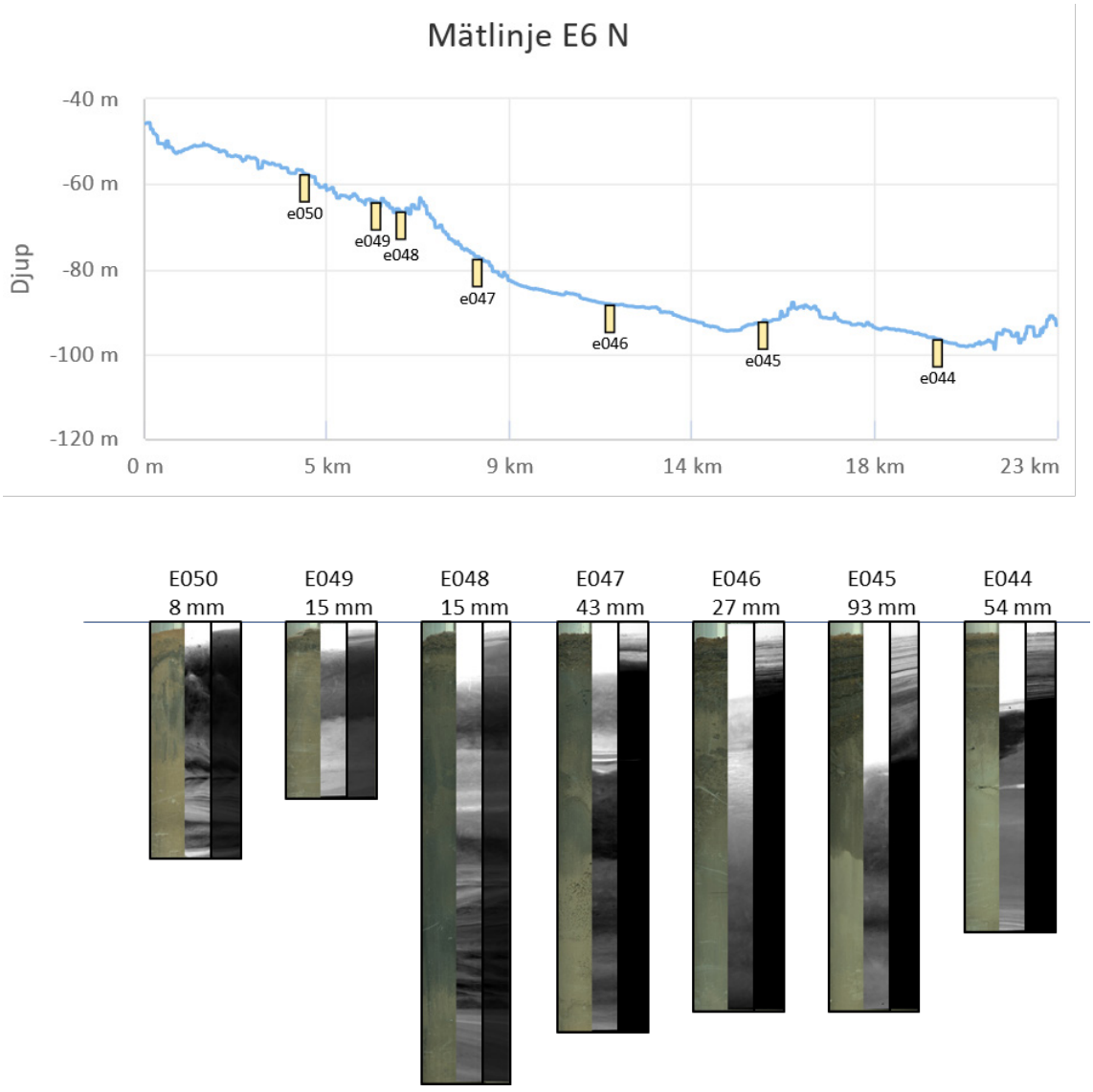
Bilaga 1. Röntgenbilder och sedimenttyp



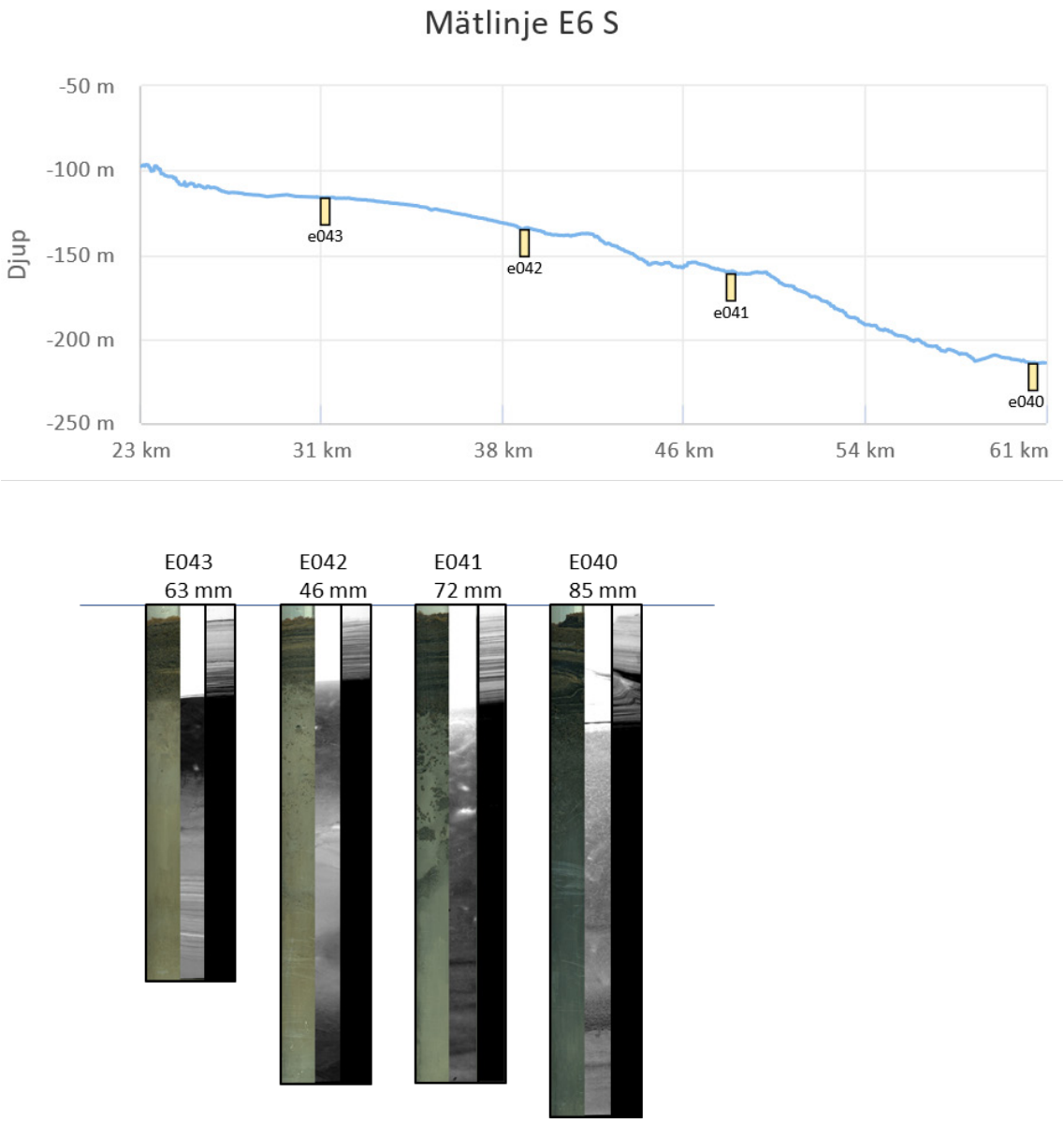
Figur 1. Överst en tvärsektion av bottnen med provlokaler för mätlinje E3. Avstånden på x-axeln räknas från mätlinje T1:s norra ände. Därunder visas bilder av en sedimentkärna från varje provlokal, dels en optisk bild (till vänster), dels två svartvita röntgenbilder (i mitten och till höger). Värdet i mm som anges under provlokalens namn är mäktigheten på det laminerade lagret. Den blå djupsektionen i det övre diagrammet är tagen från EMODnet:s öppet tillgängliga djupdatabas (https://portal.emodnet-bathymetry.eu/).



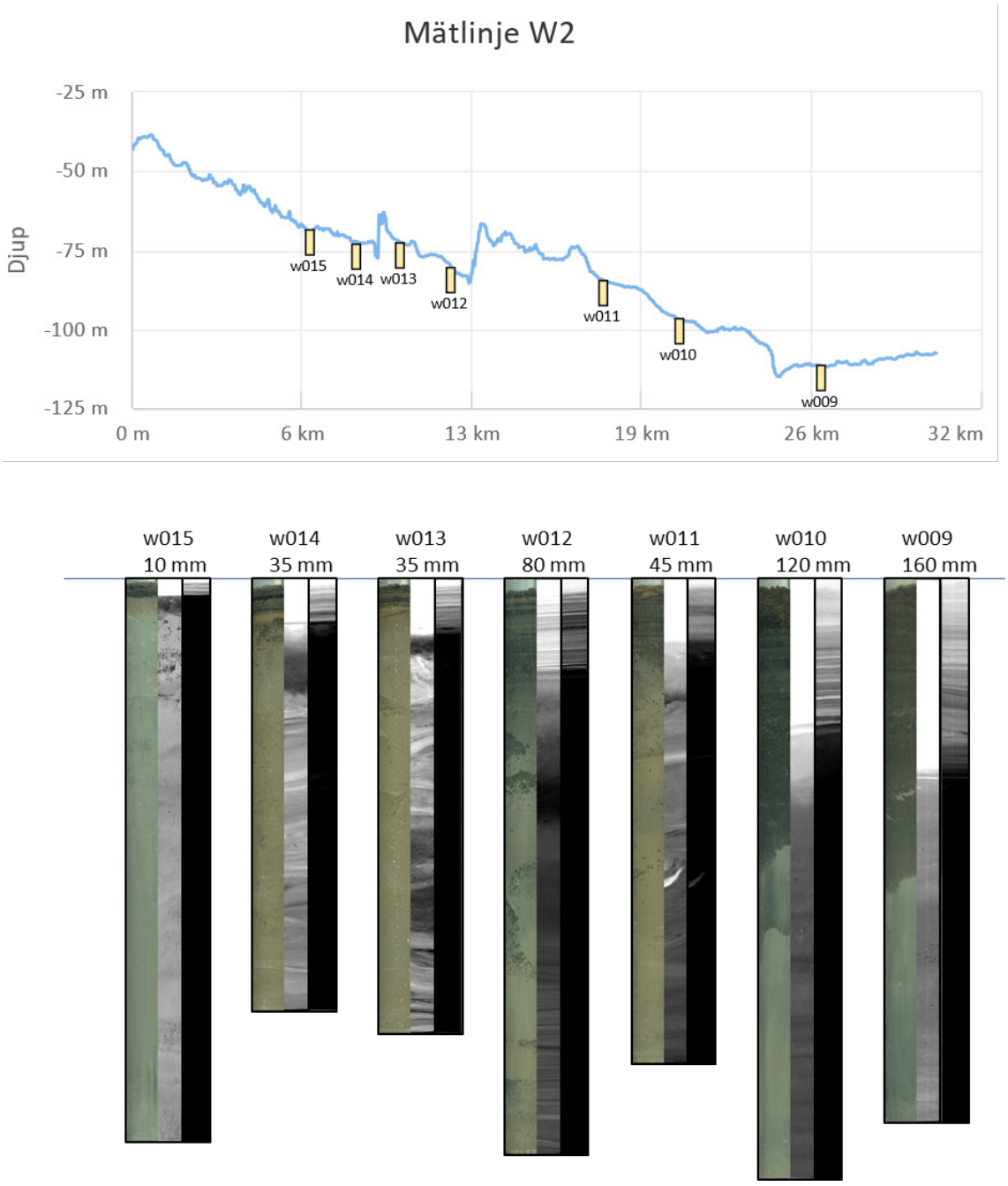
Figur 2. Mätlinje E5.



