

# ARCHIV FÜR GESCHIEBEKUNDE

Herausgegeben vom Archiv für Geschiebekunde am  
Geologisch-Paläontologischen Institut und Museum  
der Universität Hamburg



Arch. Geschiebekde.	Band I	Heft 11	Seite 625 – 688	Hamburg März 1995
---------------------	--------	---------	--------------------	----------------------



# Hochauflösende Rekonstruktion von Eistransportwegen: Die "Leitserienmethode"

Roland VINX

VINX R 1993 Hochauflösende Rekonstruktion von Eistransportwegen: Die "Leitserienmethode" (Enhanced-Resolution Reconstruction of Ice Flow Paths: The "Indicator Sequence Method") - *Arch. Geschiebekde.* 1 (11): 625-640, 9 Abb., Hamburg 1995. ISSN 0936-2967.

**A b s t r a c t:** A new petrographically and petrochemically based approach designed for high-resolution ice flow reconstructions is presented. Suites of related rocks ("indicator sequences") in assemblages of glacially transported clasts are utilized instead of traditional "single rock indicators".

*Roland Vinx, Mineralogisch-Petrographisches Institut, Universität Hamburg, Grindelallee 48, D-20146 Hamburg.*

## 1. Einleitung

Dieser Beitrag soll einen petrographisch und petrochemisch begründeten neuen Ansatz zur systematischen Auswertung kristalliner Geschiebe für glazialgeologische Fragestellungen vorstellen. Ziel ist die Rekonstruktion von Eisbewegungen pleistozäner Inlandeisdecken mit maximal möglicher Auflösung. Chemische (Röntgenfluoreszenz-) Gesteinsanalysen sind in begrenztem Umfang erforderlich. Die Durchführbarkeit hat sich auf der Grundlage eines 1992 erstmals dargestellten Konzepts (VINX 1992) als realistisch erwiesen. Erste Anwendungsversuche wurden von ARDASHTY 1992 und MOSEBACH 1992 in ihren vom Verfasser vergebenen Diplomarbeiten unternommen. Die im Folgenden beschriebenen Erfahrungen mit der konzeptionell abgeschlossenen Methode legen es nahe, sie zur Diskussion zu stellen, obwohl präzise Wegmarken eines Segmentes einer Inlandeisdecke noch nicht ermittelt sind. Dies liegt daran, daß eine umfangreiche Sammlung von Serien geeigneter Referenz-Gesteinsproben und -analysen erforderlich ist. An ihrem Ausbau wird parallel gearbeitet. Es geht mit diesem Beitrag auch darum, daß bei Geschiebeauswertungen nebenbei anfallendes, potentiell aussagekräftiges Material nicht unbeachtet bleibt. Hiermit sind lokal in erhöhter Konzentration auftretende gabbroide und doleritische Geschiebe gemeint. Diese bieten, wie gezeigt werden soll, besonders gute Voraussetzungen zur verbesserten Rekonstruktion von Eis-Transportpfaden.

Aus Platzgründen können hier die zugrunde liegenden Datengrundlagen, Beschreibungen der relevanten Gesteinsserien und vollständigen Argumentationen nicht dargestellt werden. Beispieldokumentationen sind auf Anforderung vom Verfasser erhältlich.

## 2. Problematik der Ermittlung von Eistransportwegen an Hand von Leitgeschieben

Der auffällige, aber durchweg geringe Anteil ausreichend großer (> ca. 2 cm Ø) und daher makroskopisch bestimmbarer Geschiebe in Tills und glaziofluviatilen Ablagerungen der pleistozänen Vereisungen kann zu Rückschlüssen über Materialherkunft und Ferntransportwege herangezogen werden. Zur präzisen Rekonstruktion des jeweiligen Eis-Bewegungsbildes im Herkunftsgebiet kommen nur direkt vom Ausgangsvorkommen herantransportierte Ferngeschiebe bekannter Herkunft in Betracht. In der Praxis scheitert dies jedoch daran, daß einem einzelnen Geschiebe direkter Transport nicht anzusehen ist. Es könnte in

Etappen während mehrerer Vereisungen seinen Weg gefunden haben. Nur durch das überwiegende Auftreten von Leitgeschieben ähnlicher Herkunftsrichtung lassen sich bisher Eis-Transportpfade der einzelnen Vereisungen anhand der Geschiebeführung näherungsweise rekonstruieren. Das direkteste Auswertungsverfahren hierzu entwickelte SMED 1993; er beschreibt es als "Circle-Map-Methode".

Die "Circle-Map-Methode" ist eine besonders unkomplizierte Darstellungsmethode für die Ergebnisse von Leitgeschiebezählungen. Es muß eine ausreichende Zahl von Leitgeschieben (mindestens insgesamt ca. 50 kristalline und sedimentäre) dem Till oder Glaziofluviatil entnommen werden und dessen Herkunftsgebiet in einer Landkarte der skandinavischen Herkunftsgebiete markiert werden. Der Transportpfad des betreffenden Eissegments wird mit einer Auflösung im Größenordnungsbereich von 100 - 200 km auf der Landkarte durch eine gewöhnlich schweifartige Anordnung der Herkunftsorte sichtbar. Mehrfachfunde werden durch entsprechend größere Punkte oder Kreise berücksichtigt.

Die Ergebnisse SMEDs zeigen, daß es oft klar abgrenzbare und individuelle "Herkunftskorridore" für die dominierenden Geschiebe einer gegebenen glazialen Ablagerung an gegebener Lokalität gibt.

Bisher ist kein Ansatz beschrieben worden, der zur Festlegung präziser Wegmarken entlang der Transportpfade von Teilbereichen pleistozäner Eisdecken geeignet sein könnte. In diesem Beitrag geht es um eine solche Methode. Sie bietet sich vor allem als Nebenprodukt und Erweiterung von Leitgeschiebezählungen an, kann aber auch für sich durchgeführt werden.

Die "Leitserienmethode" ist nicht als Alternative oder als Ersatz bisheriger Leitgeschiebemethoden gedacht, wie sie von SCHUDEBEURS 1980, EHLERS 1990 und SMED 1993 referiert und diskutiert wurden: z.B. HESEWANN 1931, MILTHERS 1934, LÜTTIG 1958, ZANDSTRA 1983, MEYER 1983, SMED 1989 und 1993. Sie soll als deren weiterführende Ergänzung vorgeschlagen werden. Ihre Anwendung ist in den Fällen sinnvoll, wo eine höhere Auflösung der Rekonstruktion des Eistransportweges trotz zusätzlichen Aufwands sinnvoll erscheint und wo die u.g. Voraussetzungen erfüllt sind. Der größte Teil der aufgeführten Autoren stellt stratigraphische Fragestellungen bei der Auswertung von Leitgeschieben in den Vordergrund und nicht die Ermittlung von Transportpfaden. Der hier vorgestellte neue Ansatz ist nicht primär für stratigraphische Untersuchungen vorgesehen, obwohl er voraussichtlich auch der stratigraphischen Korrelation von Tills dienen kann (Kap. 8).

