



Bundesamt für
Naturschutz

HABITAT MARE
aktiv für die marine Lebensvielfalt

Entwicklung und Anpassung von Indikatoren für aus- gewählte Lebensräume

Fallstudie zu Schlick und Feinsand

Stand: 20.02.2023

Bearbeiter:



Dr. Iris Schaub

Dr. Katharina Romoth

Dr. Michael L. Zettler



Erstellt im Rahmen des Projekts:

Leben am Gradienten: Analyse des Einflusses von Umweltparametern auf Verbreitung, Diversität und Funktion benthischer Gemeinschaften und deren Lebensräume in der südlichen Ostsee

(LEGRA, Benthos)

Bericht zum Arbeitspaket 3: Entwicklung und Anpassung von Indikatoren für ausgewählte Lebensräume; Meilenstein 6.1: Fallstudie A zu Schlick und Feinsand

Fachbetreuung im BfN:

Kathrin Heinicke, Fachgebiet II 3.2 Meeresschutzgebiete der AWZ, Insel Vilm

Dieter Boedeker, Fachgebiet II 3.1 Grundlagen, internationaler Meeresnaturschutz, Insel Vilm

Simone Eisenbarth, Fachgebiet II 3.2 Meeresschutzgebiete der AWZ, Insel Vilm

Claudia Morys, Fachgebiet II 3.2 Meeresschutzgebiete der AWZ, Insel Vilm

LEGRA



Entwicklung und Anpassung von Indikatoren für
ausgewählte Lebensräume



Fallstudie zu Schlick und Feinsand

Impressum

Die dieser Veröffentlichung zu Grunde liegenden wissenschaftlichen Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz durchgeführt. Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Herausgebers unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen. Nachdruck, auch in Auszügen, nur mit Genehmigung des BfN.



Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Abkürzungsverzeichnis | II |
| Abbildungsverzeichnis | IV |
| Tabellenverzeichnis | XII |
| 1 Hintergrund | 13 |
| 2 Vorgehensweise | 17 |
| 2.1 Berechnung des BQI..... | 17 |
| 2.2 Zuweisung der deutschen Ostseefläche zu den EIG..... | 18 |
| 2.3 Neubewertung des EIG 4-Gebiets..... | 22 |
| 2.4 Resultierende Datengrundlage für die Berechnung des BQI | 26 |
| 2.5 Ansätze der Schwellenwertberechnung | 30 |
| 2.6 Datennutzung zu anthropogenen Belastungen des Meeresbodens | 32 |
| 2.7 Festlegung von Referenzflächen mit keinen bis geringen anthropogenen Belastungen | 34 |
| 2.8 Die Nutzung von historischen Daten als Referenz..... | 39 |
| 3 Ergebnisse der vergleichenden Schwellenwerttestung | 41 |
| 3.1 Schwellenwerttestung für das EIG 2-Gebiet | 41 |
| 3.2 Schwellenwerttestung für das EIG 3-Gebiet | 50 |
| 3.3 Schwellenwerttestung für das EIG 4a-Gebiet..... | 58 |
| 3.4 Schwellenwerttestung für das EIG 4b-Gebiet..... | 66 |
| 3.5 Schwellenwerttestung für das EIG 5-Gebiet | 74 |
| 4 Zusammenfassung und abschließende Empfehlung der Schwellenwertsetzung | 82 |
| Literaturverzeichnis | 84 |
| Anhang | 86 |



Abkürzungsverzeichnis

| | |
|----------------|--|
| As | Arsen |
| AWZ | Ausschließliche Wirtschaftszone |
| BfN | Bundesamt für Naturschutz |
| BHT | Broad habitat types (Biotopklassen) |
| BQI | Benthic Quality Index |
| BSH | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie |
| Cuml | Cumulativ Impact on benthic biotops |
| EG-BENTHIC | Expert Group on Benthic Habitats and Biotopes |
| EIG | Ecological Indicator Group |
| ES | Expected number of species |
| GES | Good Environmental Status |
| HELCOM | Baltic Marine Environment Protection Commission |
| Hg | Quecksilber |
| HOLAS | HELCOM Holistic Assessment of Ecosystem Health of the Baltic Sea |
| IOW | Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde |
| mobilerP | Mobiler Phosphor |
| MSRL | Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (Richtlinie 2008/56/EG) |
| MW | Mittelwert |
| NSG | Naturschutzgebiet |
| O ₂ | Sauerstoff |
| OHT | Other Habitat Types (andere Lebensraumtypen) |
| orgG | Organischer Gehalt |
| Pb | Blei |
| psu | Practical salinity unit |
| Sm | Seemeilen |
| SAR | Swept Area Ration |
| TN | Gesamtstickstoff |



| | |
|------|---|
| TOC | Gesamter organischer Kohlenstoff |
| TP | Gesamtphosphor |
| WRRL | Wasser-Rahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG) |



Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Bathymetrie- (BSH, 2012) und Salinitätsbereiche (modellierte mittlere Bodensalinität, R. Friedland, IOW) gemäß Schiele et al. 2016, wonach die EIG-Flächen in Abbildung 2 definiert wurden | 20 |
| Abbildung 2: Die Zuordnung der deutschen Ostseefläche zu den EIG (Ecological Indicator Group) gemäß modellierten mittleren Bodensalinität (R. Friedland, IOW) und Bathymetrie (BSH 2012) | 21 |
| Abbildung 3: BQI-Werte im EIG 4-Gebiet nach Größenklassen farblich unterteilt; BQI berechnet mit Stationsdaten aus einem größeren Datensatz (2002-2021) | 23 |
| Abbildung 4: Substrattyp der für die EIG 4-Gebietsneubewertung betrachteten BQI-Stationen ... | 24 |
| Abbildung 5: Die Zuordnung der deutschen Ostseefläche zu den EIG (Ecological Indicator Group) gemäß modellierten mittleren Bodensalinität (R. Friedland, IOW) und Bathymetrie (BSH 2012) mit der Trennung des EIG 4-Gebiets in EIG 4a und EIG 4b an der 20m Tiefengrenze | 25 |
| Abbildung 6: Lage der für diese Studie genutzten Stationen (Zeitraum 2015-2021) pro EIG (Ecological Indicator Group), auf dem Hintergrund der angepassten EIG-Flächen | 28 |
| Abbildung 7: Lage der für diese Studie genutzten Stationen (Zeitraum 2015-2021) pro EIG (Ecological Indicator Group), auf dem Hintergrund der BHT (Board Habitat Types, Biotopklassen; Marx et al. in prep.) | 29 |
| Abbildung 8: Ausgewählte Beispiele von Stressoren in der südlichen Ostsee, die für die Ausweisung von Referenzflächen genutzt wurden; TOC = Gesamt organischer Kohlenstoff in Gewichts-%; TN = Gesamtstickstoff in Gewichts-%, MobilerP = mobiler Phosphor in Gewichts-%; Hg = Quecksilber in µg/kg; Hypoxieereignisse = Phasen von Hypoxieereignissen (mind. 7 Tage am Stück < 2 mg/l); Physikalische Störungen = HELCOM Kernindikator „Cuml“ und „Loss“ aus der HOLAS 3-Bewertung (2022)..... | 36 |
| Abbildung 9: Definierte Referenzfläche in der südlichen Ostsee anhand der Stressoren aus Tabelle 5..... | 37 |
| Abbildung 10: Stationen welche in der Referenzfläche liegen, farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group)..... | 38 |
| Abbildung 11: Lage der historischen Daten von Thulin (1922) und Hertling (1928) mit einer farblichen Zuordnung zu den EIG (Ecological Indicator Group), auf dem Hintergrund der BHT (Broad Habitat types, Biotopklassen; Marx et al. in prep. für dt. Gewässer; Emodnet 2021 für außerhalb der deutschen AWZ) | 40 |



- Abbildung 12: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 2 mit den berechneten Schwellenwerten aus Tabelle 6 (vertikal gestrichelte Linien: schwarz = „alter“ Schwellenwert; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)..... 43
- Abbildung 13: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 2 mit der Unterteilung in 5 Gruppen gemäß WRRL (Wasser-Rahmenrichtlinie) nach Normierungswert a) Maximum, b) 99. Perzentil, c) 95. Perzentil; vertikale rote Linie = Übergang schlecht zu unbefriedigend; orange = unbefriedigend zu mäßig; gelbe = mäßig zu gut; grüne = gut zu sehr gut; blaue Linie = Normierungswert 44
- Abbildung 14: Für EIG (Ecological Indicator Group) 2 der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) organischer Gehalt (OrgG), b) Gesamter organischer Kohlenstoff (TOC), c) Gesamtstickstoff (TN) und den Schwellenwerten aus Tabelle 6 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil) 46
- Abbildung 15: Für EIG (Ecological Indicator Group) 2 der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) Gesamtphosphor (TP), b) mobiler Phosphor (mobilerP) und den Schwellenwerten aus Tabelle 6 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)..... 47
- Abbildung 16: Für EIG (Ecological Indicator Group) 2 der BQI (Benthic Quality Index) versus der Schwermetallbelastung durch a) Blei (Pb), b) Arsen (As), c) Quecksilber (Hg) und den Schwellenwerten aus Tabelle 6 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil) 48
- Abbildung 17: Für EIG (Ecological Indicator Group) 2 der BQI (Benthic Quality Index) versus a) der Hypoxie (Anzahl der Tage mit Sauerstoffgehalt (O₂) < 2 mg/l) und b) des Fischereidrucks (Swept Area Ration (SAR) pro Jahr) und den Schwellenwerten aus Tabelle 6 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil) 49
- Abbildung 18: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 3 mit den berechneten Schwellenwerten aus Tabelle 7 (vertikal



- gestrichelte Linien: schwarz = „alter“ Schwellenwert; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)..... 51
- Abbildung 19: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 3 mit der Unterteilung in 5 Gruppen gemäß WRRL (Wasser-Rahmenrichtlinie) nach Normierungswert a) Maximum, b) 99. Perzentil, c) 95. Perzentil; rote Linie = Übergang schlecht zu unbefriedigend; orange = unbefriedigend zu mäßig; gelbe = mäßig zu gut; grüne = gut zu sehr gut; blaue Linie = Normierungswert 52
- Abbildung 20: Für EIG (Ecological Indicator Group) 3 der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) organischer Gehalt (OrgG), b) Gesamter organischer Kohlenstoff (TOC), c) Gesamtstickstoff (TN) und den Schwellenwerten aus Tabelle 7 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil) 54
- Abbildung 21: Für EIG (Ecological Indicator Group) 3 der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) Gesamtphosphor (TP), b) mobiler Phosphor (mobilerP) und den Schwellenwerten aus Tabelle 7 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)..... 55
- Abbildung 22: Für EIG (Ecological Indicator Group) 3 der BQI (Benthic Quality Index) versus der Schwermetallbelastung durch a) Blei (Pb), b) Arsen (As), c) Quecksilber (Hg) und den Schwellenwerten aus Tabelle 7 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil) 56
- Abbildung 23: Für EIG (Ecological Indicator Group) 3 der BQI (Benthic Quality Index) versus a) der Hypoxie (Anzahl der Tage mit Sauerstoffgehalt (O₂) < 2 mg/l) und b) des Fischereidrucks (Swept Area Ration (SAR) pro Jahr) und den Schwellenwerten aus Tabelle 7 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil) 57
- Abbildung 24: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 4a mit den berechneten Schwellenwerten aus Tabelle 8 (vertikal gestrichelte Linien: schwarz = „alter“ Schwellenwert; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich



| | |
|--|----|
| abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)..... | 59 |
| Abbildung 25: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 4a mit der Unterteilung in 5 Gruppen gemäß WRRL (Wasser-Rahmenrichtlinie) nach Normierungswert a) Maximum, b) 99. Perzentil, c) 95. Perzentil; rote Linie = Übergang schlecht zu unbefriedigend; orange = unbefriedigend zu mäßig; gelbe = mäßig zu gut; grüne = gut zu sehr gut; blaue Linie = Normierungswert | 60 |
| Abbildung 26: Für EIG (Ecological Indicator Group) 4a der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) organischer Gehalt (OrgG), b) Gesamter organischer Kohlenstoff (TOC), c) Gesamtstickstoff (TN) und den Schwellenwerten aus Tabelle 8 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil) | 62 |
| Abbildung 27: Für EIG (Ecological Indicator Group) 4a der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) Gesamtphosphor (TP), b) mobiler Phosphor (mobilerP) und den Schwellenwerten aus Tabelle 8 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)..... | 63 |
| Abbildung 28: Für EIG (Ecological Indicator Group) 4a der BQI (Benthic Quality Index) versus der Schwermetallbelastung durch a) Blei (Pb), b) Arsen (As), c) Quecksilber (Hg) und den Schwellenwerten aus Tabelle 8 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil) | 64 |
| Abbildung 29: Für EIG (Ecological Indicator Group) 4a der BQI (Benthic Quality Index) versus a) der Hypoxie (Anzahl der Tage mit Sauerstoffgehalt (O ₂) < 2 mg/l) und b) des Fischereidrucks (Swept Area Ration (SAR) pro Jahr) und den Schwellenwerten aus Tabelle 8 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil) | 65 |
| Abbildung 30: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 4b mit den berechneten Schwellenwerten aus Tabelle 9 (vertikal gestrichelte Linien: schwarz = „alter“ Schwellenwert; rot = Ansatz 1; orange = Ansatz 2; blaue = Ansatz 3; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil) | 67 |



- Abbildung 31: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 4b mit der Unterteilung in 5 Gruppen gemäß WRRL (Wasser-Rahmenrichtlinie) nach Normierungswert a) Maximum, b) 99. Perzentil, c) 95. Perzentil; rote Linie = Übergang schlecht zu unbefriedigend; orange = unbefriedigend zu mäßig; gelbe = mäßig zu gut; grüne = gut zu sehr gut; blaue Linie = Normierungswert 68
- Abbildung 32: Für EIG (Ecological Indicator Group) 4b der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) organischer Gehalt (OrgG), b) Gesamter organischer Kohlenstoff (TOC), c) Gesamtstickstoff (TN) und den Schwellenwerten aus Tabelle 9 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; orange = Ansatz 2; blau = Ansatz 3; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil) 70
- Abbildung 33: Für EIG (Ecological Indicator Group) 4b der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) Gesamtphosphor (TP), b) mobiler Phosphor (mobiler P) und den Schwellenwerten aus Tabelle 9 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; orange = Ansatz 2; blau = Ansatz 3; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil) 71
- Abbildung 34: Für EIG (Ecological Indicator Group) 4b der BQI (Benthic Quality Index) versus der Schwermetallbelastung durch a) Blei (Pb), b) Arsen (As), c) Quecksilber (Hg) und den Schwellenwerten aus Tabelle 9 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; orange = Ansatz 2; blau = Ansatz 3; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil) 72
- Abbildung 35: Für EIG (Ecological Indicator Group) 4b der BQI (Benthic Quality Index) versus a) der Hypoxie (Anzahl der Tage mit Sauerstoffgehalt (O₂) < 2 mg/l) und b) des Fischereidrucks (Swept Area Ration (SAR) pro Jahr) und den Schwellenwerten aus Tabelle 9 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; orange = Ansatz 2; blau = Ansatz 3; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil) 73
- Abbildung 36: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 5 mit den berechneten Schwellenwerten aus Tabelle 10 (vertikal gestrichelte Linien: schwarz = „alter“ Schwellenwert; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil) 75



- Abbildung 37: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 5 mit der Unterteilung in 5 Gruppen gemäß WRRL (Wasser-Rahmenrichtlinie) nach Normierungswert a) Maximum, b) 99. Perzentil, c) 95. Perzentil; rote Linie = Übergang schlecht zu unbefriedigend; orange = unbefriedigend zu mäßig; gelbe = mäßig zu gut; grüne = gut zu sehr gut; blaue Linie = Normierungswert 76
- Abbildung 38: Für EIG (Ecological Indicator Group) 5 der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) organischer Gehalt (OrgG), b) Gesamter organischer Kohlenstoff (TOC), c) Gesamtstickstoff (TN) und den Schwellenwerten aus Tabelle 10 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil) 78
- Abbildung 39: Für EIG (Ecological Indicator Group) 5 der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) Gesamtphosphor (TP), b) mobiler Phosphor (mobiler P) und den Schwellenwerten aus Tabelle 10 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil) 79
- Abbildung 40: Für EIG (Ecological Indicator Group) 5 der BQI (Benthic Quality Index) versus der Schwermetallbelastung durch a) Blei (Pb), b) Arsen (As), c) Quecksilber (Hg) und den Schwellenwerten aus Tabelle 10 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil) 80
- Abbildung 41: Für EIG (Ecological Indicator Group) 5 der BQI (Benthic Quality Index) versus a) der Hypoxie (Anzahl der Tage mit Sauerstoffgehalt (O₂) < 2 mg/l) und b) des Fischereidrucks (Swept Area Ration (SAR) pro Jahr) und den Schwellenwerten aus Tabelle 10 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil) 81
- Abbildung 42: BQI (Benthic Quality Index) versus TOC (Gesamter organischer Kohlenstoff; Gewichts-%), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten für die Bestimmung der Referenzfläche 86
- Abbildung 43: BQI (Benthic Quality Index) versus TN (Gesamtstickstoff; Gewichts-%), farblich unterschieden nach Ecological Indicator Group (EIG) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte



| | |
|---|----|
| Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten für die Bestimmung der Referenzfläche | 87 |
| Abbildung 44: BQI (Benthic Quality Index) versus TP (Gesamtphosphor; Gewichts-%), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten für die Bestimmung der Referenzfläche | 87 |
| Abbildung 45: BQI (Benthic Quality Index) versus mobilerP (mobiler Phosphor; Gewichts-%), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten für die Bestimmung der Referenzfläche | 88 |
| Abbildung 46: BQI (Benthic Quality Index) versus Pb (Blei; mg/kg), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten für die Bestimmung der Referenzfläche | 88 |
| Abbildung 47: BQI (Benthic Quality Index) versus As (Arsen; mg/kg), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten für die Bestimmung der Referenzfläche..... | 89 |
| Abbildung 48: BQI (Benthic Quality Index) versus Hg (Quecksilber; µg/kg), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten für die Bestimmung der Referenzfläche..... | 89 |
| Abbildung 49: BQI (Benthic Quality Index) versus Hypoxieereignisse (Phasen von mindestens 7 Tage am Stück in denen O ₂ -Konzentration unter 2 mg/l liegt; Anzahl Phasen), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten für die Bestimmung der Referenzfläche..... | 90 |
| Abbildung 50: BQI (Benthic Quality Index) versus OrgG (Organischer Gehalt; Gewichts-%), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten..... | 91 |
| Abbildung 51: BQI (Benthic Quality Index) versus Hypoxie (Anzahl der Tage mit Sauerstoffgehalt (O ₂) < 2 mg/l), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten | 92 |



Abbildung 52: BQI (Benthic Quality Index) versus Fischereidruck (Swept Area Ration (SAR) pro Jahr), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten ... 92



Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Die akzeptierten Schwellenwerten für die HELCOM-Bewertungseinheiten der Ostsee; die Schwellenwerte wurden anhand von zwei unterschiedlichen Ansätzen festgelegt, siehe Spalte „BQI species sensitivity value method“ ; Leonardsson et al. 2009 entspricht dem schwedischen Ansatz; Schiele et al. 2016 entspricht dem finnischen WRRL-Ansatz; Quelle: HELCOM (2018b) | 16 |
| Tabelle 2: Abgrenzung der für die deutsche Ostsee relevanten EIG (Ecological Indicator Group) nach Schiele et al. (2016) gemäß Salinität, Wassertiefe und Beprobungsmethoden | 19 |
| Tabelle 3: Die für die deutsche Ostsee relevanten EIG (Ecological Indicator Group; gemäß Schiele et al. 2016 mit Änderungen an EIG 4) mit den GES (Good Environmental Status)-Schwellenwerte für den BQI (Benthic Quality Index) der jeweilige Bewertungseinheit (HELCOM (2017) und die Anzahl der für diese Studie genutzten Stationen bzw. Hols pro EIG; Die rot markierten GES-Schwellenwerte sind für die jeweils rot markierten Bewertungseinheiten regional nicht akzeptiert worden | 27 |
| Tabelle 4: Anthropogene Belastungsdaten | 33 |
| Tabelle 5: Die für die Ausweisung der Referenzfläche genutzten Stressparametern mit den Grenzwerte unterhalb derer keine bis geringe negative Einflüsse auf das Makrozoobenthos postuliert werden | 34 |
| Tabelle 6: Resultierende Schwellenwerte, Datengrundlage und Methode der verschiedenen Ansätze der Schwellenwertermittlung für EIG (Ecological Indicator Group) 2 | 42 |
| Tabelle 7: Resultierende Schwellenwerte, Datengrundlage und Methode der verschiedenen Ansätze der Schwellenwertermittlung für EIG (Ecological Indicator Group) 3 | 50 |
| Tabelle 8: Resultierende Schwellenwerte, Datengrundlage und Methode der verschiedenen Ansätze der Schwellenwertermittlung für EIG (Ecological Indicator Group) 4a | 58 |
| Tabelle 9: Resultierende Schwellenwerte, Datengrundlage und Methode der verschiedenen Ansätze der Schwellenwertermittlung für EIG (Ecological Indicator Group) 4b | 67 |
| Tabelle 10: Resultierende Schwellenwerte, Datengrundlage und Methode der verschiedenen Ansätze der Schwellenwertermittlung für EIG (Ecological Indicator Group) 5 | 74 |
| Tabelle 11: Die für die deutsche Ostsee relevanten EIG (Ecological Indicator Group) nach Schiele et al. (2016), verändert durch die Trennung des EIG 4-Gebiets, und den abschließend empfohlenen Schwellenwerten nach Ansatz 4/99. Perzentil | 83 |



1 Hintergrund

Die Bewertung des Zustands von Biotopen und den darin lebenden Gemeinschaften mit geeigneten Indikatoren ist eine der Voraussetzungen, um den aktuellen Umweltzustand von Gewässern innerhalb von regionalen Übereinkommen wie der Baltic Marine Environment Protection Commission (Helsinki Commission - HELCOM) oder im Rahmen der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL 2008/56/EG) zu beschreiben. Die nach MSRL bewerteten Biotopklassen (Broad Habitat Types, BHT) und andere Lebensraumtypen (Other Habitat Types, OHT) der deutschen Ostseegewässer zeigten in der letzten Bewertungsperiode (2011-2016) insgesamt keinen guten Zustand (BMU, 2018). Anthropogen verursachte Belastungen der Meeresumwelt wie Eutrophierung, Schadstoffeinträge und physikalische Störungen beeinträchtigen den ökologischen Umweltzustand erheblich. Die Eutrophierung verursacht eine gesteigerte Produktion an Biomasse, bei deren Abbau am Meeresboden durch Mikroorganismen Sauerstoff gezehrt wird. Eine daraus potentiell resultierende Hypoxie führt zu einem Verlust der Artenvielfalt durch Abwandern oder Absterben sensibler Arten und einer erhöhten Dominanz von wenigen Hypoxie-toleranten Taxa (Levin et al., 2009). Physikalische Störungen des Meeresbodens wie grundberührende Fischerei oder das Ausbringen von Baggergut kann ebenfalls die Artenvielfalt reduzieren und die Gemeinschaftszusammensetzung und Ökosystemfunktion der Invertebratengemeinschaft verändern (Hiddink et al., 2006; Powilleit et al., 2006; Tillin et al., 2006). Die benthische Makrofauna ist aufgrund ihres Substratbezugs und relativ niedrigen Mobilität generell ein guter Anzeiger für den ökologischen Umweltzustand am Meeresboden. Anthropogen belastete Gebiete sind durch das Vorkommen opportunistischer Arten geprägt, die dort in teils hoher Abundanz auftreten können. Im Gegensatz zu sensitiven Arten sind sie in der Lage, bis zu einem gewissen Grad mit den anthropogen veränderten Umweltbedingungen umzugehen, da sie z. B. eine höhere Toleranz gegenüber Schwankungen von Umweltparametern oder auch erfolgreichere Strategien zum Umgang damit aufweisen. Eine hohe Artenvielfalt mit Vorkommen von sensitiven Arten charakterisiert hingegen ungestörte Areale (Rosenberg et al., 2004; Ugland et al., 2008; Schiele et al., 2016). Da Opportunisten im Allgemeinen schwache Konkurrenten sind, kommen sie in solch artenreichen Umgebungen seltener vor (Leonardsson et al., 2009). Derartige Betrachtungen machen die Gemeinschaftsstruktur des Makrozoobenthos zu einem guten Diagnosewerkzeug, um den Zustand der Umwelt abzubilden. Es muss jedoch beachtet werden, dass sich die benthische Gemeinschaftszusammensetzung nicht nur im Zuge von anthropogenen Störungen ändert, sondern auch durch die natürliche Variabilität der Umweltparameter wie Salinität, natürlich bedingte Sauerstoffverfügbarkeit, Substrat, Wellenkraft, Strömung oder Nahrungsverfügbarkeit. Gerade in der Ostsee mit ihren ausgeprägten horizontalen und vertikalen Salinitätsgradienten (Salinität sinkt von West nach Ost und steigt mit der Wassertiefe) ist es sehr wichtig, den Faktor Salinität von den anthropogenen Stressoren zu trennen, da sich mit der sinkenden Salinität natürlicherweise auch die Artenvielfalt bis zu einem Brackwasserminimum reduziert, um dann Richtung Süßwasserbedingungen wieder anzusteigen (Remane, 1934; Zettler et al., 2014, 2017).



Mit dem benthischen Qualitäts-Index (Benthic Quality Index, BQI) liegt ein Indikator für die Makrofauna der Weichböden (Schlick bis Mittelsand) vor, der sowohl national von mehreren HELCOM-Anrainerstaaten als auch regional für die Bewertungen des Umweltzustands der Ostsee durch HELCOM angewandt wird. Der BQI wurde von Rosenberg et al. (2004) entwickelt und von Leonardsson et al. (2009) weiter modifiziert. Er wird auf der Grundlage der Artenvielfalt (species richness), den Abundanzen der einzelnen Taxa und einem Maß für die Sensitivität der Arten (Sensitivitätswert) berechnet. Der Sensitivitätswert pro Taxon beruht auf der Annahme, dass sensitive Arten hauptsächlich an ungestörten Standorten mit einer insgesamt hohen Diversität vorkommen, wohingegen tolerante Taxa hauptsächlich an gestörten Bereiche mit einer insgesamt geringen Diversität dominieren (Rosenberg et al., 2004). Der HELCOM Kernindikator „State of the soft-bottom macrofauna community“ ist identisch mit dem BQI (HELCOM, 2018). In die MSRL-Bewertung geht der BQI als Zustandsindikator in das primäre Kriterium D6C5 (Benthic habitat condition) des Deskriptors 6 (Meeresboden) mit ein. Bei der Bewertung des Deskriptors D5 (Eutrophierung) wird er beim sekundären Kriterium D5C8 (Species composition and abundance of macrofauna communities) zusätzlich als Belastungsindikator herangezogen (European Commission, 2022). Hohe BQI-Werte kennzeichnen einen gesunden Umweltzustand, während niedrige BQI-Werte auf schlechte Umweltbedingungen hindeuten. Allerdings muss hierbei der potenzielle Einfluss von Tiefe und Salzgehalt regional berücksichtigt werden. Die Grundlage der Zustandsbewertung mit einem Indikator ist die Definition des guten Umweltzustandes (Good Environmental Status; GES) anhand von festgelegten Schwellenwerten, die eine Unterscheidung zwischen „gut“ und „schlecht“ erst ermöglichen.

Mehrere Studien zum BQI zeigten, dass überregionale Schwellenwerte und Sensitivitätseinstufungen einzelner Taxa entlang natürlicher Gradienten, wie z. B. des Salinitätsgradienten in der Ostsee, die Aussagekraft des Indexes deutlich senken können (Zettler et al., 2007, 2013; Fleischer and Zettler, 2009). Statische Sensitivitätswerte erschweren die Verwendung eines Indizes außerhalb der Region, für die er entwickelt wurde, insbesondere wenn bestimmte dominante Arten entlang eines Umweltgradienten eine unterschiedliche Empfindlichkeit aufweisen (Zettler et al., 2013). Der Vielborster *Hediste diversicolor* gilt z. B. als tolerant in Gebieten der Ostsee mit hohem Salzgehalt. Mit sinkender Salinität nimmt die Sensitivität von *Hediste diversicolor* jedoch zu (Schiele et al., 2016). Um den BQI dahingehend zu entwickeln, dass er für die gesamte Ostsee einheitlich genutzt werden kann und gleichzeitig die abiotischen Gegebenheiten jedes Gebietes berücksichtigt, wurden die Sensitivitätswerte von Taxa, welche als Faktor in die Kalkulation des BQI eingehen, entlang von Umweltgradienten bestimmt (Schiele et al., 2016). Als Resultat entstanden für die gesamte Ostsee 19 ökologische Indikatorgruppen (Ecological Indicator Group, EIG), welche anhand der Faktoren Salinität, Wassertiefe und der verwendeten Beprobungsmethode (Probenahmeverfahren, Maschenweite der Siebe) aufgeteilt wurden. Der Sensitivitätswert pro Taxon wurde anschließend, soweit die Datengrundlage es zuließ, für jede EIG bestimmt (Schiele et al., 2016). Die Wassertiefe beschreibt indirekt die Salinität, da diese in der Ostsee, aufgrund der besonderen hydrologischen Bedingungen, mit der Tiefe zunimmt. Auch die Substratverhältnisse werden indirekt über die Salinität und die Wassertiefe mitberücksichtigt, da Schlick hauptsächlich in den tiefen Becken akkumuliert, während die Sandflächen in



den flachen Bereichen der Ostsee anzutreffen sind. Auch das Probenahmenvolumen und die Maschenweite, mit der das Makrozoobenthos extrahiert wird, sind wichtige Abtrennungsfaktoren, da diese, genau wie die Umweltparameter, die Anzahl der Arten, die gefunden werden, beeinflusst und damit den Indexwert mitbestimmen.

Wie schon für die Sensitivitätseinstufungen der Taxa, wurden innerhalb der HELCOM die GES-Schwellenwerte des BQI anhand der Umweltgradienten in der Ostsee abgestimmt. Zur Festlegung der GES-Schwellenwerte wurden zwei unterschiedliche Ansätze genutzt (HELCOM, 2017). Die vom Expertengruppe für benthische Lebensräume und Biotope (Expert Group on Benthic Habitats and Biotopes, EG-BENTHIC) abgestimmte HELCOM-Methode folgte dem finnischen Wasser-Rahmenrichtlinien (WRRL)-Ansatz. Hierfür wurde ein möglichst großer Datensatz aller Anrainerstaaten der Ostsee verwendet. Der Referenzwert, dies entspricht dem BQI-Wert bei dem ein ursprünglicher Umweltzustand ohne negativen anthropogenen Einflüsse angenommen wird, wurde auf den Median der obersten 10% aller BQI-Werte innerhalb eines EIG festgelegt. Das 10. Perzentil der obersten 10% wurde als Grenze zwischen den Umweltzuständen „sehr gut“ und „gut“ definiert. Darauf aufbauend wurden die BQI-Werte unterhalb der „sehr gut/gut“-Grenze in fünf gleich große Klassen gemäß der WRRL unterteilt. Die oberen beiden Klassen wurden als „gut“ definiert und der GES-Schwellenwert wurde zwischen der zweiten und dritten Klasse (gut zu mäßig) festgesetzt (HELCOM, 2017; Annex 3). Schweden hingegen nutzt für seine nationalen Schwellenwerte einen eigenen Ansatz, bei dem Stationen in Gebieten ohne oder mit geringen anthropogenen Belastungen als Referenzstandorte dienen. Für Gebiete für die keine unbelastenden Referenzstationen vorlagen wurden historische Daten verwendet. Die GES-Schwellenwerte wurden als das untere 20. Perzentil der Referenzstationen bzw. der historischen Daten pro Gebiet festgelegt (Leonardsson et al., 2009). Die Sensitivitätswerte wurden im schwedischen Ansatz anhand zwei verschiedener Methoden berechnet. Für die Westküste Schwedens erfolgte dies nach dem gleichen Vorgehen wie von Schiele et al. (2016) beschrieben. An der Ostküste Schwedens (Grenze liegt zwischen Öresund und Arkonabecken) wurden die Sensitivitätswerte dagegen anhand von Expertenwissen festgelegt (Leonardsson et al., 2009; HELCOM, 2017).

Im Arkona- und Bornholmbecken liegen GES-Schwellenwerte sowohl nach dem finnischen, als auch nach dem schwedischen Ansatz vor. Während der Schwellenwert-Abstimmung zwischen den Ostsee-Anrainerstaaten für das zuletzt von HELCOM entwickelte Konzept für die ganzheitliche Bewertung des Zustands der Ökosysteme der Ostsee (HELCOM Holistic Assessment of Ecosystem Health of the Baltic Sea, HOLAS II), konnte sowohl für das Arkona- als auch das Bornholmbecken keine Einigung in Bezug auf die Schwellenwerte erzielt werden (HELCOM, 2018). Ein Grund war die fehlende Vergleichbarkeit der Schwellenwerte zwischen dem Experten-basierten schwedischen Ansatz (ungestörte vs. gering gestörte Gebiete) und dem statistisch geprägten finnischen WRRL-Ansatz, in welchem die Schwellenwerte nicht nochmal gegenüber anthropogenen Störungen getestet wurden. Laut HELCOM (2017) sind die schwedischen, nationalen Schwellenwerte der nördlichen Teile des Arkona- und Bornholmbeckens wiederum nicht auf die südlichen Bereiche anwendbar, da die Umweltbedingungen zu unterschiedlich sind. Für Deutschland sind



somit nur für die Mecklenburger- und Kieler Bucht regionale Schwellenwerte auf HELCOM-Ebene abgestimmt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Die akzeptierten Schwellenwerten für die HELCOM-Bewertungseinheiten der Ostsee; die Schwellenwerte wurden anhand von zwei unterschiedlichen Ansätzen festgelegt, siehe Spalte „BQI species sensitivity value method“ ; Leonardsson et al. 2009 entspricht dem schwedischen Ansatz; Schiele et al. 2016 entspricht dem finnischen WRRL-Ansatz; Quelle: HELCOM (2018b)

| Open sea assessment unit | Assessed depths | Threshold value | | | | | | | | BQI species sensitivity value method |
|--------------------------|-----------------|--|------|------|---|---|-----------|------|----|--------------------------------------|
| | | Subset according to Schiele <i>et al.</i> 2016 | | | | | | | | |
| | | 2 | 3 | 4 | 8 | 9 | 11 | 12 | 13 | |
| Bothnian Bay | | 1.5 | | | | | | | | Leonardsson <i>et al.</i> 2009 |
| The Quark | | 1.5 | | | | | | | | |
| Bothnian Sea | | 4.0 | | | | | | | | |
| Åland Sea | | 4.0 | | | | | | | | |
| Northern Baltic Proper | <60 m | 4.0 | | | | | | | | |
| Western Gotland Basin | <60 m | 4.0 | | | | | | | | |
| Gulf of Finland | <60 m | | | | | | 0.93 | 1.07 | | Schiele <i>et al.</i> 2016 |
| Gulf of Riga | | | | | | | 1.59 1.07 | | | |
| Eastern Gotland Basin | <60 m | | | | | | 1.81 | 2.11 | | |
| Bay of Mecklenburg | | 7.22 | 5.44 | 4.52 | | | | | | |
| Kiel Bay | | 7.22 | 5.44 | 4.52 | | | | | | |

Nach wie vor ist es das Bestreben von Deutschland und HELCOM, einheitliche GES-Schwellenwerte pro EIG für die HELCOM-Becken zu erarbeiten. Mit der vorliegenden Studie sollen als Endprodukte Schwellenwerte für die BQI-Bewertung der Weichböden des Arkona- und Bornholmbeckens entstehen, die für die nächste nationale MSRL-Bewertung Deutschlands genutzt werden können und des Weiteren auch bei HELCOM für HOLAS 4 vorgeschlagen werden können. Zusätzlich sollen auch die Schwellenwerte der Kieler und Mecklenburger Bucht, die bereits bei HELCOM akzeptiert sind, auf ihre Eignung überprüft werden verlässlich zwischen guten und mäßigen Umweltbedingungen abzutrennen. Zur Erreichung dieser beiden Ziele werden verschiedene Ansätze der Schwellenwertsetzung neu getestet. Diese beinhalten die Definierung von Referenzgebieten pro EIG mit keinen bzw. geringen anthropogenen Störungen anhand von Belastungsdaten. Falls solche Referenzgebiete im jeweiligen EIG-Gebiet nicht vorkommen, wird nach historischen Daten geforscht, welche aus einem Zeitraum vor der zunehmenden Eutrophierung (vor 1960) stammen und für die BQI-Berechnung geeignet sind. Neben diesen Ansätzen die dem schwedischen Vorgehen entsprechen wird außerdem ein statistischer Ansatz angewendet, der dem finnischen Vorgehen ähnelt. Im Anschluss wird durch den Vergleich des BQI mit den verschiedensten Belastungsdaten die „alten“ als auch die „neu berechneten“ Schwellenwerte auf ihre Eignung hin überprüft, zwischen niedrigen



und hohen anthropogenen Störungen zu trennen. Der Ansatz bzw. die daraus resultierende Schwellenwerte, welche am besten in den verschiedenen EIG zwischen schädlichen und unschädlichen Umweltbedingungen trennen, werden am Ende für die MSRL-Bewertung empfohlen.