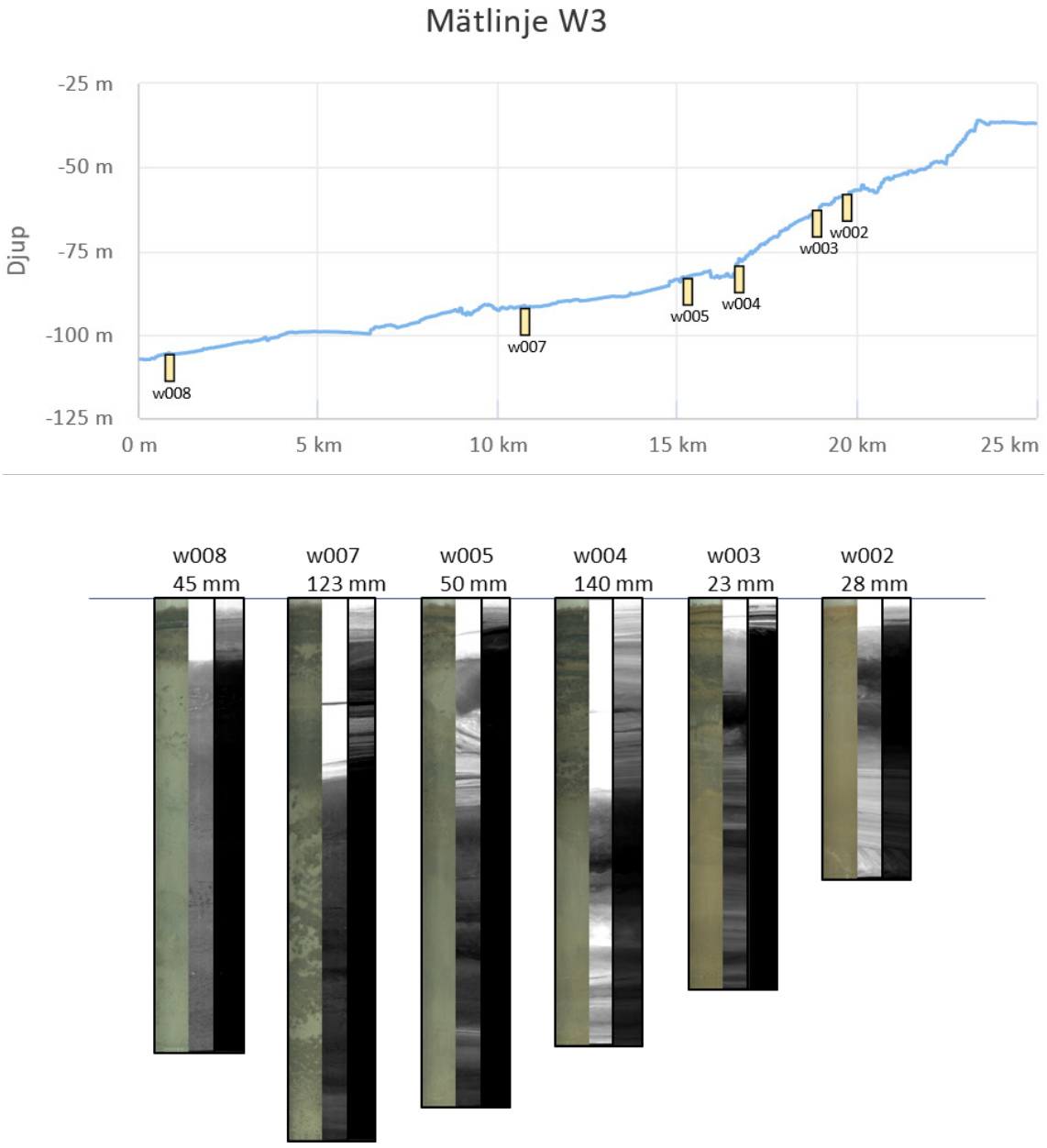
Figur 3. Mätlinje E6 N.



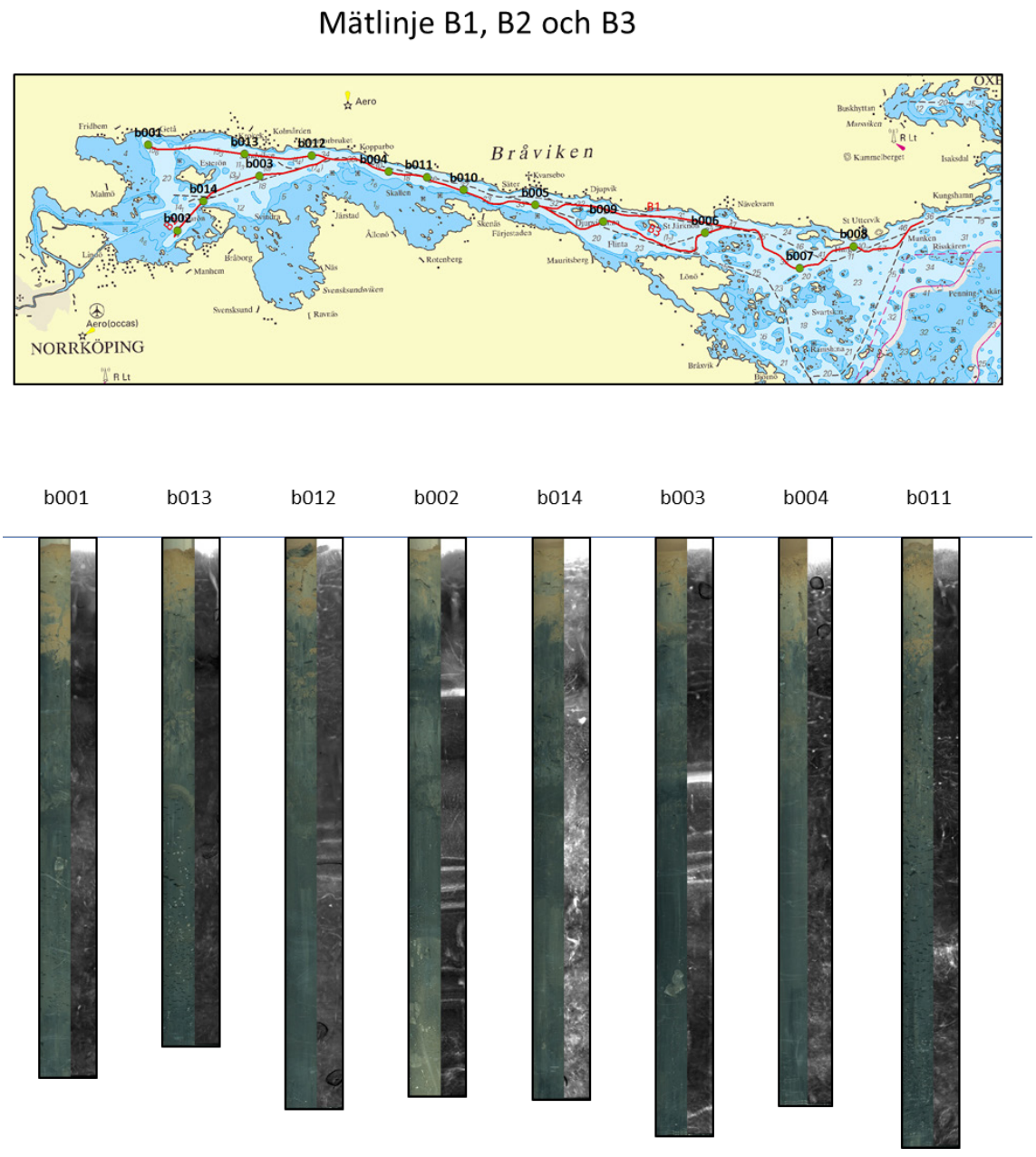
Figur 4. Mätlinje E6 S.



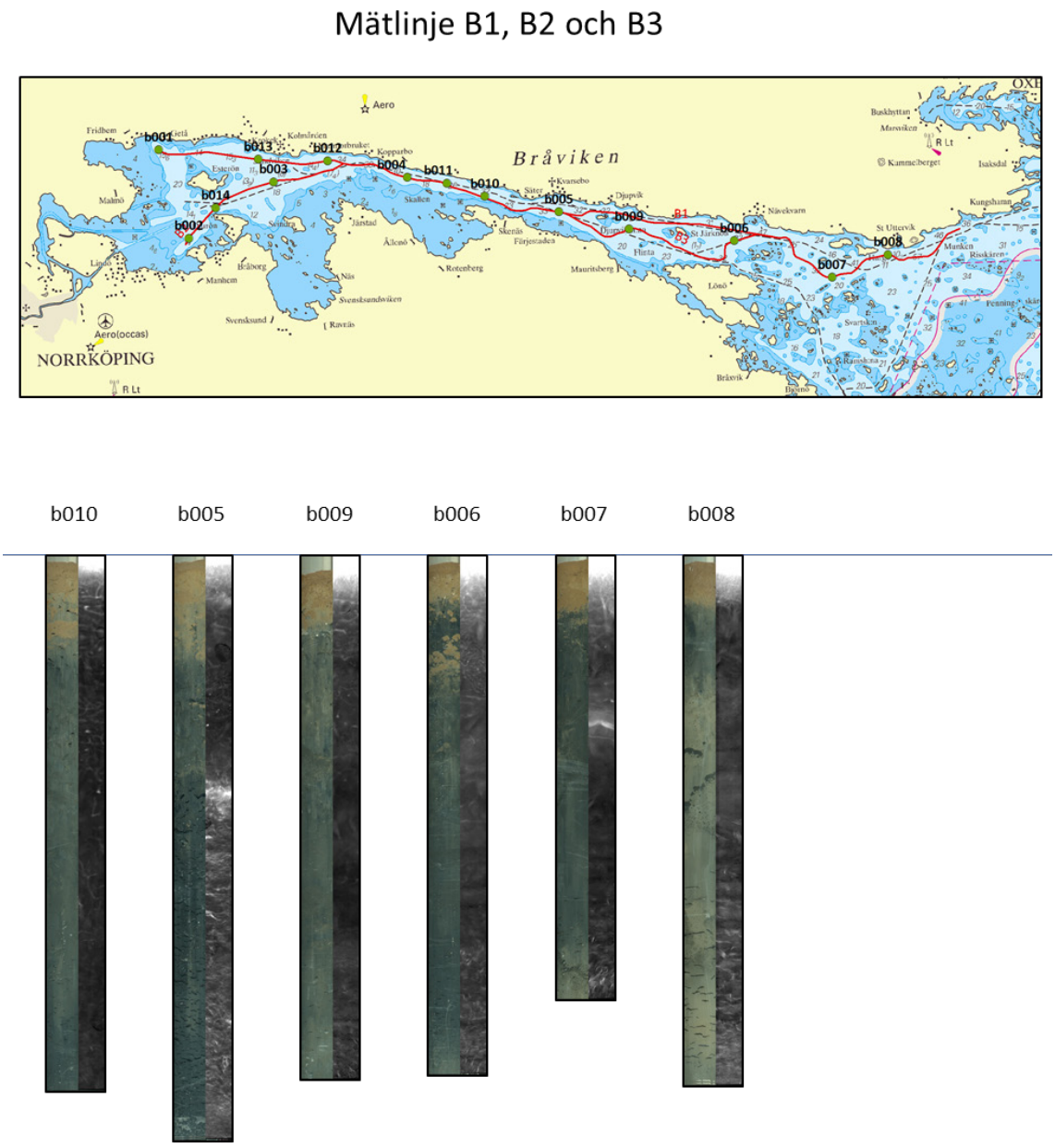
Figur 5. Mätlinje W2.



Figur 6. Mätlinje W3.



Figur 7. Mätlinje B1, B2 och B3.



Figur 8. Mätlinje B1, B2 och B3.

Tabell 1. Bedömning av sedimentationsförhållandena på respektive utvärderad provlokal. Se tabell 2 för en förklaring av värdena för sedimenttyp.