### 3. Grundansatz der "Leitserienmethode"

Gehäuft auftretende Geschiebe kleinräumig-gleichen Ursprungs müssen, anders als eine Mischung verschiedener einzelner Leitgeschiebe unterschiedlicher Herkunft, den unmittelbaren Transport vom anstehenden gemeinsamen Primärvorkommen zum Ablagerungsort anzeigen. Wiederaufnahme aus einer älteren glazialen oder glaziofluviatilen Ablagerung würde eine nach dem ersten Transportabschnitt noch vorhandene relative Häufung zu unauffälligen Hintergrundkonzentrationen verdünnen. Gegenstand der Untersuchungen sind daher nicht möglichst viele verschiedene "Einzelklasten-Leitgeschiebe", wie man übliche Leitgeschiebe nennen könnte, sondern lokal auftretende, genetisch zusammengehörende Gesteinsserien gemeinsamen Ursprungs (kogenetische Geschiebe). Daher die hier vorgeschlagene Bezeichnung "Leitserienmethode". Kogenetische Geschiebe müssen nicht lithologisch einheitlich sein.

Die Transportweg-Rekonstruktion anhand von Leitserien ist prinzipiell auf einige km genau möglich. Sie ist anders als jede "Einzelklasten-Leitgeschiebeauswertung" unabhängig von der Mittelung über eine größere Anzahl großflächig verteilter Ursprungsvorkommen, von denen gewöhnlich ein Teil mit dem direkten Transportweg nichts zu tun hat. Besonders Kontamination durch früher transportiertes Glazialmaterial ist innerhalb des Auflösungsvermögens üblicher Leitgeschiebe-Auswertungsverfahren wegen der Wiederholung ähnlicher Eis-Fließrichtungen nicht immer erkennbar.

Eine Verwechslungsgefahr von Leitserien mit sog. Schrapnellgeschieben besteht kaum. Dies gilt besonders für die zumeist deutlich differenzierten Gabbroide, in geringem Ausmaß auch für doleritische Gesteine. Schrapnellgeschiebe sind im Gegensatz zu normalen kogenetischen Serien prinzipiell lithologisch und auch geochemisch sehr einheitlich. Ihre Häufung geht auf die Zerlegung von Blöcken oder Schollen erst während des Transports zurück, statt auf die separate Aufnahme von lithologisch unterschiedlichen Klasten an verschiedenen Stellen des flächigen Ursprungsvorkommens.

Wenn das Ursprungsvorkommen einer "Leitserie" ermittelt worden ist, ist eine präzise Wegmarke für das Eis festgelegt. Die Auflösungsschärfe hängt dann nur noch von der Größe des Primärvorkommens ab, evtl. unter Einbeziehung unmittelbar angrenzender, hochkonzentrierter Lokalgeschiebefächer.

Die wesentlichen Schritte der "Leitserienmethode" sind:

1. Das Erkennen und Heraussortieren von Gesteinsserien mit signifikanten gemeinsamen geochemischen und petrographischen Merkmalen aus der Geschiebemixtur. Solche Gesteinsserien können als "kohärent" bezeichnet werden. Bei geeigneter Merkmalsauswahl ist eine gleiche Herkunft, d.h. ein "kogenetischer" Ursprung wahrscheinlich, zunächst aber noch nicht nachweisbar.

2. Die Identifikation der anstehenden Ursprungsvorkommen. Wenn dies unter Berücksichtigung aller wesentlichen Merkmale gelungen ist, ist gleichzeitig der zunächst nur wahrscheinliche "kogenetische" Charakter der "kohärenten" Serie(n) bestätigt.

Das Aussortieren und Zuordnen einer kogenetischen Gesteinsserie aus der Gesamt-Geschiebeassoziation ist mit den bei der Leitgeschiebestimmung üblichen makroskopischen und gelegentlich angewandten mikroskopischen Methoden allein kaum möglich. Zusätzliche quantitative Daten sind erforderlich. Diese werden durch chemische Gesamtgesteinsanalysen ausgewählter Proben geliefert. Sie sind anders als z.B. petrographische Befunde zur direkten Weiterverarbeitung im Computer geeignet.

Die Anfertigung von chemischen Analysen mag als unangemessener Aufwand erscheinen, wenn man gewohnt ist, fast ausschließlich mit Geländemethoden zu arbeiten. Andererseits sind Röntgenfluoreszenz-spektrometrische gesteinschemische Analysen (RFA-Analysen) in statistisch relevanten Mengen während der letzten 10 bis 15 Jahre ein schnell verfügbares Routinehilfsmittel für verschiedenste geologische Fragestellungen geworden. Der nötige Zeitaufwand ist geringer als z.B. der für die Herstellung und mikroskopische Auswertung von Gesteinsdünnschliffen.

#### 4. Besondere Eignung von Gabbroiden und Doleriten

Grundsätzlich kommen viele Gesteinsgruppen einschließlich bekannter Leitgeschiebe in Frage, Leitserien abzugeben. Gabbroide und Dolerite (bzw. Diabase) sind jedoch besonders gut geeignet. Die Bezeichnung Gabbroide wird hier über die Abgrenzung gemäß der Klassifikation für magmatische Gesteine nach Le MAITRE et al. 1989 erweitert. Im Gegensatz zu Le MAITRE et al. werden dioritische Gesteine einbezogen. Auch gabbroid- oder dioritähnliche Amphibolite und gabbroide Coronite können für die "Leitserienmethode" eingesetzt werden.

Gabbroide und Diorite sind ohne viel Übung leicht als Gruppe für sich erkennbar. Dies bedeutet, daß das wahrscheinliche Vorkommen oder das definitive Nichtvorkommen einer gabbroiden Leitserie im Gelände auch ohne Kenntnis "normaler" Leitgeschiebe leicht erkennbar ist. Für Dolerite bzw. Diabase gilt dies ebenso.

Gabbroidserien zeigen eine besonders ausgeprägte chemische Variabilität, sowohl von Vorkommen zu Vorkommen als auch innerhalb der Vorkommen selbst. Sie haben daher gewöhnlich gut faßbare, vorkommensspezifische chemische Merkmale und zeigen individuelle, differentiationsbedingte Variationstrends (Abb. 1). Für Dolerite bzw. Diabase gilt dies in eingeschränktem Maße.

Gabbroidvorkommen sind in den Grundgebirgsgebieten Skandinaviens weit verbreitet und ingermaßen gleichmäßig verteilt. Eine Ausnahme bildet der im Zusammenhang mit der Svekonorwegischen Orogenese hochgradig metamorph überprägte Teil SW-Schwedens. Dort fehlen Gabbroide mit normalen plutonischen Gefügen und Mineralbeständen weitgehend. Stattdessen kommen Coronite und Amphibolite als ihre metamorphen Entsprechungen in Betracht.