2 Vorgehensweise

2.1 Berechnung des BQI

Für die Berechnung des BQI wurden alle verfügbaren IOW eigenen Makrozoobenthos-Daten auf Hol-Ebene für die deutschen Meeresgebiete, von der Kieler Bucht im Westen bis zur Pommerschen Bucht im Osten, für die Jahre 2015 bis 2021 genutzt (Holdaten wurden erst ab 2015 in die Datenbank eingespeist). Um nur die Weichböden zu erfassen, wurden Stationen mit Grobsande und kiesigen Substrate (mittlere Korngröße > 500 µm oder Anteil Kies (2000 µm) > 30%) aus dem Datensatz entfernt. Damit wurden auch Stationen in die Bewertung aufgenommen, die nach der aktuell gültigen BHT-Karte (Marx et al. in prep.) auf Hartböden oder Mischsedimenten liegen. Aufgrund der hohen räumlichen Variabilität in den als Hartböden und als Grobsediment definierten Arealen ist es nicht ungewöhnlich, dass Sande und Schlicke mit ihren spezifischen Biotopgemeinschaften lokal anzutreffen sind. Diese Stationen sind vor allem deshalb wichtig, da einer der Hauptstressoren in der deutschen Ostsee, die bodenberührende Fischerei, in den Riffbereichen lokal teilweise nicht auftritt. Unbelastete Sande- und Schlickstationen sind damit besonders in dem BHT Hartböden anzutreffen. Da für die Berechnung des BQI nur Daten mit der gleichen Beprobungsmethode verwendet werden können, wurden alle Proben aus dem Datensatz entfernt, die nicht mit dem Van Veen-Bodengreifer (0,1 m²) genommen und nicht über eine Maschenweite von 1 mm gesiebt worden waren. Pro Station werden standardmäßig drei Hols für die Bestimmung der endobenthischen Besiedlung und ein Hols für die Bestimmung des Substrattyps (Korngrößenverteilung und organischer Gehalt) durchgeführt. Abweichend davon werden je nach Ziel und Zweck der Probenahme zwischen 1 bis 5 Hols pro Station für die endobenthische Besiedlung beprobt. Es wurden alle zur Verfügung stehenden Hols pro Station verwendet. Fixiert wird die Makrozoobenthos-Probe mit einem 4%-igen Formalin-See-wasser-Gemisch. Nach der Prozessierung des Datensatzes flossen am Ende 1693 Hols von der gesamten deutschen Ostsee in die Auswertung ein. Die Berechnung des BQI erfolgte nach Gleichung 1 gemäß Leonardsson et al.

(2009).

$$BQI = \left(\sum_{i=1}^{S_{classified}} \left(\frac{N_i}{N_{classified}} \times ES_{50,05i} \right) \right) \times \log_{10}(S + 1) \times \left(\frac{N_{total}}{N_{total} + 5} \right)$$

Gleichung 1:

Dabei entspricht S der Gesamtartenzahl, $S_{classified}$ der Anzahl der Arten für die ein Sensitivitätswert existiert, N_i die Zahl der Individuen von Art i , $N_{classified}$ die Summe der Individuen pro Hol für die ein Sensitivitätswert vorhanden ist und N_{total} die Summe aller Individuen auf der beprobten Fläche. Der ES_{50} entspricht



der erwarteten Anzahl an Taxa (ES = expected number of species) von 50 zufällig gewählten Individuen einer Beprobungsfläche. Der $ES_{50,0,5i}$ ist der Sensitivitätswert für die Art i gemäß Schiele et al. (2016). Er entspricht dem unteren 5%-Perzentil aller für dieses Taxon ermittelten ES_{50} -Werte (Rosenberg et al., 2004). Der Sensitivitätswert wird damit aus der Abundanz der Arten in einem ökologisch ähnlichem Gebiet (also innerhalb eines EIG) berechnet, welches nach der Salinität, der Wassertiefe und der Beprobungsmethode abgetrennt wurde (Rosenberg et al., 2004; Schiele et al., 2016). Für die BQI-Berechnung muss zur Nutzung des richtigen Sensitivitätswertes pro Taxon den Stationen zunächst das entsprechende EIG zugewiesen werden.

2.2 Zuweisung der deutschen Ostseefläche zu den EIG

Nach einer Empfehlung von HELCOM soll für die Zuordnung der Stationen zu dem entsprechenden EIG, gemäß den definierten Grenzen aus Schiele et al. (2016), eine modellierte Salinität und Wassertiefe verwendet werden (HELCOM, 2018). Und zwar für die Salinität die EUSeaMap Version von 2016 (EUSeaMap, 2016; Rasterdatensatz). Hintergrund dieser Empfehlung ist, dass durch eine standardisierte Salinität pro Standort vermieden wird, dass Dauerstationen, zu unterschiedlichen Zeiten beprobt, in verschiedene EIG fallen. Eine vergleichende Untersuchung zur Nutzung von modellierten versus tatsächlich gemessenen Salinitäts- und Wassertiefenwerten für die Festlegung der EIG pro Station hat ergeben, dass mit den modellierten Werten eine z. B. bessere Abtrennung von sandigen und schlickigen Substraten im östlichen Bereich des Arkonabeckens erreicht wird. Das mit den tatsächlich gemessenen Werten Stationen zwischen den Jahren in unterschiedliche EIG fallen, hat sich bestätigt insbesondere, wenn die Salinität an den von Schiele et al. (2016) definierten Grenzen liegt und die Nachkommastelle entscheidet in welches EIG die jeweilige Station fällt. Aus ökologischer Sicht macht die Nutzung von modellierten und damit mittleren Salinitätswerten dahingegen Sinn, da kurzfristige Ab- oder Zunahmen der Salinität um wenige psu die Gemeinschaft nicht wesentlich ändern. Anhand dieser Ergebnisse einer Voruntersuchung, wurde für diese Studie die modellierte mittlere Bodensalinität von R. Friedland (IOW) genutzt (Abbildung 1). Berechnet mit dem GETM/ERGOM-Modell mit IOW-Salinitätsdaten von 2010 bis 2017, weist dieses eine sehr viel höhere räumliche Auflösung (0,8 x 0,8 km) auf als die EUSeaMap 2016 (4,6 x 4,6 km). Für die modellierte Wassertiefe wurde die Bathymetrie des BSH (BSH 2012) verwendet (Abbildung 1). Mit der Bathymetrie und den modellierten mittleren Salinitätswerten wurden die Gebiete für die EIG der südlichen Ostsee anhand der Grenzen von Schiele et al. (2016) (Tabelle 2) mit dem Programm ArcGIS Desktop (Version 10.8.1) definiert (Abbildung 2). Für die deutsche Ostsee sind fünf der von Schiele et al. (2016) definierten 19 EIG (EIG 2 bis 6; Tabelle 2; Abbildung 2) relevant.



Tabelle 2: Abgrenzung der für die deutsche Ostsee relevanten EIG (Ecological Indicator Group) nach Schiele et al. (2016) gemäß Salinität, Wassertiefe und Beprobungsmethoden

| EIG | Region | Salinität | Wassertiefe [m] | Beprobungsfläche [m ²] | Maschenweite der Siebe [mm] |
|-----|--------|-----------|--------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| 2 | Süd | 18-30 | Flacher als 20m | 0,1 | 1 |
| 3 | Süd | 18-30 | Tiefer als 20m | 0,1 | 1 |
| 4 | Süd | 10-18 | Keine Unterteilung | 0,1 | 1 |
| 5 | Süd | 7,5-10 | Keine Unterteilung | 0,1 | 1 |
| 6 | Süd | 5-7,5 | Keine Unterteilung | 0,1 | 1 |

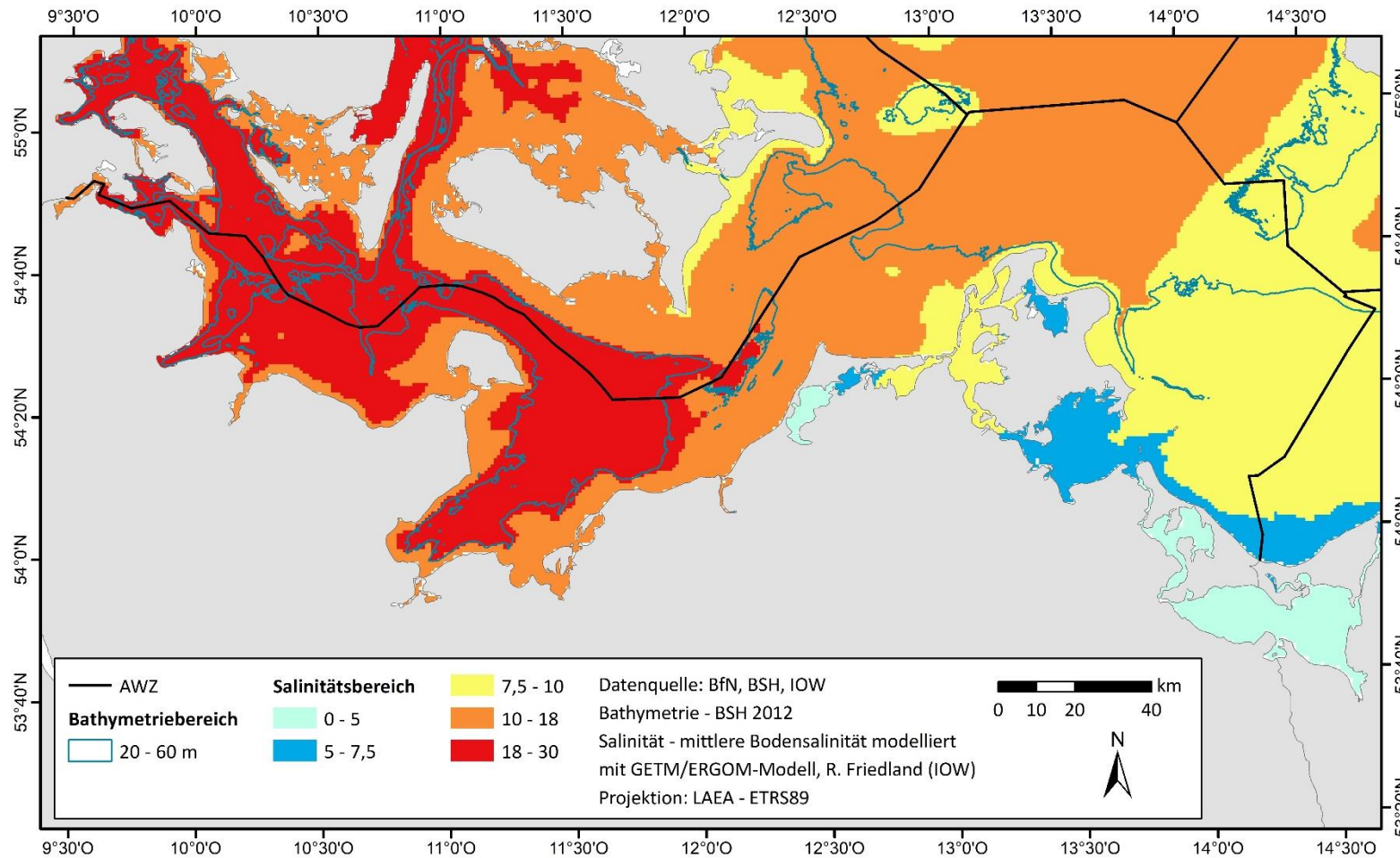


Abbildung 1: Bathymetrie- (BSH, 2012) und Salinitätsbereiche (modellierte mittlere Bodensalinität, R. Friedland, IOW) gemäß Schiele et al. 2016, wonach die EIG-Flächen in Abbildung 2 definiert wurden

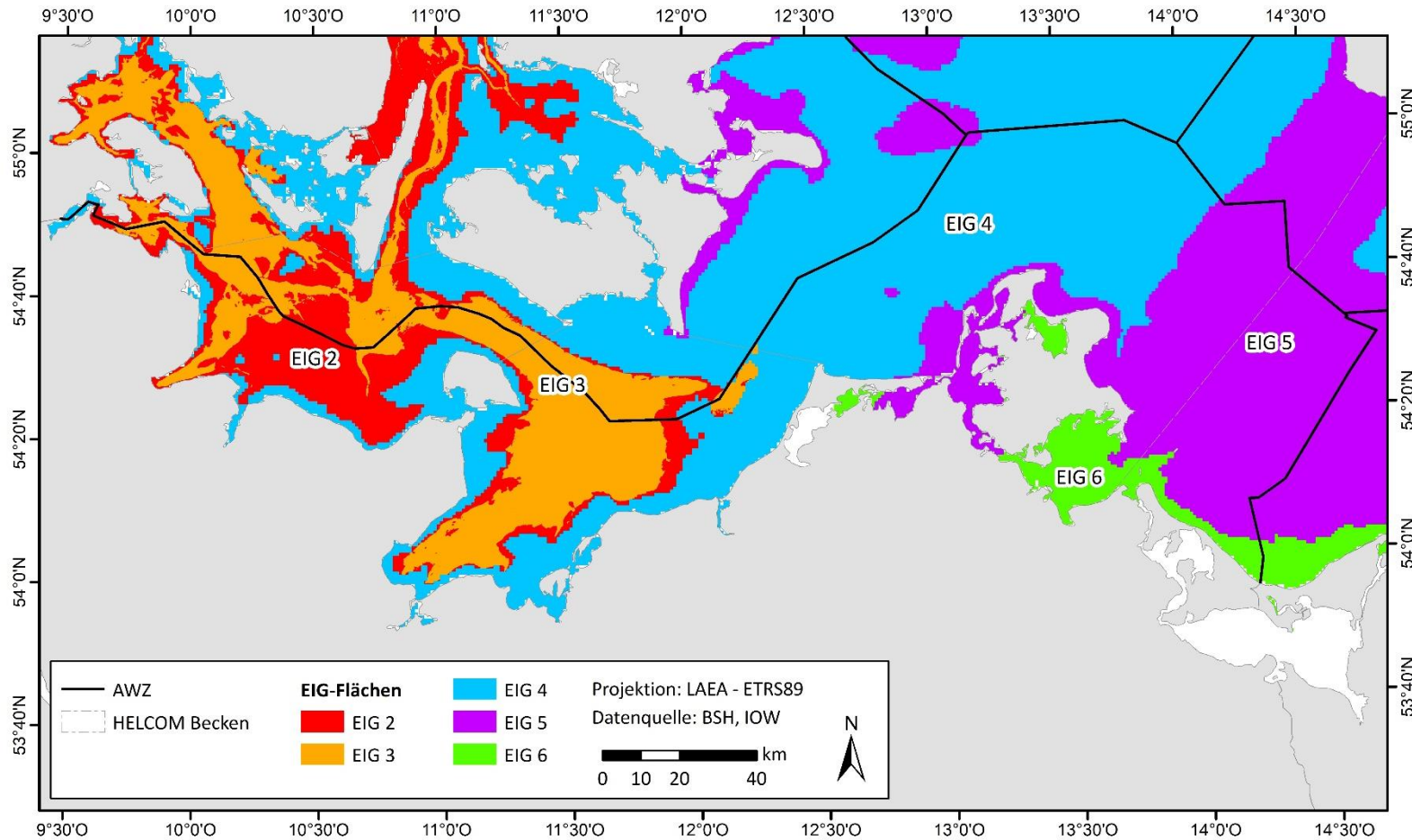


Abbildung 2: Die Zuordnung der deutschen Ostseefläche zu den EIG (Ecological Indicator Group) gemäß modellierten mittleren Bodensalinität (R. Friedland, IOW) und Bathymetrie (BSH 2012)



2.3 Neubewertung des EIG 4-Gebiets

Das EIG 4-Gebiet reicht, nach den von Schiele et al. (2016) definierten Grenzen (10-18 psu, keine Unterteilung nach der Wassertiefe), von den sandigen Flachwasserbereichen der Kieler- und Mecklenburger Bucht bis zu den tiefen schlickigen Arealen des Arkonabeckens (Abbildung 2). Voruntersuchungen zeigten, dass die Größenverteilung der berechneten BQI-Werte innerhalb des EIG 4-Gebiets nicht gleichmäßig ist. Um diese ungleichmäßige Größenverteilung nochmals genauer zu überprüfen, wurde für das EIG 4-Gebiet ein größerer Datensatz, als für die Berechnung der Schwellenwerte verwendet wurde, ausgewertet (IOW- und Fremddaten; Zeitraum 2002 – 2021). In diesem Datensatz liegen die Abundanzdaten nicht auf Holo-Ebene, sondern nur auf Stationsebene (Mittelwerte der Hols) vor. Standardmäßig wird der BQI mit Holo-daten berechnet und eine Kalkulation mit Stationsdaten führt zu leicht höheren BQI-Werten (für mehr Information siehe Kapitel 2.8). Da in dieser Betrachtung jedoch nur die relative Größenverteilung der BQI-Werte im EIG 4-Gebiet von Interesse ist, und die absoluten Werte nicht weiterverwendet werden, ist die Nutzung von Stationsdaten hierfür zweckmäßig. Abbildung 3 stellt die BQI-Werte dieses größeren Datensatzes farblich abgestuft nach Größenstufe für das EIG 4-Gebiet dar. Die höchsten BQI-Werte liegen fast ausschließlich westlich der Darßer Schwelle, während niedrige BQI-Werte im gesamten EIG 4-Gebiet vorkommen. Wenn die Schwellenwerte anhand des gesamten EIG 4-Gebiets berechnet werden, führt dies dazu, dass der Zustand des Benthos östlich der Darßer Schwelle schlechter bewertet wird, als dies tatsächlich der Fall ist. Daher sollte in Betracht gezogen werden, dass EIG 4-Gebiet in ein westliches Gebiet, das die flachen küstennahen Bereiche in der Kieler- und Mecklenburger Bucht beinhaltet, und in ein östliches Gebiet, welches die tiefen, schlickigen Bereiche des Arkonabeckens umfasst, zu trennen. Auch die Substratverteilung spricht für eine Unterteilung des EIG 4-Gebiets. Die zugrundeliegenden Substrattypen an den BQI-Stationen des erweiterten Datensatzes zeigt, dass die Stationen der Kieler- und Mecklenburger Bucht als auch des Plantagenetgrunds dem Substrattyp Sand zuzuordnen sind (Abbildung 4). Die Stationen in den tiefen Bereiche des Arkonabeckens gehören fast ausschließlich zum Schlick. Um konsistent mit dem Vorgehen von Schiele et al. (2016) zu sein, wird empfohlen das EIG 4-Gebiet an der 20m Wassertiefe (in Abbildung 3 und Abbildung 4 eingezeichnet) in ein EIG 4a (> 20m) und EIG 4b (< 20m) zu trennen. Die damit einhergehende Änderung in der Zuweisung der deutschen Ostseefläche zu den EIG-Gebieten ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Trennung des EIG 4-Gebiets erfolgt damit einerseits am Übergang zwischen dem Plantagenetgrund und dem Arkonabecken und umfasst andererseits die tiefen Bereiche der Kadetrinne.

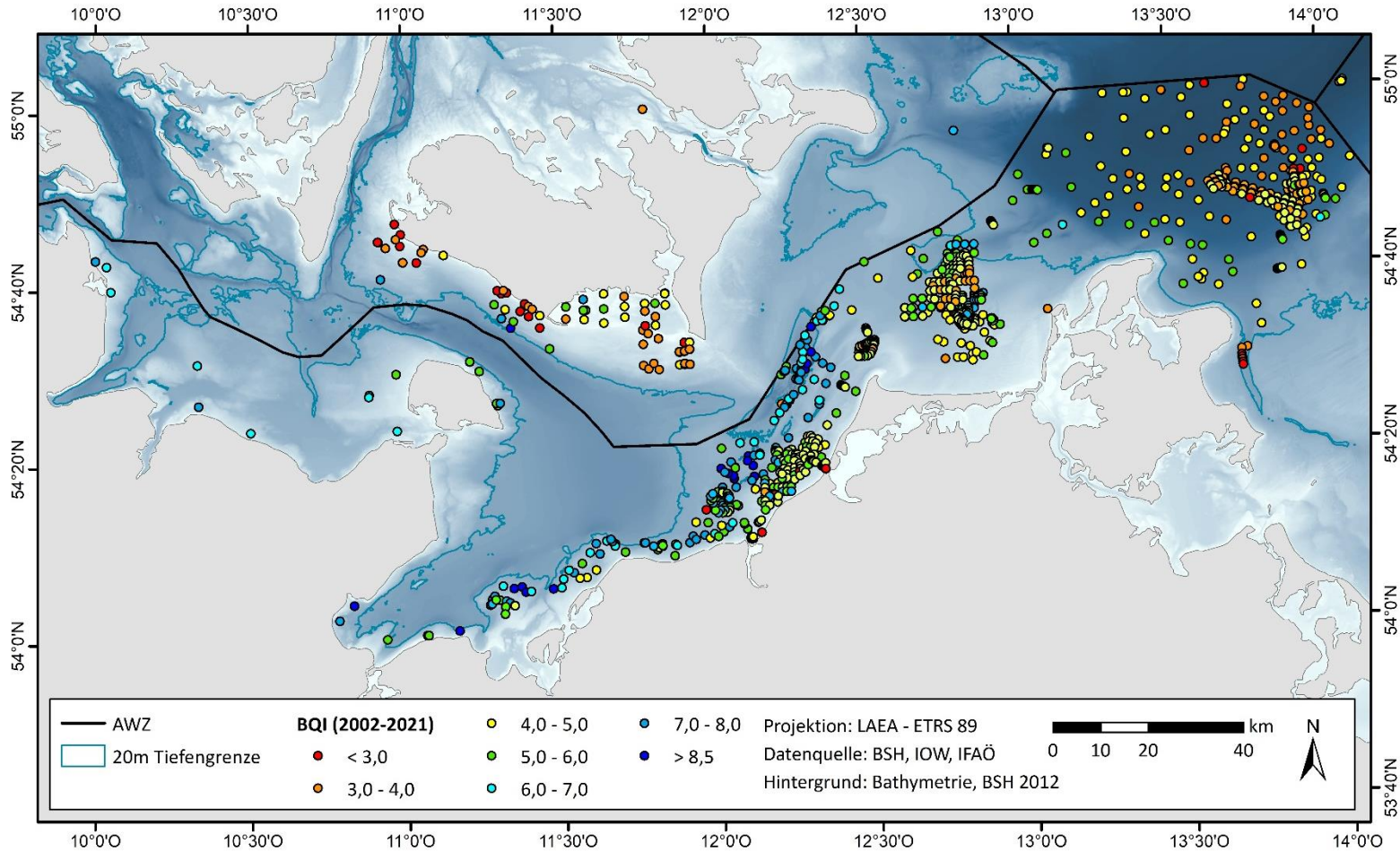


Abbildung 3: BQI-Werte im EIG 4-Gebiet nach Größenklassen farblich unterteilt; BQI berechnet mit Stationsdaten aus einem größeren Datensatz (2002-2021)

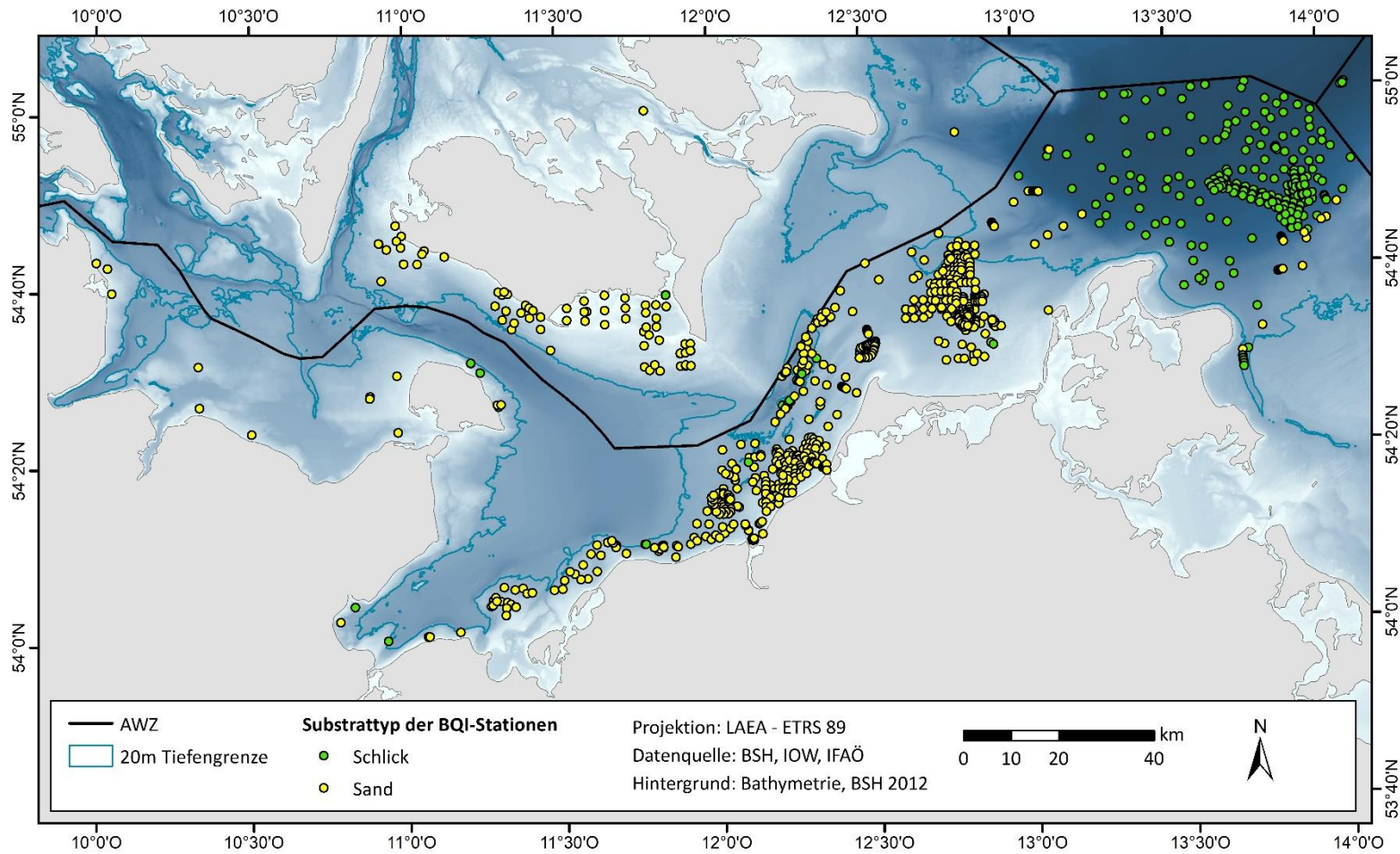


Abbildung 4: Substrattyp der für die EIG 4-Gebietsneubewertung betrachteten BQI-Stationen

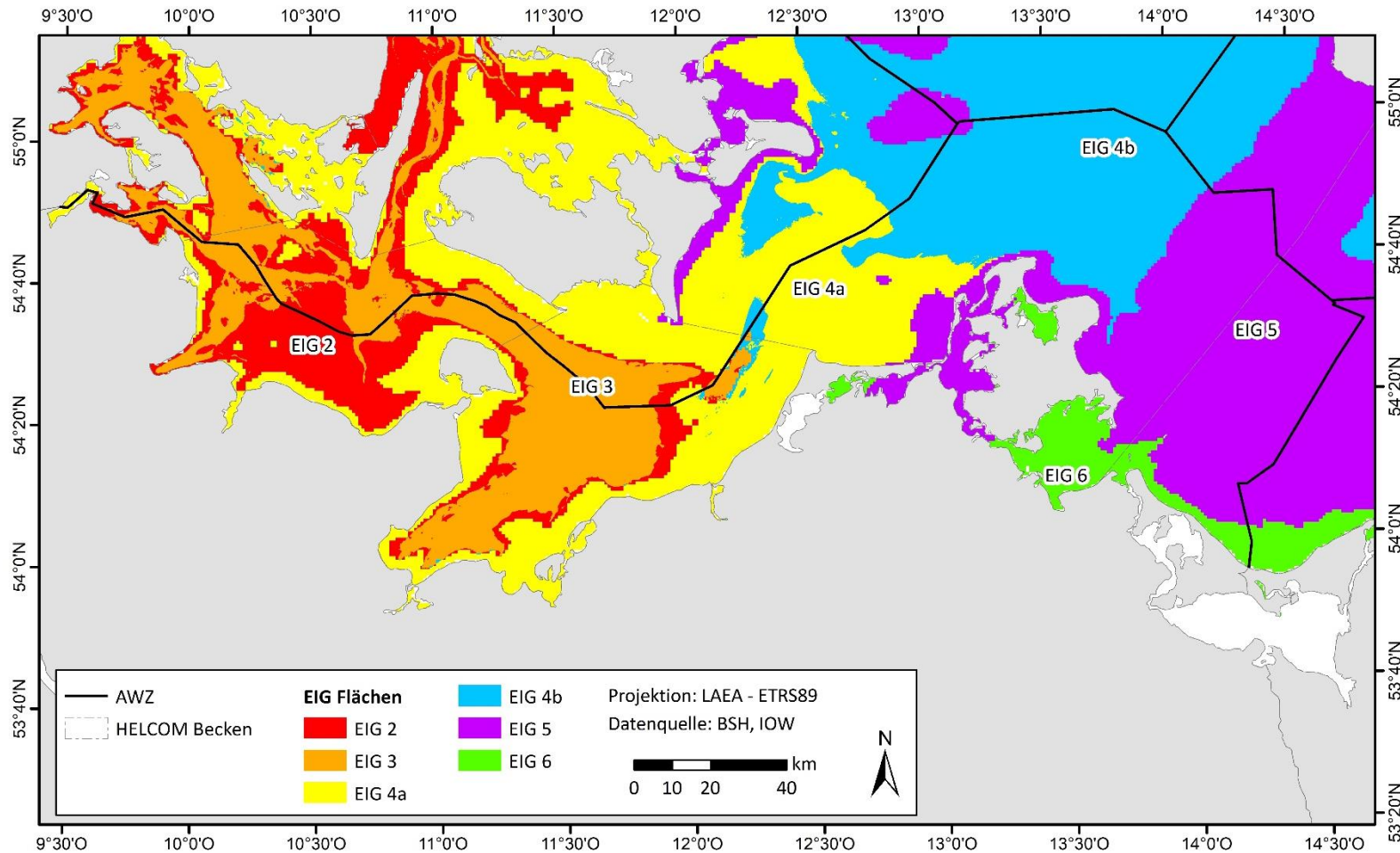


Abbildung 5: Die Zuordnung der deutschen Ostseefläche zu den EIG (Ecological Indicator Group) gemäß modellierten mittleren Bodensalinität (R. Friedland, IOW) und Bathymetrie (BSH 2012) mit der Trennung des EIG 4-Gebiets in EIG 4a und EIG 4b an der 20m Tiefengrenze



2.4 Resultierende Datengrundlage für die Berechnung des BQI

Mit den definierten EIG-Flächen (Kapitel 2.3) wurde den zur Verfügung stehenden Stationen die entsprechende EIG zugewiesen und die BQI-Werte pro Hol berechnet (Kapitel 2.1). Insgesamt wurden 1693 Hols für die Berechnung der BQI-Werte genutzt. Davon fallen 225 Hols in EIG2, 442 Hols in EIG3, 322 Hols in EIG 4a, 263 Hols in EIG 4b, 439 Hols in EIG 5 und 2 Hols in EIG 6. In Tabelle 3 wird für die in der deutschen Ostsee relevanten EIG, inklusive der empfohlenen Trennung von EIG 4 in EIG 4a und EIG 4b, nochmals die quantitative Datengrundlage aufgelistet sowie die „alten“ Schwellenwerte von HELCOM pro Bewertungseinheit dargestellt. Die rot markierten Schwellenwerte sind regional nicht akzeptiert worden (siehe Kapitel 1). In Abbildung 6 bzw. Abbildung 7 sind die für diese Studie verwendeten Stationen räumlich abgebildet und auf dem Hintergrund der EIG bzw. BHT dargestellt. Für alle EIG bis auf EIG 6 stehen genug Hols für eine Neuberechnung der Schwellenwerte zur Verfügung. Für EIG 6 mit 2 Hols ist die Datengrundlage für eine Überprüfung des vorhandenen bzw. eine Neuberechnung eines Schwellenwerts zu gering. Da die EIG 6-Fläche (siehe Abbildung 6) jedoch nur einen kleinen Randbereich des Bornholmbeckens ausmacht, ist eine MSRL- bzw. HOLAS-Bewertung dieser beiden Becken ohne EIG 6-Stationen möglich.

Mit der Einstufung nach Schiele et al. (2016) in die EIG wird das Substrat nicht direkt berücksichtigt. Durch die Beachtung der Wassertiefe in der Kieler- und Mecklenburger Bucht und der Salinität und damit indirekt der Wassertiefe im Arkona- und Bornholmbecken, findet jedoch eine grobe Trennung zwischen den tieferliegenden, schlickigen Bereichen und den flachen, sandigen Arealen statt (Abbildung 7). Die Trennung des EIG 4-Gebiets an der 20m Wassertiefe verbessert zusätzlich die indirekte Trennung der Substrate Sand und Schlick. Eine weitere Unterteilung der EIG nach dem dominierenden Substrattyp ist vermutlich weniger sinnvoll, da dadurch zu wenig Stationen pro EIG zur Verfügung stehen würden, um verlässliche Schwellenwerte zu ermitteln. Mit einer zunehmenden Verfügbarkeit an Daten und räumlich hochauflösenden Informationen zur Substratverteilung, könnte der Versuch, die Substrate zu berücksichtigen, in der Zukunft nochmal aufgegriffen werden.