Område	Mätlinje	Provlokal	Provtagningsdatum	Vattendjup (m)	Sedimenttyp
E	e5	e025	2019-06-04	59	3
E	e5	e026	2019-06-05	65	3
E	e5	e027	2019-06-05	69	3
E	e5	e028	2019-06-05	74	3
E	e5	e029	2019-06-06	87	3
E	e5	e030	2019-06-06	118	3
E	e5	e031	2019-06-07	144	2
E	e5	e032	2019-06-07	173	2
T	t1	t011	2019-07-31	62	-
T	t1	t012	2019-07-31	67	4
T	t1	t013	2019-07-31	72	4
T	t1	t014	2019-07-31	79	3
T	t1	t015	2019-07-31	92	2
T	t1	t001	2019-07-29	103	2
T	t1	t002	2019-08-01	121	2
T	t1	t003	2019-08-01	121	2
T	t1	t004	2019-07-28	138	2
T	t1	t005	2019-07-28	168	1
T	t1	t006	2019-07-28	191	1
T	t1	t010	2019-07-28	143	2
T	t1	t008	2019-07-27	98	3
T	t1	t009	2019-07-27	105	2

Tabell 2. Beskrivning av olika sedimenttyper.

Sedimenttyp	Beskrivning
1	Postglacial lera med relativt säkert bedömd recent sedimentation av lerpartiklar.
2	Postglacial lera med trolig recent sedimentation eller partiell sedimentation av lerpartiklar.
3	Postglacial lera, sannolikt utan recent sedimentation av lerpartiklar.
4	Postglacial lera utan recent sedimentation av lerpartiklar.

Bilaga 2. Analysresultat

Tabell 1. Vattenhalt, glödförlust (glödgningsförlust), olika fosforfraktioner och totalfosfor i sediment. Analyserna har utförts av Erkenlaboratoriet. Lokalen betecknas med provlokalen (t.ex. b001), följt av typ av provtagning (03 för fosfor), följt av nivån i sedimentet i centimeter (t.ex. 000_001 för 0-1 cm under sediment-ytan).

Lokal	Vattenhalt (%)	Glödförlust (%)	Löst bunden P (µg/g TS)	Fe-P (µg/g TS)	Al-P (µg/g TS)	Org-P (µg/g TS)	Ca-P (µg/g TS)	Rest-P (µg/g TS)	Totalfosfor (µg/g TS)
b001 03 000 001	78,8	6,8	36	830	220	210	390	120	1800
b001 03 001 002	74,6	6,5	17	500	270	190	400	59	1400
b001 03 002 003	73,6	6,5	19	500	320	210	400	8	1400
b001 03 004 005	69,1	6,0	10	350	220	170	390	23	1200
b001 03 006 007	65,0	6,4							820
b001 03 008 009	65,5	5,3	3	150	120	140	390	50	850
b001 03 010 011	62,8	5,7							800
b001 03 012 013	66,5	5,8	3	150	120	150	390	44	860
b001 03 016 017	69,7	5,9	2	170	120	150	390	48	870
b001 03 020 021	71,1	5,3	6	180	130	150	380	44	890
b001 03 025 026	66,5	6,2							890
b001 03 030 031	69,2	5,7	5	190	130	150	390	49	920
b001 03 035 036	64,6	6,6							1000
b001 03 040 041	65,7	5,8	3	200	140	130	400	56	930
b001 03 045 046	69,0	7,1							890
b002 03 000 001	78,0	7,2	34	600	320	200	390	14	1600
b002 03 001 002	76,2	7,1	17	580	250	190	370	54	1500
b002 03 002 003	74,8	7,1	18	690	310	74	380	39	1500
b002 03 004 005	73,4	6,6	3	240	140	170	380	20	940
b002 03 006 007	72,1	7,3							890
b002 03 008 009	77,1	6,6	5	200	130	160	370	12	870
b002 03 010 011	86,9	7,7							890
b002 03 012 013	71,8	5,9	10	180	160	160	370	0	880
b002 03 016 017	71,2	7,0							910
b002 03 020 021	73,4	6,3	9	190	140	170	380	24	910
b002 03 025 026	72,2	7,1							900
b002 03 030 031	70,2	6,5	35	190	180	150	370	27	950
b002 03 035 036	69,1	7,3							960
b002 03 040 041	68,8	6,4	34	180	180	160	380	4	940
b002 03 045 046	68,3	6,7							980
b002 03 050 051	67,0	6,5	33	200	190	160	370	13	960
b003 03 000 001	78,5	7,4	72	1500	300	230	370	170	2700
b003 03 001 002	73,2	6,9	18	560	260	210	390	-20	1400
b003 03 002 003	71,1	6,5	12	400	350	190	410	3	1400
b003 03 004 005	69,5	6,1	7	320	200	170	410	9	1100
b003 03 006 007	69,9	6,9							1700
b003 03 008 009	70,5	5,9	9	810	650	140	450	-76	2000
b003 03 010 011	69,1	6,5							1200
b003 03 012 013	67,1	5,7	3	220	130	140	390	-5	880
b003 03 016 017	67,4	7,0							900
b003 03 020 021	70,2	6,1	5	220	160	150	380	-10	910
b003 03 025 026	70,8	6,9							920
b003 03 030 031	69,9	5,9	6	250	170	160	380	5	970
b003 03 035 036	69,0	6,1							1000
b003 03 040 041	66,8	6,2	13	450	220	160	380	2	1200
b003 03 045 046	67,7	6,6							970
b003 03 050 051	69,0	6,3	10	260	200	150	380	9	1000
b004 03 000 001	78,0	7,9	44	1100	550	190	420	110	2400
b004 03 001 002	72,9	7,0	15	500	230	180	430	6	1400
b004 03 002 003	69,4	6,7	8	290	210	160	420	29	1100
b004 03 004 005	68,2	6,6	2	160	120	140	420	40	870
b004 03 006 007	68,0	6,6							820
b004 03 008 009	66,9	6,6	2	140	120	140	410	49	850
b004 03 010 011	65,5	6,1							810

b004 03 012 013	68,7	6,6	3	150	130	140	400	33	850
b004 03 016 017	65,5	6,2							840
b004 03 020 021	66,7	5,9	2	160	130	120	420	46	870
b004 03 025 026	66,3	6,5							880
b004 03 030 031	65,5	6,0	3	160	130	110	410	38	860
b004 03 035 036	66,2	6,3							910
b004 03 040 041	68,0	6,2	3	260	160	100	430	53	1000
b004 03 045 046	63,9	6,3							1100
b004 03 050 051	64,9	6,3	4	310	210	100	430	100	1200
b005 03 000 001	82,5	7,1	56	1300	220	240	390	72	2300
b005 03 001 002	74,6	6,9	21	760	320	190	390	110	1800
b005 03 002 003	70,9	6,3	7	300	180	180	400	61	1100
b005 03 004 005	68,5	5,6	2	180	140	170	400	26	920
b005 03 006 007	67,0	7,1							850
b005 03 008 009	67,3	5,3	3	140	120	160	400	46	860
b005 03 010 011	66,8	6,7							850
b005 03 012 013	68,7	5,3	5	130	120	140	400	58	850
b005 03 016 017	75,3	7,0							880
b005 03 020 021	69,7	5,6	4	160	150	140	400	50	910
b005 03 025 026	66,7	6,5							910
b005 03 030 031	69,0	5,1	4	230	160	150	400	-2	940
b005 03 035 036	67,4	6,3							950
b005 03 040 041	69,9	5,7	3	230	160	140	400	31	960
b005 03 045 046	65,5	6,7							1000
b005 03 050 051	65,1	5,9	2	210	180	130	400	67	980
b006 03 000 001	83,7	9,7	58	990	230	310	370	89	2000
b006 03 001 002	77,3	8,7	4	350	130	260	370	140	1300
b006 03 002 003	74,4	8,4	1	110	100	240	380	81	920
b006 03 004 005	71,9	8,0	1	86	95	230	380	53	840
b006 03 006 007	70,6	8,5							840
b006 03 008 009	71,4	7,7	1	92	91	210	370	73	840
b006 03 010 011	69,3	8,6							850
b006 03 012 013	70,9	7,6	1	95	94	210	380	75	850
b006 03 016 017	68,4	8,0							830
b006 03 020 021	70,4	7,5	1	110	100	190	380	92	870
b006 03 025 026	67,9	7,7							870
b006 03 030 031	69,7	6,9	2	120	110	190	370	77	860
b006 03 035 036	67,4	7,4							800
b006 03 040 041	69,6	5,8	2	120	100	190	350	47	810
b006 03 045 046	66,9	7,5							780
b006 03 050 051	69,6	6,3	5	100	96	180	370	66	820
b007 03 000 001	85,3	10,6	57	830	150	330	360	110	1800
b007 03 001 002	79,3	10,2	19	590	220	310	370	140	1600
b007 03 002 003	76,6	9,4	2	110	97	270	370	120	960
b007 03 004 005	73,9	8,9	2	92	90	260	380	62	880
b007 03 006 007	72,4	9,6							870
b007 03 008 009	73,5	8,6	1	90	88	240	380	71	870
b007 03 010 011	71,6	9,4							870
b007 03 012 013	72,4	7,5	6	87	87	230	360	86	860
b007 03 016 017	69,6	9,0							870
b007 03 020 021	70,0	7,5	2	98	100	220	370	80	870
b007 03 025 026	68,8	8,6							820
b007 03 030 031	70,4	6,6	4	93	93	200	350	65	810
b007 03 035 036	68,4	7,6							780
b007 03 040 041	69,9	6,8	26	71	86	180	360	72	800
b007 03 045 046	68,5	7,0							800
b007 03 050 051	69,8	6,6	11	80	82	180	380	45	780
b008 03 000 001	83,1	10,4	31	560	150	290	360	230	1600
b008 03 001 002	78,3	9,1	8	160	94	240	380	110	1000
b008 03 002 003	73,0	8,8	3	81	83	230	370	130	890
b008 03 004 005	71,2	8,6	2	62	80	220	390	100	850
b008 03 006 007	69,1	8,3							780
b008 03 008 009	71,2	7,1	20	52	81	190	350	79	780

b008 03 010 011	68,9	7,7							760
b008 03 012 013	72,1	7,0	11	63	71	190	360	66	760
b008 03 016 017	71,1	8,7							770
b008 03 020 021	72,2	6,7	23	61	77	190	350	60	760
b008 03 025 026	70,6	8,4							770
b008 03 030 031	70,1	7,1	16	65	80	190	370	79	790
b008 03 035 036	68,5	7,7							800
b008 03 040 041	69,0	6,6	41	50	93	170	380	49	780
b008 03 045 046	67,7	8,0							810
b008 03 050 051	69,6	7,4	41	52	92	190	380	78	830
b009 03 000 001	84,9	7,9	44	760	220	260	360	38	1700
b009 03 001 002	77,7	7,8	43	840	230	220	370	120	1800
b009 03 002 003	73,4	7,4	13	280	130	210	380	70	1100
b009 03 004 005	69,9	7,0	3	99	100	180	380	60	830
b009 03 006 007	68,9	6,9							800
b009 03 008 009	68,3	6,6	4	94	110	180	380	45	810
b009 03 010 011	68,1	7,2							820
b009 03 012 013	68,1	6,6	4	97	100	170	380	61	810
b009 03 016 017	67,4	7,2							780
b009 03 020 021	66,0	6,8	1	110	100	160	380	71	830
b009 03 025 026	66,9	7,3							770
b009 03 030 031	69,1	6,7	4	110	110	170	350	57	800
b009 03 035 036	68,3	6,9							790
b009 03 040 041	68,1	5,6	18	99	110	140	370	37	780
b009 03 045 046	66,3	6,5							780
b009 03 050 051	67,5	5,5	30	100	110	150	380	24	790
b010 03 000 001	78,0	6,9	20	600	180	160	370	86	1400
b010 03 001 002	75,6	7,0	2	200	110	160	380	80	940
b010 03 002 003	71,7	6,2	5	320	200	140	420	-3	1100
b010 03 004 005	65,8	5,6	3	140	140	110	410	91	900
b010 03 006 007	63,2	5,9							790
b010 03 008 009	63,8	5,9	2	99	110	120	400	49	790
b010 03 010 011	63,4	5,8							750
b010 03 012 013	63,8	5,7	2	100	95	110	410	38	760
b010 03 016 017	63,1	5,6	3	110	95	99	390	60	750
b010 03 020 021	63,3	5,7	2	100	100	100	400	46	750
b010 03 025 026	62,3	5,5							780
b010 03 030 031	63,0	5,8	2	130	100	97	400	57	790
b010 03 035 036	61,2	5,8							850
b010 03 040 041	63,7	5,9	2	160	130	88	410	72	860
b010 03 045 046	61,3	5,3							830
b011 03 000 001	76,8	7,5	27	810	200	210	410	35	1700
b011 03 001 002	72,0	6,7	5	220	130	170	410	71	1000
b011 03 002 003	69,6	7,0	4	170	140	150	410	87	960
b011 03 004 005	68,3	6,6	2	150	120	150	410	38	870
b011 03 006 007	65,4	6,2							820
b011 03 008 009	67,4	6,6	2	120	110	140	400	65	830
b011 03 010 011	67,2	6,8							790
b011 03 012 013	66,9	6,4	2	110	110	120	420	54	810
b011 03 016 017	65,1	6,4							810
b011 03 020 021	66,5	6,5	2	140	140	130	420	34	860
b011 03 025 026	66,9	6,4							850
b011 03 030 031	69,1	6,1	13	410	220	110	430	57	1200
b011 03 035 036	65,4	6,6							880
b011 03 040 041	67,9	6,3	3	200	140	120	420	35	920
b011 03 045 046	64,9	6,4							1200
b011 03 050 051	64,9	6,3	5	380	210	100	430	12	1100
b012 03 000 001	78,9	8,1	37	1200	410	210	410	140	2400
b012 03 001 002	72,7	7,2	14	500	230	180	430	-1	1300
b012 03 002 003	70,3	6,9	9	350	290	150	480	45	1300
b012 03 004 005	68,6	6,7	5	300	220	140	440	19	1100
b012 03 006 007	67,9	6,8							1200
b012 03 008 009	67,6	6,2	2	170	130	140	420	39	890