Gabbroidvorkommen sind in Skandinavien im Gegensatz z.B. zu vielen Granitoidvorkommen klar voneinander abgesetzt. Typische Gabbroidintrusionen sind mit selten mehr als 10 - 20 km<sup>2</sup> und nur im Ausnahmefall über 100 km<sup>2</sup> Anschnittfläche (Abb. 3) durchweg um ein bis zwei Größenordnungen kleiner als typische Granitoid- oder auch Porphyrvorkommen. Für die Rekonstruktion von Eisbewegungen bedeutet dies, daß die schließlich identifizierte Herkunfts-

intrusion einer kogenetischen Geschiebe-Gabbroidserie eine eng begrenzte Wegmarke darstellt und nicht ein großes und oft schlecht abgrenzbares Gebiet, wie es für viele Granitoide der Fall wäre. Doleritdecken können größere Flächen einnehmen. Sie sind aber stets sehr klar von den umgebenden Gesteinen abgrenzbar.

Gabbroide Gesteine spielen als "normale" ("Einzelklasten-")Leitgeschiebe bisher keine Rolle, Dolerite bzw. Diabase eine geringe. Gabbroide gelten als petrographisch monoton und schlecht unterscheidbar, z.T. zu unrecht.

Viele Gabbroidvorkommen sind wie manche Dolerite durch charakteristische Gefüge und/oder Mineralbestände gekennzeichnet. Nur fehlen die oft bunten Farben vieler Granitoide oder Porphyre. Die sonstigen makroskopisch erkennbaren petrographischen Merkmale können jedoch vielfältig sein: z.B. richtungslos gleichkörniges, porphyrisches oder grobkörniges, doleritisch ophitisches Gefüge, Kumulatgefüge, magmatische Lamination bis hin zur magmatischen Schichtung (Abb. 9), tektonisch bedingte Deformation, Coronabildungen in abgestuften Entwicklungsstadien. Hinzu kommen das Mengenverhältnis Plagioklas zu Mafiten, Vorkommen oder Nichtvorkommen von Olivin/Serpentin, Pyroxenen, Amphibolen, Chloriten, Biotit, Granat, Fe-Ti-Oxiden, Titanit. Die Plagioklase können Zonarität, Färbung und unterschiedlichen Alterationsgrad zeigen.

Wenn zu der petrographischen Charakterisierung von gehäuft auftretenden Gabbroid- oder Doleritgeschieben gesteinschemische Daten hinzukommen, ist es nach den Erfahrungen mit den nachfolgend aufgezählten potentiellen Herkunftsvorkommen und sonstigen Beispielen möglich, Proben gleichen Ursprungs trotz differentiationsbedingter interner Unterschiede, als solche recht zuverlässig zu erkennen und von den Proben anderer Primärvorkommen zu unterscheiden und auszusortieren (Abb. 1). Auch die Differentiationstrends selbst bieten vorkommensspezifische Unterscheidungsmerkmale.

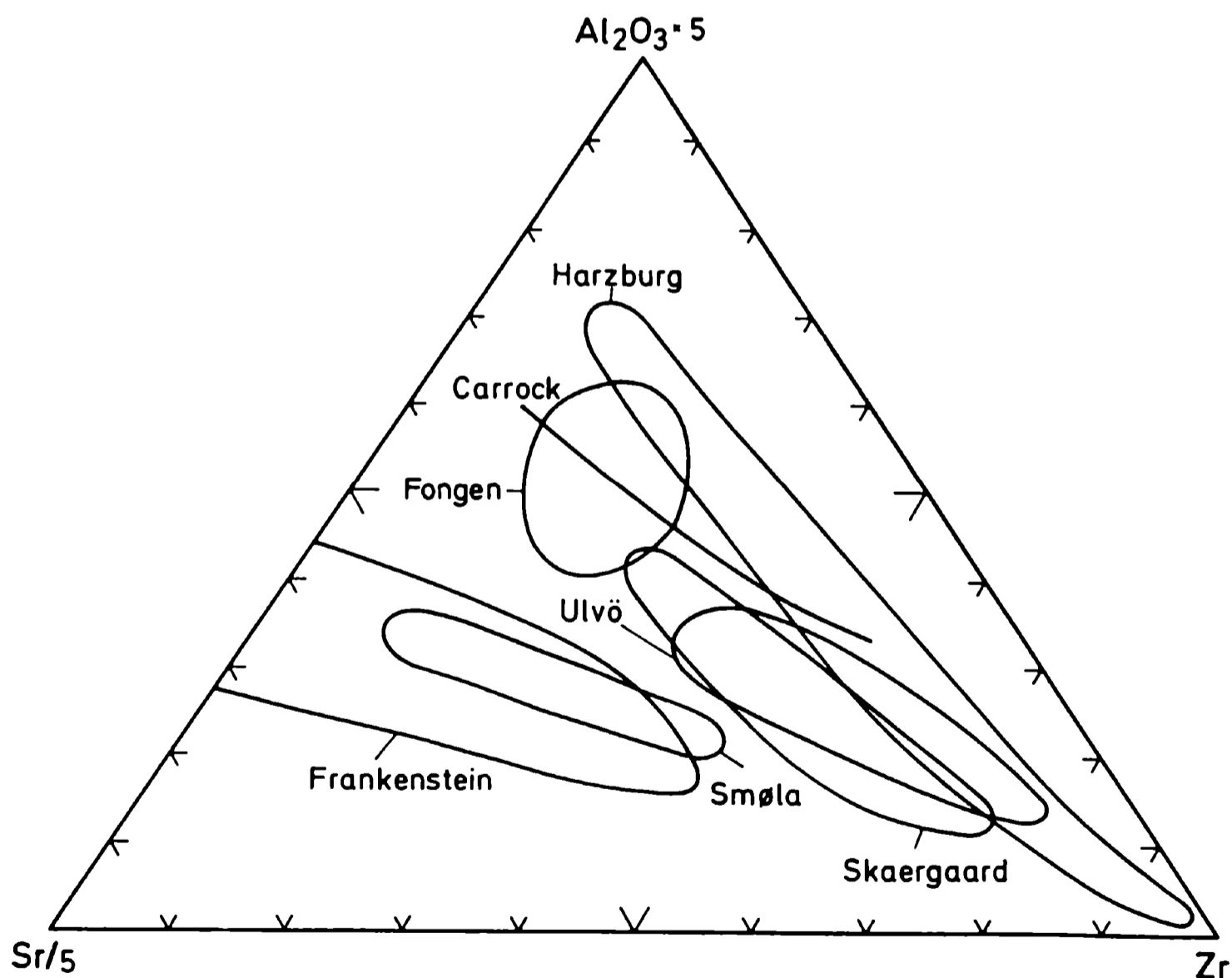


Abb. 1. Diagramm Sr/Al/Zr für Beispiele von Gabbroserien unterschiedlichen tektonischen Rahmens. Carrock: Carock Fell, Lake District (England); Fongen: Fongen-Hyllingen (Norwegen); Frankenstein: Frankenstein-Gabbro, Odenwald; Skaergaard: Skaergaard-Intrusion (Grönland); Smøla: West-Smøla-Gabbro (Norwegen); Ulvö: Ulvö-Dolerite und Gabbros (Schweden). (Quellenangabe in Kap. 4).