Tabelle 3: Die für die deutsche Ostsee relevanten EIG (Ecological Indicator Group; gemäß Schiele et al. 2016 mit Änderungen an EIG 4) mit den GES (Good Environmental Status)-Schwellenwerte für den BQI (Benthic Quality Index) der jeweilige Bewertungseinheit (HELCOM (2017)) und die Anzahl der für diese Studie genutzten Stationen bzw. Hols pro EIG; Die rot markierten GES-Schwellenwerte sind für die jeweils rot markierten Bewertungseinheiten regional nicht akzeptiert worden

| Schiele et al. (2016) | | | HELCOM (2017) | | Diese Studie | |
|-----------------------|-----------|--------------------|--------------------|--|--------------|------|
| EIG | Salinität | Wassertiefe [m] | GES-Schwellenwerte | Bewertungseinheit | Stationen | Hols |
| 2 | 18-30 | Flacher als 20m | 7,22 | Kieler- und Mecklenburger Bucht | 84 | 225 |
| 3 | 18-30 | Tiefer als 20m | 5,44 | Kieler- und Mecklenburger Bucht | 212 | 442 |
| 4a | 10-18 | Flacher als 20m | 4,52/4,52 | Kieler- und Mecklenburger Bucht, Arkonabecken | 123 | 322 |
| 4b | 10-18 | Tiefer als 20m | 4,52/4,52 | Mecklenburger Bucht, Arkonabecken | 131 | 263 |
| 5 | 7,5-10 | Keine Unterteilung | 2,69 | Arkona- und Bornholmbecken | 176 | 439 |
| 6 | 5-7,5 | Keine Unterteilung | 2,71 | Bornholmbecken | 2 | 2 |

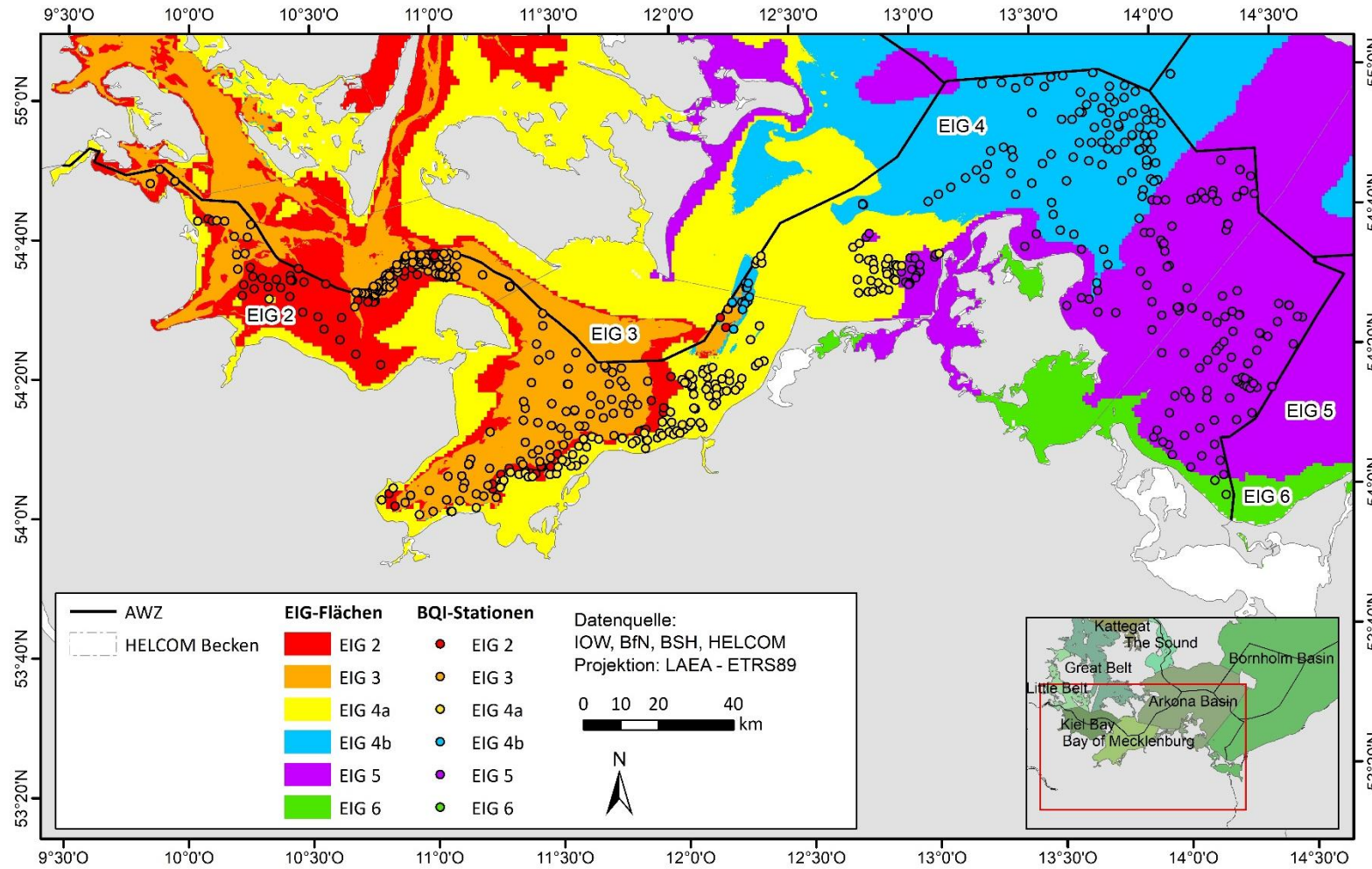


Abbildung 6: Lage der für diese Studie genutzten Stationen (Zeitraum 2015-2021) pro EIG (Ecological Indicator Group), auf dem Hintergrund der angepassten EIG-Flächen

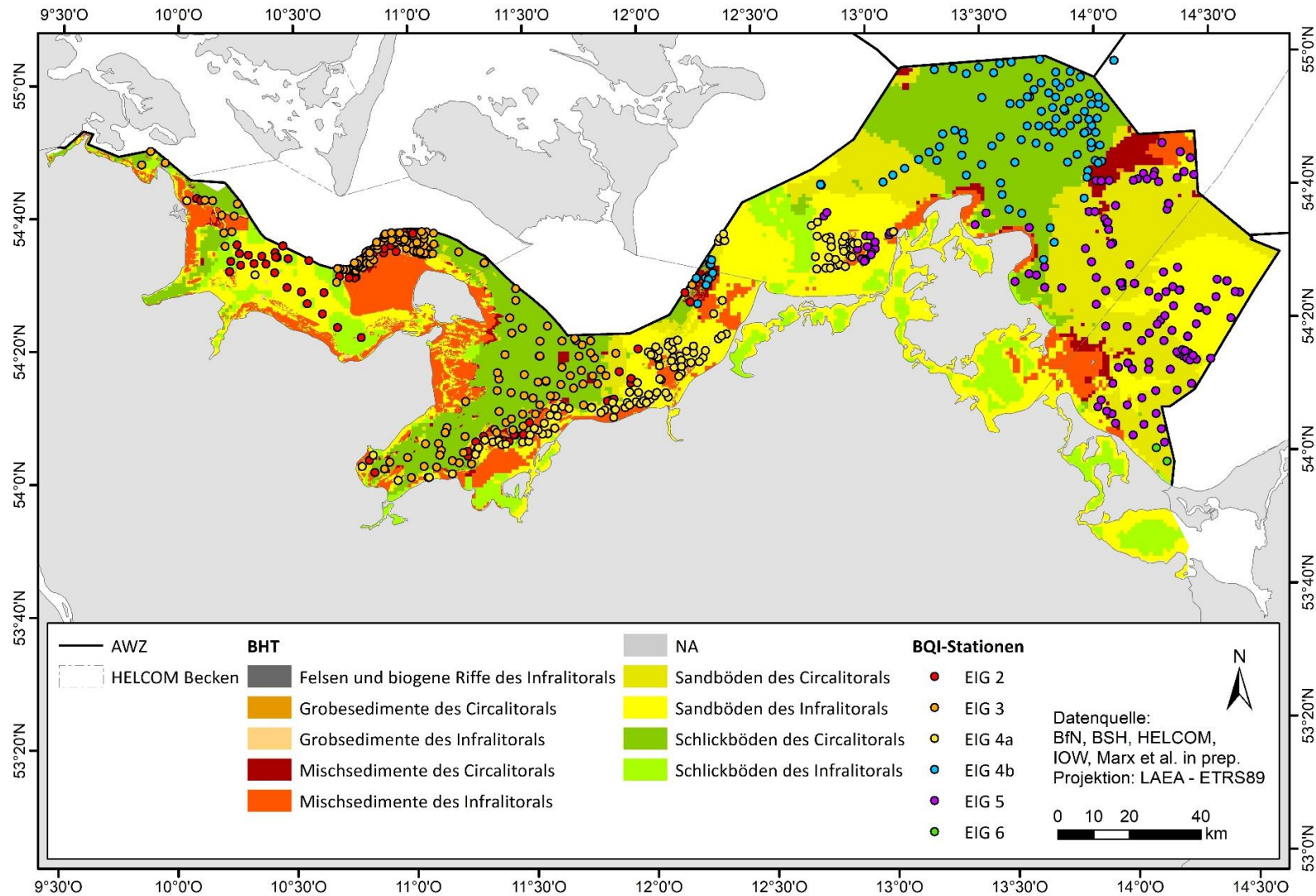


Abbildung 7: Lage der für diese Studie genutzten Stationen (Zeitraum 2015-2021) pro EIG (Ecological Indicator Group), auf dem Hintergrund der BHT (Board Habitat Types, Biotopklassen; Marx et al. in prep.)



2.5 Ansätze der Schwellenwertberechnung

Für jedes EIG werden, mithilfe der berechneten BQI-Werte pro Hol, welche in der entsprechenden EIG-Fläche liegen, verschiedene Schwellenwerte anhand der Ansätze 1 bis 4 berechnet:

- **Ansatz 1)** Pro EIG nur Referenzstationen; Holdaten Bootstrappen (100.000-mal mit zurücklegen); das mittlere 20. Perzentile entspricht dem Schwellenwert

Für die Berechnung des Schwellenwerts nach Ansatz 1 werden nur Referenzstationen genutzt. Diese Referenzstationen entsprechen Stationen die auf Flächen liegen, die anhand von Belastungsdaten mit keinen bis geringen anthropogenen Störungen bewertet wurden (siehe Kapitel 2.7).

Um räumliche und zeitliche Ungleichheiten zwischen den Stationen auszugleichen, wurde das Bootstrapping-Verfahren gemäß den Vorgaben von HELCOM (2018b) genutzt. Dies wird als Sicherheits-Methode empfohlen, um Werte mit einer hohen Unsicherheit mit einem niedrigeren Stellenwert zu versehen (Carstensen, 2007; Leonardsson et al., 2009). Für die vorliegende Studie ist die Nutzung dieses Verfahrens dahingehend sinnvoll, da für jede Station ein oder mehrere Hols und teilweise auch mehrere Beprobungsjahre zur Verfügung stehen und die auch genutzt werden sollen. Durch diese statistische Methode nehmen Stationen mit nur einem Hol an Gewichtung ab. Bei dem Bootstrapping-Verfahren wird innerhalb einer zufällig gewählten Station der BQI einer zufällig gewählten Probe (Jahr und Hol willkürlich) gezogen. Dies wird so oft wiederholt wie es Stationen gibt (mit Zurücklegen). Aus allen zufällig gewählten BQI-Werten wird das 20. Perzentil berechnet. Diese Schritte werden 100.000-mal wiederholt. Als Resultat entstehen 100.000 20. Perzentile, von denen der Mittelwert berechnet wird.

Nach Ansatz 1 entspricht somit das mittlere 20. Perzentil aller gebootstrappten Referenzstationen dem Schwellenwert. Das 20. Perzentil (untere Konfidenzgrenze) wurde aufgrund folgender Überlegungen gewählt: An unbelasteten Stationen sollte die Makrozoobenthosgemeinschaft theoretisch in einem guten Zustand vorliegen. Allerdings gibt es aufgrund weitläufiger Umweltveränderungen in der Ostsee (z.B. Eutrophierung) kaum noch wirklich unbelastete Gebiete. Weiterhin können auch durch natürliche Umwelteinflüsse (z.B. Fraßdruck, Sturm) Beeinträchtigungen der Gemeinschaft selbst in anthropogen relativ unbelasteten Gebieten auftreten. Das Konfidenzintervall schätzt die natürliche Variation der BQI-Werte in einem unbelasteten Gebiet einschließlich natürlicher Störungen. Je unterschiedlicher die Makrozoobenthoszusammensetzung zwischen den genutzten Stationen, desto breiter ist das Konfidenzintervall. Wichtig ist dabei, sich in einer Ökoregion zu bewegen, in der die ökologischen Bedingungen welche die Zusammensetzung des Makrozoobenthos maßgeblich bestimmen relativ ähnlich sind (van Loon et al., 2018). Diese Anforderung ist mit der Verwendung der EIG in Bezug auf die Salinität und indirekt über die Salinität und Wassertiefe auch auf das Substrat gegeben. Anstatt das BQI-Minimum aller Referenzstationen pro EIG als Schwellenwert zu setzen wird das 20. Perzentil als Schwellenwert festgelegt. Damit werden



die niedrigsten 20% aller BQI-Werte einer wenig belasteten Referenzfläche als im nicht ursprünglichen Zustand bestimmt. Dieser Ansatz wird als "ausfallsicher" bezeichnet (Leonardsson et al., 2009) und wurde von Carstensen (2007) empfohlen. Der resultierende Schwellenwert hängt von der Datengrundlage ab. Die Daten sollten möglichst einen längeren Zeitraum, sowie die häufigsten Substrattypen repräsentativ erfassen um alle natürliche Änderungen der Umwelt in der entsprechenden Ökoregion abzudecken.

- **Ansatz 2)** Pro EIG Historische Daten; Daten Bootstrappen (100.000-mal mit zurücklegen); das mittlere 20. Perzentile entspricht dem Schwellenwert

Wenn für ein EIG keine Referenzflächen vorliegen, können eventuell historische Daten aus der Zeit vor der zunehmenden Eutrophierung der Ostsee (vor den 50er Jahren (Andersen et al., 2017)) herangezogen werden (siehe Kapitel 2.8). Hierfür kommen nur Untersuchungen in Betracht, welche Angaben zur Abundanz der Makrozoobenthosarten geben, die annähernd eine Fläche von 0,1 m² beproben und mit einem Sieb mit einer Maschenweite von 1 mm vom Substrat getrennt wurden. Das Bootstrapping-Verfahren wird nicht eingesetzt, da von den verwendeten historischen Daten nur jeweils ein BQI-Wert pro Station vorliegt und die Stationen damit bereits gleichwertig gewichtet sind. Der Schwellenwert entspricht wie bei Ansatz 1 dem 20. Perzentil der verwendeten historischen Daten.

- **Ansatz 3)** Pro EIG Referenzstationen und historische Daten zusammen; Daten Bootstrappen (100.000-mal mit zurücklegen); das mittlere 20. Perzentile entspricht dem Schwellenwert

Wenn für ein EIG sowohl Referenzstationen als auch historische Daten zur Verfügung stehen, macht es Sinn, diese in einen Datensatz zu vereinen und davon den Schwellenwert nach dem Vorgehen von Ansatz 1 (Bootstrappen; mittlere 20. Perzentil entspricht Schwellenwert) zu berechnen

- **Ansatz 4)** Pro EIG alle verfügbaren Hol-Werte mit Maximum/99. Perzentil/95. Perzentil normieren, damit zwischen 0 und 1 skalieren – Schwellenwert bei 0,6 setzen (WRRL-Schwelle zwischen „gutem“ und „mäßigen“ Zustand)

Dieser Ansatz ist eine rein statistische Methode, bei der alle zur Verfügung stehenden Stationen pro EIG genutzt werden. Alle BQI-Werte werden durch den im jeweiligen EIG-Gebiet höchsten BQI-Wert normalisiert. Damit werden alle BQI-Werte zwischen 0 und 1 skaliert. Der Schwellenwert wird dann auf denjenigen BQI-Wert festgelegt, der auf 0,6 fällt. Damit hängt der Schwellenwert im Wesentlichen vom höchsten BQI im betreffenden EIG ab. Da bei diesem Ansatz Ausreißer, mit überdurchschnittlich guten Zuständen, möglicherweise zu unrealistisch hohen Schwellenwerten führen könnten, wurde neben dem BQI-Maximum auch das 95. und 99. Perzentil für die Normierung getestet.



2.6 Datennutzung zu anthropogenen Belastungen des Meeresbodens

Daten zu anthropogenen Belastungen wurden in dieser Studie für zwei Zwecke verwendet. Einerseits zur Abgrenzung von Referenzflächen (siehe Kapitel 2.7) um schließlich Referenzstationen zu definieren und die Schwellenwerte nach Ansatz 1 und gegebenenfalls nach Ansatz 3 mit diesen zu berechnen. Andererseits werden die anthropogenen Belastungsdaten genutzt um die „alten“ (HELCOM, 2017) und „neuen“ (nach Ansatz 1 bis 4) Schwellenwerte auf ihre Eignung zu überprüfen niedrige von hohen Belastungsdaten zu trennen. In Tabelle 4 sind alle in dieser Studie verwendeten anthropogenen Belastungsdaten mit detaillierten Informationen aufgeführt. Im Folgenden werden diese kurz beschrieben:

Der Parameter organischer Gehalt (orgG) wurde direkt pro Station aus dem Sedimenthol als Glühverlust ermittelt und ist damit der einzige direkt gemessene Belastungsparameter. Die Parameter zur Eutrophierung (Gesamtkohlenstoff = TOC, Gesamtstickstoff = TN, Gesamtphosphor = TP, Mobiler Phosphor = mobilerP) und Schwermetallbelastung (Blei = Pb, Arsen = As, Quecksilber = HG) der Sedimente stammen von Leipe et al. (2017). Diese wurden anhand von 600 bis 800 analysierten Sedimentproben aus der südwestlichen Ostsee aus dem Zeitraum 2000 bis 2013 und weiteren Umweltdaten mit dem GETM hydrodynamischen Modell und dem ERGOM-Ökosystemmodell in die Fläche modelliert (Leipe et al., 2017). Als Parameter für Hypoxie bzw. Sauerstoff (O₂)-Versorgung wurde von R. Friedland (IOW), ebenfalls mit dem GETM und ERGOM-Modell, die Anzahl der Tage und auch die Anzahl der Phasen von mindestens 7 Tagen am Stück, an denen die Sauerstoffkonzentration in dem bodennahen Wasser unter 2 mg/l fällt, für den Zeitraum von 12 Monaten vor der Probenahme des entsprechenden Datenpunkts, ermittelt. Um den Fischereidruck in den 12 Monaten vor der Probenahme pro Datenpunkt zu berechnen, wurden Daten zur bodenberührenden Fischerei von HELCOM aus dem Zeitraum 2014 bis 2021 verwendet. Die Fischereidaten werden in der Einheit Swept Area Ratio (SAR) pro Jahr angegeben. Dies entspricht der Schleppnetz-berührenden Gesamtfläche pro Größe der verwendeten Gitterzelle. Der HELCOM Kernindikator „Cumulativ Impact on benthic biotops“ (CumI) integriert mehrere anthropogene physikalische Störungen, die auf den Meeresboden wirken und berücksichtigt dabei die Sensitivität der verschiedenen Biotope (Resistenz und Resilienz; Biotope werden in Form der BHT erfasst) (HELCOM, 2021). Folgende Störungen sind im CumI zusammengefasst: Grundsleppnetzfischerei, Marikultur, Gewinnung und Entsorgung von Sediment (Abbaggerung, Verklappung), Bau und Betrieb von Pipelines, Kabeln, Plattformen und Windparks, Küstenschutz und Schifffahrt. Der CumI prognostiziert die kumulativen Auswirkungen dieser Mehrfachbelastungen.

**Tabelle 4: Anthropogene Belastungsdaten**

| Parameter | Abkürzung | Einheit | Quelle | Anmerkung |
|---|------------------------------|---------------|---------------------------------|--|
| Organischer Gehalt | orgG | Gewichts-% | gemessen | entspricht Glühverlust der Trockenmasse; Anteil des Sediments; |
| Gesamter organischer Kohlenstoff | TOC | Gewichts-% | modelliert (Leipe et al., 2017) | Anteil des Sediments (Gesamtfraktion) |
| Gesamtstickstoff | TN | Gewichts-% | modelliert (Leipe et al., 2017) | Anteil des Sediments (Gesamtfraktion) |
| Gesamtphosphor | TP | Gewichts-% | modelliert (Leipe et al., 2017) | Anteil des Sediments (Gesamtfraktion) |
| Mobiler Phosphor | mobilerP | Gewichts-% | modelliert (Leipe et al., 2017) | Anteil des Sediments (Gesamtfraktion) |
| Anzahl Tage an denen O ₂ -Konzentration < 2 mg/l | Tage O ₂ < 2 mg/l | Anzahl Tage | modelliert (R. Friedland, IOW) | O ₂ -Gehalt im Wasser über dem Meeresboden; Anzahl der Tage in den 12 Monaten vor der Probenahme |
| Phasen von mindestens 7 Tage am Stück in denen O ₂ -Konzentration < 2 mg/l | Hypoxieereignisse | Anzahl Phasen | modelliert (R. Friedland, IOW) | O ₂ -Gehalt im Wasser über dem Meeresboden; Anzahl der Phasen in den 12 Monaten vor der Probenahme |
| Blei | Pb | mg/kg | modelliert (Leipe et al., 2017) | Anteil am Sediment (Gesamtfraktion) |
| Arsen | As | mg/kg | modelliert (Leipe et al., 2017) | Anteil am Sediment (Gesamtfraktion) |
| Quecksilber | Hg | µg/kg | modelliert (Leipe et al., 2017) | Anteil am Sediment (Gesamtfraktion) |
| Fischereidruck | | SAR/Jahr | HELCOM | AIS-Daten von ICES; 2014 bis 2021; Trawlerdaten; SurfSAR = Oberfläche (≥ 2cm) des Sediments gestört; SAR/Jahr in den 12 Monaten vor Probenahme |



| Parameter | Abkürzung | Einheit | Quelle | Anmerkung |
|--|-----------|---------|--------|--|
| HELCOM Kernindikator "Cumulativ Impact on benthic biotops" | Cuml | Klassen | HELCOM | Entspricht bei MSRL D6C3; Ergebnis von HOLAS3 – Zeitraum von 2016-2021 |

2.7 Festlegung von Referenzflächen mit keinen bis geringen anthropogenen Belastungen

Für die deutsche Ostsee wurden Referenzflächen mit keinen bis geringen anthropogenen Störungen anhand verschiedener Belastungsdaten ermittelt. Für diesen Zweck wurden die in Tabelle 5 aufgelisteten Stressoren verwendet (nähere Beschreibung der Stressoren siehe Kapitel 2.6 und Tabelle 4). Für jeden Stressor wurden Grenzen festgelegt, ab welcher der jeweilige Stressor keine negativen Einflüsse auf die Makrozoobenthos-Gemeinschaft ausübt und damit zur Eingrenzung der Referenzfläche genutzt wird (Tabelle 5).

Tabelle 5: Die für die Ausweisung der Referenzfläche genutzten Stressparametern mit den Grenzwerte unterhalb derer keine bis geringe negative Einflüsse auf das Makrozoobenthos postuliert werden

| Stressparameter | Grenzwerte |
|-------------------|------------------------------------|
| Cuml | Klassen: „none“, „very low“, „low“ |
| TOC | < 2,3 Gewichts-% |
| TN | < 0,24 Gewichts-% |
| TP | < 0,13 Gewichts-% |
| mobilerP | < 0,048 Gewichts-% |
| Pb | < 78 mg/kg |
| As | < 20 mg/kg |
| Hg | < 140 µg/kg |
| Hypoxieereignisse | < 1,5 Phasen |

HELCOM (2021) klassifizierte vom „Cuml“ die kumulativen Einflüsse „none“, „very low“ und „low“ als ohne signifikante nachteilige Auswirkungen auf die Makrozoobenthos-Gemeinschaft. Der Fischereidruck (HELCOM –Schleppnetzdaten von 2016 bis 2021) ist im Cuml bereits enthalten, daher wurde dieser für die Abgrenzung von Referenzflächen nicht nochmal gesondert berücksichtigt. Die Stressparameter „organischer Gehalt“ konnte nicht verwendet werden, da nur gemessene Werte vorlagen und



keine modellierten, in die Fläche gebrachten Polygone. Als Sauerstoffparameter wurden die Hypoxieereignisse als Anzahl der Phasen in denen die Sauerstoffkonzentration unter 2 mg/l lag gewählt anstatt die Anzahl der Tage.

Für die Abgrenzung der verwendeten Stressoren in, für das Makrozoobenthos, belastende und überlastende Bereiche, gibt es leider nur wenige bis keine Studien. Weiterhin ist bei vorhandenen Grenzwerten die Anwendbarkeit auf die Makrozoobenthosgemeinschaft der Ostsee fraglich. Diese Grenzwerte wurden daher, durch die Gegenüberstellung der BQI-Werte der gesamten Ostsee mit den jeweiligen Stressoren, anhand einer Experteneinschätzung festgelegt (siehe Anhang Abbildung 42 bis Abbildung 49; vertikal grün gestrichelte Linien markieren jeweiligen Grenzwert). Die Grenzwerte wurden dort gelegt, wo BQI-Werte mit steigenden Belastungsdaten sprunghaft abnahmen oder ab einem Belastungswert ab dem die kleinsten BQI-Werte vorkommen. Für andere Betrachtungen wurden die drei Stressparameter (orgG, Fischereidruck, Hypoxie in Anzahl der Tage), die nicht für die Abgrenzung der Referenzfläche verwendet wurden, ebenfalls dargestellt (siehe Anhang Abbildung 50 bis Abbildung 52).

In Abbildung 8 werden einige der verwendeten Stressoren beispielhaft abgebildet (gelb-orange-rotbraune Flächen sind von belastenden anthropogenen Einflüsse betroffen). Mit dem Programm ArcGIS Desktop wurde pro Stressor die Fläche, die mit ihren Werten unter der jeweiligen Grenze liegt (Tabelle 5), ausgewählt (Select) und ausgeschnitten. Die verschiedenen Flächen pro Stressor (als Polygone) entsprechen damit den unbelasteten Gebieten für den jeweiligen Belastungsparameter. Diese wurden im Anschluss miteinander verschnitten (Intersect). Die Referenzfläche resultiert aus der kleinsten gemeinsamen Fläche (Abbildung 9). Da in der CumI-Bewertung nur wenige Flächen in die Klassen \leq „low“ fallen, wird die Referenzfläche hauptsächlich vom CumI bestimmt.

Anschließend wurden alle BQI-Stationen pro EIG ausgewählt, die in die definierten Referenzflächen fallen (Abbildung 10). Mit diesen Stationen wurde Ansatz 1 bzw. 3 der Schwellenwertberechnung durchgeführt. Für EIG 2 standen damit 17 Hols, für EIG 3 63 Hols, für EIG 4a 73 Hols, für EIG 4b 33 Hols und für EIG 5 370 Hols als Referenz zur Verfügung.

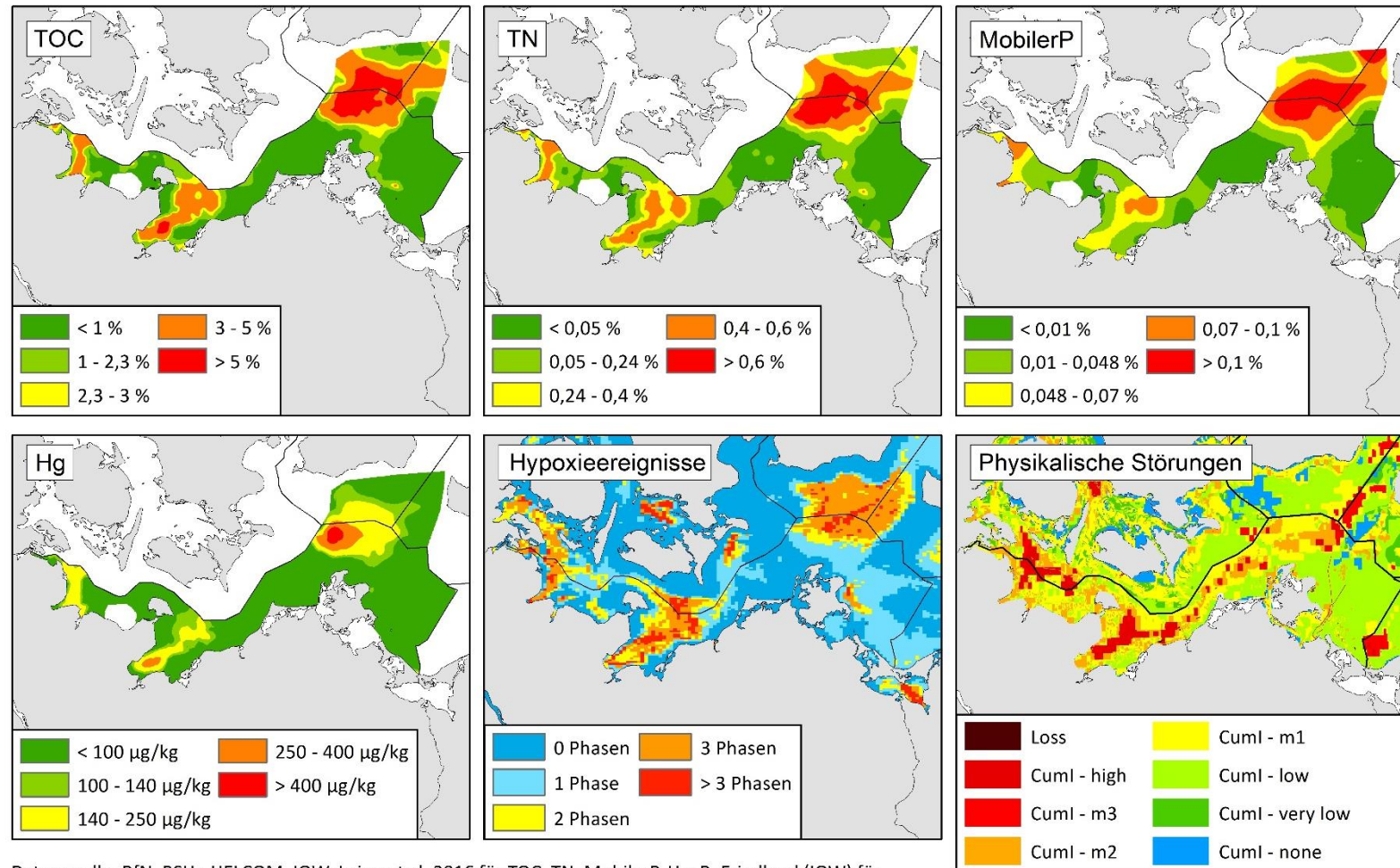
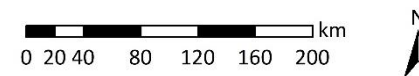


Abbildung 8: Ausgewählte Beispiele von Stressoren in der südlichen Ostsee, die für die Ausweisung von Referenzflächen genutzt wurden; TOC = Gesamt organischer Kohlenstoff in Gewichts-%; TN = Gesamtstickstoff in Gewichts-%, MobilerP = mobiler Phosphor in Gewichts-%; Hg = Quecksilber in µg/kg; Hypoxieereignisse = Phasen von Hypoxieereignissen (mind. 7 Tage am Stück < 2 mg/l); Physikalische Störungen = HELCOM Kernindikator „Cuml“ und „Loss“ aus der HOLAS 3-Bewertung (2022)

Datenquelle: BfN, BSH,; HELCOM, IOW; Leipe et al. 2016 für TOC, TN, MobilerP, Hg; R. Friedland (IOW) für Phasen von Hypoxie (< 2 mg/l) mit mindestens 7 Tage Dauer (GETM/ERGOM-Modell); HELCOM für physikalische Störungen des Meeresbodens (HOLAS3-Bewertung von 2022 für "Cuml" und "Loss")
 Projektion: LAEA - ETRS89



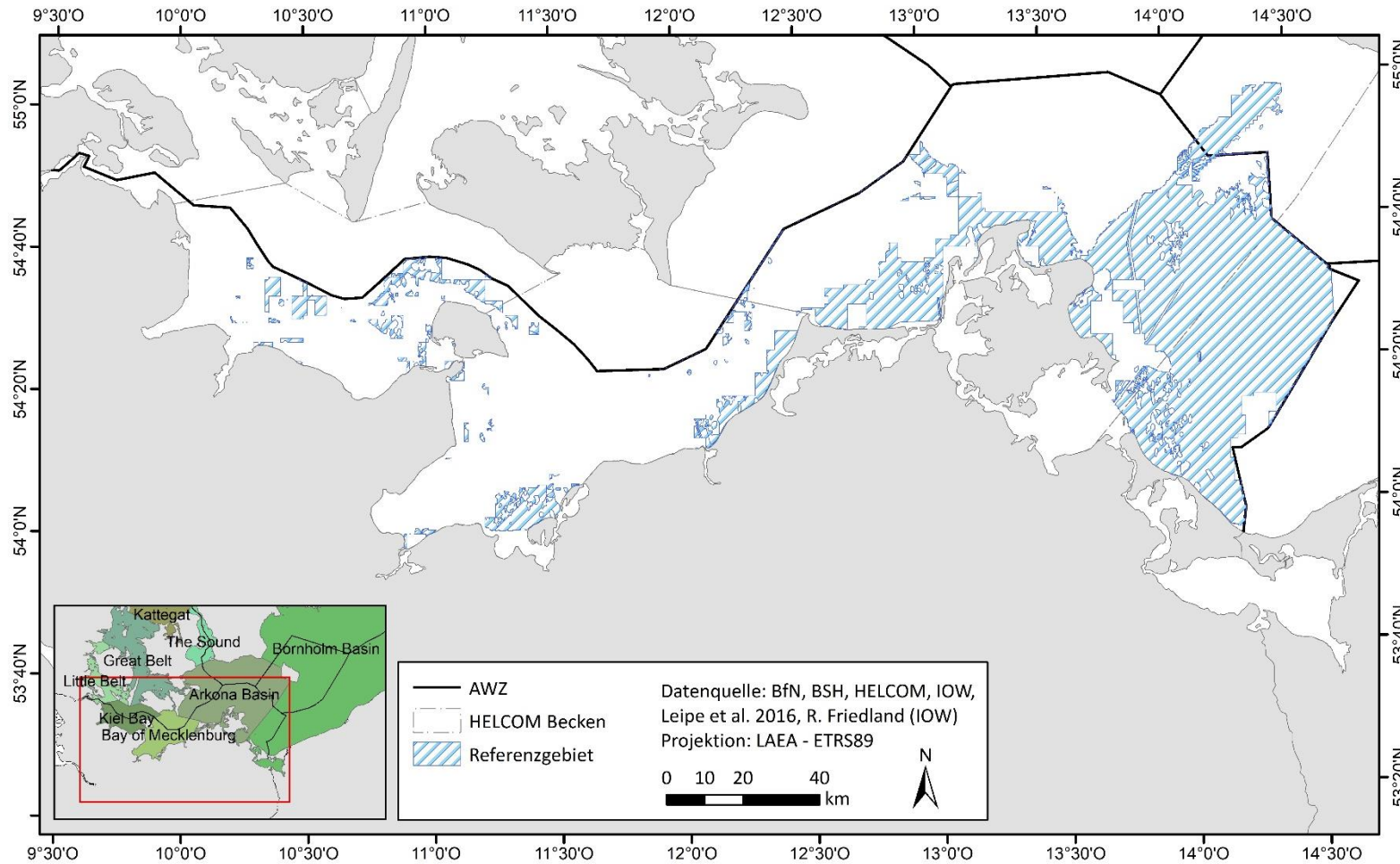


Abbildung 9: Definierte Referenzfläche in der südlichen Ostsee anhand der Stressoren aus Tabelle 5

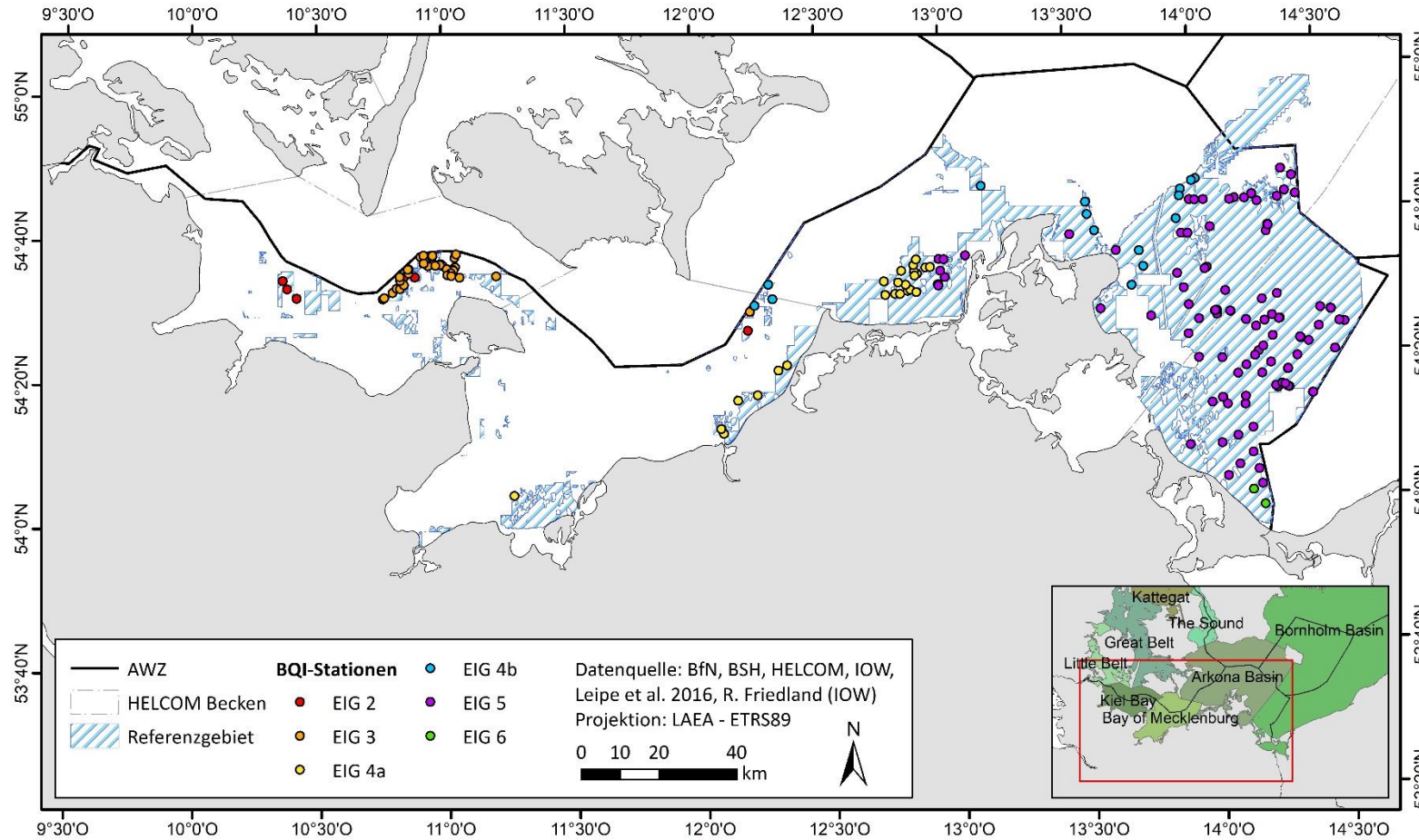


Abbildung 10: Stationen welche in der Referenzfläche liegen, farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group)



2.8 Die Nutzung von historischen Daten als Referenz

Nach einer Literaturrecherche und Durchforstung der IOW Benthos-Datenbank wurden 2 Arbeiten ausgewählt die als historische Referenz für das Arkona- und Bornholmbecken genutzt werden können. Dazu zählt Thulin (1922) und Hertling (1928). Beide Arbeiten liefern für diese Studie jeweils 8 nützliche Stationen mit Abundanzdaten zum Makrozoobenthos von den Jahren 1921 bis 1926 – ein Zeitraum der weit vor dem Anfang der Eutrophierung der südlichen Ostsee liegt (Andersen et al., 2017). Beide Arbeiten verwenden einen Petersen Bodengreifer. Das Beprobungsvolumen des Petersen Bodengreifers ist mit $0,1 \text{ m}^2$ identisch mit dem in dieser Studie genutzten van Veen-Greifer. Eine vergleichende Untersuchung des leichteren van Veen mit dem Petersen Greifer zeigte, dass mit dem van Veen-Greifer, vor allem in schlickigen Substraten, mehr Individuen beprobt werden als mit dem Petersen Greifer, da dieser, aufgrund seiner tieferen Eindringtiefe, gefüllt ist bevor er ganz schließt (Kutty and Desai, 1968). Thulin (1922) gibt für die Abtrennung der Makrozoobenthosarten ein Sieb mit einer Maschenweite von $0,8 \text{ mm}$ an. Damit werden vergleichsweise mehr Arten beprobt als in der aktuellen Studie mit der Maschenweite von 1 mm . Hertling (1928) macht zur Siebung keine Angaben. Fixiert wurden die Proben nur bei Thulin (1922) und zwar mit Formalin. Beide Arbeiten beproben pro Station drei Hols. Die Abundanzdaten sind in den Arbeiten jedoch nicht pro Hol angegeben. Thulin (1922) gibt die Summe aller drei Hols an, also Individuenzahl pro $0,3 \text{ m}^2$. Hertling (1928) dagegen beschreibt die mittlere Abundanz pro m^2 . Die BQI-Berechnung wird jedoch standardmäßig mit Hol-Daten durchgeführt, also pro $0,1 \text{ m}^2$ und keine Mittelwerte.