b012 03 010 011	65,5	6,5							870
b012 03 012 013	68,6	6,4	2	150	120	130	410	60	870
b012 03 016 017	66,2	6,7							880
b012 03 020 021	67,1	6,2	1	150	140	110	420	55	880
b012 03 025 026	66,7	6,6							910
b012 03 030 031	68,3	6,2	3	180	150	120	430	36	920
b012 03 035 036	65,4	6,9							970
b012 03 040 041	67,6	6,5	4	290	180	120	420	26	1100
b012 03 045 046	64,6	6,8							1100
b012 03 050 051	65,8	6,6	7	570	230	120	390	-25	1300
b013 03 000 001	77,9	6,9	58	1300	280	230	380	150	2400
b013 03 001 002	72,1	6,5	13	380	150	210	380	58	1200
b013 03 002 003	69,2	6,4	9	250	150	200	390	35	1000
b013 03 004 005	69,5	6,4	12	460	370	180	430	13	1500
b013 03 006 007	68,5	6,7							950
b013 03 008 009	63,7	4,8	4	170	130	130	410	10	850
b013 03 010 011	67,3	6,8							870
b013 03 012 013	68,3	6,3	4	180	140	170	370	6	870
b013 03 016 017	66,4	6,7							890
b013 03 020 021	68,2	6,2	3	200	140	180	370	14	910
b013 03 025 026	68,8	7,0							950
b013 03 030 031	66,7	6,3	3	220	150	180	380	41	970
b013 03 035 036	66,8	6,6							910
b013 03 040 041	65,7	6,3	8	350	180	160	380	50	1100
b013 03 045 046	64,9	7,4							980
b013 03 050 051	66,4	6,4	11	490	190	160	370	48	1300
b014 03a 000 001	81,7	7,4	46	770	190	210	370	190	1800
b014 03a 001 002	72,9	6,5	16	380	210	190	370	21	1200
b014 03a 002 003	70,1	6,0	24	640	270	160	380	42	1500
b014 03a 004 005	69,6	5,9	8	420	200	190	390	-37	1200
b014 03a 006 007	68,7	6,8							850
b014 03a 008 009	67,7	5,7	3	170	110	130	390	25	830
b014 03a 010 011	66,9	6,6							830
b014 03a 012 013	68,4	6,4	4	180	110	150	380	-9	810
b014 03a 016 017	66,9	7,0							850
b014 03a 020 021	69,4	6,4	5	180	120	160	360	-1	830
b014 03a 025 026	67,5	6,5							870
b014 03a 030 031	67,6	6,1	9	170	130	150	370	23	860
b014 03a 035 036	67,0	7,4							880
b014 03a 040 041	66,6	6,7	6	190	140	140	380	20	890
b014 03a 045 046	66,6	7,2							940
b014 03a 050 051	66,5	7,5	3	230	140	150	370	34	920
b014 03b 000 001	82,0	7,7	43	800	180	210	360	28	1600
b014 03b 001 002	73,6	7,2	21	470	210	160	390	40	1300
b014 03b 002 003	71,0	6,8	23	480	280	170	400	-9	1300
b014 03b 004 005	69,1	6,5	16	630	230	160	390	-34	1400
b014 03b 006 007	68,2	6,3							1000
b014 03b 008 009	69,4	6,6	4	210	120	130	380	19	870
b014 03b 010 011	67,1	6,3							860
b014 03b 012 013	68,6	7,0	4	190	130	160	370	9	850
b014 03b 016 017	66,9	6,9							870
b014 03b 020 021	68,0	6,9	5	160	140	160	370	23	860
b014 03b 025 026	67,9	6,9							870
b014 03b 030 031	67,7	6,6	11	170	140	150	370	7	850
b014 03b 035 036	65,6	6,9							880
b014 03b 040 041	66,4	7,0	6	180	150	150	370	18	880
b014 03b 045 046	64,5	7,2							900
b014 03b 050 051	65,5	7,6	5	210	150	150	370	4	890
b014 03c 000 001	81,9	8,2	49	860	190	190	360	110	1700
b014 03c 001 002	73,9	7,4	18	570	160	200	360	32	1300
b014 03c 002 003	70,7	6,9	24	520	330	170	400	-25	1400
b014 03c 004 005	69,4	6,9	15	440	320	160	390	19	1300
b014 03c 006 007	68,4	6,9							890

b014 03c 008 009	68,8	6,5	4	140	150	130	400	30	850
b014 03c 010 011	65,8	6,7							840
b014 03c 012 013	68,6	6,8	3	140	150	150	370	43	850
b014 03c 016 017	67,1	6,8							860
b014 03c 020 021	69,4	6,8	5	130	150	150	380	26	840
b014 03c 025 026	67,9	6,5							890
b014 03c 030 031	67,6	6,6	8	140	160	140	390	34	870
b014 03c 035 036	67,2	7,3							910
b014 03c 040 041	66,3	7,0	5	150	180	130	390	35	890
b014 03c 045 046	65,7	7,3							940
b014 03c 050 051	65,7	7,5	4	210	180	130	390	56	970
e025 03 000 001	60,5	4,1	15	57	11	87	220	89	480
e025 03 001 002	48,8	3,5	4	12	6	70	210	100	410
e025 03 002 003	37,4	1,9	4	7	5	44	250	53	370
e025 03 003 004	32,0	1,3	2	5	5	33	320	27	390
e025 03 004 005	34,8	1,7	3	7	6	38	300	47	400
e025 03 005 006	36,9	1,8	3	10	9	38	260	41	360
e025 03 006 007	40,3	2,1							410
e025 03 007 008	49,1	3,4							390
e025 03 009 010	48,8	2,9							530
e025 03 014 015	58,8	4,5							410
e025 03 019 020	61,9	4,0	7	48	52	110	300	42	560
e026 03 000 001	66,6	5,1	12	28	9	110	250	110	510
e026 03 001 002	57,1	3,9	34	10	8	91	270	38	450
e026 03 002 003	43,6	2,3	3	7	6	52	290	80	430
e026 03 003 004	44,0	2,5	7	10	9	46	370	24	460
e026 03 004 005	49,2	3,5	4	14	11	62	370	75	540
e026 03 005 006	53,8	4,5	8	17	13	67	340	120	570
e026 03 007 008	51,5	4,4							540
e026 03 009 010	59,0	6,8							520
e026 03 014 015	66,9	10,2							590
e026 03 019 020	68,8	11,1	13	23	20	140	370	190	750
e026 03 024 025	70,4	12,4							750
e027 03 000 001	82,2	11,3	20	43	15	240	270	74	660
e027 03 001 002	67,7	6,2	5	10	11	140	300	110	580
e027 03 002 003	55,2	3,7	6	9	8	83	290	85	480
e027 03 003 004	42,7	2,4	3	8	6	50	320	97	490
e027 03 004 005	57,1	4,2	5	16	14	73	330	130	570
e027 03 005 006	56,4	4,5	6	16	14	80	310	100	540
e027 03 006 007	53,8	4,8							740
e027 03 007 008	55,5	5,7							570
e027 03 009 010	52,3	9,7							570
e027 03 014 015	66,0	9,7							590
e027 03 019 020	71,2	11,5	36	45	31	150	510	3	770
e028 03 000 001	88,3	14,8	14	24	21	350	320	230	960
e028 03 001 002	84,3	13,6	14	21	20	300	330	260	950
e028 03 002 003	82,6	12,6	14	22	19	270	320	210	860
e028 03 003 004	72,3	7,8	7	20	18	160	310	140	650
e028 03 004 005	64,2	5,9	8	15	15	120	290	47	490
e028 03 005 006	50,1	3,3	5	10	9	69	330	70	500
e028 03 007 008	71,2	9,8							660
e028 03 009 010	66,2	8,4							780
e028 03 014 015	59,4	6,0							750
e028 03 019 020	73,0	12,2	12	30	20	150	390	200	810
e028 03 029 030	73,5	14,7							590
e029 03 000 001	92,7	17,0	12	34	18	350	300	300	1000
e029 03 001 002	89,6	15,3	9	24	20	320	320	230	920
e029 03 002 003	85,8	12,4	7	23	16	250	340	200	840
e029 03 003 004	78,1	9,4	6	18	19	180	330	160	720
e029 03 004 005	78,0	10,0	8	22	19	190	320	96	660
e029 03 005 006	64,1	5,6	8	15	14	110	330	85	560
e029 03 007 008	50,2	3,8							810
e029 03 009 010	59,7	5,8							650