Die Auswertung von eigenen Serien von chemischen Analysen skandinavischer und sonstiger Gabbros und Dolerite und von Analysen aus anderen Arbeiten ergab deutliche individuelle Merkmale jedes Einzelvorkommens durch die unterschiedlichen Stadien magmatischer Differentiation hindurch. Die gabbroiden und doleritischen Referenzserien sind u.a. Skaergaard (Grönland, McBIRNEY 1989), Fongen-Hyllingen (Norwegen, WILSON et al. 1981 und unveröff. Daten), Smöla (Norwegen, eigene unveröff. Daten); Ulvö (Schweden, LARSON 1980); Artfjället (Schweden, OTTEN, 1983); Bamble-Gabbros (Norwegen, HAAS 1992); Österkvarngabbro (Småland, eigene unveröff. Daten und Exkursionsgruppe 1993: M. GEIST, S. HENNEKE, M. MAHN); Holmeshultagabbro (Småland, eigene unveröff. Daten und Exkursionsgruppe 1993: T. GEISLER, M. HÜBNER, F. REESE); Allgönnen-övingen-Gabbro (Småland, eigene unveröff. Daten und Exkursionsgruppe 1993: I. BRINKMANN, A. GROSZ, M. KREMP); Harzburg (Harz, VINX 1982 und eigene unveröff. Daten); Frankenstein (Odenwald, eigene unveröff. Daten; verschiedene "Hyperite" (Småland/Schonen, eigene unveröff. Daten); Rymmengabbro, Almesåkra-Dolerit, Hultsjö-Gabbro, Sävsjö-Gabbro (alle Småland, eigene unveröff. Daten); NW-Dolerite (Schonen, eigene unveröff. Daten); Kinnekulle-Diabas (Geschiebeprobe, eigene unveröff. Daten).

Die räumliche Verteilung von Gabbroid- und Doleritvorkommen in einem relativ gabbroidreichen Beispielausschnitt des schwedischen proterozoischen Grundgebirges im Bereich des Transskandinavischen Magmatitgürtels (GORBATSCHEV 1980) ist in Abb. 3 dargestellt. Die im Text berücksichtigten gesteinschemisch dokumentierten Beispiele sind hervorgehoben. Abb. 2 zeigt die Lage des Ausschnitts der Abb. 3 und weitere im Text erwähnte Gabbroidgebiete und Geschiebelokalitäten. Besonders für größere Gabbroid- und Doleritvorkommen ist zu beachten, daß oft nur Teilgebiete als Ursprung größerer Geschiebemengen in

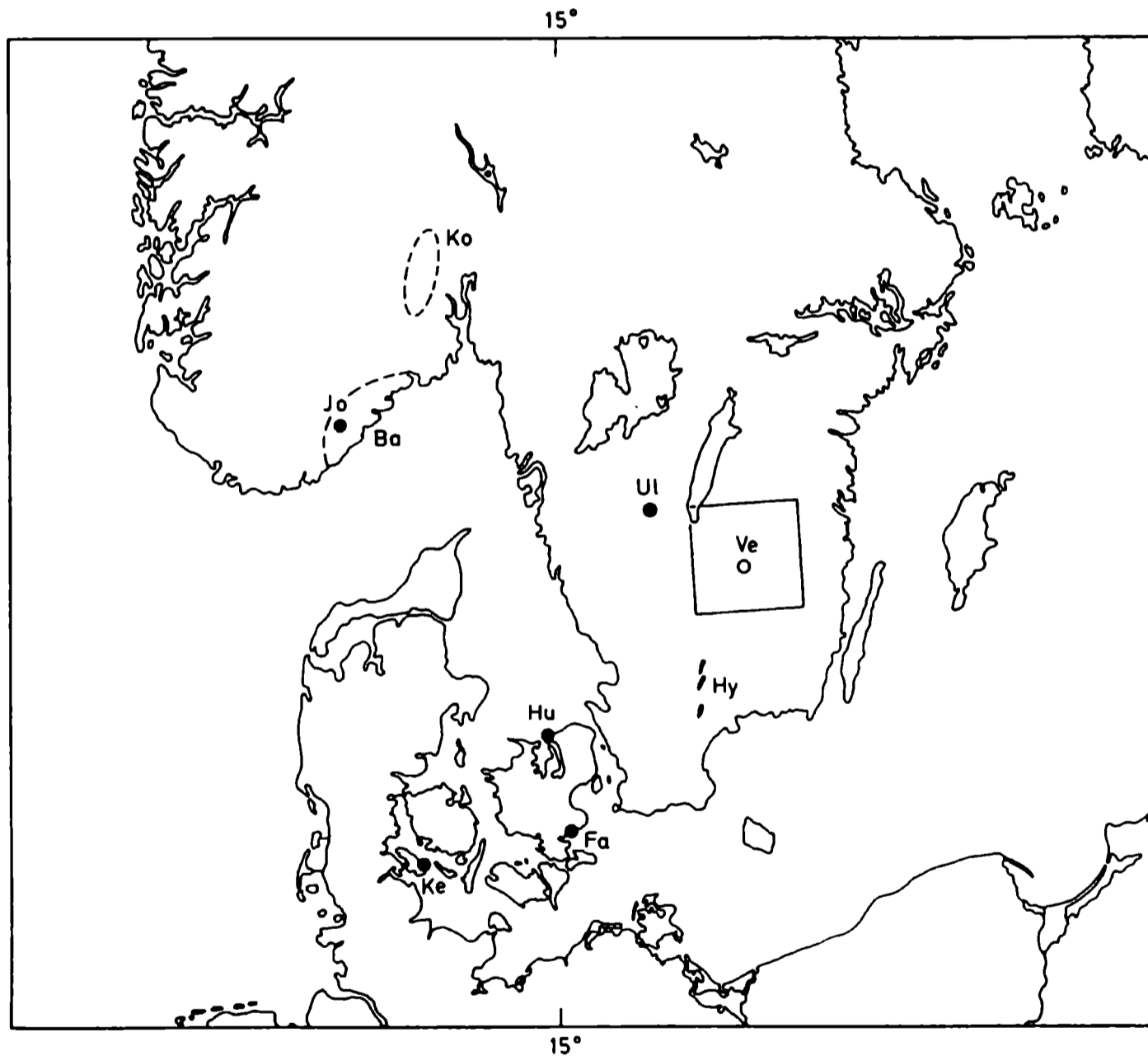


Abb. 2. Lage der im Text erwähnten Lokalitäten. Der rechteckige Ausschnitt zeigt das Gebiet der Abb. 3; Ba = Bamble-Gebiet, Fa = Fakse Ladeplads, Hu = Hundested, Hy = Gebiet beprobter "Hyperite" (= gabbroid/basaltische Gangdolerite), Jo = Jomåsknutene Gabbro, Ke = Kettingskov (Alsen), Ko = Kongsberg-Gebiet, Ul = Ulricehamn, Ve = Vetlanda. Die Westhälfte Südschwedens, z.B. das Gebiet um Ulricehamn und die Bamble- und Kongsberg-Gebiete in Südnorwegen sind potentielle Liefergebiete granatreicher Coronite. Der Jomåsknutene Gabbro ist das größte Vorkommen coronitischer Gabbroide im Bamble-Gebiet. Er ist geochemisch gut dokumentiert (HAAS 1992).