Trotz aller kleinen Unterschiede in den Beprobungsmethoden und der Art der Datenangabe sind diese beiden Arbeiten recht gut vergleichbar mit der vorliegenden Studie. Die Abundanzdaten wurden auf $0,1 \text{ m}^2$ umgerechnet. Anhand eines Testdatensatzes mit 18 Station bzw. 54 Hols aus der deutschen Ostsee wurden die Auswirkungen auf den BQI-Wert untersucht, wenn zur BQI-Berechnung Stations- anstatt Holdaten genutzt werden (Daten nicht gezeigt). Die Ergebnisse zeigen, dass der BQI-Wert aus Stationsdaten berechnet im Mittel um $0,16 \pm 0,2$ höher ist, als der BQI-Wert aus Holdaten. Dies liegt daran, dass wenn Holdaten pro Station zusammengefasst und die mittleren Abundanzen pro Art berechnet wird, die Artenzahl höher sein kann als bei den einzelnen Hols, da in jedem Greifer andere seltene Arten erfasst werden können. Der Unterschied von $0,16 \pm 0,2$ aufgrund der Berechnungsmethode ist für die Betrachtung von Schwellenwerten nicht sehr dramatisch und kann vernachlässigt werden.

Von den 16 historischen Stationen fallen 13 in EIG 4b und drei in EIG 5 (Abbildung 11). Drei Stationen sind zu wenig für eine Schwellenwertberechnung. Ansatz 2 und 3 (2 = Nutzung von historischen Daten; 3 = Nutzung von Referenzstationen und historischen Daten; siehe Kapitel 2.2) wird daher nur für EIG 4b angewandt.

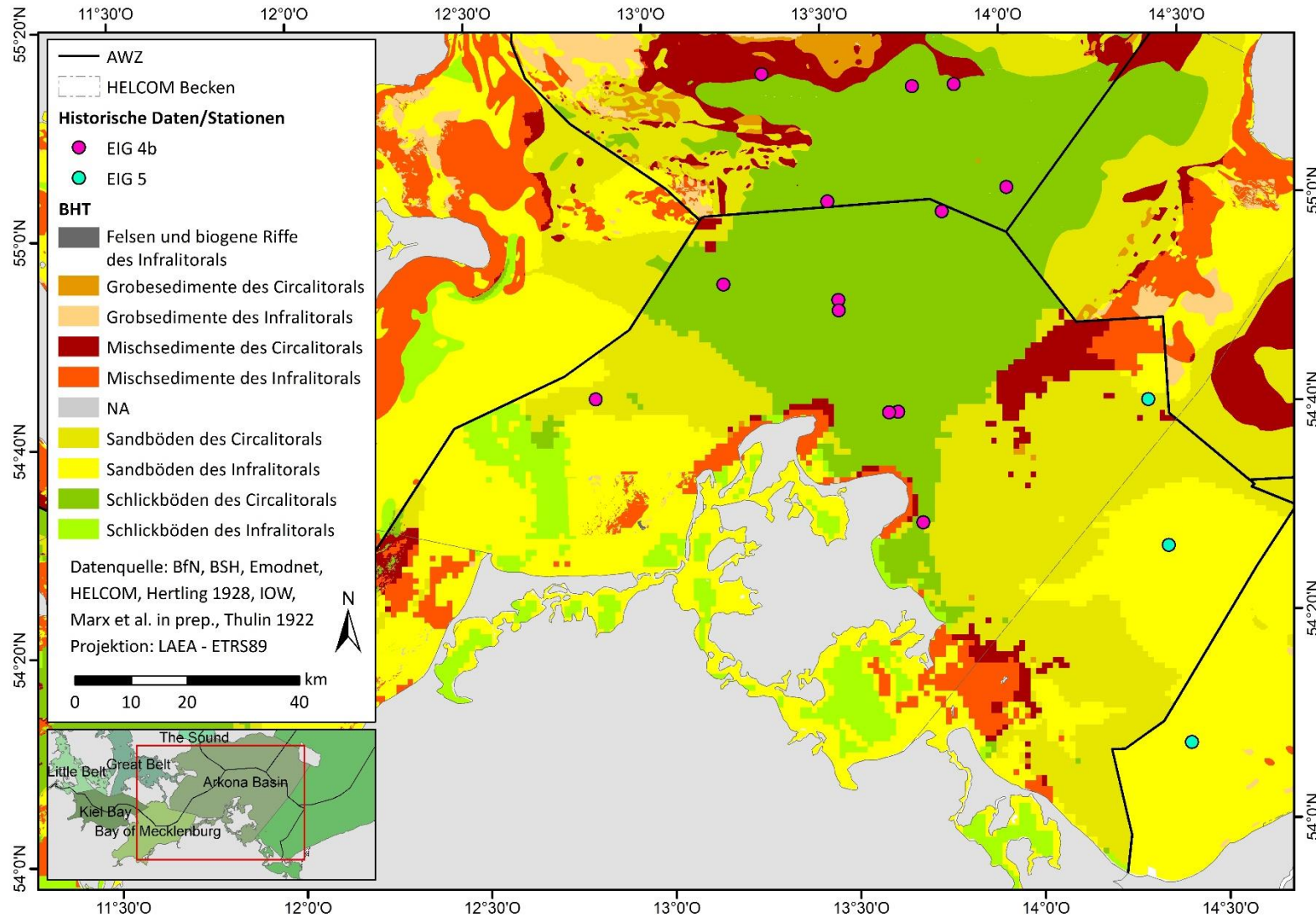


Abbildung 11: Lage der historischen Daten von Thulin (1922) und Hertling (1928) mit einer farblichen Zuordnung zu den EIG (Ecological Indicator Group), auf dem Hintergrund der BHT (Broad Habitat types, Biotopklassen; Marx et al. in prep. für dt. Gewässer; Emodnet 2021 für außerhalb der deutschen AWZ)



3 Ergebnisse der vergleichenden Schwellenwerttestung

Die Gegenüberstellung von BQI-Werten und Stressdaten ist ein gutes Instrument um Schwellenwert auf ihre Eignung zu überprüfen niedrige von hohen Belastungen zu trennen. Ein Problem hierbei liegt in der Festlegung von Grenzen zwischen unbelasteten und belastenden Bedingungen pro Stressor. Grenzen in der Literatur für die Eutrophierungsparameter wie z. B. TOC existieren nur für den pelagischen Lebensraum, nicht aber für das Benthos. Für den Einfluss von Schwermetallbelastungen und Fischereidruck gibt es einige Studien, doch sind diese vermutlich nicht eins zu eins auf die Ostseegemeinschaften übertragbar. So beschreibt Josefson et al. (2008) einen Schwellenwert für Blei im Grönländischen Fjordsystem von 200 mg/kg. Ab dieser Bleikonzentration wird eine drastisch sinkende Makrofauna-Diversität beschrieben, wobei sensitive Arten durch tolerante und opportunistische Arten ersetzt werden. In der deutschen Ostsee liegen alle modellierten Bleikonzentrationen unter diesem angegebenen Schwellenwert. Sehr niedrige BQI-Werte werden im EIG 3-Gebiet bereits ab 35 mg Pb/kg und im EIG 4b-Gebiet ab 60 mg Pb/kg festgestellt (Abbildung 46). Die MSRL-Schwellenwerte sollen außerdem zwischen „guten“ und „mäßigen“ Zustandsbedingungen abgrenzen und müssen damit zwangsläufig niedriger liegen, als Werte ab der eine drastische veränderte Makrofaunagemeinschaft beobachtet wird. Der einzige Stressparameter für den annähernd verlässliche Grenzwerte definiert wurden ist der Fischereidruck. Eine Studie von Schröder et al. (2008) in der Nordsee zeigte, dass ein Fischereievent pro Jahr bereits einen signifikanten Effekt auf die benthische Gemeinschaft haben kann. Für den Cuml wurde anhand dieser Untersuchung ein Fischereidruck von SAR/Jahr ≥ 2 als hoch klassifiziert. Bei einem SAR/Jahr von 0,66 – 2 einen moderaten Fischereidruck (HELCOM, 2021). Und tatsächlich nehmen die BQI-Werte dieser Studie ab einem Fischereidruck von SAR/Jahr ≥ 2 deutlich ab (Abbildung 52).

Ein weiteres Problem in der Grenzwert-Festlegung liegt darin, dass selbst in einer Ökoregion verschiedene Gemeinschaften unterschiedliche Sensitivitäten gegenüber verschiedenen Stressoren aufweisen können (HELCOM, 2021). Daher wurde generell auf die Einzeichnung fester vertikaler Grenzen zwischen unbelastenden und belastenden Stresslevel verzichtet. Um auf den ersten Blick eine Einschätzung zu ermöglichen, welche Bandbreite des entsprechenden Stressors in der deutschen Ostsee vorkommt, wurden die x-Achsenkalen zwischen den EIG gleich gehalten.

Aus Gründen der Konsistenz sollen die Schwellenwerte pro EIG, die abschließend für die MSRL-Bewertung genutzt werden, von einem Ansatz stammen. Die Empfehlung, welcher Ansatz und welche Schwellenwerte damit am Ende verwendet werden sollten, kann daher erst nach der Betrachtung der Ergebnisse aller EIG getroffen werden.

3.1 Schwellenwerttestung für das EIG 2-Gebiet

Das EIG 2-Gebiet kommt innerhalb der deutschen Gewässer in der Kieler- und Mecklenburger Bucht vor (Abbildung 6). Es ist gemäß Schiele et al. 2016 definiert durch eine Wassertiefe von bis zu 20 m und



einer mittleren Bodensalinität von 18 bis 30 psu. Damit umfasst das EIG 2-Gebiet vor allem die infralitoralischen Sande und Schlicke in der Kieler Bucht (Abbildung 7). In der Mecklenburger Bucht zählt nur ein schmaler Streifen zwischen dem Küstengewässer mit geringeren Salinitäten (EIG 4a) und den tieferen schlickigen Bereichen der Mecklenburger Bucht (EIG 3) zu EIG 2. In EIG 2 liegen insgesamt 225 Hols. Davon liegen nur 17 Hols in den Referenzflächen (Abbildung 10). Von 225 Hols zählen 166 zu dem Sedimenttyp Sand und 59 zu dem Sedimenttyp Schlick. Die berechneten BQI-Werte reichen von 1,63 bis 13,52 (Abbildung 12). Für EIG 2 wurde Ansatz 1 und 4 der Schwellenwertberechnung genutzt (siehe Kapitel 2.5). Der „alte“ und die „neu“ berechneten Schwellenwerte sind in Tabelle 6, zusammen mit der Datengrundlage (Anzahl der Hols) und der zugrundeliegenden Methode, aufgelistet. In Abbildung 12 sind die Schwellenwerte aus Tabelle 6 innerhalb eines Histogramms aller BQI-Werte, die für EIG 2 verwendet wurden, abgebildet. Der „alte“ Schwellenwert fällt am niedrigsten, und der Schwellenwert von Ansatz 1 am höchsten aus. Die drei Schwellenwerte von Ansatz 4 liegen in der Mitte, wobei die Schwellenwerte von Ansatz 4/Maximum und Ansatz 4/99. Perzentil sehr nahe beieinanderliegen (Abbildung 12).

In Abbildung 13 wird die Häufigkeit der BQI-Werte aus EIG 2 nochmals gezeigt, unterteilt nach den 5 Gruppen der WRRL, wenn der Datensatz gemäß Ansatz 4 mit dem Maximum (A), dem 99. Perzentil (B) bzw. dem 95. Perzentil (C) normiert wurde (< rote Linie = schlechter Umweltzustand; zwischen roter und oranger Linie = unbefriedigend; zwischen oranger und gelber Linie = mäßig; zwischen gelber und grüner Linie = gut; zwischen grüner und blauen Linie = sehr gut). Die gelbe Linie entspricht dabei dem jeweiligen Schwellenwert von Ansatz 4. Wird der EIG 2-Datensatz mit dem 99. Perzentil normiert, werden die drei höchsten Hols abgeschnitten bzw. beim 95. Perzentil die zwölf höchsten Hols. Generell zeigt die Unterteilung aller BQI-Werte gemäß Ansatz 4, dass die meisten Hols aus dem EIG 2-Gebiet in den „guten“ und „sehr guten“ Bereich fallen und nur einzelne Hols in den „schlecht“ und „unbefriedigend“ Bereich (Abbildung 13). Die beiden zuletzt genannten Bereiche sind damit im Datensatz unterrepräsentiert.

Tabelle 6: Resultierende Schwellenwerte, Datengrundlage und Methode der verschiedenen Ansätze der Schwellenwertermittlung für EIG (Ecological Indicator Group) 2

| Ansatz | „alt“ | 1 | 4/Max | 4/99P | 4/95P |
|-------------------------------------|-------------------------------|---|---|---|---|
| Schwellenwert | 7,22 | 8,25 | 8,11 | 7,98 | 7,53 |
| Datengrundlage (Anzahl) | Ostseeweiter Datensatz | Referenzstationen in EIG 2 (17 Hols) | Alle EIG 2-Stationen (225 Hols) | Alle EIG 2-Stationen (225 Hols) | Alle EIG 2-Stationen (225 Hols) |
| Methode der Schwellenwertermittlung | HELCOM finnischer WRRL-Ansatz | Bootstrapping; GES-Schwelle bei mittlerem 20. Perzentil | Mit Maximum (13,5) normiert; bei 0,6 GES-Schwelle | Mit 99. Perzentil (13,3) normiert; bei 0,6 GES-Schwelle | Mit 95. Perzentil (12,6) normiert; bei 0,6 GES-Schwelle |

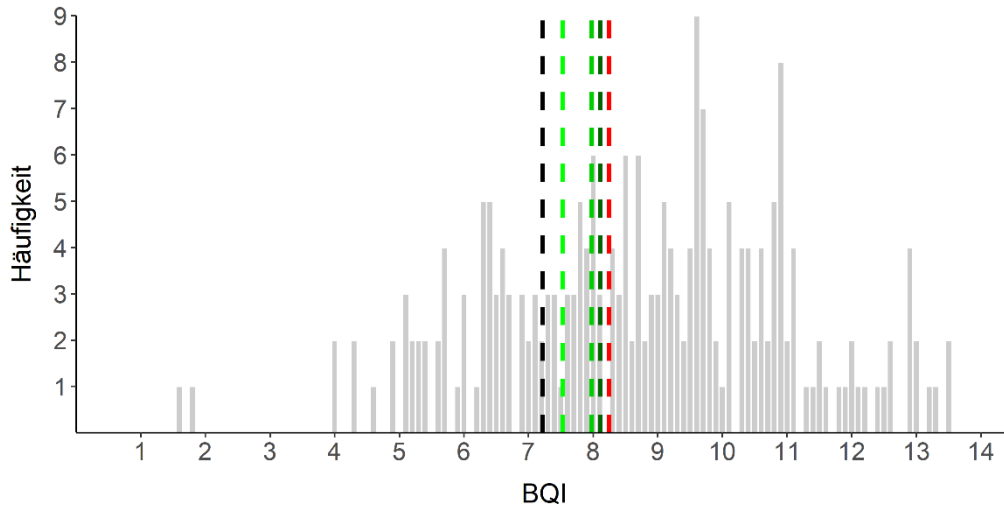


Abbildung 12: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 2 mit den berechneten Schwellenwerten aus Tabelle 6 (vertikal gestrichelte Linien: schwarz = „alter“ Schwellenwert; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

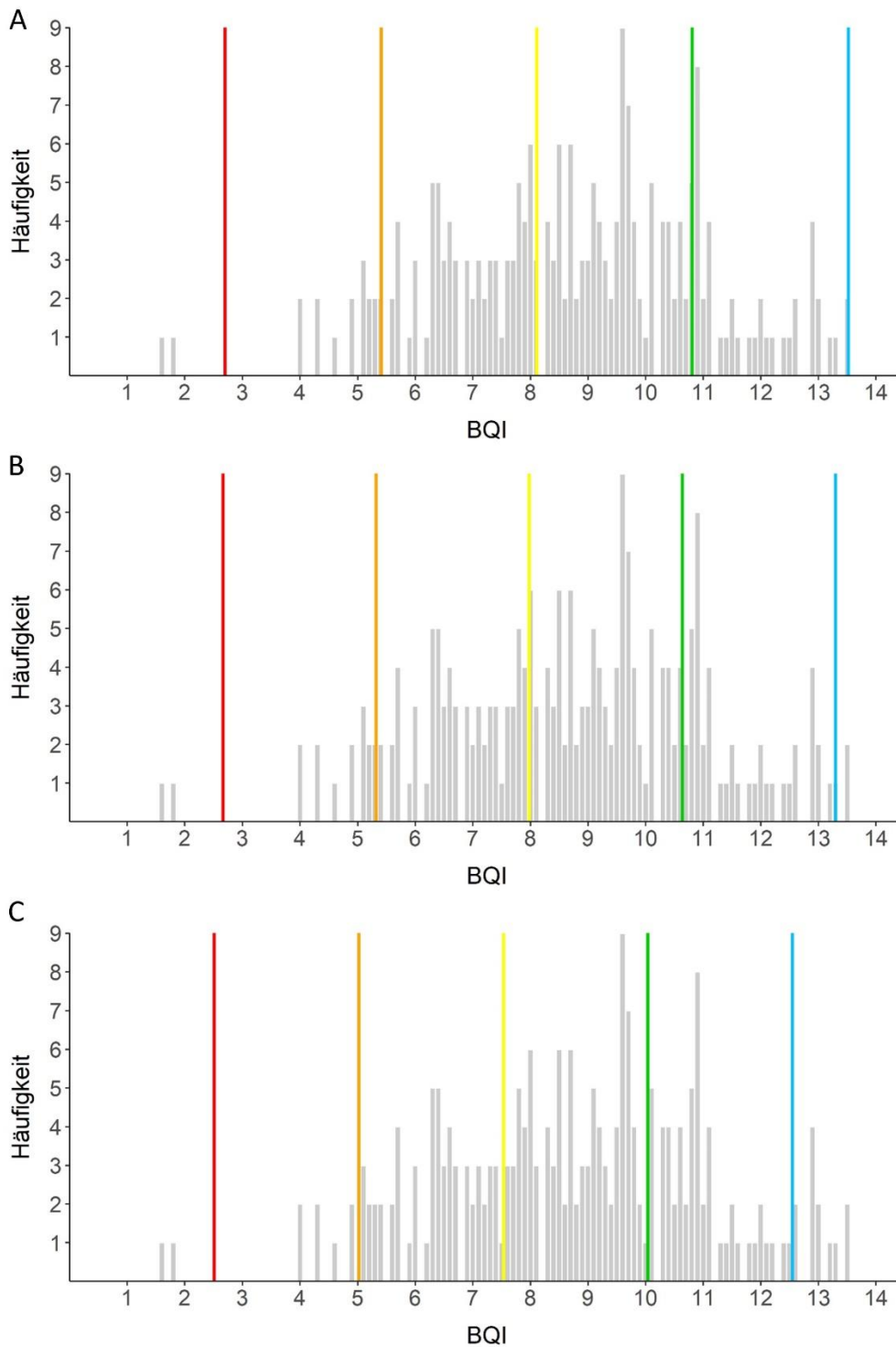


Abbildung 13: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 2 mit der Unterteilung in 5 Gruppen gemäß WRRL (Wasser-Rahmenrichtlinie) nach Normierungswert a) Maximum, b) 99. Perzentil, c) 95. Perzentil; vertikale rote Linie = Übergang schlecht zu unbefriedigend; orange = unbefriedigend zu mäßig; gelbe = mäßig zu gut; grüne = gut zu sehr gut; blaue Linie = Normierungswert



Um nun Festzustellen welcher der „neu“ berechneten oder der „alte“ Schwellenwert am geeignetsten ist, um im EIG 2-Gebiet zwischen unbelastete und belastete Zustände zu trennen, wurden die Schwellenwerte in einer Gegenüberstellung der BQI-Werte mit den verschiedensten Stressparametern aufgetragen (Abbildung 14 bis Abbildung 17; Schwellenwerte entsprechen horizontal gestrichelten Linien). In EIG 2 ist eine Trennung zwischen niedrigen und hohen Stressleveln anhand der berechneten Schwellenwerte nicht eindeutig. Dies liegt an der recht geringen Anzahl an Hols von EIG 2 die in Bereiche mit hohen Stressleveln fallen (Abbildung 42 bis Abbildung 52). EIG 2-Flächen, die von hohen anthropogenen Belastungen betroffen sind, sind teilweise nicht oder unzureichend repräsentativ beprobt, wie zum Beispiel seewärts der Eckernförder Bucht am Übergang zum EIG 3-Gebiet oder seewärts der Kieler Förde (Abbildung 6). Die wenigen Hols mit hohen Stressleveln liegen mal unter, mal über den berechneten Schwellenwerten (Abbildung 14 bis Abbildung 17). In einem EIG, in dem hauptsächlich gute und moderte Zustände des Makrozoobenthos, hoch belastende Flächen jedoch unzureichend beprobt wurden, ist es also generell schwierig Schwellenwerte mit Belastungsdaten zu beurteilen. Der Fischereidruck ist einer der bedeutendsten Stressoren in der südwestlichen Ostsee (HELCOM, 2021) und der einzige Stressparameter für den ein Grenzwert vorliegt. Beim Fischereidruck liegen die BQI-Werte ab einem Fischereidruck von 2 SAR/Jahr, bis auf einige Ausnahmen, unter den Schwellenwerten von Ansatz 1, Ansatz 4/Maximum und Ansatz 4/99. Perzentil (Abbildung 17 B). Diese Schwellenwert liegen damit für EIG 2 zur Auswahl vor. Da der Schwellenwert von Ansatz 1 auf einer sehr geringen Datengrundlage von 16 Hols beruht, kann dieser nicht als robust eingeschätzt werden und ist damit nicht zu empfehlen. Die zwei Schwellenwerte von Ansatz 4/Maximum und Ansatz 4/99. Perzentil basieren dagegen auf 225 Hols und damit einer ausreichenden Datengrundlage. Da sich beide Schwellenwerte nur um den Wert 0,1 unterscheiden, würde eine Bewertung mit diesen beiden Schwellenwerten vermutlich zu einem sehr ähnlichen Ergebnis führen.

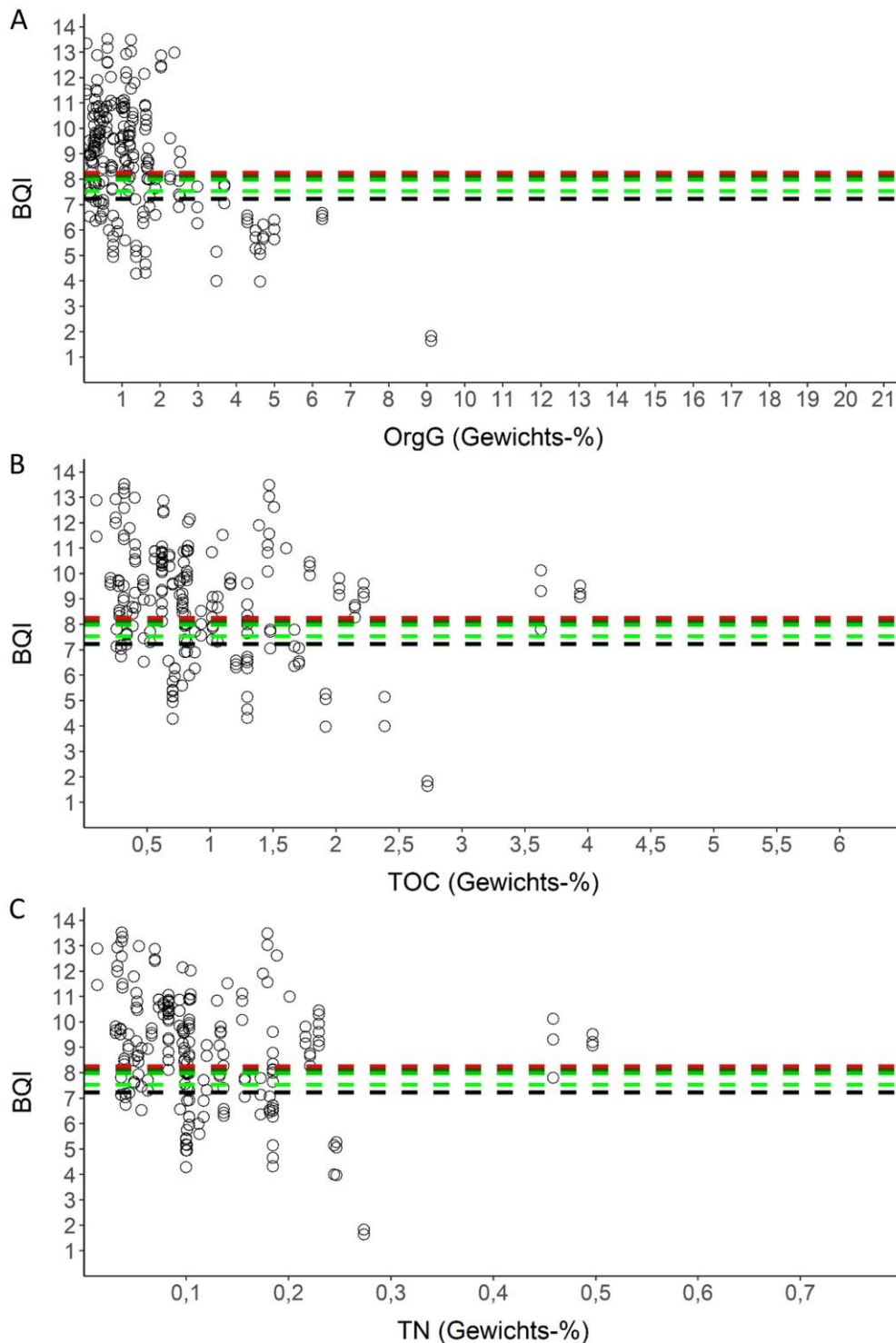


Abbildung 14: Für EIG (Ecological Indicator Group) 2 der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) organischer Gehalt (OrgG), b) Gesamter organischer Kohlenstoff (TOC), c) Gesamtstickstoff (TN) und den Schwellenwerten aus Tabelle 6 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

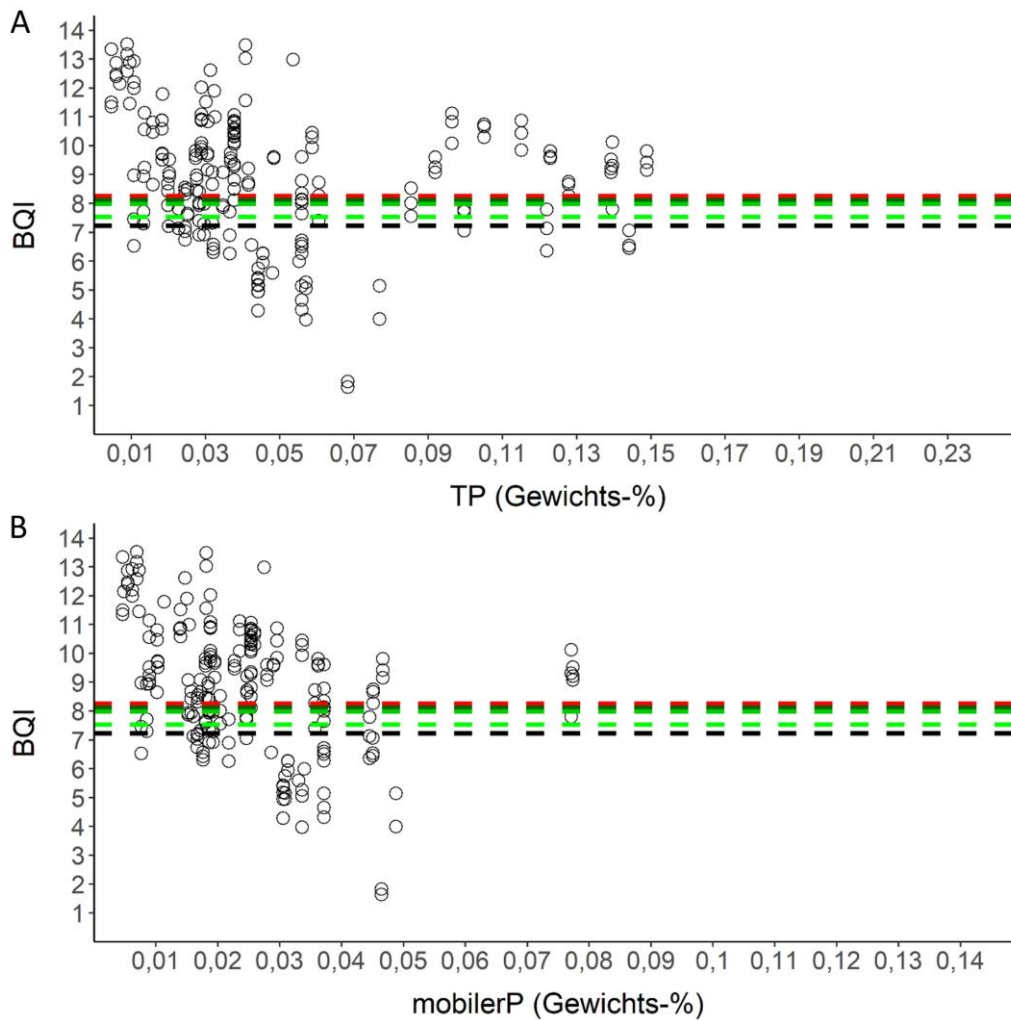


Abbildung 15: Für EIG (Ecological Indicator Group) 2 der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) Gesamtphosphor (TP), b) mobiler Phosphor (mobilerP) und den Schwellenwerten aus Tabelle 6 (horizontale gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

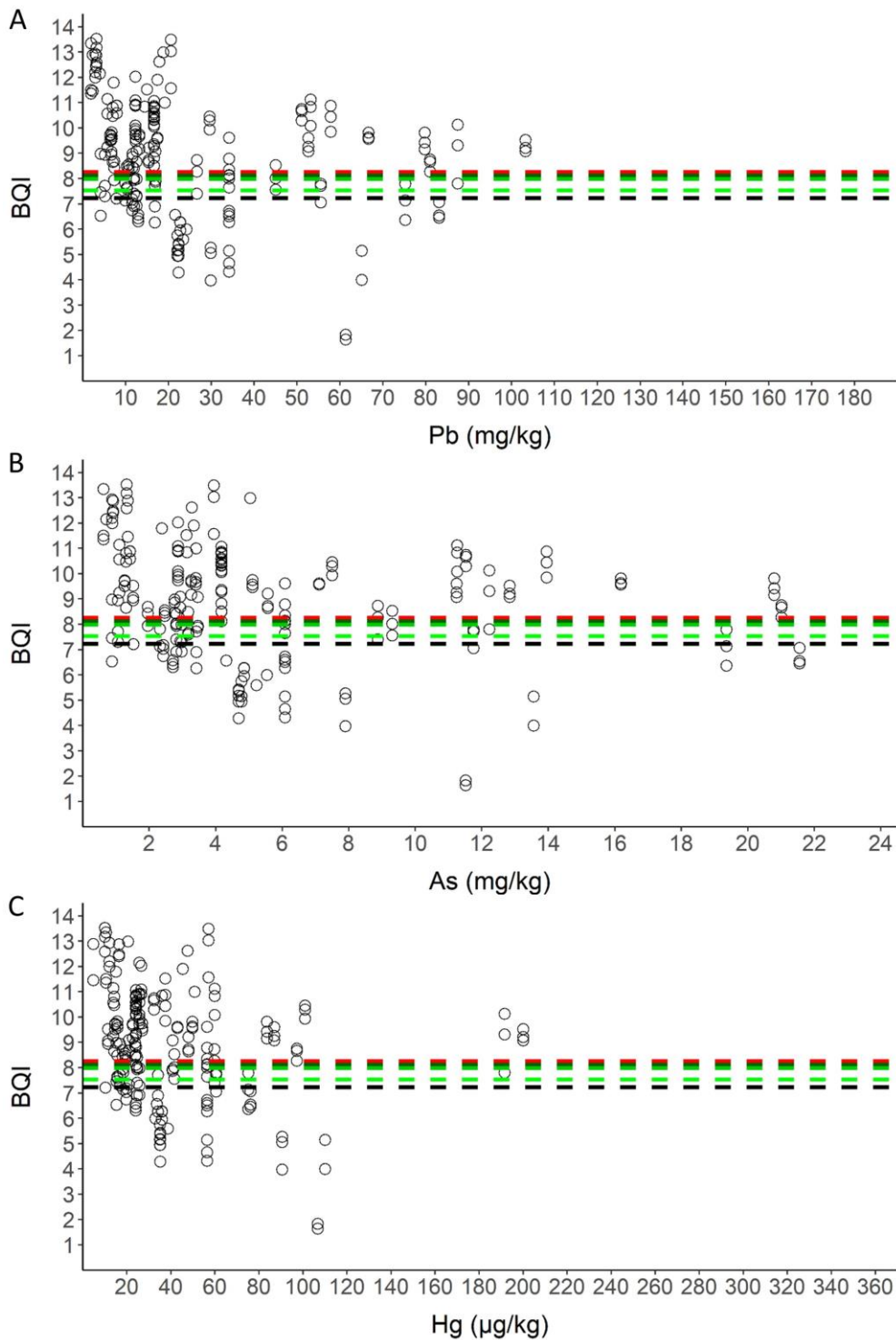


Abbildung 16: Für EIG (Ecological Indicator Group) 2 der BQI (Benthic Quality Index) versus der Schwermetallbelastung durch a) Blei (Pb), b) Arsen (As), c) Quecksilber (Hg) und den Schwellenwerten aus Tabelle 6 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

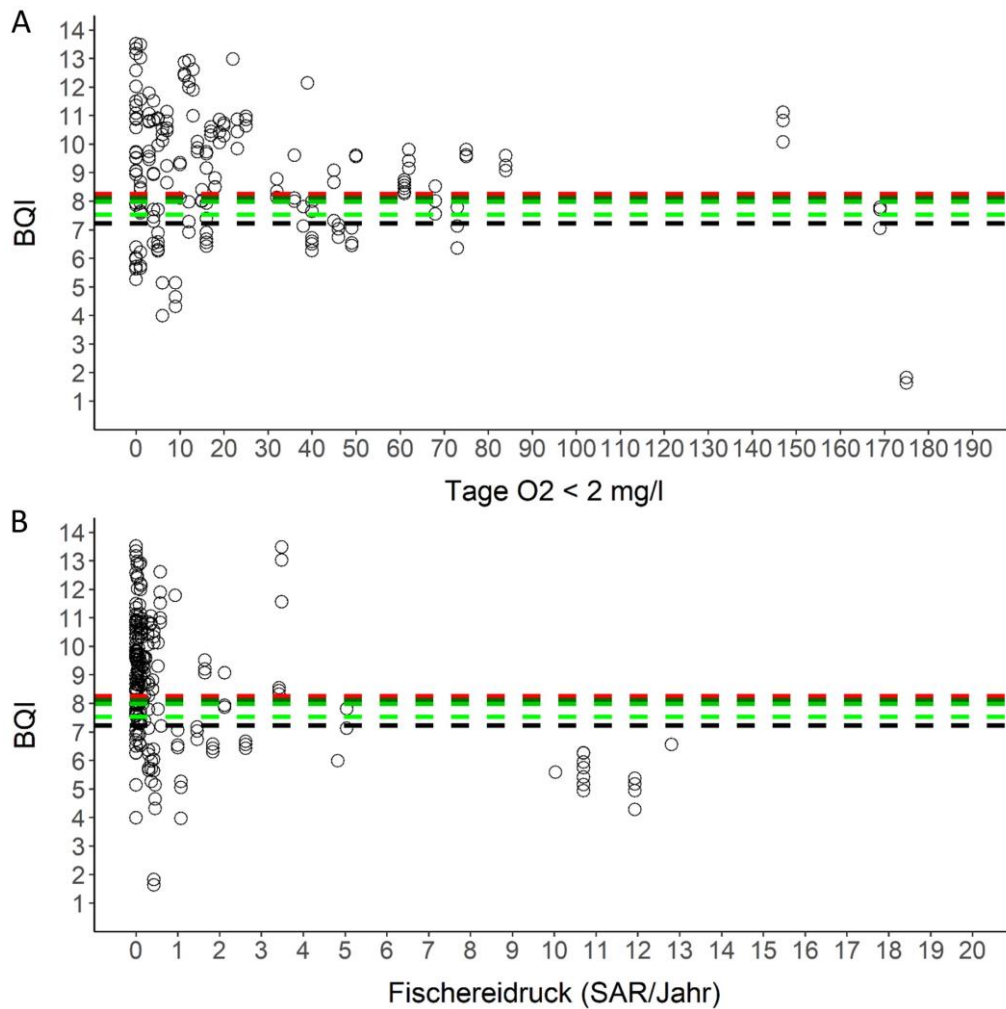


Abbildung 17: Für EIG (Ecological Indicator Group) 2 der BQI (Benthic Quality Index) versus a) der Hypoxie (Anzahl der Tage mit Sauerstoffgehalt (O_2) <math>< 2 \text{ mg/l}</math>) und b) des Fischereidrucks (Swept Area Ration (SAR) pro Jahr) und den Schwellenwerten aus Tabelle 6 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)



3.2 Schwellenwerttestung für das EIG 3-Gebiet

Das EIG 3-Gebiet kommt innerhalb der deutschen Gewässer in der Kieler- und Mecklenburger Bucht vor (Abbildung 6). Es ist definiert durch eine Wassertiefe ab 20 m und einer mittleren Bodensalinität von 18 bis 30 psu (Schiele et al., 2016). Damit umfasst das EIG 3-Gebiet vor allem die circalitoralen Schlicke und Sande in der Kieler- und Mecklenburger Bucht, einschließlich des Fehmarnbelts und der Kadetrinne (Abbildung 6 und Abbildung 7). In EIG 3 liegen insgesamt 442 Hols, wovon 63 Hols in die Referenzflächen fallen (Abbildung 10). Von den 442 Hols zählen 122 zu den Sanden und 320 zu den Schlickten. Die berechneten BQI-Werte reichen von 0,1 bis 17,45. Für EIG 3 konnte Ansatz 1 und 4 zur Schwellenwertberechnung verwendet werden (siehe Kapitel 2.5). Der „alte“ und die „neuen“ Schwellenwerte sind in Tabelle 7 aufgelistet. In Abbildung 18 sind die Schwellenwerte aus Tabelle 7, innerhalb eines Histogramms aller BQI-Werte die für EIG 3 verwendet wurden, abgebildet. Der „alte“ Schwellenwert ist am niedrigsten, und der Schwellenwert von Ansatz 4/Maximum am höchsten. Der Schwellenwert von Ansatz 1 liegt zwischen den Schwellenwerten von Ansatz 4/95. Perzentil und Ansatz 4/99. Perzentil (Abbildung 18).