e029 03 014 015	63,1	6,9							690
e029 03 019 020	72,1	10,0	16	25	27	190	380	190	830
e029 03 029 030	72,9	11,2							700
e030 03 000 001	95,2	33,1	20	130	30	650	230	520	1600
e030 03 001 002	94,7	25,5	25	63	12	520	190	280	1100
e030 03 002 003	95,0	27,9	20	62	7	480	170	270	1000
e030 03 003 004	95,0	27,9	24	61	7	400	170	220	890
e030 03 004 005	93,5	22,4	6	52	29	340	240	300	970
e030 03 005 006	89,5	16,5	7	42	18	310	300	230	910
e030 03 007 008	87,4	16,6							880
e030 03 009 010	79,3	10,8							930
e030 03 014 015	74,2	9,7							870
e030 03 019 020	73,6	9,1	16	47	40	240	350	170	860
e030 03 029 030	73,1	10,3							840
e031 03 000 001	95,6	23,5	23	55	14	490	220	430	1200
e031 03 001 002	94,5	23,0	18	43	11	420	240	220	940
e031 03 002 003	92,1	23,7	11	41	24	380	280	220	960
e031 03 003 004	91,5	19,2	9	44	28	400	280	170	940
e031 03 004 005	87,3	13,4	11	53	38	280	330	93	800
e031 03 005 006	80,6	10,9	24	46	42	230	350	94	780
e031 03 007 008	75,2	11,2							890
e031 03 009 010	73,1	9,7							860
e031 03 014 015	75,5	10,8							850
e031 03 019 020	78,6	12,8	25	37	39	200	370	160	830
e031 03 029 030	72,9	29,8							720
e032 03 000 001	96,2	29,5	20	80	23	550	200	380	1300
e032 03 001 002	94,8	23,3	10	48	17	420	210	260	970
e032 03 002 003	92,9	21,4	11	54	27	400	250	230	970
e032 03 003 004	92,4	19,6	8	58	41	410	240	230	990
e032 03 004 005	86,4	12,6	9	64	43	250	320	160	850
e032 03 005 006	82,2	11,2	14	58	45	230	320	170	830
e032 03 007 008	76,4	9,3							690
e032 03 009 010	74,0	9,1							700
e032 03 014 015	72,7	9,4							820
e032 03 019 020	73,4	9,3	30	50	62	200	190	310	850
e032 03 029 030	77,6	14,0							900
e033 03 000 001	43,7	2,5	3	33	10	59	280	5	390
e033 03 001 002	32,0	1,5	2	5	4	30	230	45	310
e033 03 002 003	36,8	2,1	4	8	8	39	360	84	500
e033 03 003 004	52,6	4,5	6	16	18	75	300	50	470
e033 03 004 005	49,6	3,7	4	14	16	62	310	63	470
e033 03 005 006	47,2	2,9	5	11	14	59	300	71	460
e033 03 007 008	56,4	4,7							500
e033 03 009 010	64,9	6,6							530
e033 03 014 015	64,9	5,8							510
e033 03 019 020	66,0	6,3	11	31	39	110	270	68	530
e033 03 029 030	63,1	5,1							520
e034 03 000 001	68,4	6,4	7	28	16	120	230	150	550
e034 03 001 002	49,0	3,4	6	9	14	60	270	76	430
e034 03 002 003	34,8	1,8	4	7	6	32	320	42	410
e034 03 003 004	39,2	2,8	5	10	16	40	310	75	450
e034 03 004 005	46,4	4,2	6	13	15	57	290	100	480
e034 03 005 006	50,8	4,6	6	16	17	63	290	120	510
e034 03 007 008	52,4	4,7							500
e034 03 009 010	38,1	2,6							410
e034 03 014 015	70,9	12,0							800
e034 03 019 020	73,6	14,6	22	34	23	150	350	240	820
e034 03 024 025	67,6	10,6							750
e035 03 000 001	91,1	15,9	12	47	20	340	320	320	1000
e035 03 001 002	85,4	13,7	10	33	21	280	320	200	870
e035 03 002 003	67,1	5,9	9	19	13	120	280	88	520
e035 03 003 004	51,4	3,6	8	11	9	70	290	94	480
e035 03 004 005	46,2	3,1	7	13	9	63	340	83	520

e035 03 005 006	41,9	2,6	7	13	10	53	300	77	460
e035 03 007 008	45,4	3,2							760
e035 03 009 010	62,3	7,6							870
e035 03 014 015	69,3	9,5							920
e035 03 019 020	58,7	5,9	13	20	16	97	350	120	620
e035 03 029 030	55,1	5,7							810
e036 03 000 001	89,2	15,6	21	25	20	350	310	280	1000
e036 03 001 002	82,7	11,4	11	29	17	240	320	190	810
e036 03 002 003	79,3	10,1	11	30	21	200	300	210	780
e036 03 003 004	70,7	7,6	11	23	19	140	300	130	630
e036 03 004 005	58,9	5,0	9	15	13	94	320	130	580
e036 03 005 006	52,7	3,9	10	15	14	77	330	110	550
e036 03 007 008	50,7	4,5							830
e036 03 009 010	68,4	8,7							690
e036 03 014 015	64,5	7,7							870
e036 03 019 020	69,8	9,0	15	34	20	140	350	220	780
e036 03 029 030	65,8	8,9							730
e037 03 000 001	86,8	12,9	19	24	19	270	300	260	890
e037 03 001 002	79,0	9,5	17	25	20	180	330	150	720
e037 03 002 003	67,2	6,3	10	20	14	120	310	110	580
e037 03 003 004	58,2	4,6	9	16	13	90	320	96	540
e037 03 004 005	47,8	5,8	9	13	12	64	330	83	510
e037 03 005 006	61,0	5,9	11	20	18	96	340	120	600
e037 03 007 008	68,3	8,8							860
e037 03 009 010	64,0	7,5							880
e037 03 014 015	67,4	9,0							900
e037 03 019 020	52,5	4,7	13	16	13	65	360	76	550
e037 03 029 030	72,8	14,1							740
e038 03 000 001	94,6	25,3	24	70	13	460	240	390	1200
e038 03 001 002	92,9	20,5	16	44	19	370	270	300	1000
e038 03 002 003	89,2	15,7	16	37	22	300	320	250	940
e038 03 003 004	88,9	17,3	14	38	28	340	300	290	1000
e038 03 004 005	83,6	11,8	23	45	33	240	360	210	910
e038 03 005 006	78,2	10,4	27	40	34	200	360	190	860
e038 03 007 008	72,2	9,0							550
e038 03 009 010	72,9	9,2							800
e038 03 014 015	72,7	9,5							900
e038 03 019 020	73,9	9,6	21	43	35	200	360	210	870
e038 03 029 030	73,7	10,3							880
e039 03 000 001	95,9	30,3	25	100	38	600	210	370	1300
e039 03 001 002	95,9	30,5	32	54	11	430	140	320	1000
e039 03 002 003	94,1	22,9	12	45	12	400	220	310	1000
e039 03 003 004	93,1	21,7	13	55	19	410	260	230	990
e039 03 004 005	92,6	20,3	9	53	31	420	220	300	1000
e039 03 005 006	87,2	12,4	11	58	36	250	330	170	860
e039 03 007 008	75,2	12,3							560
e039 03 009 010	74,5	9,0							650
e039 03 014 015	80,6	8,8							790
e039 03 019 020	74,7	9,6	24	47	51	220	350	200	880
e039 03 029 030	73,7	9,8							560
e040 03 000 001	96,0	36,4	27	140	52	590	150	750	1700
e040 03 001 002	94,5	25,5	10	60	41	350	210	430	1100
e040 03 002 003	92,8	22,6	10	68	35	350	210	340	1000
e040 03 003 004	91,5	20,5	9	64	44	340	240	310	1000
e040 03 004 005	92,1	20,4	6	84	45	290	230	320	980
e040 03 005 006	87,4	15,1	20	130	75	120	370	300	1000
e040 03 007 008	80,0	9,8							810
e040 03 009 010	77,8	9,3							800
e040 03 014 015	77,2	9,5							860
e040 03 019 020	78,6	10,3	7	99	55	140	340	250	890
e040 03 029 030	76,5	9,5							810
e041 03 000 001	96,1	37,1	47	240	41	340	150	830	1600
e041 03 001 002	95,8	31,9	14	53	26	270	110	750	1200

e041 03 002 003	94,9	26,8	8	54	31	280	140	570	1100
e041 03 003 004	93,9	26,8	8	44	25	250	130	590	1100
e041 03 004 005	93,6	22,9	9	56	33	280	150	500	1000
e041 03 005 006	92,4	22,5	10	55	41	310	190	470	1100
e041 03 007 008	87,5	12,9							860
e041 03 009 010	79,1	9,3							810
e041 03 014 015	73,3	8,7							820
e041 03 019 020	72,6	9,5	17	49	55	170	350	230	860
e041 03 029 030	72,2	9,0							840
e042 03 000 001	93,6	23,0	18	55	44	400	240	500	1200
e042 03 001 002	90,9	17,8	16	52	45	330	280	270	990
e042 03 002 003	85,4	12,2	19	51	53	220	320	210	880
e042 03 003 004	74,8	8,6	18	44	48	150	360	180	790
e042 03 004 005	70,3	7,2	20	39	47	130	340	140	720
e042 03 005 006	66,1	6,3	20	39	41	120	330	140	690
e042 03 007 008	61,8	5,9							670
e042 03 009 010	66,8	7,2							750
e042 03 014 015	78,5	13,2							940
e042 03 019 020	76,8	11,0	25	48	42	150	380	230	880
e042 03 029 030	72,7	9,6							830
e043 03 000 001	94,1	26,3	19	59	56	490	210	480	1300
e043 03 001 002	93,7	27,9	10	55	49	470	210	450	1200
e043 03 002 003	91,0	19,0	9	40	37	320	230	970	1600
e043 03 003 004	76,3	7,7	7	18	20	120	190	220	580
e043 03 004 005	36,1	1,6	5	8	10	30	150	60	270
e043 03 005 006	32,4	1,5	7	9	11	29	200	37	290
e043 03 007 008	49,6	6,1							470
e043 03 009 010	58,9	8,1							540
e043 03 014 015	72,1	10,9							780
e043 03 019 020	73,5	12,7	19	46	44	120	380	260	870
e043 03 029 030	69,7	9,5							750
e044 03 000 001	93,2	19,8	14	43	43	320	270	460	1100
e044 03 001 002	68,2	5,3	6	16	18	77	350	42	510
e044 03 002 003	33,1	1,5	5	8	10	25	300	35	380
e044 03 003 004	38,0	2,3	8	14	20	40	320	59	460
e044 03 004 005	27,7	6,3	10	20	28	46	200	370	680
e044 03 005 006	56,0	7,8	18	38	51	85	280	320	800
e044 03 007 008	68,5	8,1							750
e044 03 009 010	69,0	8,1							760
e044 03 014 015	67,0	9,3							750
e044 03 019 020	65,2	7,0	21	50	72	110	370	150	780
e044 03 029 030	63,4	5,4							670
e045 03 000 001	95,0	28,0	13	49	51	360	250	570	1300
e045 03 001 002	90,4	17,2	10	44	41	290	330	230	940
e045 03 002 003	86,4	14,7	17	41	40	250	350	230	920
e045 03 003 004	82,9	12,9	26	42	44	220	350	190	870
e045 03 004 005	78,3	10,6	25	44	50	180	370	170	840
e045 03 005 006	76,1	9,7	25	40	49	180	370	170	820
e045 03 007 008	70,8	7,5							780
e045 03 009 010	70,0	7,5							780
e045 03 014 015	70,6	7,9							780
e045 03 019 020	72,4	10,1	29	46	49	180	400	190	890
e045 03 029 030	70,4	9,4							860
e046 03 000 001	93,9	26,0	15	61	48	380	270	490	1300
e046 03 001 002	90,7	18,0	8	37	37	270	320	240	920
e046 03 002 003	86,0	14,6	6	45	35	240	340	220	890
e046 03 003 004	82,5	13,2	17	41	37	220	340	200	850
e046 03 004 005	80,4	11,6	23	36	40	200	350	180	820
e046 03 005 006	80,2	12,5	16	42	39	210	350	180	830
e046 03 007 008	80,1	11,3							840
e046 03 009 010	80,2	12,0							850
e046 03 014 015	70,1	7,3							780
e046 03 019 020	70,1	9,4	25	29	40	180	340	160	780