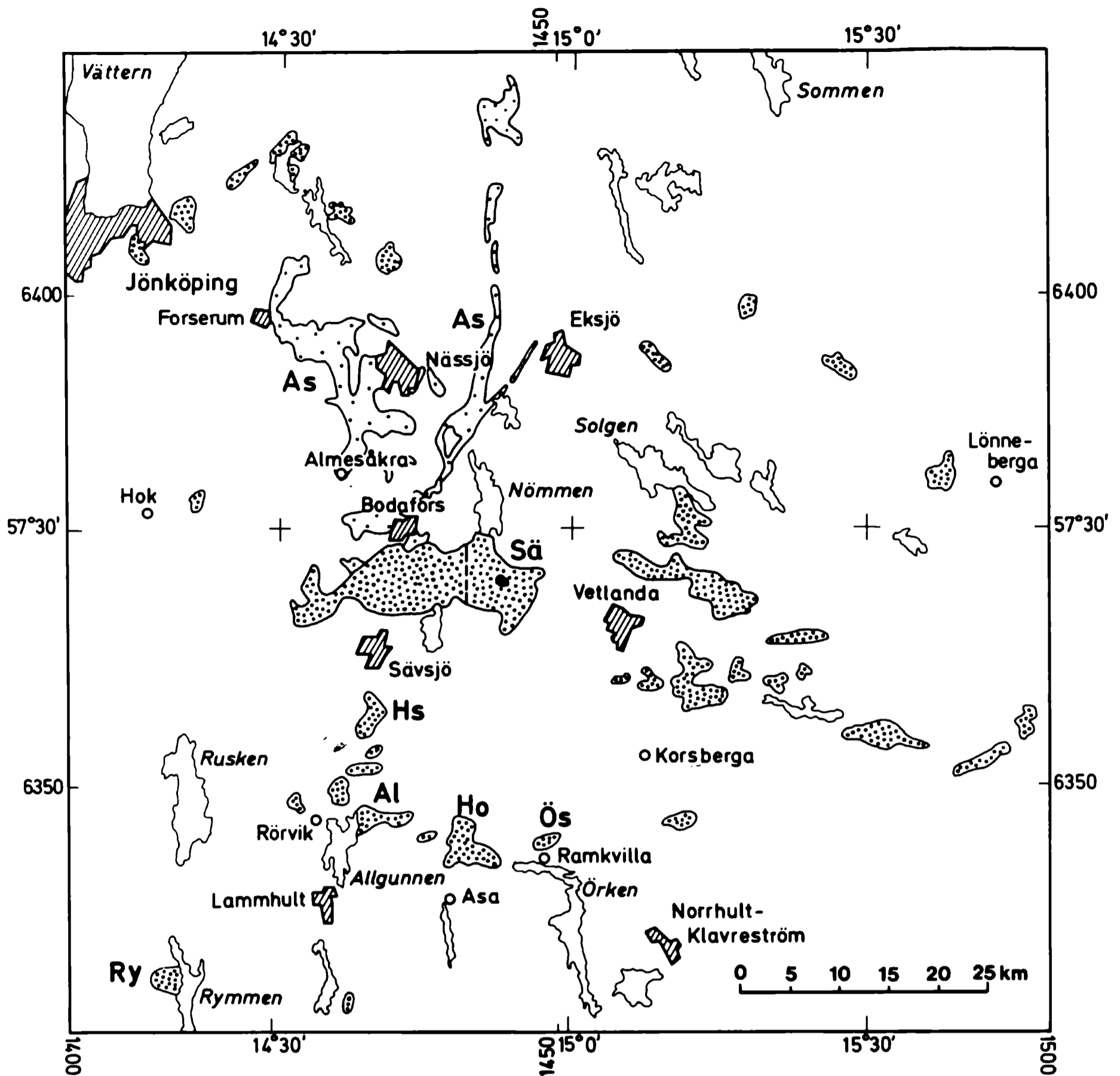


Abb. 3. Verbreitung wesentlicher gabbroider Intrusionen (eng gepunktet) und von Sills des Almesåkra-Dolerits (weit gepunktet) in NE-Småland. Mit ausreichend RFA-Analysen abgedeckte Referenz-Vorkommen: Al = Allgunnen-Övingen-Gabbro, As = Almesåkra-Dolerit, Ho = Holmeshulta-Gabbro, Hs = Hultsjö-Gabbro, Ös = Österkvarn-Gabbro, Ry = Rymmen-Gabbro, Sä = Sävsjö-Gabbro. Die schwarze Fläche im Sävsjö-Gabbro zeigt die ungefähre Verbreitung einer Fazies mit braunvioletten Plagioklasen an. Die gestrichelte Grenzlinie im Sävsjö-Gabbro trennt den topographisch unruhigen, felsigen Ostteil vom flachen Westteil. Umgezeichneter Ausschnitt aus Geol. Karte Jönköping, 1:250.000 von PERSSON und WIKMAN 1986.

Frage kommen. So ist der westliche, größte Teil des Sävsjö-Gabbros extrem flach und arm an anstehenden Felsen und daher kaum ein ergiebiges Ferngeschiebe-Liefergebiet. Der Ostteil hingegen hebt sich im Gelände mit abrupter Grenze durch eine engräumig-kuppige Landschaft mit vielen steilen Felsen ab. Ähnliches gilt für das große Gebiet des Almesåkra-Dolerits. Bewegte Morphologie mit reichlich Felsen ist hier weitgehend auf das Gebiet zwischen Forserum und Nässjö beschränkt.

Innerhalb eines durch parallele Leitgeschiebeauswertung oder auch durch regionale geochemische Gabbroidmerkmale eingegrenzten potentiellen Herkunftsgebietes von realistischer Größe sind Verwechslungen nicht zu erwarten, wenn geochemische und makroskopisch-petrographische Merkmale gemeinsam herangezogen werden. Routinemäßige RFA-Analysen umfassen 25-30 chemische Elemente, deren Konzentration in Gabbroiden ausreichend hoch über den Nachweisgrenzen liegt. Die Einbeziehung petrochemischer Daten ist unerläßlicher Bestandteil der "Leitserienmethode".