In Abbildung 19 wird die Häufigkeit der BQI-Werte aus EIG 3 nochmals gezeigt, unterteilt nach den 5 Gruppen der WRRRL, wenn der Datensatz gemäß Ansatz 4 mit dem Maximum (A), dem 99. Perzentil (B) bzw. dem 95. Perzentil (C) normiert wurde (< rote Linie = schlechter Umweltzustand; zwischen roter und oranger Linie = unbefriedigend; zwischen oranger und gelber Linie = mäßig; zwischen gelber und grüner Linie = gut; zwischen grüner und blauen Linie = sehr gut). Die gelbe Linie entspricht dabei dem jeweiligen Schwellenwert von Ansatz 4. Wenn der EIG 3-Datensatz mit dem 99. Perzentil normiert wird, werden die fünf höchsten Hols abgeschnitten bzw. beim 95. Perzentil die 23 höchsten Hols. Die BQI-Werte aus EIG 3 sind recht gut verteilt, mit den meisten Hols in den „unbefriedigend“ und „mäßigen“ Bereich (Abbildung 19). In den Zustandsklassen „gut“, „sehr gut“ und der „schlecht“ liegen ebenfalls einige Hols. Damit sollten alle Zustände mit ausreichend Daten abgedeckt sein, um die Schwellenwerte zu beurteilen.

Tabelle 7: Resultierende Schwellenwerte, Datengrundlage und Methode der verschiedenen Ansätze der Schwellenwertermittlung für EIG (Ecological Indicator Group) 3

| Ansatz | „alt“ | 1 | 4/Max | 4/99P | 4/95P |
|-------------------------------------|--------------------------------|---|---|---|---|
| Schwellenwert | 5,44 | 8,15 | 10,47 | 9,50 | 7,77 |
| Datengrundlage (Anzahl) | Ostseeweiter Datensatz | Referenzdaten (63 Hols) | Alle EIG 3-Stationen (442 Hols) | Alle EIG 3-Stationen (442 Hols) | Alle EIG 3-Stationen (442 Hols) |
| Methode der Schwellenwertermittlung | HELCOM finnischer WRRRL-Ansatz | Bootstrapping; GES-Schwelle bei mittlerem 20. Perzentil | Mit Maximum (17,4) normiert; bei 0,6 GES-Schwelle | Mit 99. Perzentil (15,8) normiert; bei 0,6 GES-Schwelle | Mit 95. Perzentil (13,0) normiert; bei 0,6 GES-Schwelle |

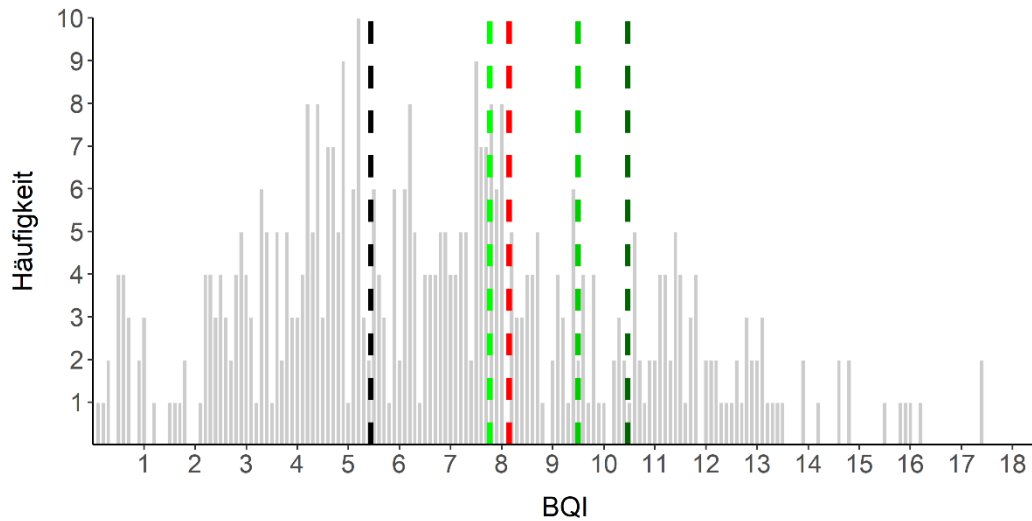


Abbildung 18: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 3 mit den berechneten Schwellenwerten aus Tabelle 7 (vertikal gestrichelte Linien: schwarz = „alter“ Schwellenwert; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

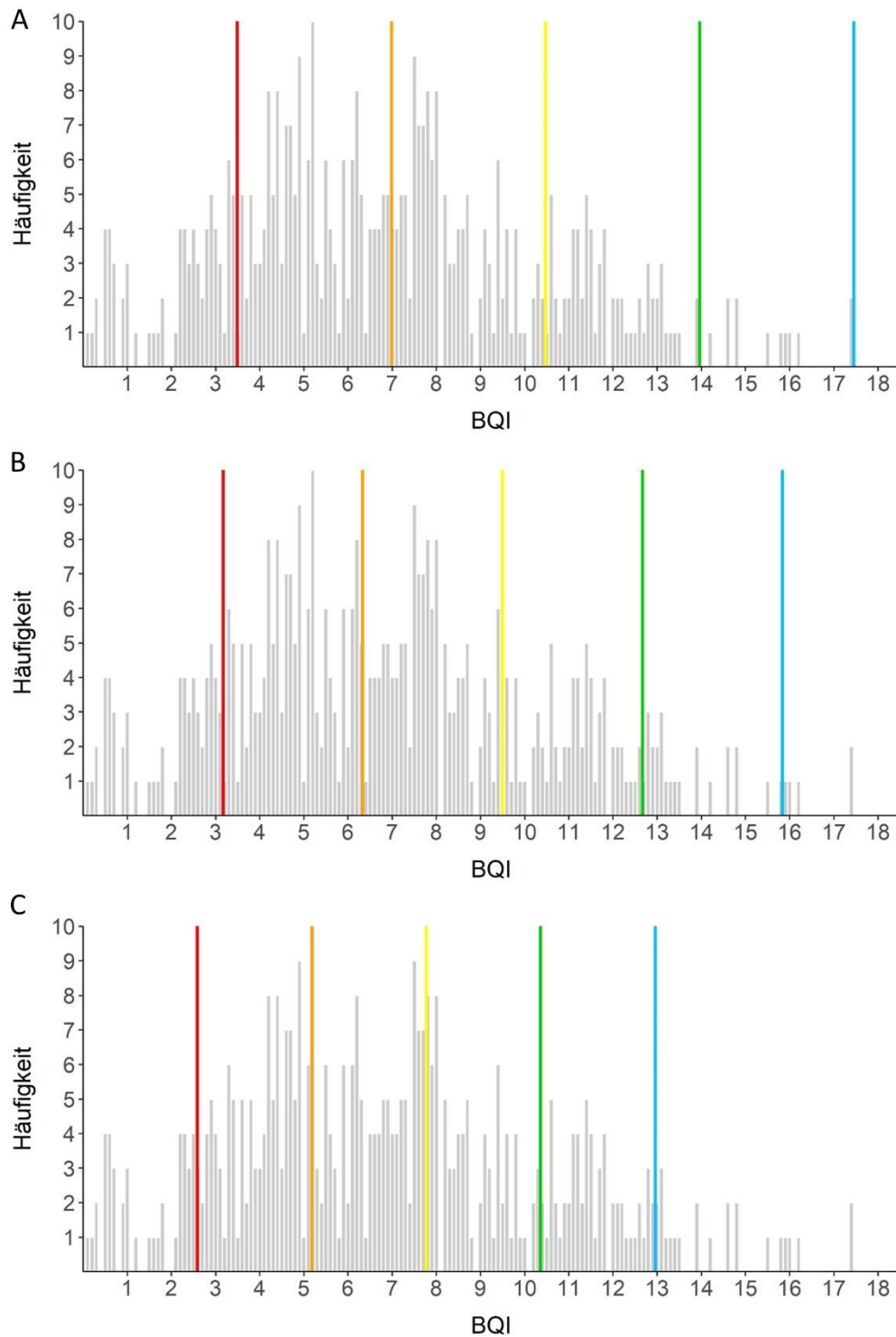


Abbildung 19: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 3 mit der Unterteilung in 5 Gruppen gemäß WRRL (Wasser-Rahmenrichtlinie) nach Normierungswert a) Maximum, b) 99. Perzentil, c) 95. Perzentil; rote Linie = Übergang schlecht zu unbefriedigend; orange = unbefriedigend zu mäßig; gelbe = mäßig zu gut; grüne = gut zu sehr gut; blaue Linie = Normierungswert



Von einigen Bereichen des EIG 3-Gebiets, wie östlich der Eckernförder Bucht und der Kadettrinne, sind nur wenige Datenpunkte eingeflossen (Abbildung 6). Allerdings sind genug Daten zu mittleren und hohen Stressleveln vorhanden um die Schwellenwerte zu bewerten (Abbildung 42 bis Abbildung 52). In der Gegenüberstellung der BQI-Werte mit den verschiedensten Stressoren zeigt sich, dass im EIG 3-Gebiet die BQI-Werte mit zunehmenden Stressleveln kontinuierlich abnehmen (Abbildung 20 bis Abbildung 23; Schwellenwerte entsprechen horizontal gestrichelten Linien). Dieses stufenweise Absinken der BQI-Werte mit steigendem Stresslevel ist vor allem bei den Eutrophierungsparametern orgG, TOC, TN und TP gut erkennbar. Der Schwellenwert von Ansatz 4/Maximum grenzt bereits leicht erhöhte Stresswerte ab. Mittlere und auch hohe Stresslevel werden mit dem Schwellenwert von Ansatz 4/99. Perzentil effektiv abgetrennt. Bei Ansatz 1 und Ansatz 4/95. Perzentil würden nicht alle, doch die meisten BQI-Werte bei mittleren und hohen Stressleveln unter die Schwellenwerte fallen. Hier ist der Schwellenwert von Ansatz 1 noch etwas besser. Der „alte“ Schwellenwert ist eindeutig zu niedrig angesetzt für eine Trennung von mittleren und hohen Stresswerten.

Je nachdem wie konservativ die Bewertung erfolgen soll, liegen für EIG 3 die Schwellenwerte von Ansatz 4/Maximum, Ansatz 4/99. Perzentil oder Ansatz 1 zur Auswahl. Die Datengrundlage für Ansatz 4 ist mit 442 Hols deutlich besser als die von Ansatz 1 mit nur 63 Hols. Die drei zu Auswahl stehenden Schwellenwerte unterscheiden sich um mindestens einen Wert von 1,0. Eine Bewertung würde damit vermutlich zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Insgesamt ist der Schwellenwert von Ansatz 4/99. Perzentil am besten geeignet mittlere und hohe Stresslevel effektiv abzutrennen und gleichzeitig nicht zu hoch, um viele gute Zustände als ebenfalls „schlecht“ zu bewerten.

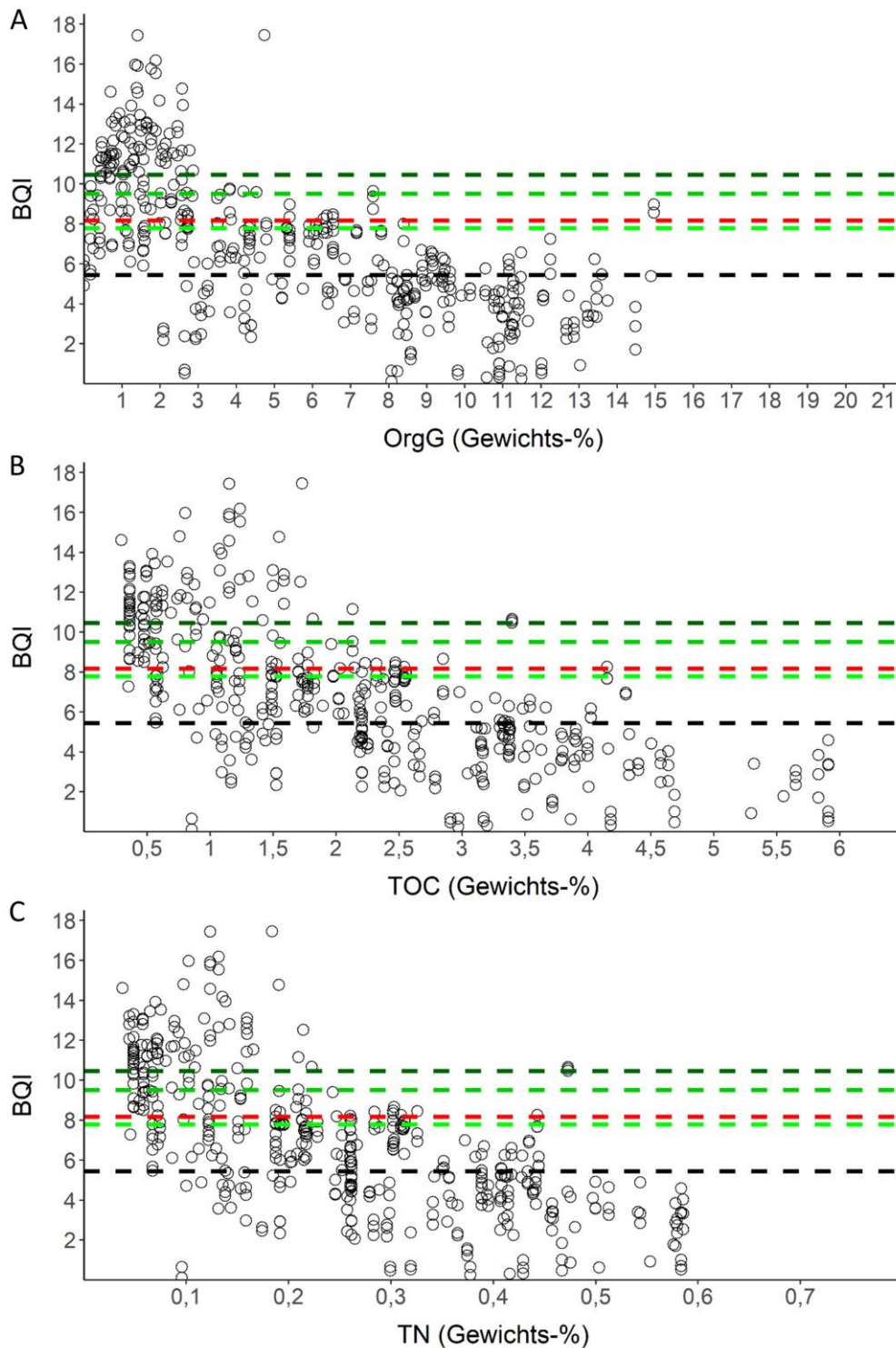


Abbildung 20: Für EIG (Ecological Indicator Group) 3 der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) organischer Gehalt (OrgG), b) Gesamter organischer Kohlenstoff (TOC), c) Gesamtstickstoff (TN) und den Schwellenwerten aus Tabelle 7 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

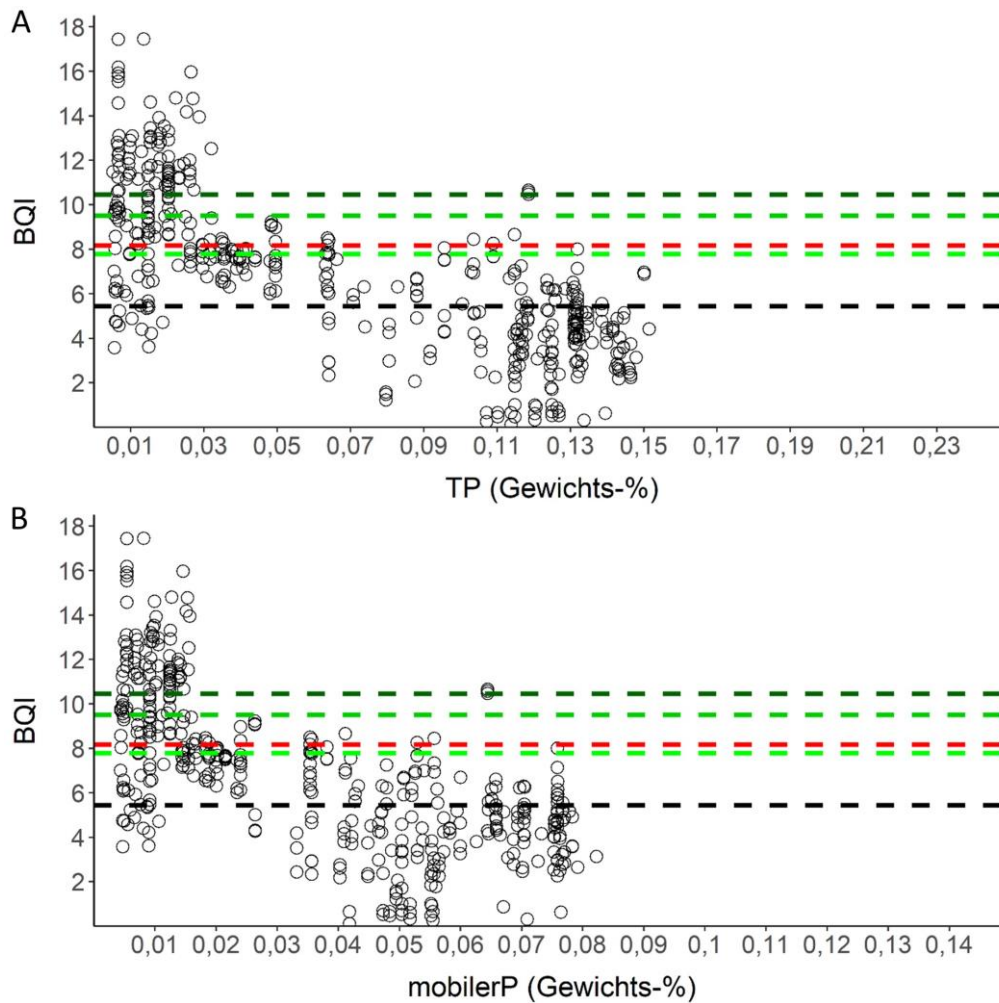


Abbildung 21: Für EIG (Ecological Indicator Group) 3 der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) Gesamtphosphor (TP), b) mobiler Phosphor (mobiler P) und den Schwellenwerten aus Tabelle 7 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

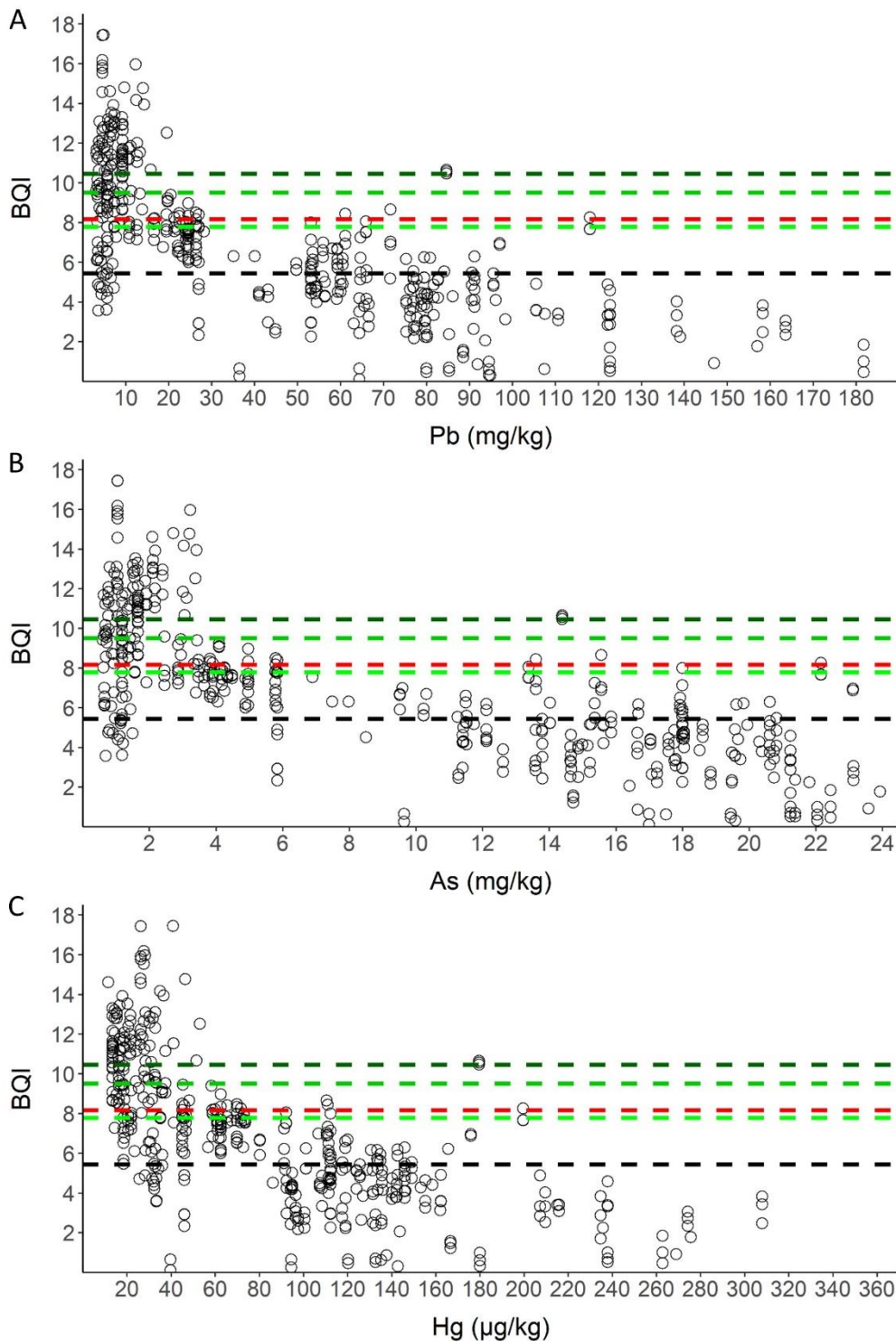


Abbildung 22: Für EIG (Ecological Indicator Group) 3 der BQI (Benthic Quality Index) versus der Schwermetallbelastung durch a) Blei (Pb), b) Arsen (As), c) Quecksilber (Hg) und den Schwellenwerten aus Tabelle 7 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

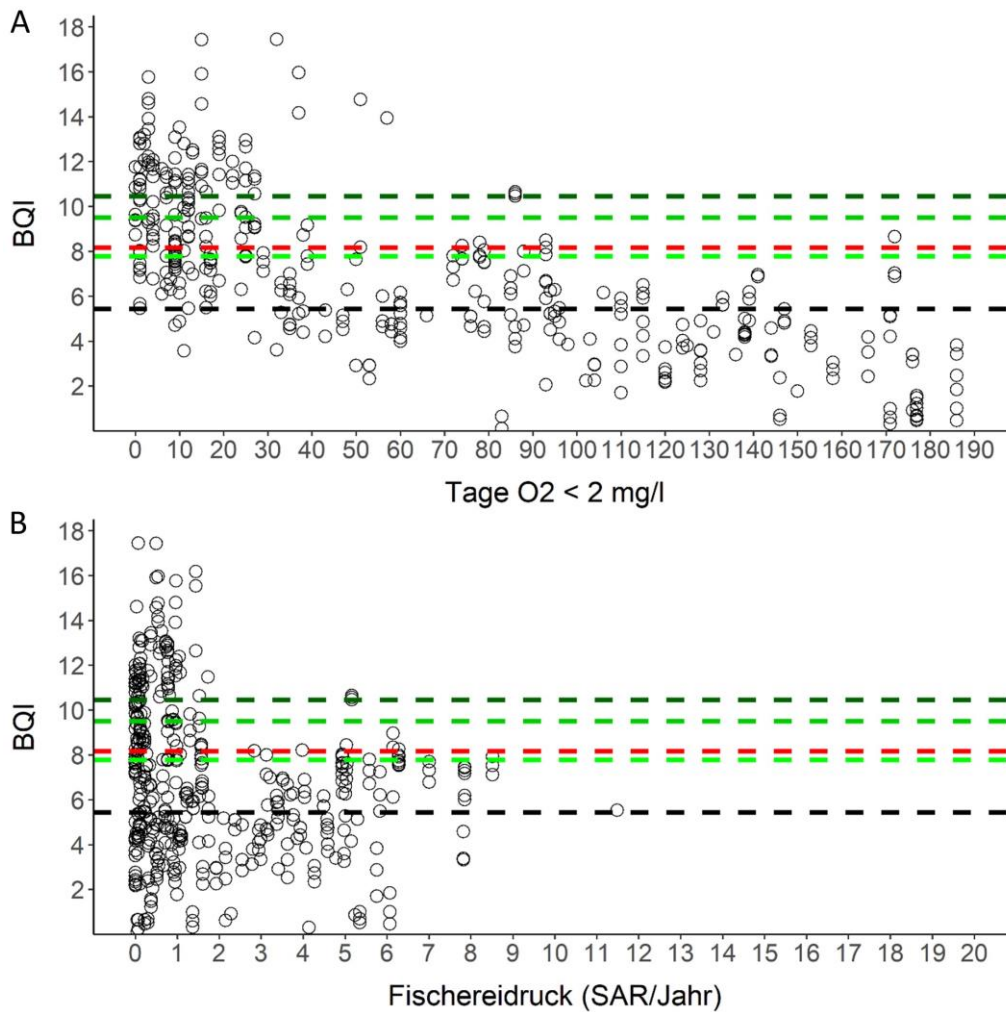


Abbildung 23: Für EIG (Ecological Indicator Group) 3 der BQI (Benthic Quality Index) versus a) der Hypoxie (Anzahl der Tage mit Sauerstoffgehalt (O₂) < 2 mg/l) und b) des Fischereidrucks (Swept Area Ration (SAR) pro Jahr) und den Schwellenwerten aus Tabelle 7 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)



3.3 Schwellenwerttestung für das EIG 4a-Gebiet

Das EIG 4a-Gebiet kommt innerhalb der deutschen Gewässer von der Kieler Bucht bis zur Rügen-Falster-Platte vor (Abbildung 6). Nach der Trennung des EIG 4 Gebiets an der 20m Wassertiefe wird EIG 4a durch eine Wassertiefe bis 20 m und einer mittleren Bodensalinität von 10 bis 18 psu definiert. Damit umfasst das EIG 4a-Gebiet die infralitoralen Sande und Schlicke küstennah in der Kieler- und Mecklenburger Bucht und großflächig auf der Rügen-Falster-Platte (Abbildung 7). In EIG 4a liegen insgesamt 322 Hols. Im Referenzgebiet liegen davon 73 (Abbildung 10). Von den 322 Hols zählen 290 Hols zu dem Substrattyp Sand und 32 Hols zu den Schlickten. Die berechneten BQI-Werte reichen von 2,76 bis 10,86. Für EIG 4a konnte Ansatz 1 und 4 zur Schwellenwertberechnung verwendet werden (siehe Kapitel 2.5). Der „alte“ und die „neu“ kalkulierten Schwellenwerte sind in Tabelle 8 aufgeführt. In Abbildung 24 sind die Schwellenwerte aus Tabelle 8 innerhalb eines Histogramms aller BQI-Werte, die für EIG 4a genutzt wurden, abgebildet. Der Schwellenwert von Ansatz 1 ist am niedrigsten und liegt unter dem „alten“ Schwellenwert. Der drei Schwellenwerte von Ansatz 4 sind am höchsten (Abbildung 24).

In Abbildung 25 wird die Häufigkeit der BQI-Werte aus EIG 4a nochmals gezeigt, unterteilt nach den 5 Gruppen der WRRL, wenn der Datensatz gemäß Ansatz 4 mit dem Maximum (A), dem 99. Perzentil (B) bzw. dem 95. Perzentil (C) normiert wurde (< rote Linie = schlechter Umweltzustand; zwischen roter und oranger Linie = unbefriedigend; zwischen oranger und gelber Linie = mäßig; zwischen gelber und grüner Linie = gut; zwischen grüner und blauen Linie = sehr gut). Die gelbe Linie entspricht dabei dem jeweiligen Schwellenwert von Ansatz 4. Wenn der EIG 4a-Datensatz mit dem 99. Perzentil normiert wird, werden die vier höchsten Hols abgeschnitten bzw. beim 95. Perzentil die 17 höchsten Hols. Die Unterteilung aller BQI-Werte gemäß Ansatz 4 zeigt, dass die meisten Hols in den „mäßigen“ und „guten“ Bereich fallen (Abbildung 25). Der Bereich „schlecht“ ist mit keiner Station vertreten.

Tabelle 8: Resultierende Schwellenwerte, Datengrundlage und Methode der verschiedenen Ansätze der Schwellenwertermittlung für EIG (Ecological Indicator Group) 4a

| Ansatz | „alt“ | 1 | 4/Max | 4/99P | 4/95P |
|-------------------------------------|-------------------------------|---|--|--|---|
| Schwellenwert | 4,52 | 3,96 | 6,51 | 6,04 | 5,58 |
| Datengrundlage (Anzahl) | Ostseeweiter Datensatz | Referenzdaten (73 Hols) | Alle EIG 4a-Stationen (322 Hols) | Alle EIG 4a-Stationen (322 Hols) | Alle EIG 4a-Stationen (322 Hols) |
| Methode der Schwellenwertermittlung | HELCOM finnischer WRRL-Ansatz | Bootstrapping; GES-Schwelle bei mittlerem 20. Perzentil | Mit Maximum (10,86) normiert; bei 0,6 GES-Schwelle | Mit 99. Perzentil (10,06) normiert; bei 0,6 GES-Schwelle | Mit 95. Perzentil (9,30) normiert; bei 0,6 GES-Schwelle |

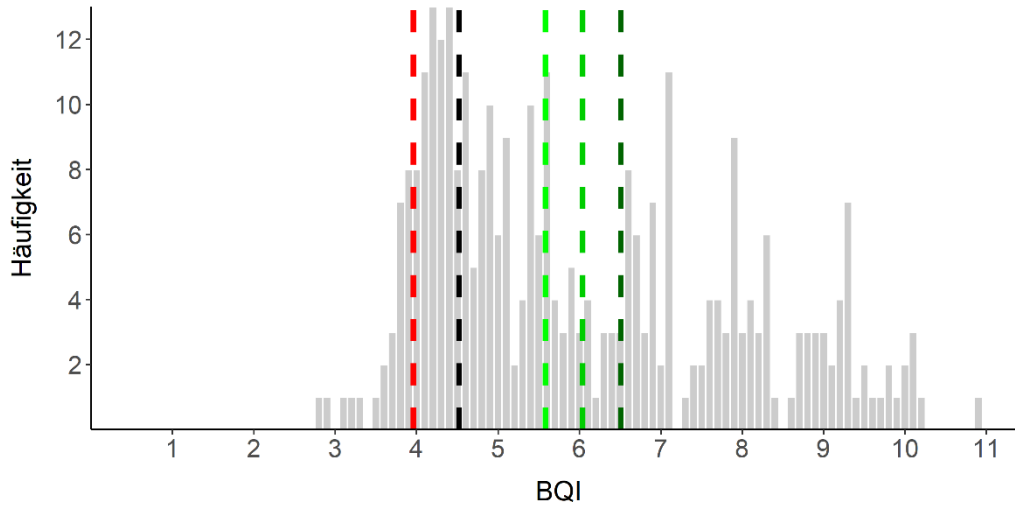


Abbildung 24: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 4a mit den berechneten Schwellenwerten aus Tabelle 8 (vertikal gestrichelte Linien: schwarz = „alter“ Schwellenwert; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

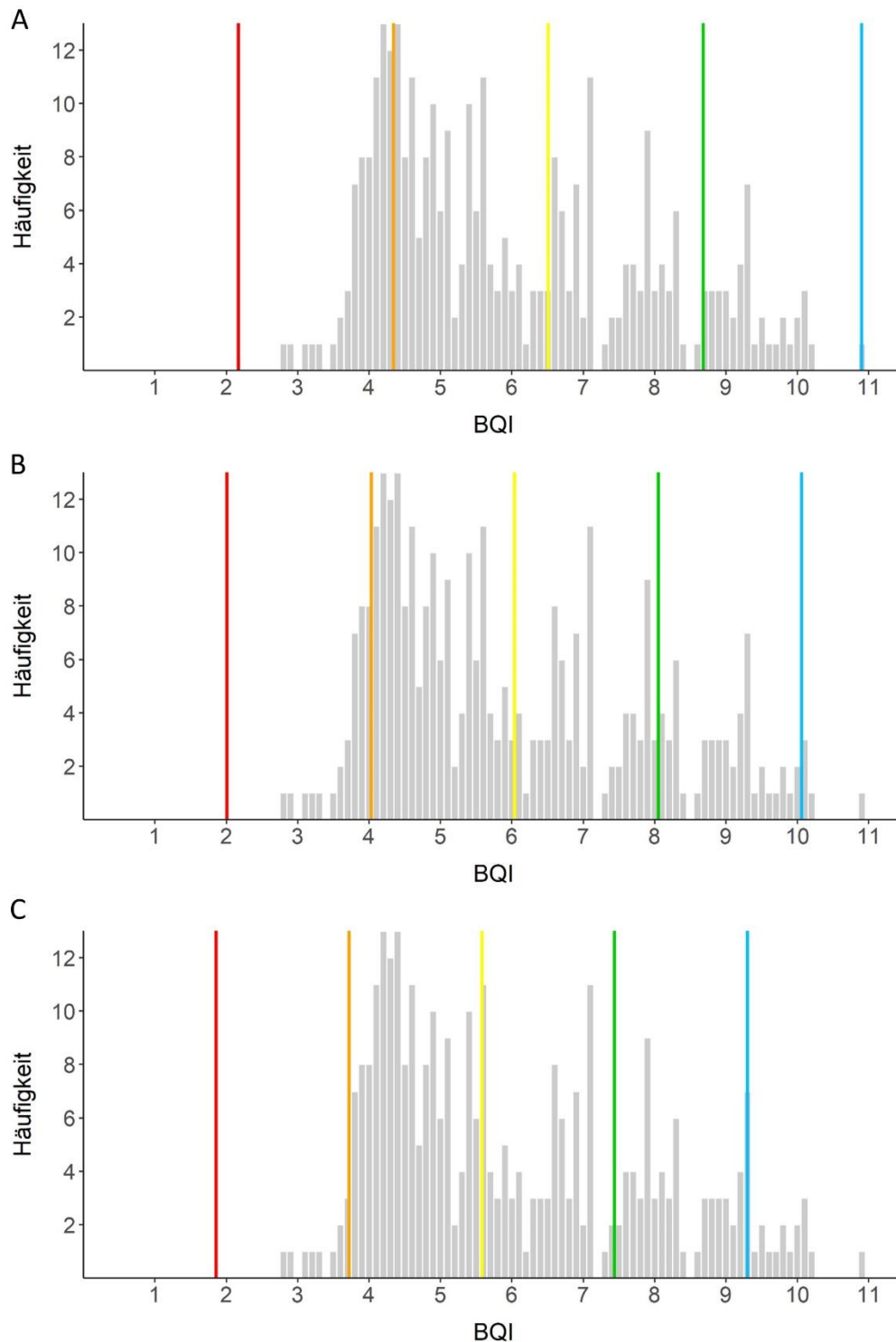


Abbildung 25: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 4a mit der Unterteilung in 5 Gruppen gemäß WRRL (Wasser-Rahmenrichtlinie) nach Normierungswert a) Maximum, b) 99. Perzentil, c) 95. Perzentil; rote Linie = Übergang schlecht zu unbefriedigend; orange = unbefriedigend zu mäßig; gelbe = mäßig zu gut; grüne = gut zu sehr gut; blaue Linie = Normierungswert



Um festzustellen welcher der nun berechneten Schwellenwerte am geeignetsten ist, um im EIG 4a-Gebiet zwischen unbelastete und belastete Zustände zu trennen, wurden die Schwellenwerte in einer Gegenüberstellung der BQI-Werte mit den verschiedensten Stressoren aufgetragen (Abbildung 26 bis Abbildung 29; Schwellenwerte entsprechen horizontal gestrichelten Linien). Wie für EIG 2 ist eine Trennung im EIG 4a-Gebiet zwischen niedrigen und hohen Stressleveln anhand der berechneten Schwellenwerte nicht eindeutig, da zu wenige Hols in den hohen Stresslevel-Bereich fallen (Abbildung 42 bis Abbildung 52). EIG 4a-Flächen, die von hohen anthropogenen Belastungen betroffen sind, sind teilweise nicht oder unzureichend repräsentativ beprobt. Die wenigen Hols mit hohen Stressleveln liegen mal unter, mal über den berechneten Schwellenwerten von Ansatz 4 (Abbildung 26 bis Abbildung 29). Die Schwellenwerte von Ansatz 1 und der „alte“ Schwellenwert sind jedoch eindeutig zu niedrig um die BQI-Werte unter den höchsten Stresswerten als „schlecht“ zu bewerten. Beim Fischereidruck liegen die BQI-Werte ab einem Fischereidruck von 2 SAR/Jahr, bis auf eine Station (3 Hols) als Ausnahmen, unter den Schwellenwerten von Ansatz 4/Maximum und die meisten auch unter dem Schwellenwert von Ansatz 4/99. Perzentil (Abbildung 29 B). Damit stehen auch für EIG 4a die Schwellenwerte von Ansatz 4/Maximum und Ansatz 4/99. Perzentil zur Auswahl.