e046 03 029 030	71,0	8,4							830
e047 03 000 001	89,2	19,3	6	25	21	220	200	550	1000
e047 03 001 002	82,4	13,0	8	16	16	120	190	490	840
e047 03 002 003	76,5	10,1	6	31	21	160	310	190	710
e047 03 003 004	69,7	8,3	4	22	18	130	320	150	650
e047 03 004 005	68,0	8,1	3	22	19	120	350	150	670
e047 03 005 006	66,8	8,1	3	26	21	120	350	160	680
e047 03 007 008	67,3	7,0							650
e047 03 009 010	60,4	5,2							590
e047 03 014 015	55,3	4,4							570
e047 03 019 020	59,7	6,2	15	18	19	92	340	120	610
e047 03 029 030	61,3	6,2							660
e048 03 000 001	85,2	12,9	7	31	30	280	330	230	910
e048 03 001 002	81,9	13,7	7	26	26	250	330	210	860
e048 03 002 003	78,8	10,9	6	29	22	190	330	170	750
e048 03 003 004	71,8	7,6	4	23	18	130	300	150	620
e048 03 004 005	65,2	6,5	5	20	16	110	300	120	570
e048 03 005 006	60,5	5,4	3	18	14	89	330	100	550
e048 03 007 008	64,3	5,8							550
e048 03 009 010	58,4	4,7							520
e048 03 014 015	59,1	5,3							560
e048 03 019 020	61,4	6,7	12	24	19	110	350	140	650
e048 03 029 030	67,9	9,7							770
e049 03 000 001	79,2	10,4	4	30	24	210	300	160	730
e049 03 001 002	63,7	5,7	5	11	14	100	270	100	510
e049 03 002 003	56,7	4,5	5	11	11	79	260	79	450
e049 03 003 004	49,9	3,7	4	11	10	60	260	85	430
e049 03 004 005	43,9	3,0	2	10	9	49	280	89	440
e049 03 005 006	44,8	3,1	2	12	9	50	270	73	420
e049 03 007 008	59,3	6,1							570
e049 03 009 010	60,4	6,5							590
e049 03 014 015	58,7	6,3							600
e049 03 019 020	60,5	7,4	13	21	21	96	370	130	660
e049 03 024 025	64,3	8,3							660
e050 03 000 001	58,6	4,5	4	42	13	97	230	99	490
e050 03 001 002	35,7	1,9	2	6	6	37	280	47	380
e050 03 002 003	32,9	1,7	3	7	8	29	340	71	460
e050 03 003 004	43,8	3,3	5	12	15	46	300	68	450
e050 03 004 005	54,2	4,9	5	15	20	71	350	52	520
e050 03 005 006	54,6	4,9	9	16	21	77	320	91	530
e050 03 006 007	53,9	4,5							500
e050 03 007 008	58,1	5,6							550
e050 03 009 010	62,4	7,8							630
e050 03 014 015	59,1	6,8							590
e050 03 019 020	56,2	6,7	15	16	19	93	340	130	610
t001 03 000 001	95,7	24,8	10	82	58	390	250	200	980
t001 03 001 002	94,3	25,6	9	89	56	440	250	85	940
t001 03 002 003	93,6	24,7	8	83	49	380	250	59	830
t001 03 003 004	91,4	20,5	5	59	45	290	270	84	750
t001 03 004 005	91,0	17,4	5	82	57	290	310	160	900
t001 03 005 006	86,1	12,2	5	79	63	210	350	130	840
t001 03 007 008	78,5	9,8							860
t001 03 009 010	84,2	13,7							920
t001 03 014 015	70,1	6,6							760
t001 03 019 020	68,9	7,0	8	76	90	110	410	71	760
t001 03 029 030	67,1	6,0							760
t002 03 000 001	93,9	24,9	7	46	39	410	270	380	1200
t002 03 001 002	92,0	19,7	6	43	61	380	290	210	990
t002 03 002 003	86,8	14,2	3	51	58	270	360	150	890
t002 03 003 004	87,4	16,0	15	46	57	310	370	170	960
t002 03 004 005	87,3	17,2	8	49	60	300	370	140	920
t002 03 005 006	81,6	10,6	9	59	84	200	390	51	800
t002 03 007 008	72,9	6,4							750

t002 03 009 010	67,9	5,7							750
t002 03 014 015	68,8	5,6							730
t002 03 019 020	69,6	7,5	12	67	110	140	410	13	750
t002 03 029 030	67,7	6,1							790
t003 03 000 001	95,8	34,2	15	77	74	590	210	450	1400
t003 03 001 002	95,2	28,7	9	72	75	510	230	320	1200
t003 03 002 003	94,2	27,1	8	59	49	460	240	310	1100
t003 03 003 004	93,4	28,1	4	60	52	460	260	230	1100
t003 03 004 005	93,3	25,1	6	63	38	380	260	250	1000
t003 03 005 006	89,9	17,0	4	70	49	290	320	140	870
t003 03 007 008	88,2	16,7							930
t003 03 009 010	88,8	18,4							1000
t003 03 014 015	69,9	6,6							750
t003 03 019 020	70,6	7,6	8	66	91	120	420	65	760
t003 03 029 030	68,0	6,4							790
t004 03 000 001	96,8	35,0	52	74	43	500	160	650	1500
t004 03 001 002	96,3	32,0	15	46	48	390	140	540	1200
t004 03 002 003	95,7	31,2	17	54	39	430	170	450	1200
t004 03 003 004	94,9	28,5	11	60	46	460	230	160	970
t004 03 004 005	93,9	26,0	8	67	46	370	260	73	820
t004 03 005 006	90,2	17,6	6	65	51	290	340	180	940
t004 03 007 008	89,3	17,7							990
t004 03 009 010	77,9	8,4							810
t004 03 014 015	69,1	6,5							780
t004 03 019 020	69,8	9,3	13	75	99	110	420	87	800
t004 03 029 030	66,3	6,4							810
t005 03 000 001	97,3	32,2	59	83	49	450	160	640	1400
t005 03 001 002	96,4	34,3	67	94	52	530	170	680	1600
t005 03 002 003	96,1	35,7	30	98	49	550	180	530	1400
t005 03 003 004	96,4	36,2	28	110	40	440	150	410	1200
t005 03 004 005	96,1	31,2	19	130	45	470	160	170	990
t005 03 005 006	95,5	33,0	16	130	45	450	190	220	1100
t005 03 007 008	95,4	35,4							1200
t005 03 009 010	92,0	21,6							1100
t005 03 014 015	89,7	18,5							1000
t005 03 019 020	93,6	27,6	13	290	70	430	230	250	1300
t005 03 029 030	70,8	6,4							850
t006 03 000 001	97,4	34,5	51	58	58	440	200	630	1400
t006 03 001 002	97,8	33,1	110	47	53	360	160	460	1200
t006 03 002 003	97,9	33,0	170	36	50	310	110	490	1200
t006 03 003 004	98,1	37,6	250	38	31	390	94	510	1300
t006 03 004 005	97,0	37,4	160	77	41	470	140	630	1500
t006 03 005 006	96,8	36,9	130	110	54	510	170	530	1500
t006 03 007 008	96,4	40,5							1600
t006 03 009 010	96,3	29,1							1200
t006 03 014 015	93,7	27,6							1300
t006 03 019 020	92,5	27,8	94	740	220	180	580	8	1800
t006 03 029 030	94,8	32,8							1400
t008 03 000 001	94,2	24,5	14	46	43	380	310	340	1100
t008 03 001 002	88,8	15,8	8	41	40	230	300	350	970
t008 03 002 003	87,7	16,8	23	33	44	290	460	140	990
t008 03 003 004	90,0	21,1	16	37	45	350	330	260	1000
t008 03 004 005	83,0	11,3	9	26	28	110	200	460	840
t008 03 005 006	78,3	8,7	20	50	69	150	390	110	790
t008 03 007 008	67,9	5,6							740
t008 03 009 010	64,3	5,1							700
t008 03 014 015	69,2	7,2							830
t008 03 019 020	69,4	7,3	25	46	70	120	420	150	830
t008 03 029 030	76,6	14,7							960
t009 03 000 001	95,1	32,2	37	100	55	630	210	590	1600
t009 03 001 002	94,2	28,9	9	60	51	510	240	540	1400
t009 03 002 003	93,9	25,9	4	43	38	410	230	430	1200
t009 03 003 004	89,5	16,4	6	52	42	280	340	270	990

t009 03 004 005	89,1	17,4	23	47	41	300	320	240	970
t009 03 005 006	89,2	18,4	12	54	45	320	330	260	1000
t009 03 007 008	79,7	9,2							830
t009 03 009 010	70,1	6,1							770
t009 03 014 015	68,4	5,1							720
t009 03 019 020	67,9	6,9	15	65	72	130	400	88	770
t009 03 029 030	66,0	5,7							750
t010 03 000 001	95,6	32,9	24	59	58	500	210	700	1500
t010 03 001 002	94,7	32,7	11	40	38	350	210	510	1200
t010 03 002 003	90,1	16,0	3	59	43	260	330	240	930
t010 03 003 004	87,9	16,4	10	56	49	290	370	230	1000
t010 03 004 005	89,7	18,9	10	57	51	330	340	240	1000
t010 03 005 006	91,0	21,9	9	40	34	230	220	510	1000
t010 03 007 008	80,6	8,5							810
t010 03 009 010	65,8	5,0							710
t010 03 014 015	67,2	4,6							760
t010 03 019 020	67,2	5,7	23	46	81	110	360	170	790
t010 03 029 030	69,7	5,7							780
t011 03 000 001	62,9	5,3	7	230	260	60	370	-11	910
t011 03 001 002	56,2	4,6	10	120	180	43	370	75	800
t011 03 002 003	56,1	4,6	4	100	150	32	380	68	740
t011 03 003 004	56,0	4,3	4	51	130	41	400	30	660
t011 03 004 005	56,0	4,6	3	55	120	31	400	68	670
t011 03 005 006	55,6	3,8	3	61	120	30	420	69	690
t011 03 006 007	54,4	2,9							690
t011 03 007 008	54,2	2,6							680
t011 03 008 009	54,3	2,7							680
t011 03 009 010	54,3	2,9							700
t011 03 014 015	54,0	4,6	3	75	110	35	470	88	790
t012 03 000 001	89,8	17,1	15	61	64	360	410	240	1100
t012 03 001 002	83,5	12,9	16	51	63	240	380	170	920
t012 03 002 003	76,4	9,3	17	50	89	170	400	95	830
t012 03 003 004	73,9	8,7	16	47	76	120	440	100	800
t012 03 004 005	69,1	7,9	12	40	87	130	430	78	780
t012 03 005 006	69,8	7,2	13	43	82	120	450	58	760
t012 03 007 008	68,6	6,4							750
t012 03 009 010	66,3	6,2							740
t012 03 014 015	65,3	6,0							710
t012 03 019 020	67,0	7,4	16	41	90	120	440	42	750
t012 03 029 030	66,2	6,2							730
t013 03 000 001	89,1	16,6	15	43	62	400	380	170	1100
t013 03 001 002	78,5	9,5	16	48	85	210	420	71	850
t013 03 002 003	73,6	9,0	13	41	86	170	420	95	830
t013 03 003 004	69,4	8,2	11	36	80	150	440	92	810
t013 03 004 005	66,3	7,0	9	35	73	110	450	120	790
t013 03 005 006	68,3	8,0	13	37	80	110	440	110	790
t013 03 007 008	65,9	6,3							770
t013 03 009 010	66,3	5,9							770
t013 03 014 015	65,0	5,5							740
t013 03 019 020	63,7	6,7	13	46	96	120	450	23	750
t013 03 029 030	64,8	5,5							730
t014 03 000 001	90,6	16,6	14	46	56	350	370	200	1000
t014 03 001 002	78,9	9,3	14	51	72	190	410	66	810
t014 03 002 003	73,5	9,0	9	37	68	160	450	78	800
t014 03 003 004	75,9	9,5	8	40	75	230	420	83	850
t014 03 004 005	78,2	11,5	14	43	61	220	400	120	860
t014 03 005 006	74,2	8,5	11	46	65	150	410	100	790
t014 03 007 008	68,9	6,4							790
t014 03 009 010	59,4	4,9							770
t014 03 014 015	65,0	6,2							770
t014 03 019 020	70,8	8,1	19	43	86	130	430	78	790
t014 03 029 030	71,7	8,8							820
t015 03 000 001	95,0	22,8	8	74	55	420	290	370	1200