### 5. Notwendige Voraussetzungen

Die "Leitserienmethode" unter Einsatz von Gabbroiden oder Doleriten bzw. Diabasen ist wegen des nur lokalen Auftretens von Häufungen dieser Gesteine nicht überall, aber nach bisheriger Erfahrung für jeden Eisvorstoß in ausreichend enger Rasterung einsetzbar, wenn Aufschlüsse in ausreichender Menge bestehen. Nach eigener Erfahrung mit weichsel- und saalezeitlichen Moränen und glaziofluviatilen Ablagerungen wie auch auf der Grundlage von aus anderem Zweck durchgeführten Geschiebezählungen von SCHUDEBEURS 1980/81 aus saalezeitlichen glazialen und glaziofluviatilen Ablagerungen kann davon ausgegangen werden, daß ca. jeder 5. bis 10. Aufschluß mit Geschiebeführung kogenetische Gabbroide in ausreichender Häufung enthält. Hierbei kommt es zusätzlich auf die Aufschlußgröße an. Die Gabbroidführung kann in einem Till über wenige 100 Meter von Hintergrundwerten zu signifikanten Konzentrationen ansteigen und wieder abklingen. Örtlich können Gabbroide völlig fehlen.

Der Einsatz der "Leitserienmethode" unter Verwendung von gabbroiden Gesteinen ist aussichtsreich, wenn der Anteil von gabbroiden Gesteinen einschließlich Dioriten ca. 4% des Kristallinanteils einer Geschiebeassoziation erreicht. Für Dolerite bzw. Diabase können größenordnungsmäßig 1 - 2 % ausreichen, weil es, abgesehen von geringmächtigen Gängen, weniger Vorkommen gibt und dementsprechend der Anteil von Streuproben geringer bleibt.

Die ca. 4%-Grenze für Gabbroide und Diorite gilt für eine routinemäßige Sortierung ohne Auftreten makroskopisch auffälliger Gruppenmerkmale. Wenn schon makroskopisch eine Gruppierung deutlich hervortritt, können auch geringere Gesamt-Gabbroidgehalte ausreichen. Wenn Gabbroide und Diorite 4% oder mehr des Kristallinanteils ausmachen, kann davon ausgegangen werden, daß das an der Geschiebelokalität sedimentierende Eissegment ein oder mehrere Gabbroidvorkommen überfahren hat. Es ist unbedingt sinnvoll, daß in Geschiebezählungen besonders Gabbroide nicht als "sonstiges Kristallin" ignoriert, sondern für sich ausgewiesen werden. Wenn die gabbroiden oder doleritischen Proben zusätzlich nicht gleich weggeworfen werden, kommt der Einsatz der "Leitserienmethode" auf der Grundlage von Gabbroiden oder Doleriten ohne zusätzlichen Geländeaufwand auch nachträglich in Betracht. Der Verfasser ist gern bereit, entsprechend aufgesammelte Gesteinsassoziationen auszuwerten. Die Aufsammlung sollte nicht auf bestimmte Korngrößen beschränkt werden.

Nicht die zur Routine entwickelte Heraustrennung kohärenter Serien, um die es in diesem Beitrag geht, jedoch der Vergleich solcher Serien mit potentiellen Ursprungsvorkommen erfordert eine petrochemische und petrographische Inventur des in Frage kommenden skandinavischen Gabbroid- und Doleritbestandes. Hieran hängt die zukünftige, routinemäßige Einsetzbarkeit der "Leitserienmethode". Diese Inventur erfordert systematische Beprobungen in Skandinavien. Sie wird laufend erweitert, kann aber naturgemäß nicht sofort fertiggestellt sein. Gegenwärtiger Schwerpunkt der schrittweisen Erstellung dieser Referenzdateien ist Ostsmåland. Literaturdaten liegen nur in begrenztem Umfang vor und können wegen Unvollständigkeit meist auch nur bedingt verwendet werden.

### 6. Probenauswahl und Durchführung der RFA-Analytik

Eine Minimierung des Analysenaufwands ist in den meisten Fällen möglich.



Gewöhnlich zeigt ein wesentlicher Teil der an einer Geschiebelokalität vorliegenden Gabbroide oder Dolerite schon bei makroskopischer Betrachtung Gruppenmerkmale. So kann der Rest an "Hintergrundproben" vorab aussortiert werden. Die Analytik läßt sich dann auf 5 - 10 Proben pro erkennbarer Gruppe einschränken. Bei Fehlen klarer makroskopischer Gruppenmerkmale können bis zu ca. 50 Analysen für eine dann allein mögliche "blinde Sortierung" erforderlich sein. Gerölle ab ca. 2 cm Durchmesser sind bei normaler Homogenität für die Herstellung von aussagekräftigen RFA-Analysen geeignet.

Die Analysen selbst lassen sich gegenüber solchen für petrologische Zwecke entscheidend vereinfachen. Die besonders aufwendigen gesonderten Bestimmungen von  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  und  $\text{FeO}$  über die Ermittlung des Gesamt-Fe hinaus sind überflüssig, ebenso die von  $\text{SO}_3$  und  $\text{CO}_2$ . Hierdurch wird der Laboraufwand gegenüber "normalen" Gesteinsanalysen für petrologische Zwecke auf weniger als die Hälfte reduziert.

Im gemeinsamen Anorganisch-Geochemischen Labor des Mineralogischen und des Geologischen Instituts der Universität Hamburg enthält die in einem Durchgang ohne Wechsel der Röntgenröhre (Rh-Röhre) gemessene Standardanalyse folgende für Gabbroide relevanten Haupt- und Spurenelemente:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Gesamt-Fe als  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , Cr, Ni, Co, V, Cu, Pb, Zn, S, Rb, Ba, Sr, Ga, Nb, Zr, Ti, Y, La, Ce, Nd.

## 7. Sortiergang der Leitserienmethode

Die folgenden Abkürzungen und Symbole werden in diesem Kapitel und in den entsprechenden Abbildungen benutzt:  $\text{FeO}^*$  = Gesamt-Fe als  $\text{FeO}$  gerechnet;  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$  = Gesamt-Fe als  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  gerechnet; Solidifikationsindex =  $100 \text{ MgO} / (\text{MgO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ ;  $\text{Mg}\#$  = (Mg-Zahl) =  $100 \text{ MgO} / (\text{MgO} + \text{FeO}^*)$ .

Das praktische Vorgehen bei der Anwendung der "Leitserienmethode" besteht im weitgehend normierten, im Einzelfall aber auch flexiblen Einsatz gesteinschemischer Sortierschritte nach makroskopischer Vorsortierung. Hierdurch werden aus der gabbroiden oder doleritischen Gesamtpopulation eines Geschiebevorkommens die Proben heraussortiert, die so signifikante gemeinsame chemische wie auch makroskopisch-petrographische Merkmale aufweisen, daß sie als gemeinsame Bestandteile eines Ursprungsvorkommens gelten können. Die petrographische Vorsortierung kann nicht normiert werden. Sie richtet sich "opportunistisch" nach den im Einzelfall sich anbietenden Merkmalen.