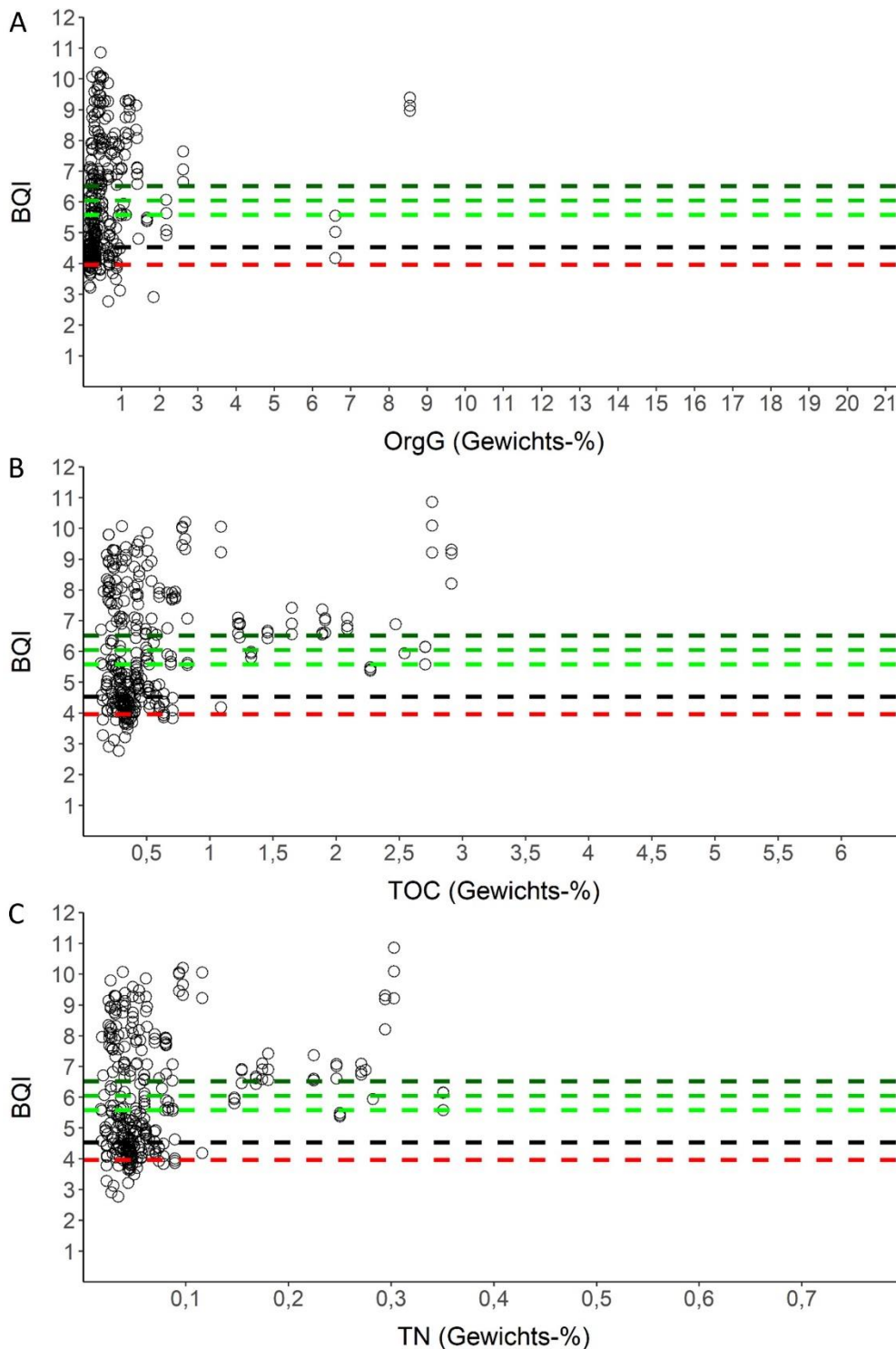


Abbildung 26: Für EIG (Ecological Indicator Group) 4a der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) organischer Gehalt (OrgG), b) Gesamter organischer Kohlenstoff (TOC), c) Gesamtstickstoff (TN) und den Schwellenwerten aus Tabelle 8 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

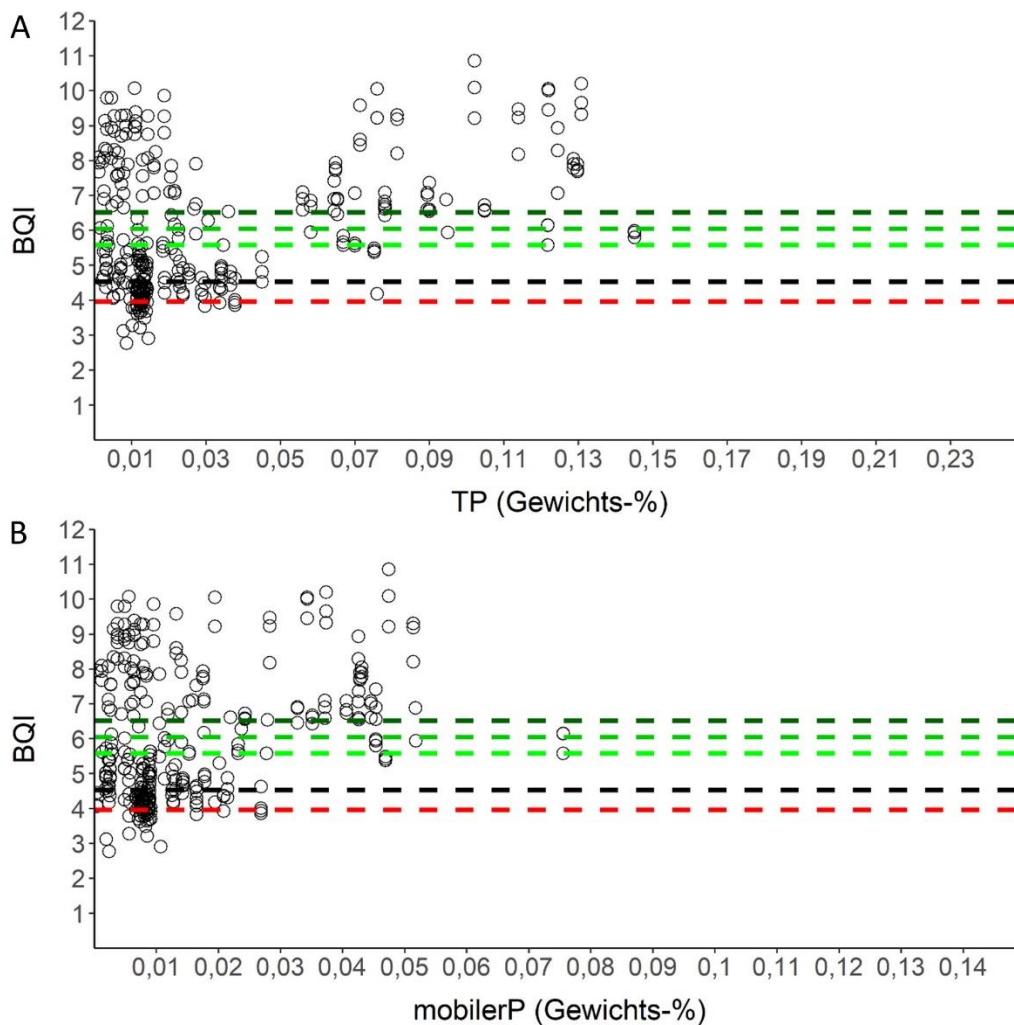


Abbildung 27: Für EIG (Ecological Indicator Group) 4a der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) Gesamtphosphor (TP), b) mobiler Phosphor (mobilerP) und den Schwellenwerten aus Tabelle 8 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

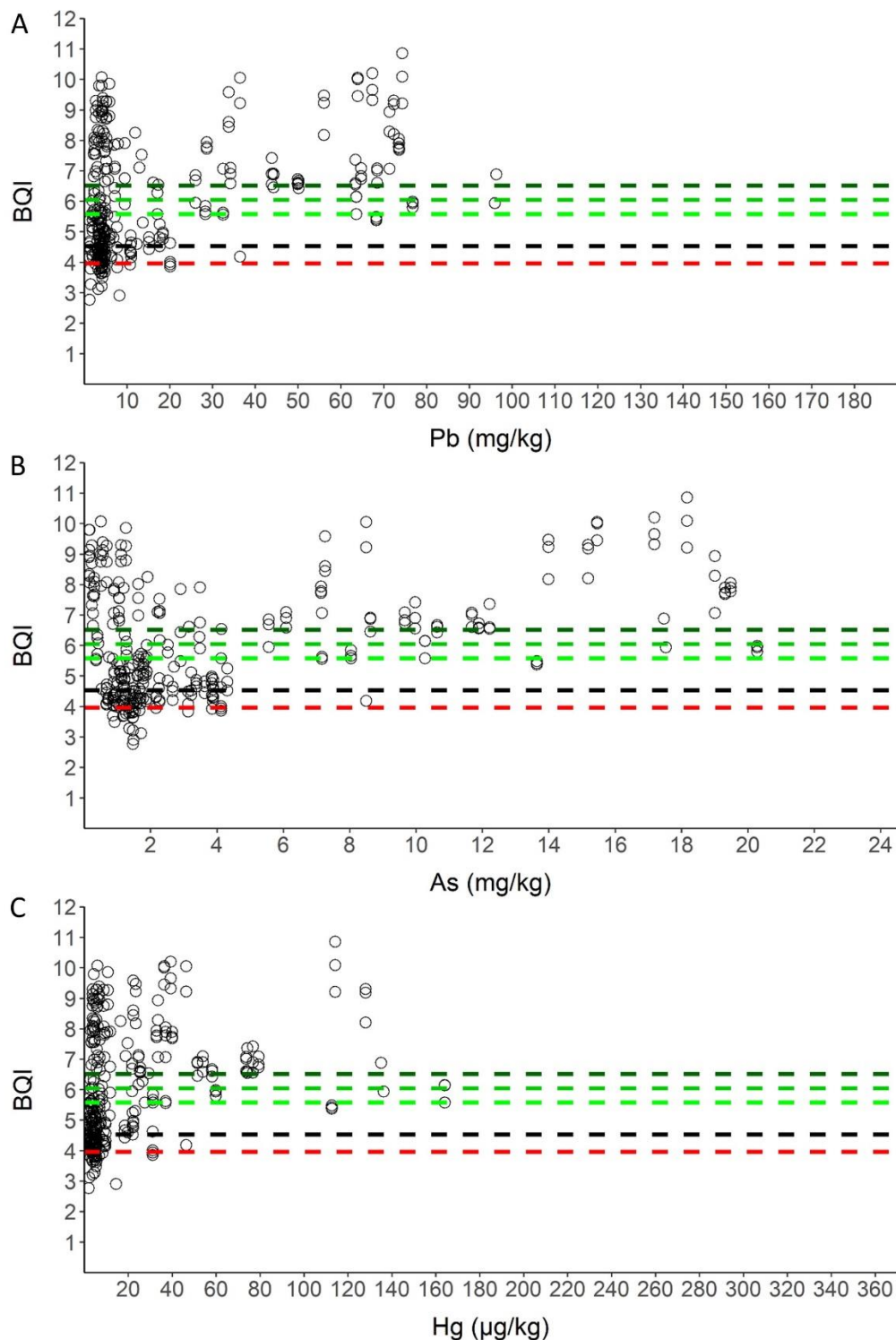


Abbildung 28: Für EIG (Ecological Indicator Group) 4a der BQI (Benthic Quality Index) versus der Schwermetallbelastung durch a) Blei (Pb), b) Arsen (As), c) Quecksilber (Hg) und den Schwellenwerten aus Tabelle 8 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

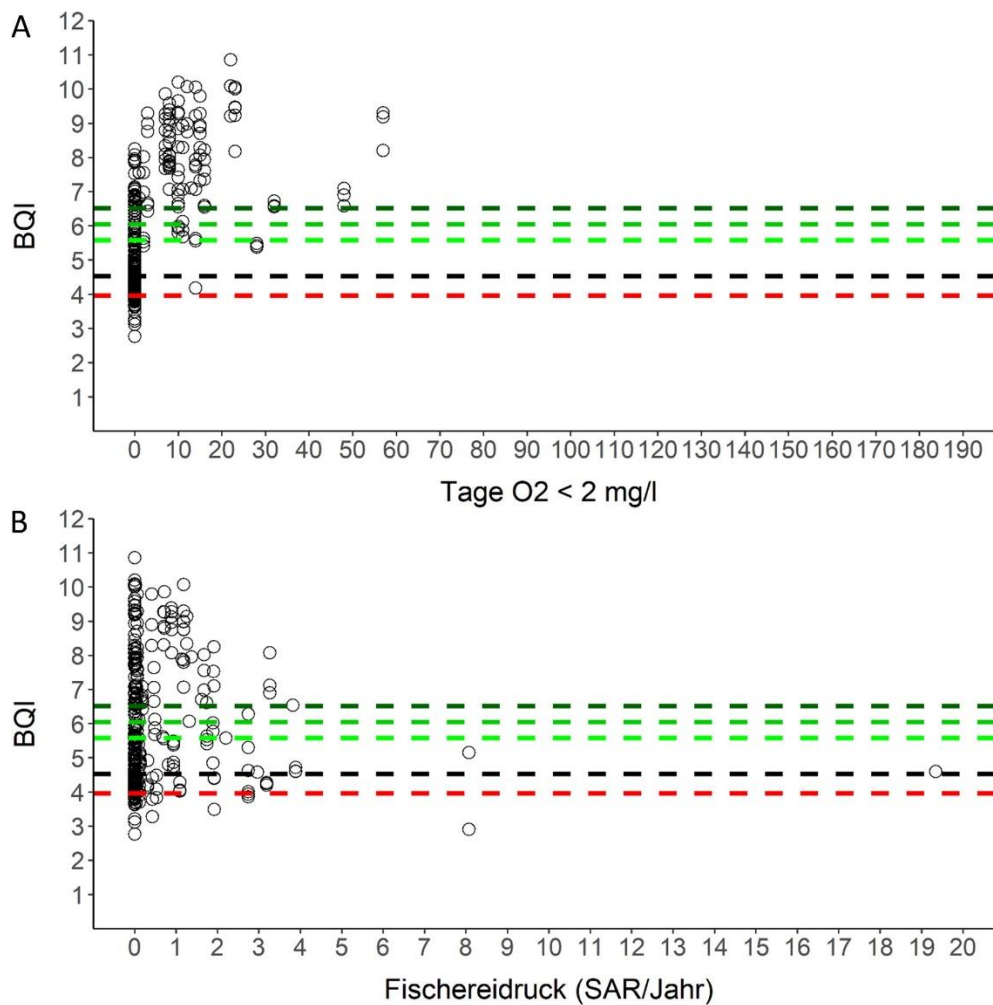


Abbildung 29: Für EIG (Ecological Indicator Group) 4a der BQI (Benthic Quality Index) versus a) der Hypoxie (Anzahl der Tage mit Sauerstoffgehalt (O₂) < 2 mg/l) und b) des Fischereidrucks (Swept Area Ration (SAR) pro Jahr) und den Schwellenwerten aus Tabelle 8 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)



3.4 Schwellenwerttestung für das EIG 4b-Gebiet

Das EIG 4b-Gebiet kommt innerhalb der deutschen Gewässer in der Kadetrinne und im Arkonabecken vor (Abbildung 6). Durch die Trennung des EIG 4 Gebiets in EIG 4a und 4b an der 20m Wassertiefe wird EIG 4b durch eine Wassertiefe ab 20 m und einer mittleren Bodensalinität von 10 bis 18 psu definiert. Damit umfasst das EIG 4b-Gebiet die tiefen circalitoralen Schlickflächen im Arkonabecken und die angrenzenden circalitoralen Sande am Übergang des Arkonabeckens zur Pommerschen Bucht bzw. der Rügen-Falster-Platte (Abbildung 7). Außerdem kommt die EIG 4b-Fläche auch in den tieferliegenden nördlichen Bereichen der Kadetrinne vor. In EIG 4b liegen insgesamt 263 Hols, mit 33 Hols innerhalb der Referenzfläche (Abbildung 10). Von den 263 Hols zählen 63 Hols zu dem Sedimenttyp Sand und 200 Hols zu dem Sedimenttyp Schlick. Die berechneten BQI-Werte reichen von 0,28 bis 9,17. Für EIG 4b konnte als einziges Gebiet zur Schwellenwertberechnung Ansatz 2 und 3 zusätzlich zu Ansatz 1 und 4 angewendet werden (siehe Kapitel 2.5). Der „alte“ und die „neuen“ Schwellenwerte sind in Tabelle 9 aufgelistet. In Abbildung 30 sind die Schwellenwerte aus Tabelle 9 innerhalb eines Histogramms aller BQI-Werte die für EIG 4b genutzt wurden, abgebildet. Der Schwellenwert von Ansatz 2 (historische Daten) ist am niedrigsten, gefolgt von dem Schwellenwert von Ansatz 3 (Referenzstationen- und Historische Daten zusammen) und 1 (Referenzstationen). Der Schwellenwert von Ansatz 1 ist dem „alten“ Schwellenwert sehr ähnlich. Der Schwellenwert von Ansatz 4/Maximum ist abermals der höchste, gefolgt von den Schwellenwerten von Ansatz 4/99. Perzentil und Ansatz 4/95. Perzentil (Abbildung 30).

In Abbildung 31 wird die Häufigkeit der BQI-Werte aus EIG 4b nochmals gezeigt, unterteilt nach den 5 Klassen der WRRRL, wenn der Datensatz gemäß Ansatz 4 mit dem Maximum (A), dem 99. Perzentil (B) bzw. dem 95. Perzentil (C) normiert wurde (< rote Linie = schlechter Umweltzustand; zwischen roter und oranger Linie = unbefriedigend; zwischen oranger und gelber Linie = mäßig; zwischen gelber und grüner Linie = gut; zwischen grüner und blauen Linie = sehr gut). Die gelbe Linie entspricht dabei dem jeweiligen Schwellenwert von Ansatz 4. Wenn der EIG 4b-Datensatz mit dem 99. Perzentil normiert wird, werden die drei höchsten Hols abgeschnitten bzw. beim 95. Perzentil die 14 höchsten Hols. Die Unterteilung aller BQI-Werte gemäß Ansatz 4 zeigt, dass die meisten Hols in den „mäßigen“ und „guten“ Bereich fallen (Abbildung 31). Die Zustandsklassen „schlecht“ und „unbefriedigend“ sind mit nur wenigen Hols vertreten.



Tabelle 9: Resultierende Schwellenwerte, Datengrundlage und Methode der verschiedenen Ansätze der Schwellenwertermittlung für EIG (Ecological Indicator Group) 4b

| Ansatz | „alt“ | 1 | 2 | 3 | 4/Max | 4/99P | 4/95P |
|-------------------------------------|-------------------------------|---|--|---|---|---|---|
| Schwellenwert | 4,52 | 4,46 | 4,03 | 4,21 | 5,50 | 5,21 | 4,97 |
| Datengrundlage (Anzahl) | Ostseeweiter Datensatz | Referenzdaten (33 Hols) | Historische Daten 1921-1926 (13 Stationen) | Referenz- & historische Daten (46 Hols/Stationen) | Alle EIG 4b-Stationen (263 Hols) | Alle EIG 4b-Stationen (263 Hols) | Alle EIG 4b-Stationen (263 Hols) |
| Methode der Schwellenwertermittlung | HELCOM finnischer WRRL-Ansatz | Bootstrapping; GES-Schwelle bei mittlerem 20. Perzentil | GES-Schwelle bei 20. Perzentil | Bootstrapping; GES-Schwelle bei mittlerem 20. Perzentil | Mit Maximum (9,17) normiert; bei 0,6 GES-Schwelle | Mit 99. Perzentil (8,69) normiert; bei 0,6 GES-Schwelle | Mit 95. Perzentil (8,28) normiert; bei 0,6 GES-Schwelle |

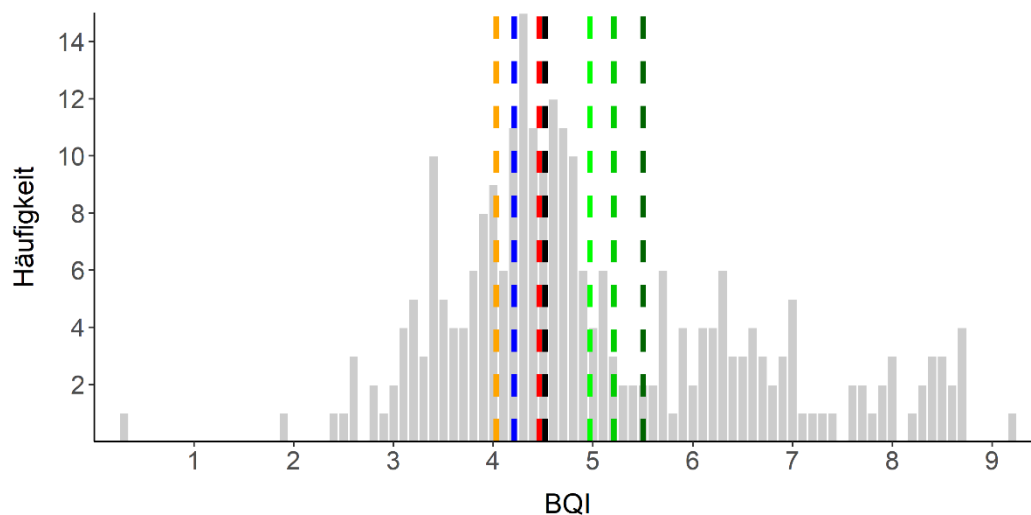


Abbildung 30: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 4b mit den berechneten Schwellenwerten aus Tabelle 9 (vertikal gestrichelte Linien: schwarz = „alter“ Schwellenwert; rot = Ansatz 1; orange = Ansatz 2; blaue = Ansatz 3; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

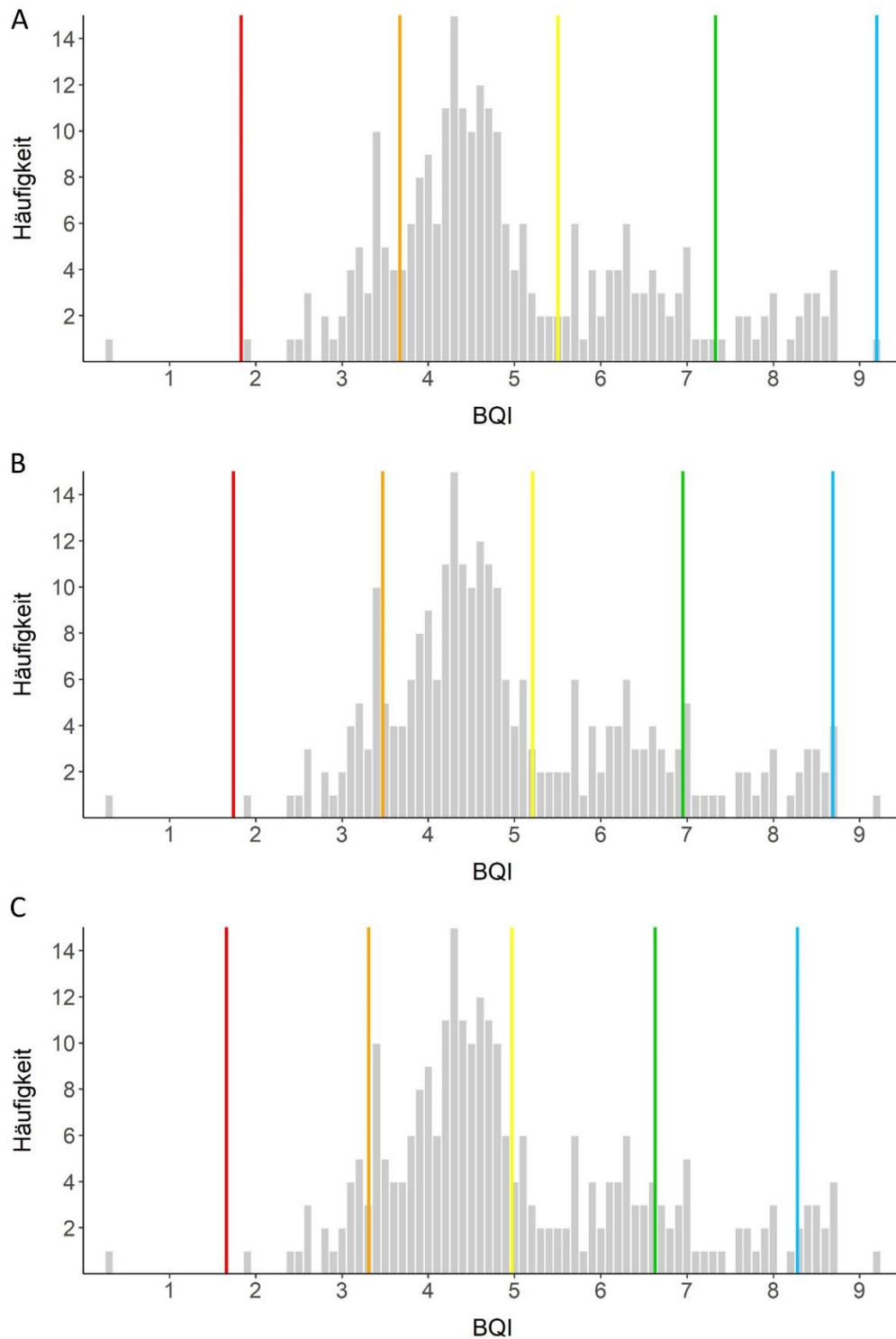


Abbildung 31: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 4b mit der Unterteilung in 5 Gruppen gemäß WRRL (Wasser-Rahmenrichtlinie) nach Normierungswert a) Maximum, b) 99. Perzentil, c) 95. Perzentil; rote Linie = Übergang schlecht zu unbefriedigend; orange = unbefriedigend zu mäßig; gelbe = mäßig zu gut; grüne = gut zu sehr gut; blaue Linie = Normierungswert



Obwohl nur wenige Hols in die WRRL-Klassen „schlecht“ und „unbefriedigend“ fallen (Abbildung 31), liegen genug der als „mäßig“ definierten Hols in den Bereichen der mittleren und hohen Stressleveln der untersuchten Belastungsparameter (Abbildung 42 bis Abbildung 52). Eine Bewertung der Schwellenwerte im EIG 4b-Gebiet ist daher gut möglich. Ein Grund für diese Diskrepanz, also eine größtenteils in mäßigem Zustand bewertete Makrozoobenthosgemeinschaft, obwohl die Stressparameter, vor allem die Eutrophierungsparameter, sehr hoch sind, könnte in der Zusammensetzung der Gemeinschaften beruhen. Die Makrofauna in den Tiefen des Arkonabeckens wird von Arten dominiert, die eine gewisse organische Anreicherungen im Sediment bevorzugen wie z. B. der Priapulide *Halicryptus spinulosus* oder der Polychaet *Ampharete baltica*. Der Fischereidruck und auch die Dauer und das Ausmaß von Hypoxieereignissen ist im Arkonabecken im Vergleich mit der Mecklenburger Bucht gar nicht so hoch (Abbildung 8, Abbildung 51 und Abbildung 52). Die Einstufung „mäßig“ macht also durchaus Sinn.

In der Gegenüberstellung der BQI-Werte mit den verschiedensten Stressoren zeigt sich, dass im EIG 4b-Gebiet die BQI-Werte ab einem mittleren Stresslevel unter oder leicht über dem höchsten Schwellenwert von Ansatz 4/Maximum liegen (Abbildung 32 bis Abbildung 35; Schwellenwerte entsprechen horizontalen gestrichelten Linien). Bei den Schwellenwerten von Ansatz „alt“, 1, 2 und 3 werden viele Hols bei hohen Stresswerten als gut bewertet werden. Diese sind damit nicht geeignet guten von moderaten Umweltzuständen abzutrennen. Die Datengrundlage für die Ansätze 1, 2 und 3 war für das EIG 4b-Gebiet auch eher dürftig (Tabelle 9). Für das EIG 4b-Gebiet ist damit insgesamt der Schwellenwert von Ansatz 4/Maximum am besten geeignet, um mittlere und hohe Stresslevel effektiv abzutrennen und gleichzeitig nicht zu hoch, um viele gute Zustände als ebenfalls „schlecht“ zu bewerten (Abbildung 32 bis Abbildung 35). Doch auch der Schwellenwert von Ansatz 4/99. Perzentil käme als Alternative in Frage, da auch hier die meisten Hols bei hohen Stressleveln als „schlecht“ bewertet werden würden.

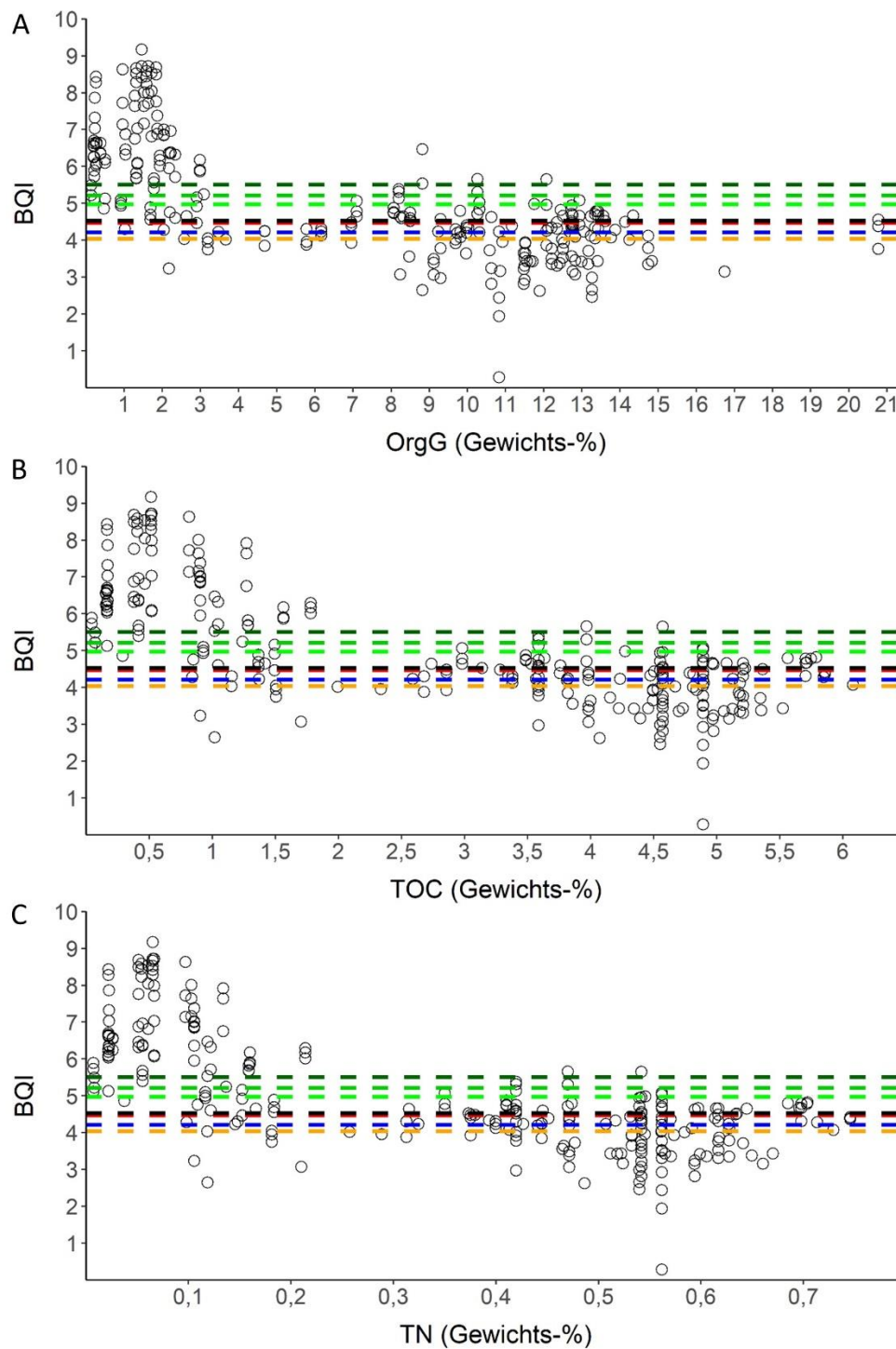


Abbildung 32: Für EIG (Ecological Indicator Group) 4b der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) organischer Gehalt (OrgG), b) Gesamter organischer Kohlenstoff (TOC), c) Gesamtstickstoff (TN) und den Schwellenwerten aus Tabelle 9 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; orange = Ansatz 2; blau = Ansatz 3; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

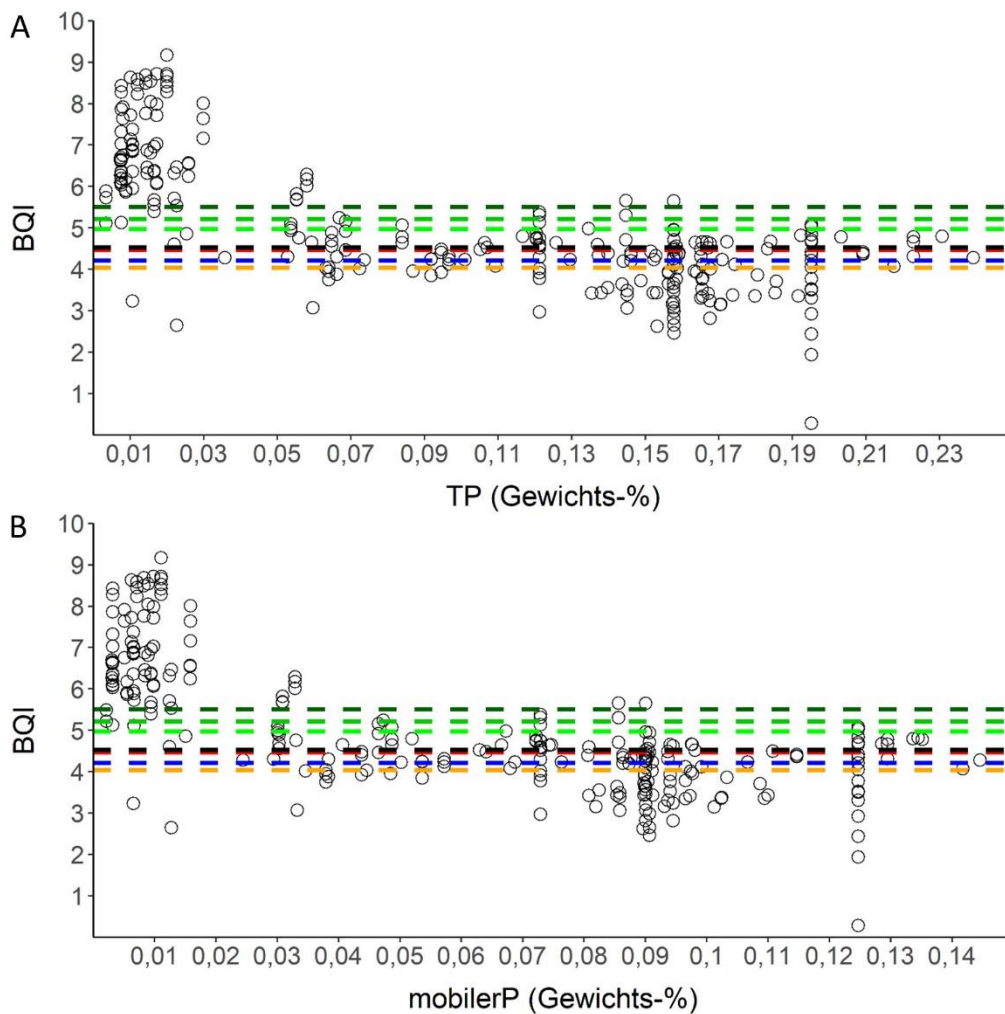


Abbildung 33: Für EIG (Ecological Indicator Group) 4b der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) Gesamtphosphor (TP), b) mobiler Phosphor (mobilerP) und den Schwellenwerten aus Tabelle 9 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; orange = Ansatz 2; blau = Ansatz 3; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