t015 03 001 002	90,3	15,6	6	47	49	310	380	190	970
t015 03 002 003	88,9	15,8	3	51	50	290	370	130	890
t015 03 003 004	82,5	10,9	6	51	59	200	380	100	800
t015 03 004 005	79,0	9,9	6	54	58	200	390	97	810
t015 03 005 006	78,2	11,2	9	50	58	210	400	110	840
t015 03 007 008	75,5	7,4							780
t015 03 009 010	72,1	6,4							740
t015 03 014 015	67,8	5,4							730
t015 03 019 020	71,0	6,8	6	58	84	120	480	28	770
t015 03 029 030	65,7	5,5							740
w002 03 000 001	86,9	13,4	18	39	31	320	320	220	950
w002 03 001 002	71,1	6,8	9	16	19	140	280	120	580
w002 03 002 003	59,6	4,8	8	13	16	88	290	100	520
w002 03 003 004	46,2	3,0	7	10	14	57	300	84	470
w002 03 004 005	43,0	3,2	7	11	14	49	310	53	450
w002 03 005 006	46,3	4,0	4	14	14	47	300	110	490
w002 03 006 007	42,1	3,5							470
w002 03 007 008	53,9	6,8							540
w002 03 009 010	68,3	11,7							700
w002 03 014 015	65,6	9,9							680
w002 03 019 020	66,0	10,6	12	21	18	120	340	180	690
w003 03 000 001	91,8	22,5	6	85	56	500	330	440	1400
w003 03 001 002	91,7	21,9	5	38	44	420	300	370	1200
w003 03 002 003	86,4	14,1	12	24	30	290	300	240	890
w003 03 003 004	82,1	10,9	14	22	24	210	290	140	700
w003 03 004 005	74,6	8,1	14	18	24	160	310	150	680
w003 03 005 006	59,4	4,4	9	13	18	80	270	86	480
w003 03 007 008	60,4	6,5							560
w003 03 009 010	72,0	10,3							700
w003 03 014 015	68,6	9,8							680
w003 03 019 020	65,6	8,7	5	25	18	120	330	180	680
w003 03 024 025	68,7	10,3							730
w004 03 000 001	93,7	23,0	7	45	40	460	300	280	1100
w004 03 001 002	92,9	21,1	7	44	36	420	300	250	1100
w004 03 002 003	90,7	17,4	5	39	33	370	300	250	1000
w004 03 003 004	90,8	20,2	6	34	32	370	300	240	980
w004 03 004 005	89,5	19,1	5	37	32	350	310	270	1000
w004 03 005 006	89,1	16,9	2	39	35	300	310	230	910
w004 03 007 008	82,5	12,2							770
w004 03 009 010	79,1	10,4							770
w004 03 014 015	54,5	4,5							500
w004 03 019 020	51,8	4,2	7	18	20	71	340	83	540
w004 03 029 030	62,5	7,1							660
w005 03 000 001	93,6	23,6	11	69	42	450	320	300	1200
w005 03 001 002	94,3	29,5	12	70	50	540	260	520	1400
w005 03 002 003	93,8	27,3	11	68	41	480	250	340	1200
w005 03 003 004	91,4	21,0	6	60	35	400	300	320	1100
w005 03 004 005	90,6	23,6	9	92	41	380	390	210	1100
w005 03 005 006	89,1	17,1	5	51	33	330	310	260	1000
w005 03 007 008	84,4	13,4							910
w005 03 009 010	77,5	8,7							780
w005 03 014 015	63,7	5,7							650
w005 03 019 020	62,2	5,9	10	32	31	100	330	120	620
w005 03 029 030	62,9	6,6							680
w007 03 000 001	92,8	18,7	5	44	36	310	340	230	970
w007 03 001 002	90,4	16,4	10	45	39	300	350	200	950
w007 03 002 003	88,4	16,0	6	49	37	280	350	220	940
w007 03 003 004	86,2	14,8	8	50	38	260	360	220	930
w007 03 004 005	84,0	12,2	6	52	39	230	360	220	900
w007 03 005 006	78,9	9,3	12	57	52	180	410	150	860
w007 03 007 008	71,3	7,8							850
w007 03 009 010	68,4	7,8							830
w007 03 014 015	67,2	8,5							830

w007 03 019 020	68,9	8,0	26	46	69	150	420	130	840
w007 03 029 030	67,7	8,2							850
w008 03 000 001	95,3	30,9	13	84	59	620	320	450	1500
w008 03 001 002	93,7	24,8	10	55	48	520	340	330	1300
w008 03 002 003	93,5	24,8	7	50	39	480	320	290	1200
w008 03 003 004	92,5	22,6	5	50	39	380	340	250	1100
w008 03 004 005	90,3	17,6	4	54	41	330	370	210	1000
w008 03 005 006	88,3	16,4	7	58	45	310	400	200	1000
w008 03 007 008	83,1	11,2							910
w008 03 009 010	70,6	7,2							830
w008 03 014 015	71,7	7,6							840
w008 03 019 020	72,1	9,4	18	55	72	170	450	160	930
w008 03 029 030	69,8	7,7							880
w009 03 000 001	95,2	31,1	15	98	68	640	300	410	1500
w009 03 001 002	93,4	29,8	12	56	50	490	350	270	1200
w009 03 002 003	92,8	23,9	7	57	42	460	310	340	1200
w009 03 003 004	91,9	21,3	10	60	42	360	380	260	1100
w009 03 004 005	89,2	18,2	5	70	45	310	400	230	1100
w009 03 005 006	88,6	15,9	11	75	46	300	400	230	1100
w009 03 007 008	87,1	17,5							1100
w009 03 009 010	83,5	14,0							1000
w009 03 014 015	73,1	7,2							840
w009 03 019 020	72,1	8,1	21	79	88	160	440	120	910
w009 03 029 030	70,1	8,1							910
w010 03 000 001	95,6	36,6	38	230	93	790	350	710	2200
w010 03 001 002	95,6	30,3	17	130	58	600	310	480	1600
w010 03 002 003	95,1	32,6	10	110	60	600	280	500	1600
w010 03 003 004	93,3	23,2	7	91	46	470	360	360	1300
w010 03 004 005	92,5	22,2	7	68	47	460	370	290	1200
w010 03 005 006	90,9	19,3	6	68	40	360	390	200	1100
w010 03 007 008	85,3	13,3							1000
w010 03 009 010	85,1	14,5							1100
w010 03 014 015	73,4	7,4							860
w010 03 019 020	71,7	7,9	15	55	76	150	460	110	870
w010 03 029 030	67,8	8,1							890
w011 03 000 001	88,9	15,1	19	38	53	330	470	250	1100
w011 03 001 002	87,0	15,3	11	41	45	320	440	240	1100
w011 03 002 003	87,5	16,4	16	35	40	340	430	260	1100
w011 03 003 004	87,7	17,6	14	37	41	350	450	180	1100
w011 03 004 005	84,1	12,3	19	38	46	260	440	200	1000
w011 03 005 006	81,7	10,8	16	48	56	230	470	150	970
w011 03 007 008	72,2	8,5							860
w011 03 009 010	64,3	7,0							770
w011 03 014 015	75,5	11,2							970
w011 03 019 020	73,6	9,5	20	44	56	160	510	130	920
w011 03 029 030	70,7	9,3							1000
w012 03 000 001	92,2	21,7	14	51	46	510	500	350	1500
w012 03 001 002	90,0	19,1	15	41	41	410	510	260	1300
w012 03 002 003	89,4	18,6	9	48	39	380	480	290	1200
w012 03 003 004	86,0	14,7	10	53	49	310	480	210	1100
w012 03 004 005	83,1	12,6	11	49	48	260	480	190	1000
w012 03 005 006	69,6	7,4	4	27	27	150	310	380	910
w012 03 007 008	82,1	13,3							1100
w012 03 009 010	75,1	9,0							960
w012 03 014 015	56,4	5,0							750
w012 03 019 020	71,1	10,7	29	39	70	150	490	190	980
w012 03 029 030	73,3	10,9							1000
w013 03 000 001	92,4	24,5	11	64	46	560	570	400	1700
w013 03 001 002	87,8	17,3	14	30	35	360	540	290	1300
w013 03 002 003	85,0	14,1	17	41	49	300	520	210	1100
w013 03 003 004	67,1	6,4	10	21	26	120	430	140	750
w013 03 004 005	61,5	5,2	9	19	24	110	510	54	730
w013 03 005 006	71,7	8,3	11	34	41	150	540	160	940

w013 03 007 008	71,8	9,8							960
w013 03 009 010	67,4	8,9							920
w013 03 014 015	67,7	9,2							940
w013 03 019 020	60,8	6,6	14	25	40	100	480	180	830
w013 03 029 030	66,8	9,4							1100
w014 03 000 001	92,6	24,1	8	88	56	560	490	400	1600
w014 03 001 002	87,5	15,4	11	48	42	340	570	210	1200
w014 03 002 003	78,8	9,4	16	31	39	200	510	200	1000
w014 03 003 004	67,3	6,2	12	24	36	130	670	14	880
w014 03 004 005	57,7	4,6	7	21	28	91	560	63	770
w014 03 005 006	55,7	4,3	9	21	32	82	540	18	710
w014 03 007 008	67,8	9,7							1000
w014 03 009 010	71,8	9,9							990
w014 03 014 015	71,7	9,9							960
w014 03 019 020	71,5	9,9	16	24	31	160	540	220	990
w014 03 029 030	70,0	10,3							950
w015 03 000 001	57,0	3,2	4	19	15	82	380	160	670
w015 03 001 002	42,1	2,2	4	22	27	44	450	140	690
w015 03 002 003	60,2	3,7	5	47	71	80	360	26	590
w015 03 003 004	61,4	3,9	5	48	76	86	370	-5	580
w015 03 004 005	62,4	4,1	4	50	71	75	350	50	600
w015 03 005 006	63,5	4,4	5	55	82	88	340	23	600
w015 03 007 008	64,4	4,7							590
w015 03 009 010	61,4	4,0							600
w015 03 014 015	61,9	3,9							590
w015 03 019 020	63,7	4,6	2	52	84	82	330	34	590
w015 03 029 030	61,0	3,9							590

Bilaga 2. Analysresultat, forts.

Tabell 2. Halter av olika grundämnen (som mg/kg TS), torrsubstans (TS), totalt organiskt kol (TOC) och totalkväve (TN) i sediment från 0-2 cm nivå i sedimentet. Analyserna har utförts av ALS Scandinavia AB, förutom TOC och tot-N som har analyserats av Mark- och växtlaboratoriet, Institutionen för mark och miljö, SLU.