Für die praktische Durchführung der chemischen Sortierung werden zwei Wege verfolgt. GEISLER 1994 setzt speziell angepaßte Clusteranalysen ein. Er hat ein Anwendungsprogramm für den Einsatz an PCs entwickelt, das kohärente Gabbroidgruppen automatisch vorschlägt. Es wird an anderer Stelle veröffentlicht und als Shareware zur Verfügung gestellt werden. Für den hier beschriebenen Ansatz wird das anpassungsfähige petrochemische Programmpaket NewPet (CLARKE 1987-1994) eingesetzt. Die Sortierung erfolgt visuell über eine Abfolge von innerhalb des Programms selbst erstellbaren graphischen Dreiecks- und X-Y-Korrelationen. Hierbei kann die Sortierung auf die bei jedem Teilschritt sichtbaren konkreten Verhältnisse optimiert werden. Der Vorteil des Einsatzes von NewPet liegt in der ständigen Transparenz bezüglich jeder Einzelprobe und in einer größeren Anpassungsfähigkeit. Der Nachteil liegt in der geringeren Automatisierung und Standardisierung sowie in dem dringlichen Erfordernis eines möglichst schnellen Computers.

Der Sortiergang auf der Grundlage von NewPet ist als Flußdiagramm in Abb. 4 dargestellt.

Die Schritte 1 und 2 des Flußdiagramms (Abb. 4) gewähren zusätzliche Sicherheit, wenn die Einstufung als Gabbroid aufgrund geringer Übung in der Gesteinsbestimmung unsicher erscheint oder wenn mit übermäßiger postmagmatischer Alteration einiger Proben gerechnet wird. Diese ist mit einiger Übung jedoch makroskopisch erkennbar. Die eigentliche chemische Sortierung auf der Grundlage von NewPet beginnt mit einer der zwei alternativ einzusetzenden Korrelationen der Schritte 3 bzw. 3a des Flußdiagramms:

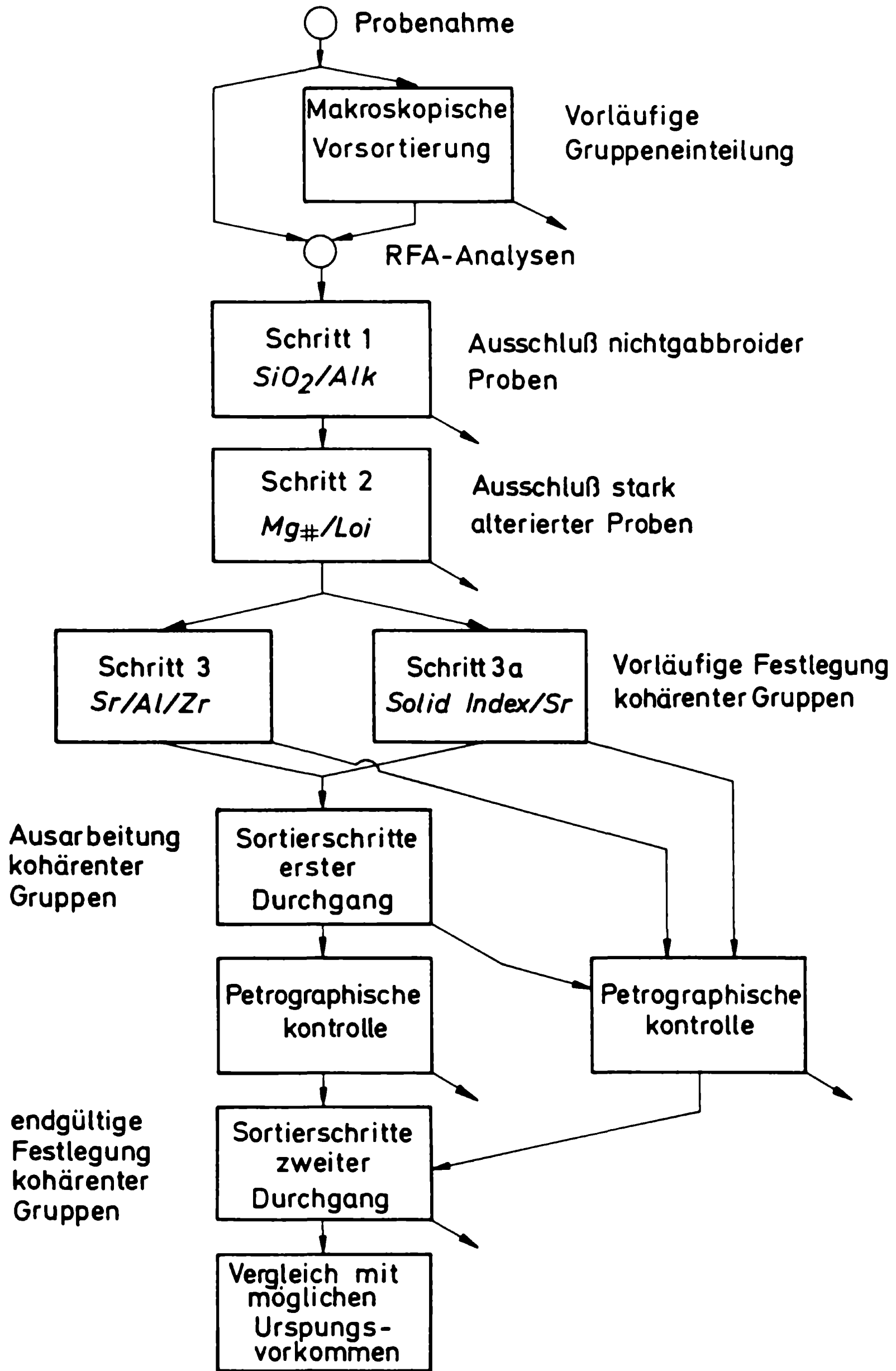


Abb. 4. Flußdiagramm: Abfolge der Schritte der "Leitserienmethode" für gabbroide Gesteine.