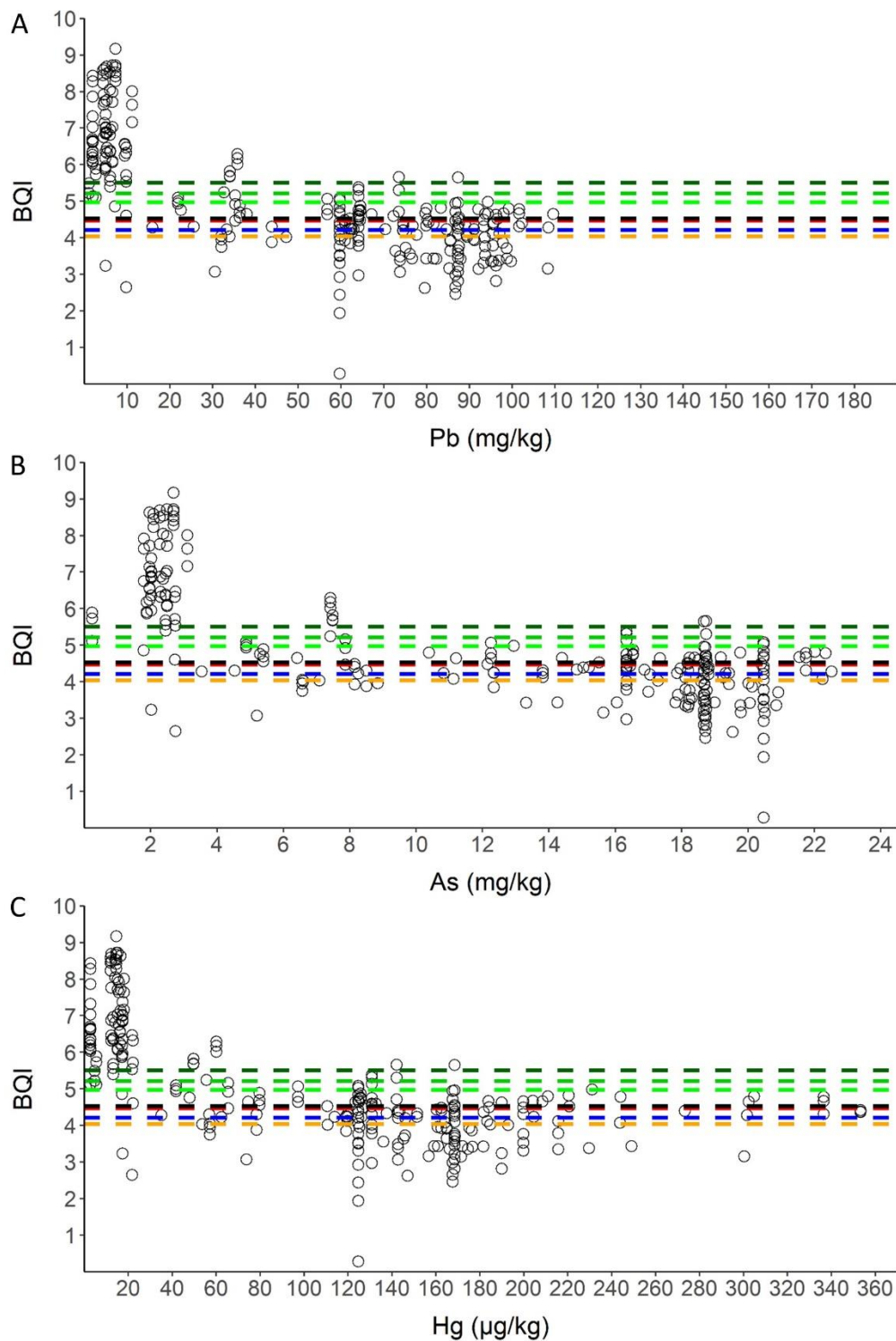


Abbildung 34: Für EIG (Ecological Indicator Group) 4b der BQI (Benthic Quality Index) versus der Schwermetallbelastung durch a) Blei (Pb), b) Arsen (As), c) Quecksilber (Hg) und den Schwellenwerten aus Tabelle 9 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; orange = Ansatz 2; blau = Ansatz 3; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

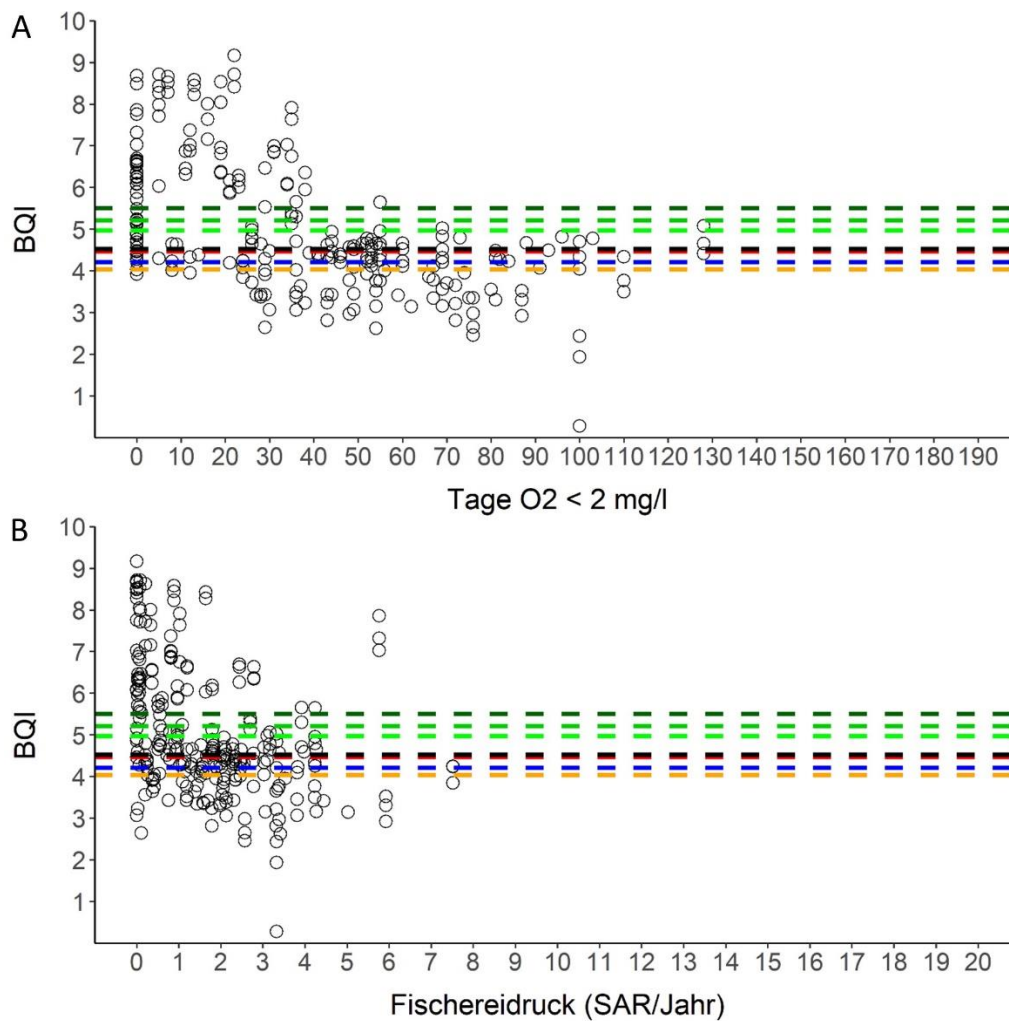


Abbildung 35: Für EIG (Ecological Indicator Group) 4b der BQI (Benthic Quality Index) versus a) der Hypoxie (Anzahl der Tage mit Sauerstoffgehalt (O₂) < 2 mg/l) und b) des Fischereidrucks (Swept Area Ration (SAR) pro Jahr) und den Schwellenwerten aus Tabelle 9 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; orange = Ansatz 2; blau = Ansatz 3; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)



3.5 Schwellenwerttestung für das EIG 5-Gebiet

Das EIG 5-Gebiet kommt innerhalb der deutschen Gewässer im Arkona- und Bornholmbecken vor (Abbildung 6). Es ist definiert durch eine mittleren Bodensalinität von 7,5 bis 10 psu. Eine weitere Unterteilung nach Wassertiefe erfolgt nach Schiele et al. (2016) nicht. Damit umfasst das EIG 5-Gebiet im Arkonabecken die küstennahen infra- teilweise aber auch circalitoralen Bereiche um die Inseln Hiddensee und Rügen sowie ab der Rönnebank und dem Adlergrund Richtung Südosten die dominierenden infra- und circalitoralen Sande und wenigen Schlickflächen (Abbildung 7). In EIG 5-Gebiet liegen insgesamt 439 Hols, wovon 370 Hols in die recht große Referenzfläche fallen (Abbildung 10). Von den 439 Hols gehören 428 Hols zu den Sanden und nur 11 Hols zu den Schlickten. Die berechneten BQI-Werte reichen von 1,73 bis 6,62. Für EIG 5 konnte Ansatz 1 und 4 zur Schwellenwertberechnung angewendet werden (siehe Kapitel 2.5). Der „alte“ und die „neuen“ Schwellenwerte sind in Tabelle 10 aufgelistet. In Abbildung 36 sind die Schwellenwerte aus Tabelle 10 innerhalb eines Histogramms abgebildet. Der „alte“ Schwellenwert ist am niedrigsten, und die fast identischen Schwellenwerte von Ansatz 4/Maximum und Ansatz 1 am höchsten. Die Schwellenwerte von Ansatz 4/95. Perzentil und Ansatz 4/99. Perzentil liegen dazwischen (Abbildung 36).

In Abbildung 37 wird die Häufigkeit der BQI-Werte aus EIG 5 nochmals gezeigt, unterteilt nach den 5 Klassen der WRRL, wenn der Datensatz gemäß Ansatz 4 mit dem Maximum (A), dem 99. Perzentil (B) bzw. dem 95. Perzentil (C) normiert wurde (< rote Linie = schlechter Umweltzustand; zwischen roter und oranger Linie = unbefriedigend; zwischen oranger und gelber Linie = mäßig; zwischen gelber und grüner Linie = gut; zwischen grüner und blauen Linie = sehr gut). Die gelbe Linie entspricht dabei dem jeweiligen Schwellenwert von Ansatz 4. Wenn der EIG 5-Datensatz mit dem 99. Perzentil normiert wird, werden die fünf höchsten Hols abgeschnitten bzw. beim 95. Perzentil die 22 höchsten Hols. Die Unterteilung aller BQI-Werte gemäß Ansatz 4 zeigt, dass die meisten Hols in den „guten“ Bereich fallen, wenige in den „mäßigen“ Bereich und nur sehr wenige Hols in den „schlechten“, „unbefriedigenden“ oder „sehr guten“ Bereich (Abbildung 19).

Tabelle 10: Resultierende Schwellenwerte, Datengrundlage und Methode der verschiedenen Ansätze der Schwellenwertermittlung für EIG (Ecological Indicator Group) 5

| Ansatz | „alt“ | 1 | 4/Max | 4/99P | 4/95P |
|-------------------------------------|-------------------------------|---|---|---|---|
| Schwellenwert | 2,69 | 3,69 | 3,97 | 3,51 | 3,06 |
| Datengrundlage (Anzahl) | Ostseeweiter Datensatz | Referenzdaten (370 Hols) | Alle EIG 5-Stationen (439 Hols) | Alle EIG 5-Stationen (439 Hols) | Alle EIG 5-Stationen (439 Hols) |
| Methode der Schwellenwertermittlung | HELCOM finnischer WRRL-Ansatz | Bootstrapping; GES-Schwelle bei mittlerem 20. Perzentil | Mit Maximum normiert (6,62); bei 0,6 GES-Schwelle | Mit 99. Perzentil (5,85) normiert; bei 0,6 GES-Schwelle | Mit 95. Perzentil (5,09) normiert; bei 0,6 GES-Schwelle |

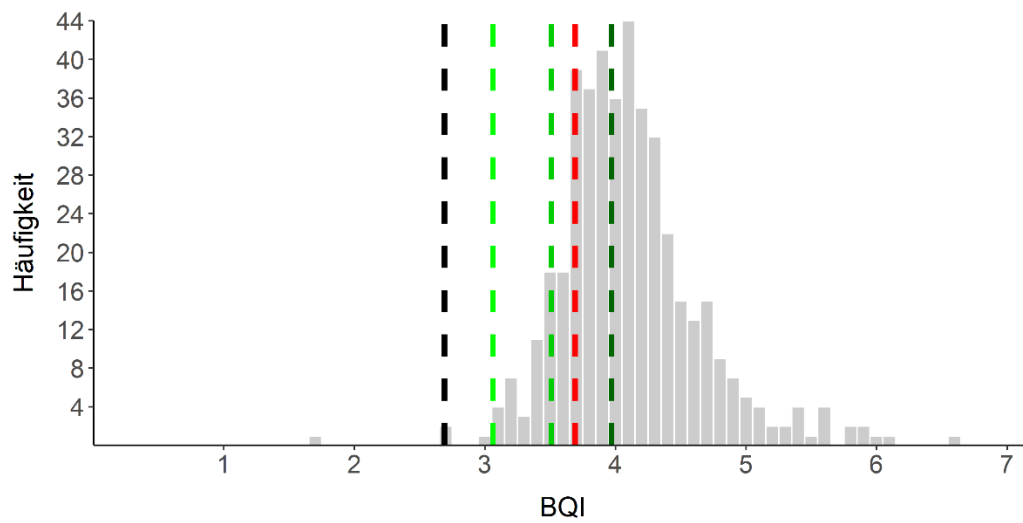


Abbildung 36: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 5 mit den berechneten Schwellenwerten aus Tabelle 10 (vertikal gestrichelte Linien: schwarz = „alter“ Schwellenwert; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

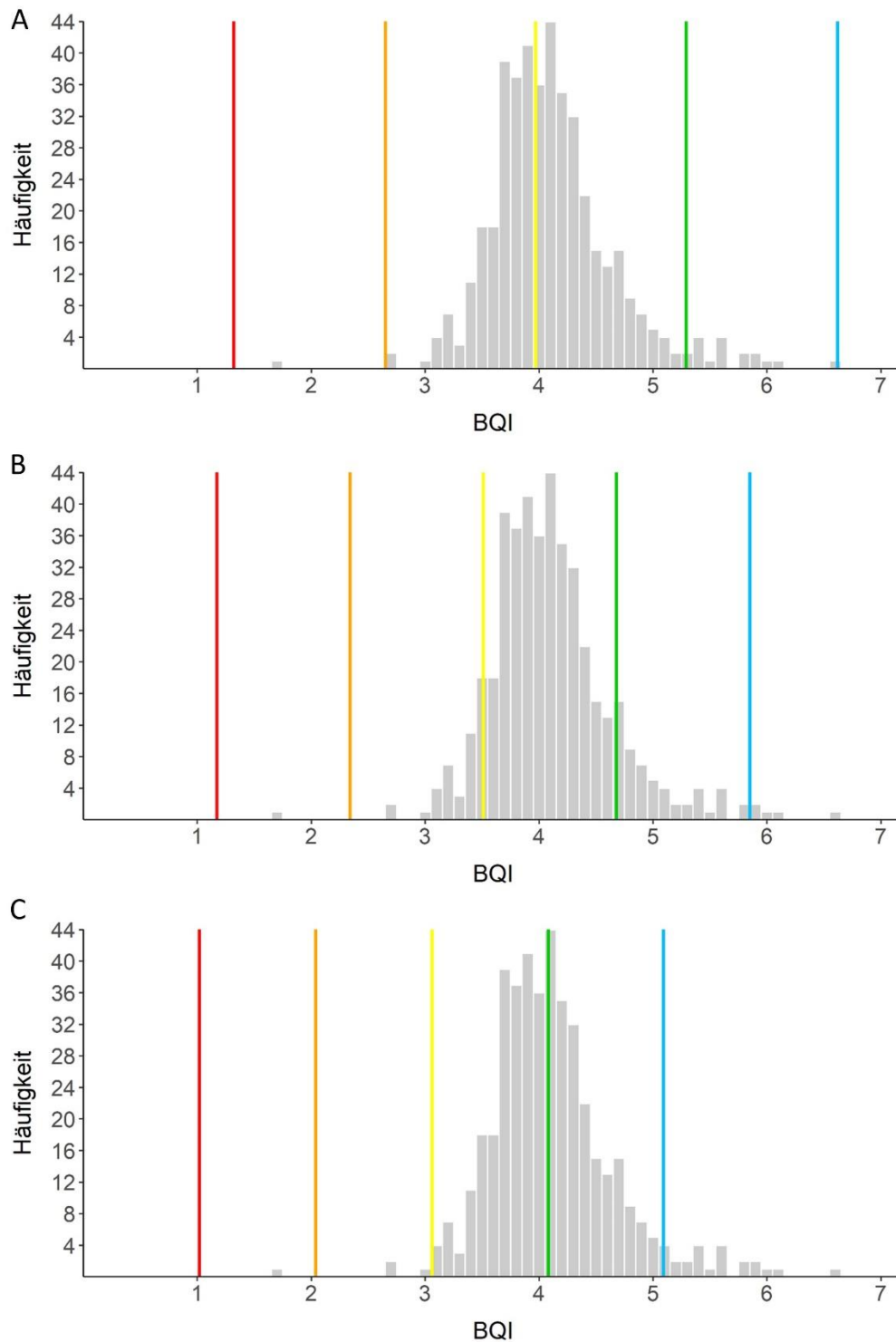


Abbildung 37: Histogramm der BQI (Benthic Quality Index)-Werte aus dem Gebiet von EIG (Ecological Indicator Group) 5 mit der Unterteilung in 5 Gruppen gemäß WRRL (Wasser-Rahmenrichtlinie) nach Normierungswert a) Maximum, b) 99. Perzentil, c) 95. Perzentil; rote Linie = Übergang schlecht zu unbefriedigend; orange = unbefriedigend zu mäßig; gelbe = mäßig zu gut; grüne = gut zu sehr gut; blaue Linie = Normierungswert



Wie für EIG 2 und 4a ist eine Trennung im EIG 5-Gebiet zwischen niedrigen und hohen Stressleveln anhand der berechneten Schwellenwerte nicht eindeutig, da nur einige wenige Hols in den mittleren und hohen Stresslevel-Bereich fallen (Abbildung 38 bis Abbildung 41; Schwellenwerte entsprechen horizontal gestrichelten Linien). Im EIG 5 liegt dies jedoch nicht daran, dass Flächen die von hohen anthropogenen Belastungen betroffen sind nicht oder unzureichend repräsentativ beprobt wurden, sondern schlicht daran, dass hohe bis sehr hohe anthropogene Drücke im EIG 5-Gebiet nicht vorkommen (Abbildung 8, Abbildung 42 bis Abbildung 52). Damit ist eine Bewertung der Schwellenwerte für EIG 5 anhand von Belastungsdaten nicht möglich.

Der „alte“ Schwellenwert ist sehr tief angesetzt und würde nur ein Hol im gesamten EIG 5-Gebiets, und zwar das BQI-Minimum, mit „schlecht“ bewerten. Der Schwellenwert von Ansatz 4/95. Perzentil liegt auch sehr niedrig und nur vier Hols liegen darunter. Dies erscheint nun doch etwas unrealistisch, da nicht das gesamte EIG 5-Gebiet gemäß den Belastungsdaten als Referenzfläche ausgewiesen wurde und auch Flächen mit mittleren anthropogenen Belastungen vorkommen (Abbildung 8). Die Pommer-sche Bucht ist außerdem von hohen Nährstofffrachten aus der Oder betroffen, wodurch organisches Material in den Sedimenten leicht akkumuliert (Leipe et al., 2017). Die Endsenke dieses organischen Material scheint jedoch die tiefen Becken der Ostsee zu sein (Leipe et al., 2017). Da eine Schwellenwert-Bewertung anhand von Belastungsdaten nicht möglich ist, stehen somit die Schwellenwerte von Ansatz 1, Ansatz 4/Maximum und Ansatz 4/99. Perzentil zur Auswahl.

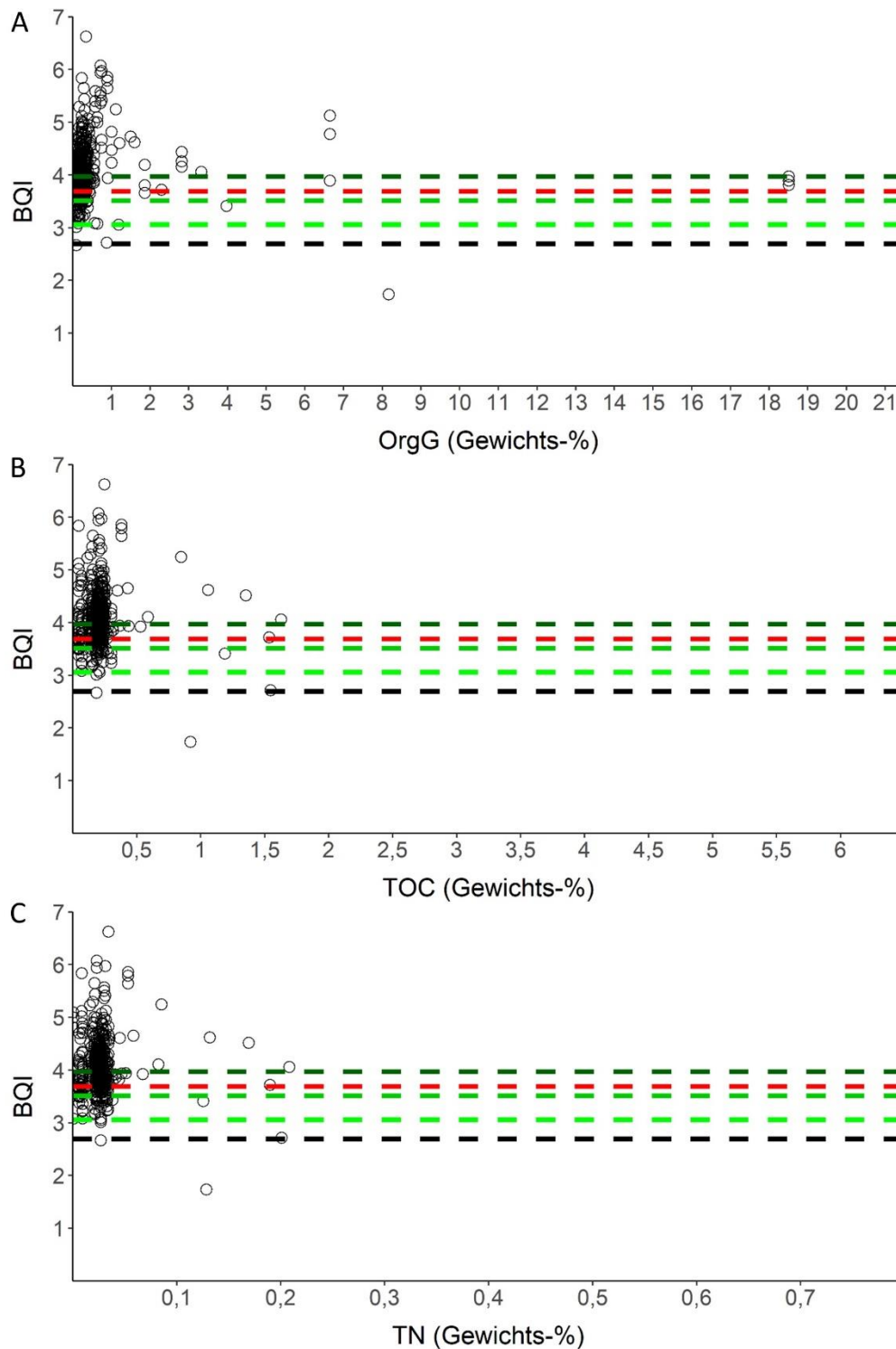


Abbildung 38: Für EIG (Ecological Indicator Group) 5 der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) organischer Gehalt (OrgG), b) Gesamter organischer Kohlenstoff (TOC), c) Gesamtstickstoff (TN) und den Schwellenwerten aus Tabelle 10 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

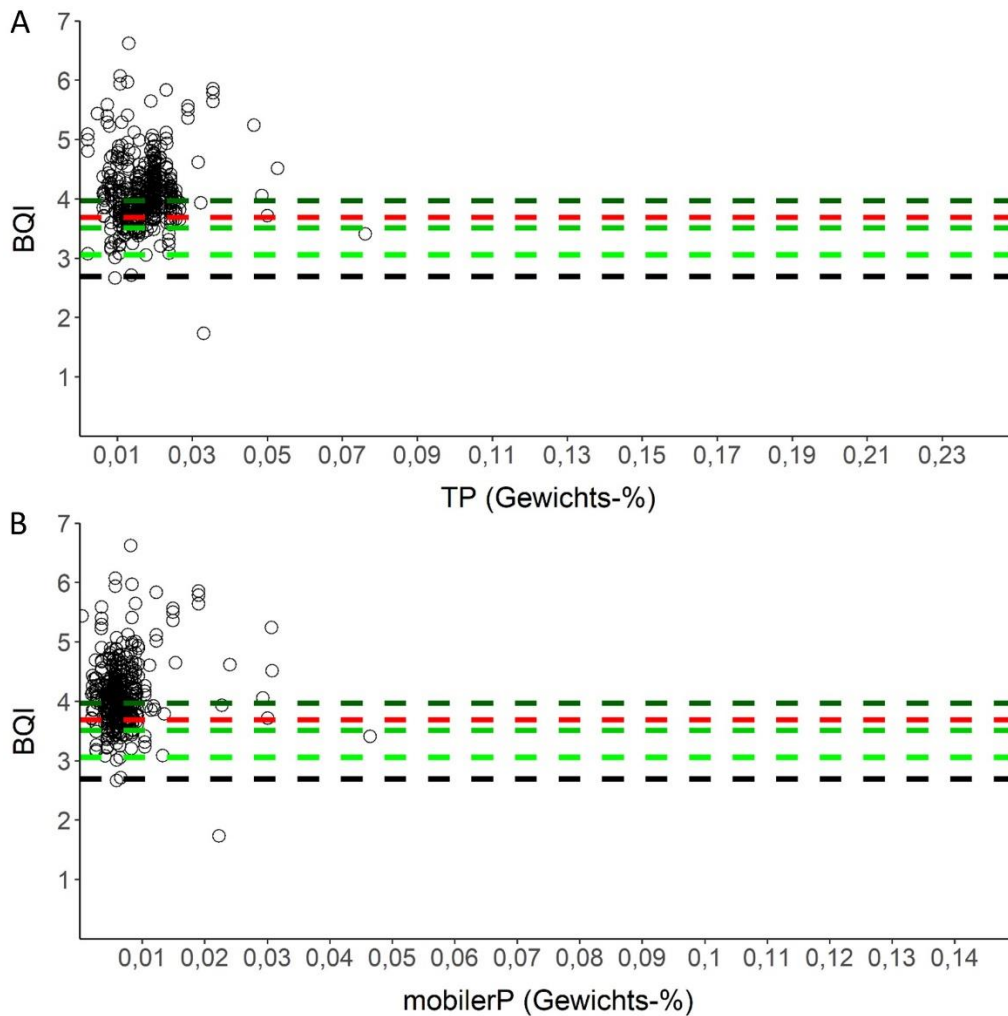


Abbildung 39: Für EIG (Ecological Indicator Group) 5 der BQI (Benthic Quality Index) versus den verschiedenen Eutrophierungsparametern a) Gesamtphosphor (TP), b) mobiler Phosphor (mobiler P) und den Schwellenwerten aus Tabelle 10 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

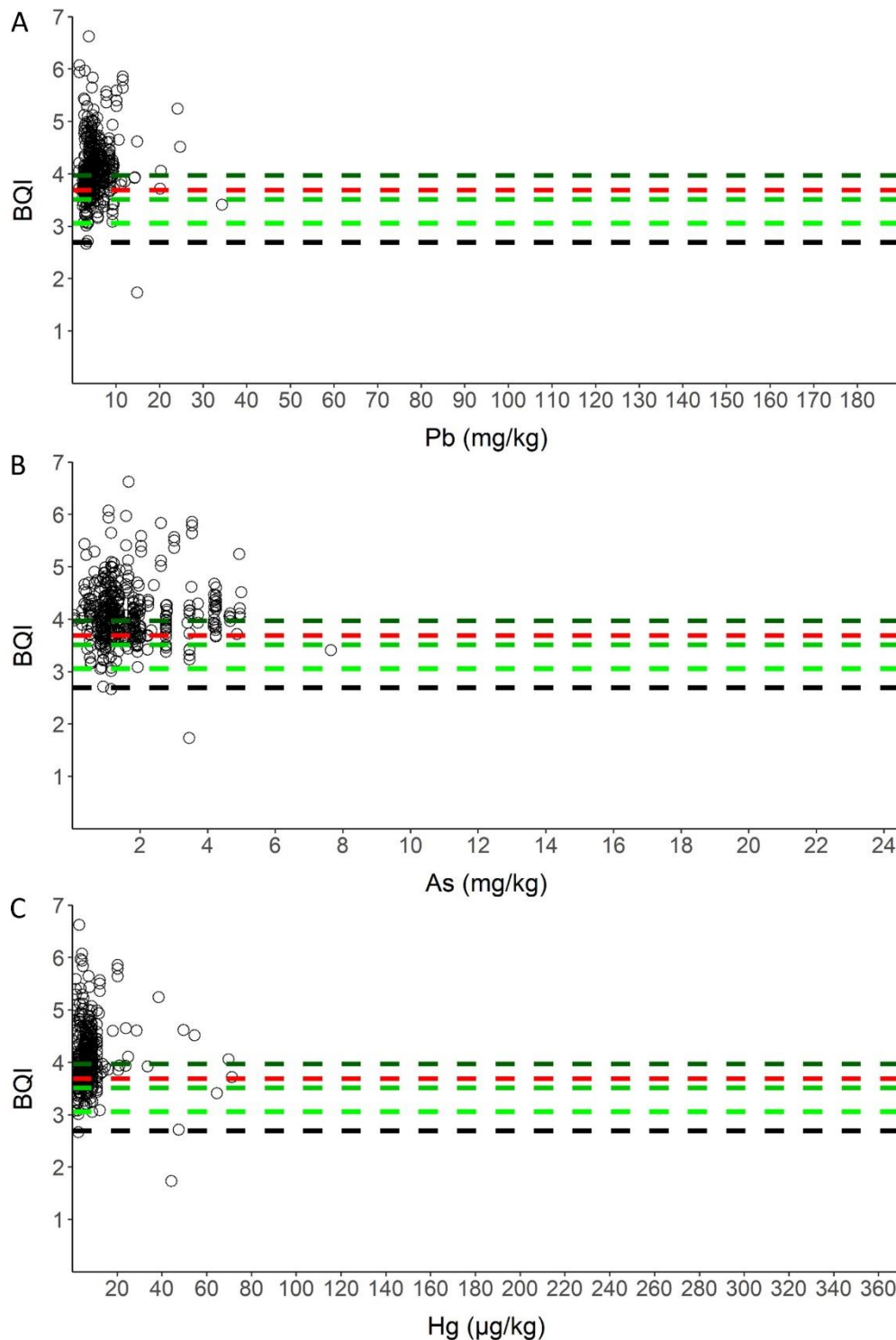


Abbildung 40: Für EIG (Ecological Indicator Group) 5 der BQI (Benthic Quality Index) versus der Schwermetallbelastung durch a) Blei (Pb), b) Arsen (As), c) Quecksilber (Hg) und den Schwellenwerten aus Tabelle 10 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)

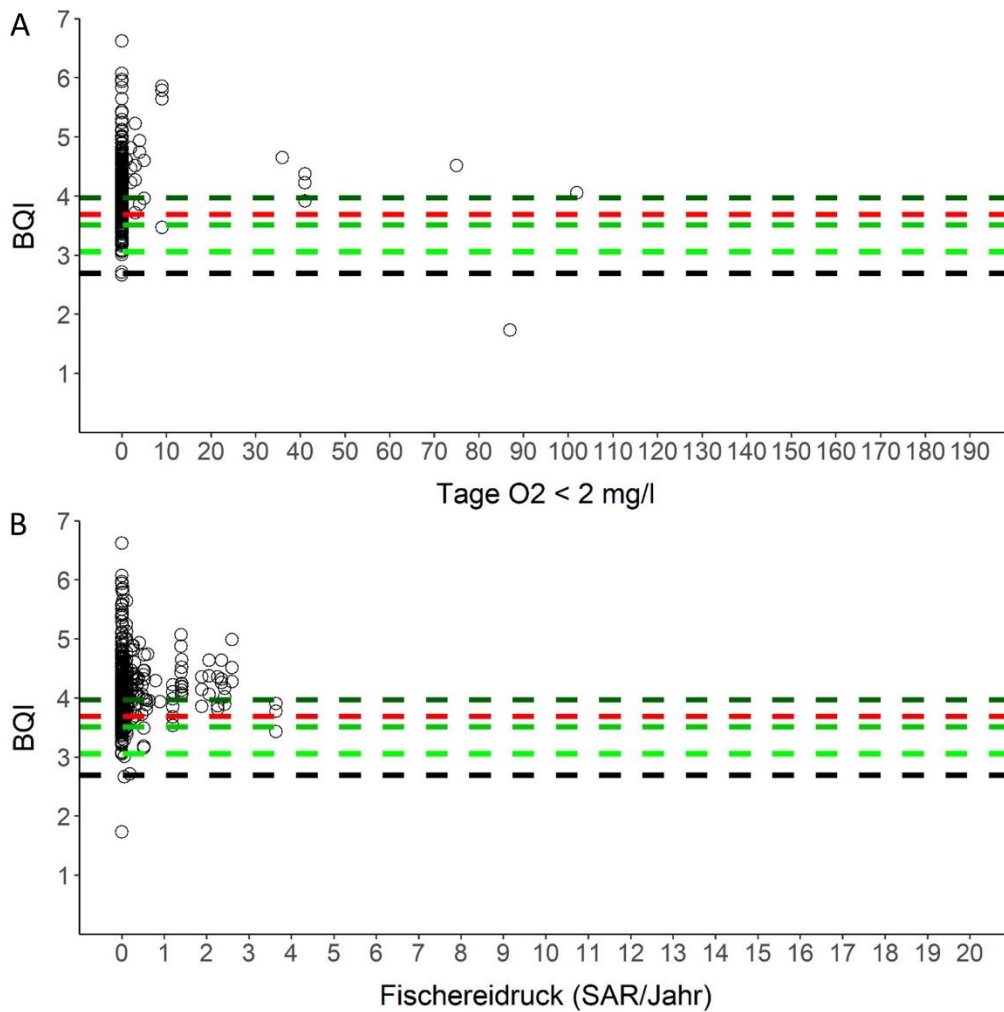


Abbildung 41: Für EIG (Ecological Indicator Group) 5 der BQI (Benthic Quality Index) versus a) der Hypoxie (Anzahl der Tage mit Sauerstoffgehalt (O₂) < 2 mg/l) und b) des Fischereidrucks (Swept Area Ratio (SAR) pro Jahr) und den Schwellenwerten aus Tabelle 10 (horizontal gestrichelte Linien: schwarz = Ansatz „alt“; rot = Ansatz 1; grün = Ansatz 4, farblich abgestuft nach Normierungswert: dunkelgrün = Maximum; mittelgrün = 99. Perzentil; hellgrün = 95. Perzentil)



4 Zusammenfassung und abschließende Empfehlung der Schwellenwertsetzung

In der vorliegenden Studie wurden vier verschiedene Ansätze vorgestellt, wie neue Schwellenwerte gesetzt werden können. Der Erste, Zweite und Dritte folgt dem Vorgehen von Schweden, bei dem definierte Referenzstationen und historische Daten zur Schwellenwertberechnung verwendet werden (Leonardsson et al., 2009). Der vierte Ansatz ist eine rein statistische Methode, die an dem Vorgehen von HELCOM angelehnt ist (HELCOM, 2017), sich jedoch anhand der tatsächlichen Festlegung der Schwellenwerte unterscheidet. Neu ist die Beurteilung der resultierenden Schwellenwerte der verschiedenen Ansätze anhand von modellierten Belastungsdaten und einhergehend damit einer Einschätzung, welcher Ansatz die besten Schwellenwerte generiert. Die anhand dem HELCOM-Vorgehen berechneten und in dieser Studie als „alte“ Schwellenwerte bezeichneten (für Kieler- und Mecklenburger Bucht akzeptiert; für Arkona- und Bornholmbecken nicht akzeptiert; siehe Tabelle 3), wurden ebenfalls in diese Beurteilung mit einbezogen. Das EIG 4-Gebiet wurde, aufgrund einer ungleichmäßigen Verteilung der vorkommenden BQI-Werte in Bezug auf hohe Werte, nochmals neu beurteilt. Es erwies sich für die Schwellenwertfindung als sinnvoll, dieses Gebiet an der 20 m Wassertiefe in ein EIG 4a (> 20 m; eher sandiges Substrat) und EIG 4b-Gebiet (< 20 m; eher schlickiges Substrat) zu trennen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass die „alten“ Schwellenwerte für die EIG 2 bis 5 nicht geeignet sind, zwischen dem „guten“ und „schlechten“ ökologischen Zustand der Weichböden zu unterscheiden und diese damit zu bewerten. In allen fünf EIG standen die Schwellenwerte von dem statistischen Ansatz 4/Maximum und Ansatz 4/99. Perzentil zur Auswahl. In EIG 3 sind die Schwellenwerten von Ansatz 4/Maximum etwas zu hoch angesetzt und würden damit einige gute Stationen mit „schlecht“ bewerten. Dagegen sind in EIG 4a und 4b die Schwellenwerte von Ansatz 4/99. Perzentil etwas zu niedrig angesetzt, wodurch einige schlechte Stationen möglicherweise nicht darunterfallen würden. Grundsätzlich sollte eine Zustandsbewertung eher konservativ erfolgen und eine fälschlicherweise als „gut“ bewertete Station sollte eher vermieden werden als eine fälschlicherweise „schlecht“ bewertete Station. Die deutsche MSRL-Bewertung ist jedoch bereits recht konservativ aufgebaut, da ein BHT der Weichböden mit „schlecht“ bewertet wird, wenn bereits 20% der BQI-Stationen unter den Schwellenwert fallen (BLANO, 2018). Um diese recht strenge Beurteilung nicht noch zusätzlich zu verschärfen, sollten die Schwellenwerte nicht zu hoch angesetzt werden, um möglichst falsch „schlechte“ Bewertungen zu minimieren. Nach diesen Überlegungen werden für EIG 2 bis 5 die Schwellenwerte des Ansatzes 4/99. Perzentil zur nächsten nationalen MSRL-Bewertung der Weichböden empfohlen (siehe Tabelle 11). Für EIG 6, welches den südöstlichsten Zipfel der Pommerschen Bucht umfasst (Abbildung 6), konnten aufgrund der in diesem Gebiet geringen Datengrundlage keine Schwellenwerte neu berechnet werden. Da die EIG 6-Fläche nur einen kleinen Randbereich des Bornholmbeckens ausmacht, ist eine MSRL- oder HOLAS-Bewertung dieser beiden Becken ohne EIG 6-Stationen jedoch unproblematisch.