Lokal	Al	Fe	Mn	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Li	Ni	Pb	S	Zn	TS (%)	TOC (%)	TN (%)
b001	86500	58200	776	5,30	0,176	14,9	81,6	29,8	0,0890	40,6	34,0	27,0	1560	136	20,2	2,21	0,28
b002	79200	53000	673	4,51	0,180	13,9	76,7	31,1	0,114	38,9	30,4	27,2	2100	140	15,3	2,46	0,30
b003	83600	60700	1280	9,97	0,138	15,2	82,5	25,5	0,0656	39,6	31,7	27,0	1310	137	17,6	2,29	0,28
b004	80200	60000	1630	10,2	0,143	15,2	77,8	26,5	0,0680	39,0	33,3	25,9	1370	132	18,5	2,31	0,29
b005	81500	59500	1550	11,0	0,158	14,8	79,2	26,1	0,0593	38,4	30,3	27,6	1460	137	17,8	2,59	0,32
b006	81600	56400	1860	9,26	0,202	15,6	75,7	30,5	0,0950	40,1	36,1	36,9	1840	159	10,2	3,32	0,43
b007	79700	55800	2590	9,60	0,248	15,3	78,8	32,6	0,0999	38,1	34,8	43,3	2720	150	15,3	3,97	0,52
b008	74800	51800	1840	9,07	0,383	14,4	67,6	34,7	0,155	34,6	33,0	48,4	4160	151	14,9	4,18	0,56
b009	78800	55800	2680	10,3	0,172	17,1	75,2	30,9	0,0835	42,3	37,3	33,0	1540	153	17,5	2,76	0,35
b010	79900	52700	1160	6,40	0,129	13,6	63,7	26,6	0,0563	36,4	30,2	25,7	1280	116	24,2	2,11	0,27
b011	82300	56000	1140	7,26	0,135	14,8	82,5	31,3	0,0838	36,2	30,9	26,9	1340	134	24,0	2,42	0,31
b012	80500	58500	2050	12,0	0,163	15,6	79,8	26,2	0,0846	38,7	32,5	27,7	1290	132	18,4	2,46	0,31
b013	82900	55900	944	6,82	0,174	14,1	82,9	25,9	0,0808	37,1	31,8	28,3	1510	132	20,1	2,49	0,31
b014a	82900	58700	836	5,84	0,146	14,4	74,7	28,9	0,106	39,9	34,4	29,0	1500	144	21,7	2,31	0,29
b014b	86400	56500	822	5,45	0,152	13,5	77,8	27,1	0,112	36,9	33,6	28,8	1670	134	17,9	2,33	0,29
b014c	75400	50300	730	5,14	0,164	15,0	75,5	29,3	0,0862	41,1	33,9	26,4	1710	150	18,3	2,38	0,29
e025	31000	9670	173	3,02	0,129	3,41	28,4	9,86	<0,04	9,41	13,6	9,93	1410	36,1	43,0	1,36	0,17
e026	33200	11600	179	3,06	0,104	3,78	33,0	11,0	<0,04	9,15	13,9	10,4	1890	30,7	38,3	1,91	0,24
e027	36100	14100	181	3,97	0,192	4,64	37,7	15,7	<0,04	12,5	19,2	15,4	2370	43,2	25,7	2,66	0,33
e028	46000	23000	250	7,39	0,471	8,60	56,1	31,6	<0,04	24,2	37,1	27,1	5910	91,6	12,4	5,79	0,77
e029	41300	23800	267	9,18	0,968	9,62	58,2	42,2	0,0377	25,3	42,9	31,3	7960	115	10,6	6,40	0,80
e030	24900	20000	210	15,5	2,74	9,53	39,7	78,8	0,0441	15,2	49,1	17,2	15200	171	3,5	12,48	1,42
e031	26200	21300	248	23,0	3,16	11,1	32,2	93,5	0,0584	17,1	57,9	24,0	16800	214	3,5	9,82	1,13
e032	32500	25500	333	32,1	4,75	15,4	49,1	119	0,0896	21,7	69,8	37,8	19500	318	4,2	11,77	1,36
e033	27900	6760	137	1,48	0,0842	2,10	22,7	5,62	<0,04	5,09	6,73	7,44	799	18,0	61,2	0,77	0,10
e034	31200	9760	140	2,65	0,149	3,41	30,4	10,4	<0,04	8,68	11,5	11,5	1610	31,7	34,3	1,81	0,24
e035	45500	20300	242	6,81	0,456	8,11	55,5	29,3	<0,04	21,4	29,1	28,9	5570	84,1	15,6	4,79	0,64
e036	47800	22900	259	10,5	0,778	8,97	62,3	36,2	0,0512	25,8	34,9	31,9	7650	109	11,9	5,99	0,77
e037	43700	22100	247	10,7	0,926	9,35	54,8	40,3	0,0449	24,1	39,9	30,4	7890	123	10,4	8,54	1,01
e038	38600	24700	264	24,7	2,99	12,7	54,5	87,5	0,0544	23,3	61,9	36,5	14900	227	5,4	9,08	1,06
e039	26000	15800	260	28,6	4,39	12,1	36,5	114	0,0701	16,5	62,6	24,3	18600	282	3,9	11,27	1,31
e040	31600	27100	4260	27,5	5,15	16,7	48,8	129	0,0719	19,5	75,0	34,7	20600	361	4,8	12,28	1,34
e041	26000	23600	357	27,8	5,53	10,4	43,8	147	0,0895	17,2	64,8	30,0	20800	327	4,0	13,04	1,48
e042	46700	29200	317	30,0	4,89	16,1	68,2	110	0,114	26,5	66,7	67,9	16700	351	7,5	8,97	0,99
e043	37300	28600	316	20,8	3,94	11,8	67,6	115	0,0736	23,7	72,2	38,2	13200	278	6,8	12,15	1,34
e044	46400	25400	259	16,6	2,35	12,0	61,0	69,1	0,0758	26,1	50,5	49,1	11000	200	8,4	7,44	0,86
e045	43800	24900	289	17,2	2,54	11,0	49,9	76,1	0,0563	25,3	53,9	36,2	12100	217	6,9	10,46	1,22
e046	43100	25700	296	16,2	1,64	10,7	57,0	57,0	0,0493	24,8	48,8	34,6	11800	158	7,0	7,71	0,96
e047	46700	23600	291	12,5	0,883	9,55	59,6	39,1	0,0404	23,7	38,5	32,3	8020	121	12,2	6,08	0,79
e048	45200	21700	270	9,09	0,461	7,92	59,8	28,7	0,0420	23,8	30,2	28,0	6710	87,4	17,5	5,25	0,72
e049	33900	12000	178	5,09	0,161	4,48	31,7	11,0	<0,04	11,1	13,9	14,6	3000	42,4	36,7	2,85	0,38
e050	27700	9310	149	3,70	0,114	3,12	26,2	8,37	<0,04	8,59	10,6	9,58	1640	30,0	44,2	2,48	0,34
t001	40400	31900	379	9,99	1,61	15,1	55,1	60,0	0,0361	25,8	48,9	18,3	14300	154	4,5	9,56	1,04
t002	49500	36900	541	16,8	2,62	19,7	65,9	81,9	0,0568	30,8	65,6	29,9	18500	244	6,9	9,85	1,06
t003	28600	21900	258	13,1	2,88	8,37	39,7	89,0	0,0473	18,7	50,1	18,0	14200	197	4,0	13,23	1,40
t004	27400	21300	271	14,7	3,08	9,14	37,1	93,7	0,0473	17,0	54,0	17,8	16200	216	3,6	12,10	1,33
t005	23500	14300	355	13,1	3,04	6,13	33,7	81,3	<0,04	15,8	39,5	13,9	11200	208	3,2	13,11	1,46
t006	14000	8690	138	10,6	2,34	3,85	22,7	68,7	<0,04	9,68	33,5	10,7	12700	169	2,2	10,83	1,49
t008	39000	26000	377	16,0	2,64	11,4	57,7	84,8	<0,04	23,0	59,3	31,7	14400	241	5,8	6,60	0,74
t009	32000	20600	251	17,6	2,48	9,07	42,8	81,3	0,0482	18,1	54,9	20,2	14100	200	4,2	12,47	1,40
t010	33300	22700	294	18,9	3,14	9,76	36,7	92,4	0,0375	19,9	59,1	22,7	15300	237	4,9	13,10	1,47
t011	78700	54200	770	20,5	0,148	20,1	100	51,3	<0,04	49,6	52,2	27,2	2700	151	31,9	0,85	0,12
t012	65900	38700	505	7,69	0,594	14,9	78,5	41,0	<0,04	41,2	44,1	24,9	6910	148	12,1	5,35	0,63
t013	64100	39100	523	7,37	0,507	15,5	82,7	43,2	0,0407	41,5	44,5	30,4	6490	153	13,0	4,95	0,57
t014	62400	37600	534	9,82	1,06	16,6	80,5	48,6	0,0401	36,4	47,4	27,2	9630	180	10,4	6,00	0,67
t015	52800	36100	533	11,5	1,20	18,7	68,3	54,8	0,0425	36,4	52,5	26,8	13400	181	7,4	8,24	0,87

w002	40200	15900	206	4,37	0,462	6,35	45,0	25,2	<0,04	16,6	25,3	26,1	3700	78,1	19,3	3,99	0,54
w003	40700	20000	235	8,00	0,894	8,64	53,0	41,8	<0,04	22,5	38,5	27,0	7330	111	10,2	7,39	1,03
w004	42500	25500	334	11,2	1,16	12,1	59,6	44,3	0,0362	24,0	44,5	28,8	12100	125	7,9	10,09	1,28
w005	34600	21500	279	12,8	1,62	9,85	49,0	56,1	<0,04	21,4	47,8	27,4	12200	147	6,7	10,49	1,25
w007	53300	30800	410	13,2	1,93	13,9	58,8	61,5	0,0742	32,9	48,6	54,9	12300	197	9,8	10,15	1,20
w008	37600	25100	313	14,8	2,35	14,2	54,0	83,5	0,0454	22,6	61,9	29,0	15500	204	5,3	12,37	1,41
w009	45000	29700	417	12,5	2,64	13,9	63,0	84,1	0,0559	26,6	59,5	37,6	14800	218	5,8	10,59	1,23
w010	29500	21100	227	11,1	1,88	9,39	43,7	64,1	0,0426	18,0	42,3	22,1	12700	144	4,1	12,83	1,45
w011	51200	31700	415	11,9	1,41	15,1	70,9	59,7	0,0560	33,2	47,3	45,8	11100	176	9,4	5,88	0,70
w012	43800	27300	365	12,0	1,10	15,4	53,4	50,6	0,0514	29,5	46,5	34,8	11500	148	9,4	8,26	1,03
w013	45700	25400	351	9,75	0,998	12,9	55,3	44,3	0,0402	27,1	42,8	33,3	9130	138	10,1	8,04	1,02
w014	40300	24400	317	7,87	0,833	10,9	54,6	40,3	0,0441	21,2	38,9	27,9	9260	119	7,8	7,18	0,91
w015	27600	13800	193	3,31	0,0853	4,75	21,5	10,3	<0,04	8,98	12,7	9,29	4980	31,3	55,8	0,79	0,11

Bilaga 2. Analysresultat, forts.

Tabell 3. Olika former av fosfor och kväve i bottenvatten från varje provlokal. Lokalerna b014 och e037 har provtagits i triplikat. Analyserna har utförts av Erkenlaboratoriet. Koordinaterna är angivna i SWEREF 99 TM.

Lokal	N	E	Fosfatfosfor (µg/l)	Totalfosfor (µg/l)	Ammoniumkväve (µg/l)	Nitritkväve (µg/l)	Nitratkväve (µg/l)
b001	6503092	574634	31	36	15	3	22
b002	6498743	576141	30	36	12	3	20
b003	6501519	580361	29	34	7	2	14
b004	6501736	587008	26	31	5	2	10
b005	6500044	594541	27	32	6	2	12
b006	6498624	603265	28	32	4	<2	12
b007	6496832	608133	30	34	6	2	15
b008	6497934	610899	27	32	<4	2	12
b009	6499201	598020	24	32	<4	<2	10
b010	6500803	590852	26	31	7	2	10
b011	6501446	588969	27	31	7	2	10
b012	6502552	583040	26	31	5	2	12
b013	6502627	579595	26	31	5	3	11
b014a	6500237	577479	28	37	<4	<2	<3
b014b	-	-	27	33	<4	<2	<3
b014c	-	-	28	35	<4	<2	<3
e025	6318295	727718	22	30	22	<2	10
e026	6318838	729037	44	51	35	<2	22
e027	6319174	729859	47	53	37	<2	26
e028	6319545	730762	62	67	41	2	31
e029	6320235	732449	81	84	37	<2	<3
e030	6322081	736942	96	110	63	<2	<3
e031	6326315	747262	100	120	65	<2	6
e032	6331748	760506	130	140	160	<2	7
e033	6350632	736641	19	24	9	<2	11
e034	6348933	739638	39	46	26	<2	30
e035	6347929	741413	76	87	65	<2	<3
e036	6346933	743165	80	87	49	<2	4
e037a	6346307	744269	76	86	46	<2	<3
e037b	-	-	77	110	47	<2	3
e037c	-	-	78	88	51	<2	<3
e038	6342998	750117	94	100	54	<2	4
e039	6338913	757314	120	130	120	<2	4
e040	6369459	796223	130	140	230	<2	11
e041	6380418	789949	130	130	130	<2	7
e042	6388005	785600	98	110	38	<2	5
e043	6395081	781551	97	99	59	<2	<3
e044	6403451	775938	97	99	43	<2	<3
e045	6407598	772129	100	100	75	<2	<3
e046	6410055	769884	97	99	68	<2	<3
e047	6412866	766116	91	100	57	<2	<3
e048	6413273	764721	58	64	39	<2	36
e049	6413410	764246	41	48	21	<2	35
e050	6413896	762554	33	39	18	<2	24
t001	6484126	665472	110	110	140	<2	7
t002	6471629	663651	100	120	120	<2	<3
t003	6462475	661209	100	110	140	<2	<3
t004	6452634	661956	110	110	150	<2	5
t005	6439928	666333	110	110	140	<2	5
t006	6430063	671967	110	110	140	<2	4
t008	6412305	683194	110	110	130	<2	<3
t009	6405844	686691	110	120	160	<2	<3
t010	6424758	675656	110	110	140	<2	<3
t011	6491425	662469	30	38	16	3	14
t012	6490365	662872	55	62	44	<2	38
t013	6488385	663697	110	110	120	<2	3

t014	6486266	664760	110	110	150	<2	<3
t015	6485328	665236	100	110	140	<2	7
w002	6317126	679339	27	31	6	<2	5
w003	6317445	678403	67	68	33	2	54
w004	6318046	676672	120	130	210	<2	15
w005	6318520	675289	120	130	200	<2	4
w007	6319855	671431	120	120	190	<2	23
w008	6323188	661812	110	120	170	<2	11
w009	6326081	655828	110	120	170	<2	<3
w010	6328842	650395	110	120	150	<2	4
w011	6329960	648197	110	110	140	<2	12
w012	6332723	642758	100	110	110	<2	6
w013	6334125	640009	110	120	140	<2	11
w014	6334651	638973	110	120	110	<2	4
w015	6335373	637556	97	100	80	<2	6