Tabelle 11: Die für die deutsche Ostsee relevanten EIG (Ecological Indicator Group) nach Schiele et al. (2016), verändert durch die Trennung des EIG 4-Gebiets, und den abschließend empfohlenen Schwellenwerten nach Ansatz 4/99. Perzentil

| EIG | Salinität | Wassertiefe [m] | Empfohlener GES-Schwellenwert | Bewertungseinheit |
|-----|-----------|--------------------|-------------------------------|---|
| 2 | 18-30 | Flacher als 20m | 7,98 | Kieler- und Mecklenburger Bucht |
| 3 | 18-30 | Tiefer als 20m | 9,50 | Kieler- und Mecklenburger Bucht |
| 4a | 10-18 | Flacher als 20m | 6,04 | Kieler- und Mecklenburger Bucht, Arkonabecken |
| 4b | 10-18 | Tiefer als 20m | 5,21 | Mecklenburger Bucht, Arkonabecken |
| 5 | 7,5-10 | Keine Unterteilung | 3,51 | Arkona- und Bornholmbecken |
| 6 | 5-7,5 | Keine Unterteilung | - | Bornholmbecken |

Die Schwellenwerte konnten nur für die deutschen Bereiche der Ostsee angepasst werden, da für die gesamten HELCOM-Becken keine ausreichenden Daten für flächendeckenden BQI-Werte und Belastungsdaten zur Verfügung stehen. Die Schwellenwerte sind jedoch trotzdem anwendbar für die kommende nationale MSRL-Bewertung Deutschlands. Für die HOLAS III-Bewertung kommt eine Verbesserung der Schwellenwerte zu spät. Für HOLAS IV müsste die Übertragbarkeit der überarbeiteten Schwellenwerte auf die anderen Bereiche der Becken getestet werden. Dies kann nur in einer gemeinsamen Anstrengung von Deutschland, Schweden, Polen und Dänemark erfolgen



Literaturverzeichnis

- Andersen, J. H., Carstensen, J., Conley, D. J., Dromph, K., Fleming-Lehtinen, V., Gustafsson, B. G., et al. (2017). Long-term temporal and spatial trends in eutrophication status of the Baltic Sea. *Biol. Rev.* 92, 135–149. doi:10.1111/brv.12221.
- BLANO (2018). Indikatorblatt Zustand Weichböden-Makrofaunagemeinschaften (BQI), Hintergrunddokument zu: BMU (Hrsg.), Zustand der deutschen Ostseegewässer 2018. Available at: https://www.meeresschutz.info/berichte-art-8-10.html?file=files/meeresschutz/berichte/art8910/zyklus18/Zustandsbericht_Ostsee_2018.pdf.
- BMU (2018). Zustand der deutschen Ostseegewässer 2018 - Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie - Bericht gemäß § 45j i.V.m. §§ 45c, 45d und 45e des Wasserhaushaltsgesetzes. Verabschiedet von Bund/Länder-Ausschuss Nord- und Ostsee (BLANO) am 13.12.2018. doi:10.1007/s35152-018-0086-4.
- Carstensen, J. (2007). Statistical principles for ecological status classification of Water Framework Directive monitoring data. *Mar. Pollut. Bull.* 55, 3–15. doi:10.1016/j.marpolbul.2006.08.016.
- European Commission (2022). MSFD CIS Guidance Document No. 19, Article 8 MSFD, May 2022.
- EUSeaMap (2019). Broad-Scale Predictive Habitat Map - "Salinity regime (a habitat descriptor); EMODnet broad-scale seabed habitat map for Europe (v2019), licensed under CC-BY 4.0 from the European Marine Observation and Data Network (EMODnet) Seabed Habitats initiative (w.
- Fleischer, D., and Zettler, M. L. (2009). An adjustment of benthic ecological quality assessment to effects of salinity. *Mar. Pollut. Bull.* 58, 351–357. doi:10.1016/j.marpolbul.2008.10.016.
- HELCOM (2017). Endorsement of GES boundary for core indicator 'State of the soft-bottom macrofauna community'. STATE & CONSERVATION 5E-2017, 3-4-Rev.1.
- HELCOM (2018). State of the soft-bottom macrofauna community - Key Message. HELCOM core indicator report. Available at: <http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/indicators/state-of-the-soft-bottom-macrofauna-community/>.
- HELCOM (2021). Cumulative impact on benthic biotopes; State & Conservation 15-2021; 3J-23. Available at: <http://www.helcom.fi>.
- Hertling, H. (1928). Untersuchungen über die Ernährung von Meeresfischen. I. Quantitative Nahrungsuntersuchungen an Pleuronektiden und einigen anderen Fischen der Ostsee. *Berichte der Dtsch. wissenschaftlichen Kommission für Meeresforsch.* 4, 25–124.
- Hiddink, J. G., Jennings, S., Kaiser, M. J., Queirós, A. M., Duplisea, D. E., and Piet, G. J. (2006). Cumulative impacts of seabed trawl disturbance on benthic biomass, production, and species richness in different habitats. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 63, 721–736. doi:10.1139/f05-266.
- Josefson, A. B., Hansen, J. L. S., Asmund, G., and Johansen, P. (2008). Threshold response of benthic macrofauna integrity to metal contamination in West Greenland. *Mar. Pollut. Bull.* 56, 1265–1274. doi:10.1016/j.marpolbul.2008.04.028.
- Kutty, M. K., and Desai, B. N. (1968). A comparison of the efficiency of the bottom samplers used in benthic studies off Cochin. *Mar. Biol.* 1, 168–171. doi:10.1007/BF00347106.
- Leipe, T., Naumann, M., Tauber, F., Radtke, H., Friedland, R., Hiller, A., et al. (2017). Regional distribution patterns of chemical parameters in surface sediments of the south-western Baltic Sea and their possible causes. *Geo-Marine Lett.* 37, 593–606. doi:10.1007/s00367-017-0514-6.
- Leonardsson, K., Blomqvist, M., and Rosenberg, R. (2009). Theoretical and practical aspects on benthic quality assessment according to the EU-Water Framework Directive – Examples from Swedish waters. *Mar. Pollut. Bull.* 58, 1286–1296. doi:10.1016/j.marpolbul.2009.05.007.
- Levin, L. A., Ekau, W., Gooday, A. J., Jorissen, F., Middelburg, J. J., Naqvi, S. W. A., et al. (2009). Effects of natural and human-induced hypoxia on coastal benthos. *Biogeosciences* 6, 2063–2098.



doi:10.5194/bg-6-2063-2009.

- Marx, D., Feldens, A., Papenmeier, S., Feldens, P., Romoth, K., Schaub, I., et al. Benthic broad and other habitat types in the German Baltic Sea. *Prep.*
- MSRL 2008/56/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Juni 2008 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie).
- Powilleit, M., Kleine, J., and Leuchs, H. (2006). Impacts of experimental dredged material disposal on a shallow, sublittoral macrofauna community in Mecklenburg Bay (western Baltic Sea). *Mar. Pollut. Bull.* 52, 386–396. doi:10.1016/j.marpolbul.2005.09.037.
- Remane, A. (1934). Die Brackwasserfauna: mit besonderer Berücksichtigung der Ostsee. *Zool. Anz.* 36, 34–74.
- Rosenberg, R., Blomqvist, M., Nilsson, H. C., Cederwall, H., and Dimming, A. (2004). Marine quality assessment by use of benthic species-abundance distributions: A proposed new protocol within the European Union Water Framework Directive. *Mar. Pollut. Bull.* 49, 728–739. doi:10.1016/j.marpolbul.2004.05.013.
- Schiele, K. S., Darr, A., Zettler, M. L., Berg, T., Blomqvist, M., Daunys, D., et al. (2016). Rating species sensitivity throughout gradient systems - a consistent approach for the Baltic Sea. *Ecol. Indic.* doi:10.1016/j.ecolind.2015.09.046.
- Schröder, A., Gutow, L., and Gusky, M. (2008). Auswirkungen von Grundschieppnetzfishereien sowie von Sand- und Kiesabbauvorhaben auf die Meeresbodenstruktur und das Benthos in den Schutzgebieten der deutschen AWZ der Nordsee.
- Thulin, G. (1922). Bottenboniteringar i södra Östersjön i samband med fisktrålingar. *Sven. Hydrogr. Kommissionens Skr.* 6, 1–9.
- Tillin, H. M., Hiddink, J. G., Jennings, S., and Kaiser, M. J. (2006). Chronic bottom trawling alters the functional composition of benthic invertebrate communities on a sea-basin scale. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 318, 31–45. doi:10.3354/meps318031.
- Ugland, K. I., Bjørgesæter, A., Bakke, T., Fredheim, B., and Gray, J. S. (2008). Assessment of environmental stress with a biological index based on opportunistic species. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 366, 169–174.
- van Loon, W. M. G. M., Walvoort, D. J. J., van Hoey, G., Vina-Herbon, C., Blandon, A., Pesch, R., et al. (2018). A regional benthic fauna assessment method for the Southern North Sea using Margalef diversity and reference value modelling. *Ecol. Indic.* 89, 667–679. doi:10.1016/j.ecolind.2017.09.029.
- Zettler, M. L., Friedland, R., Gogina, M., and Darr, A. (2017). Variation in benthic long-term data of transitional waters: Is interpretation more than speculation? *PLoS One* 12, 1–22. doi:10.1371/journal.pone.0175746.
- Zettler, M. L., Karlsson, A., Kontula, T., Gruszka, P., Laine, A. O., Herkül, K., et al. (2014). Biodiversity gradient in the Baltic Sea: A comprehensive inventory of macrozoobenthos data. *Helgol. Mar. Res.* 68, 49–57. doi:10.1007/s10152-013-0368-x.
- Zettler, M. L., Proffitt, C. E., Darr, A., Degraer, S., Devriese, L., Greathead, C., et al. (2013). On the myths of indicator species: Issues and further consideration in the use of static concepts for ecological applications. *PLoS One* 8, e78219. doi:10.1371/journal.pone.0078219.
- Zettler, M. L., Schiedek, D., and Bobertz, B. (2007). Benthic biodiversity indices versus salinity gradient in the southern Baltic Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 55, 258–270. doi:10.1016/j.marpolbul.2006.08.024.

Anhang

Die zur Abgrenzung der Referenzflächen für die verschiedenen Stressoren festgelegten Grenzen aus Tabelle 5 zwischen belastende und nicht belastende Bereiche – in den folgenden Abbildungen als grün gestrichelte vertikale Linie dargestellt. Verwendet wurden alle BQI-Werte der untersuchten südlichen Ostsee, farblich unterschieden nach den EIG-Gebieten.

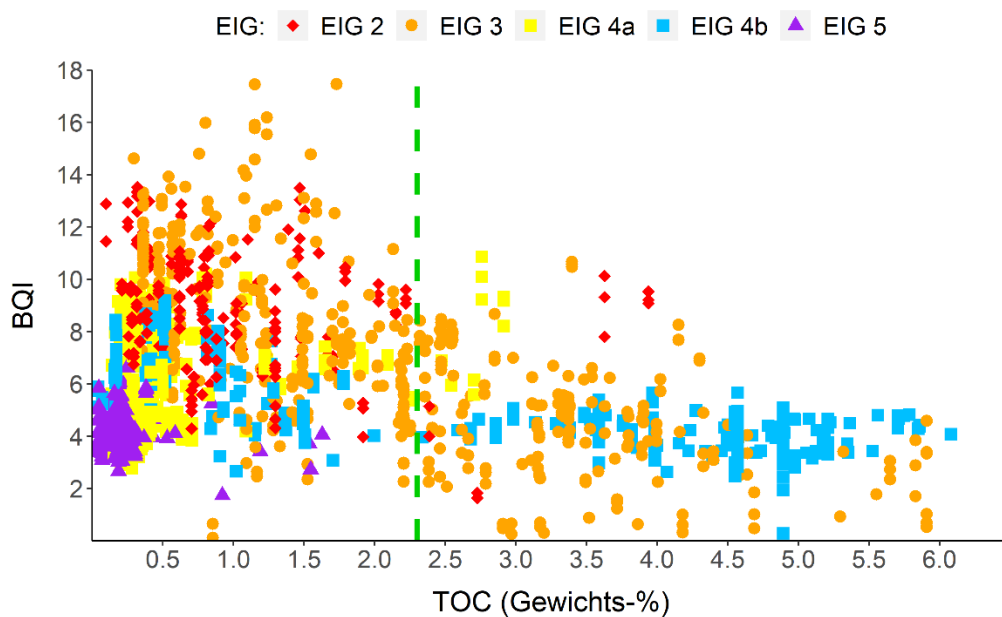


Abbildung 42: BQI (Benthic Quality Index) versus TOC (Gesamter organischer Kohlenstoff; Gewichts-%), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten für die Bestimmung der Referenzfläche

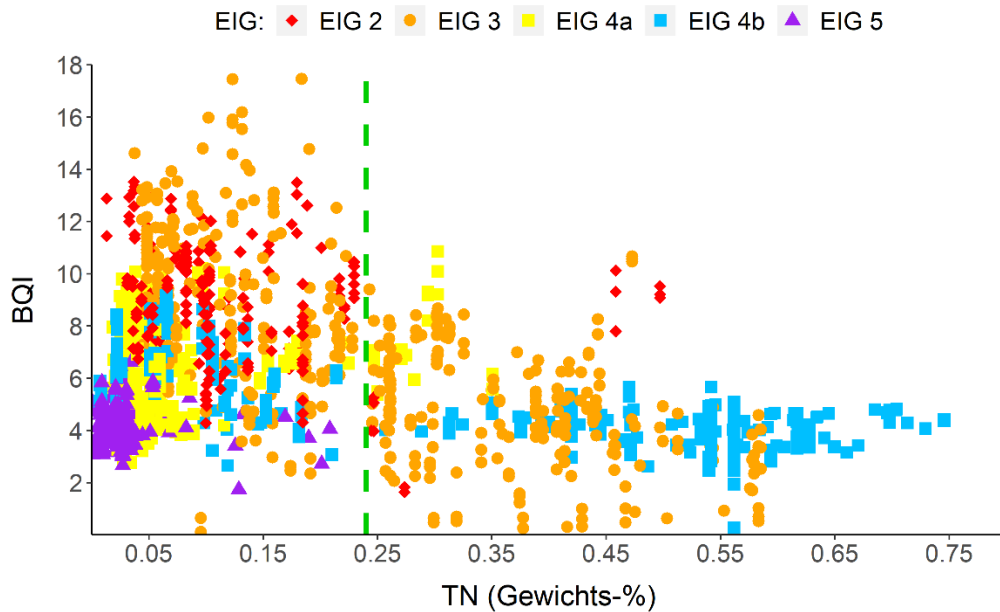


Abbildung 43: BQI (Benthic Quality Index) versus TN (Gesamtstickstoff; Gewichts-%), farblich unterschieden nach Ecological Indicator Group (EIG) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten für die Bestimmung der Referenzfläche

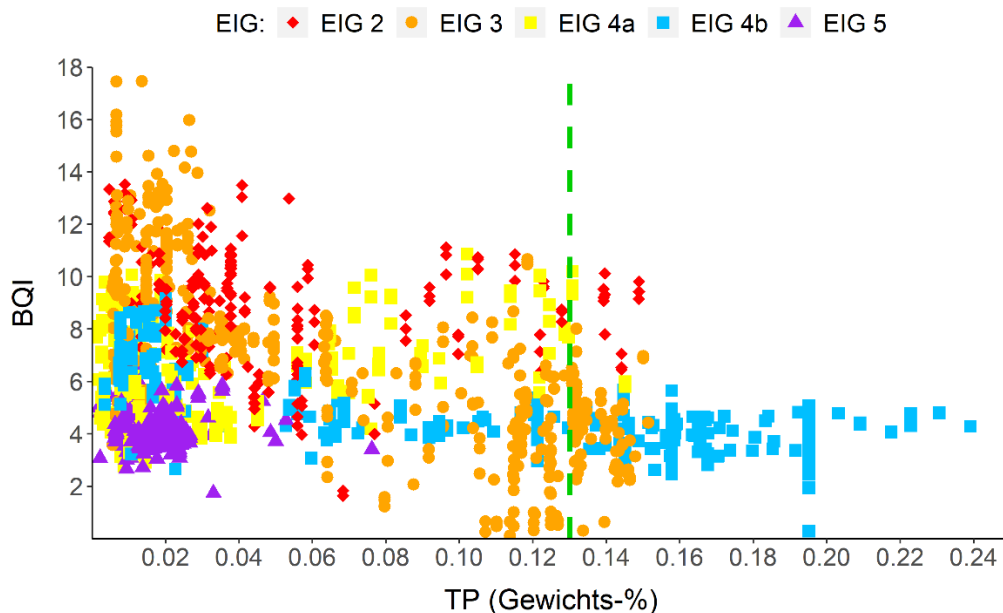


Abbildung 44: BQI (Benthic Quality Index) versus TP (Gesamtphosphor; Gewichts-%), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten für die Bestimmung der Referenzfläche

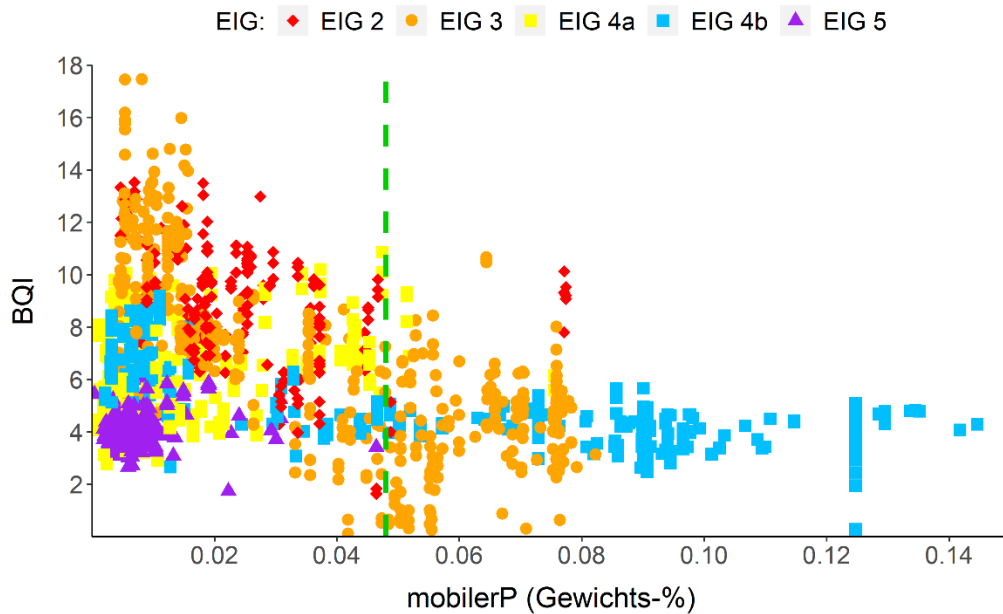


Abbildung 45: BQI (Benthic Quality Index) versus mobilerP (mobiler Phosphor; Gewichts-%), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten für die Bestimmung der Referenzfläche

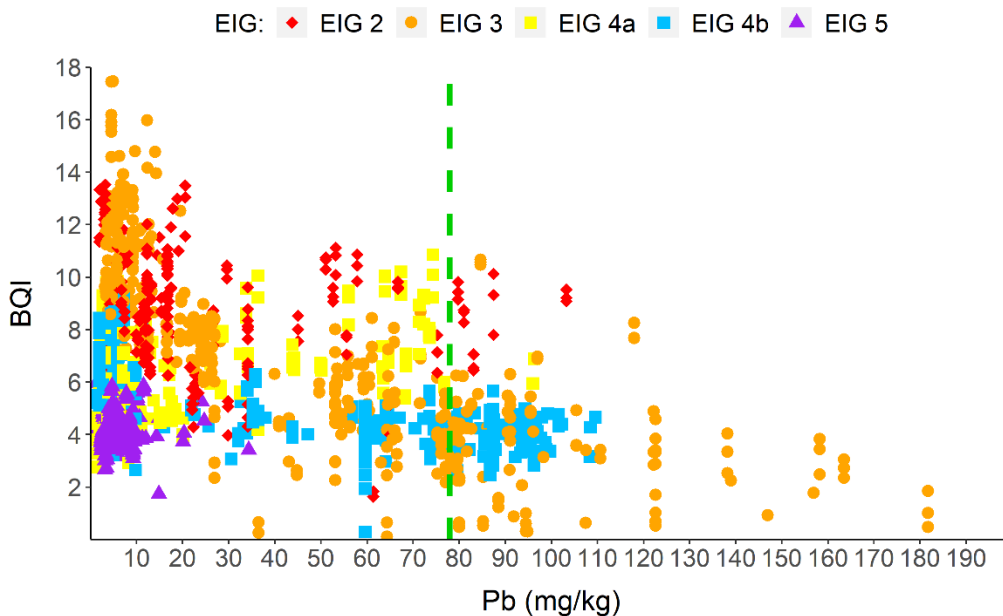


Abbildung 46: BQI (Benthic Quality Index) versus Pb (Blei; mg/kg), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten für die Bestimmung der Referenzfläche

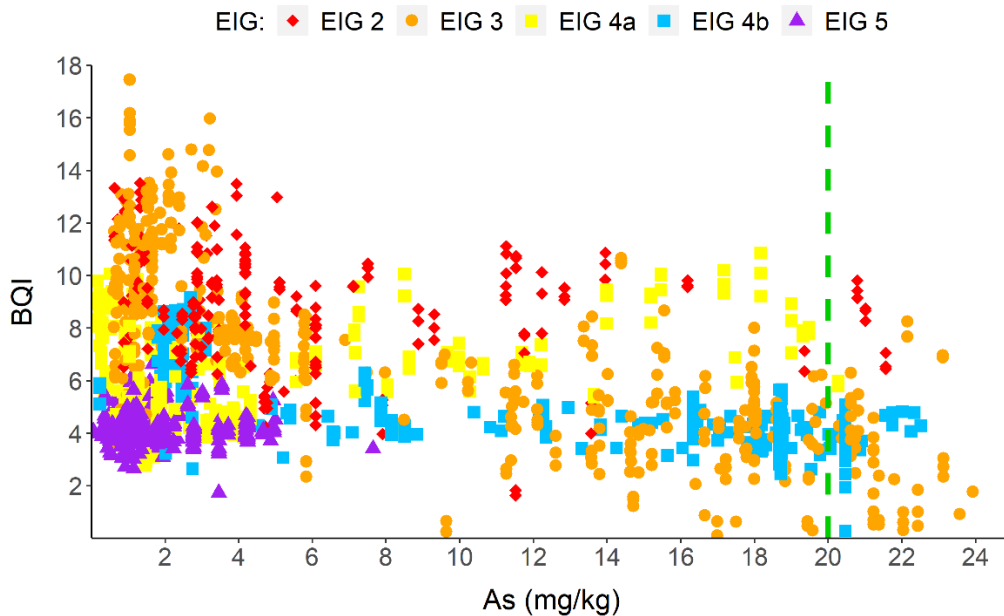


Abbildung 47: BQI (Benthic Quality Index) versus As (Arsen; mg/kg), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten für die Bestimmung der Referenzfläche

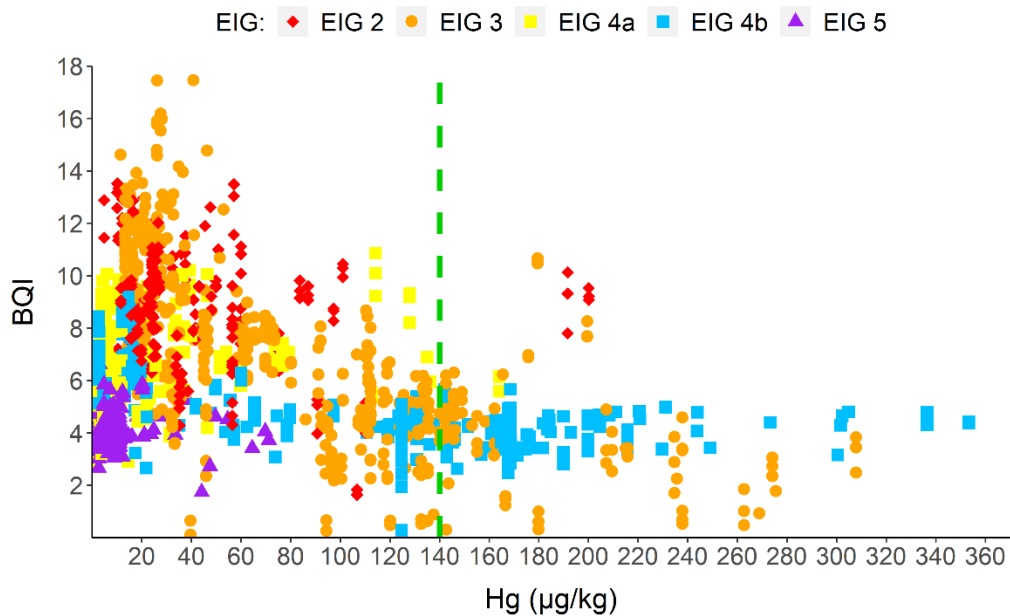


Abbildung 48: BQI (Benthic Quality Index) versus Hg (Quecksilber; µg/kg), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten für die Bestimmung der Referenzfläche

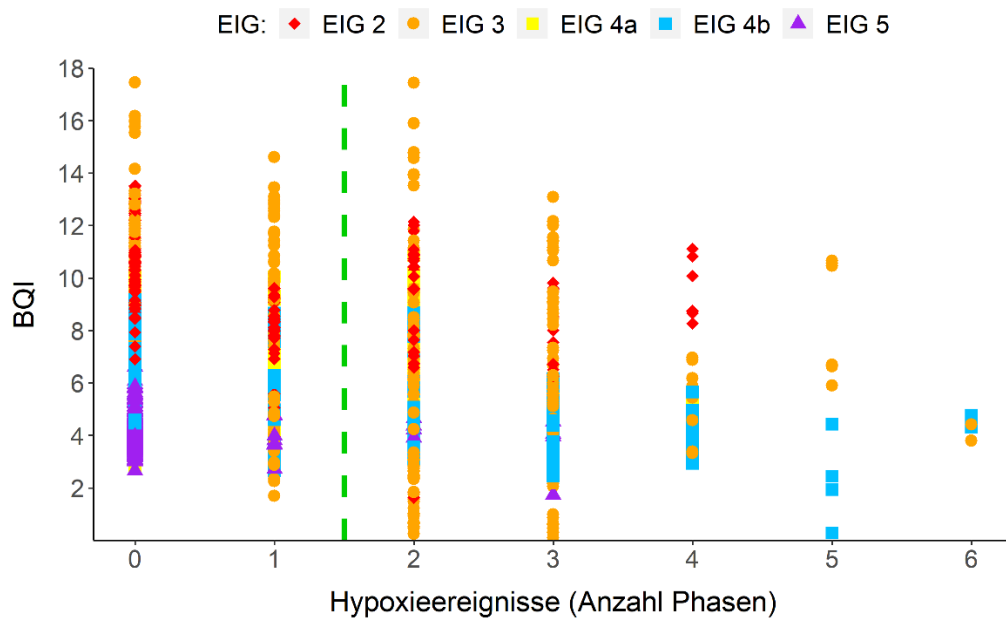


Abbildung 49: BQI (Benthic Quality Index) versus Hypoxieereignisse (Phasen von mindestens 7 Tage am Stück in denen O₂-Konzentration unter 2 mg/l liegt; Anzahl Phasen), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten für die Bestimmung der Referenzfläche

Die Stressparameter, die nicht für die Abgrenzung der Referenzflächen verwendet wurden, werden in den folgenden Abbildungen dargestellt. Eine Einschätzung der Grenze zwischen belastende und nicht belastende Bereiche wurde hier ebenfalls durchgeführt (grün gestrichelte vertikale Linien).

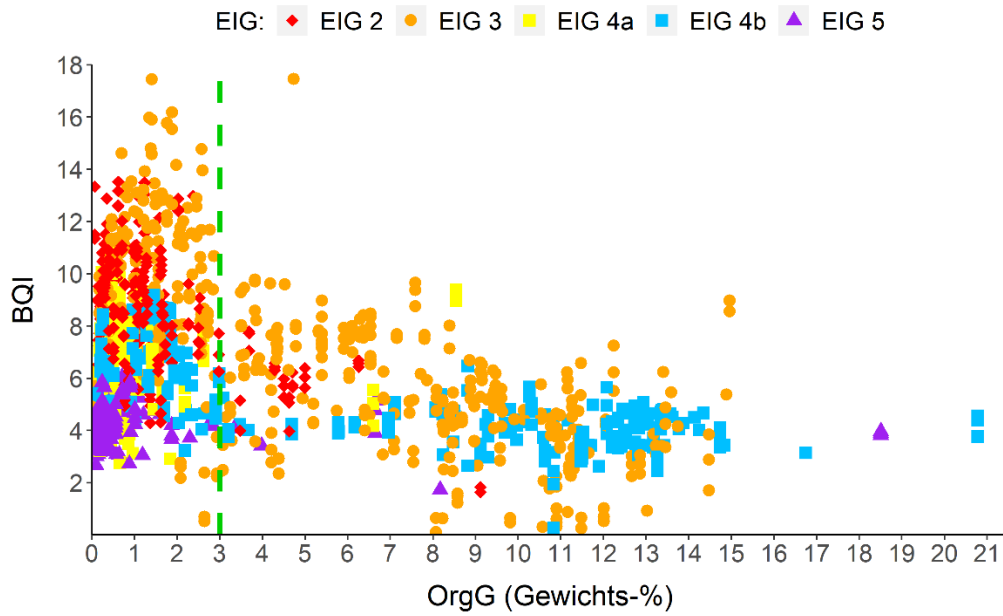


Abbildung 50: BQI (Benthic Quality Index) versus OrgG (Organischer Gehalt; Gewichts-%), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten

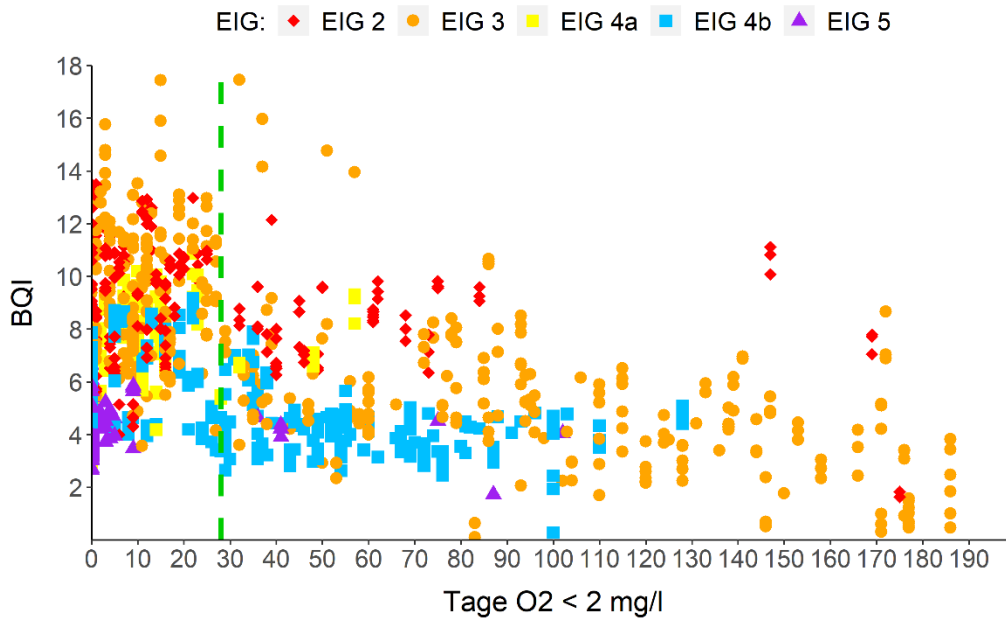


Abbildung 51: BQI (Benthic Quality Index) versus Hypoxie (Anzahl der Tage mit Sauerstoffgehalt (O₂) < 2 mg/l), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten

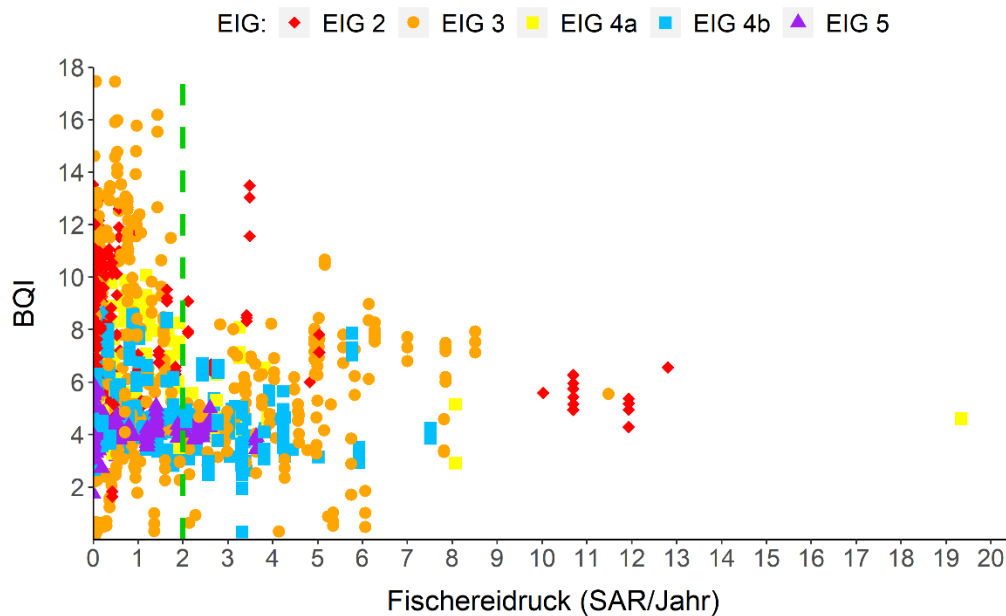


Abbildung 52: BQI (Benthic Quality Index) versus Fischereidruck (Swept Area Ration (SAR) pro Jahr), farblich unterschieden nach EIG (Ecological Indicator Group) 2 bis 5; die vertikale grün gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen unbelastenden und belastenden Werten