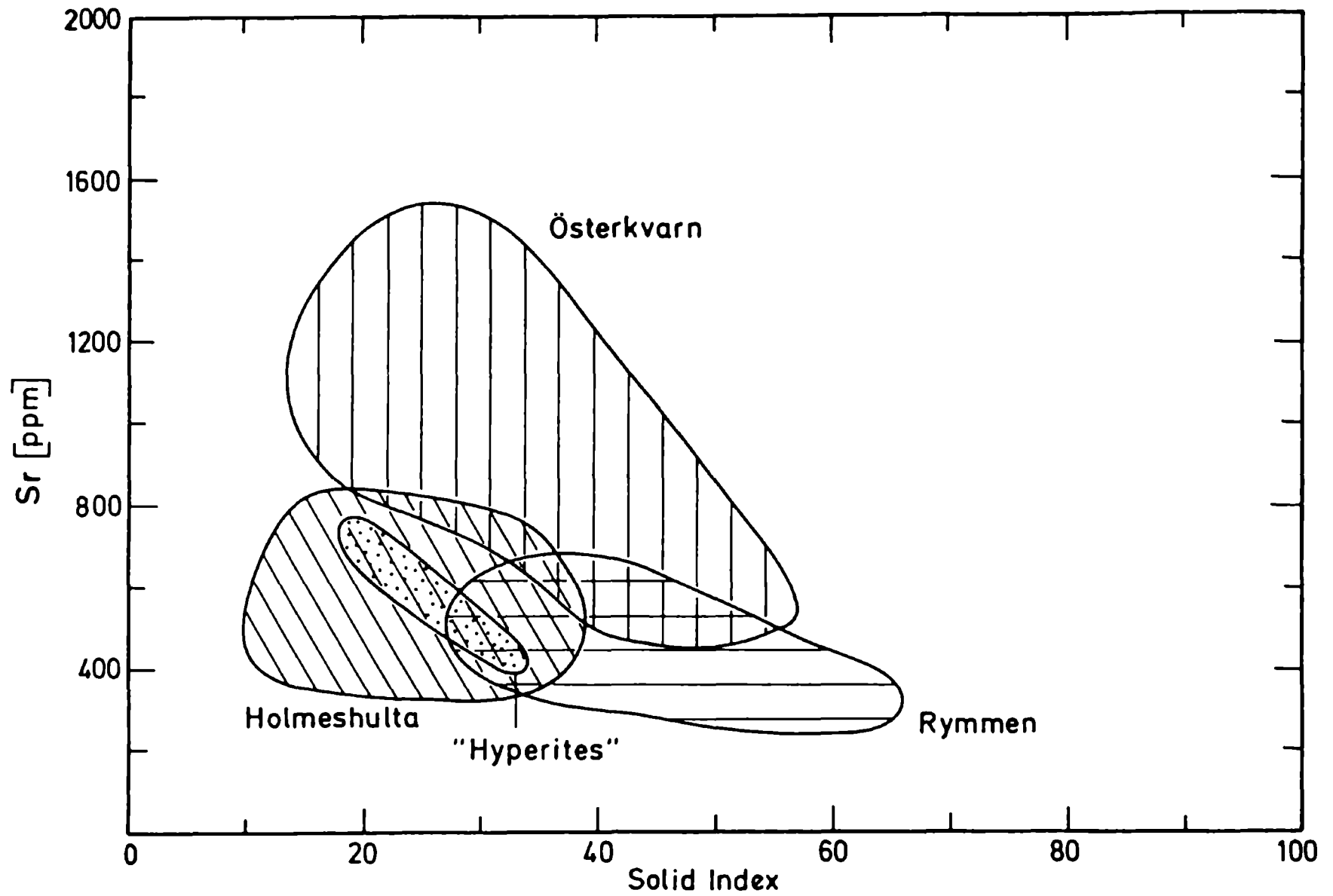


Abb. 5. Petrochemische Unterschiede zwischen gabbroiden und doleritischen Referenz-Vorkommen in Småland, gezeigt für Solidifikationsindex gegen Sr.

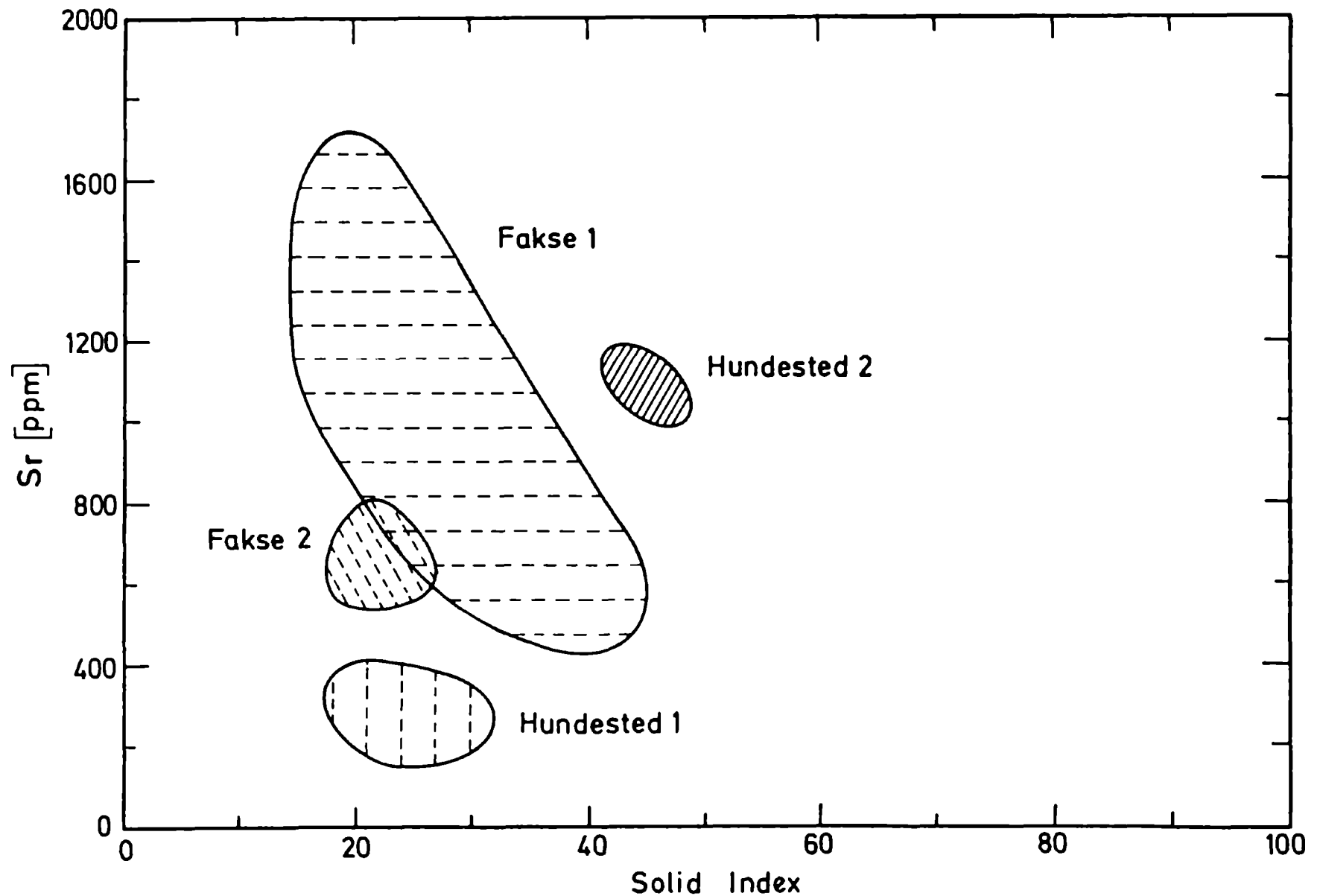


Abb. 6. Diagramm Solidifikationsindex/Sr für Geschiebe-Gabbroidserien von Fakse-Ladeplads und Hundested (Sjælland), Abgrenzung der kohärenten Serien nach kombinierter petrochemischer und makroskopischer Sortierung.



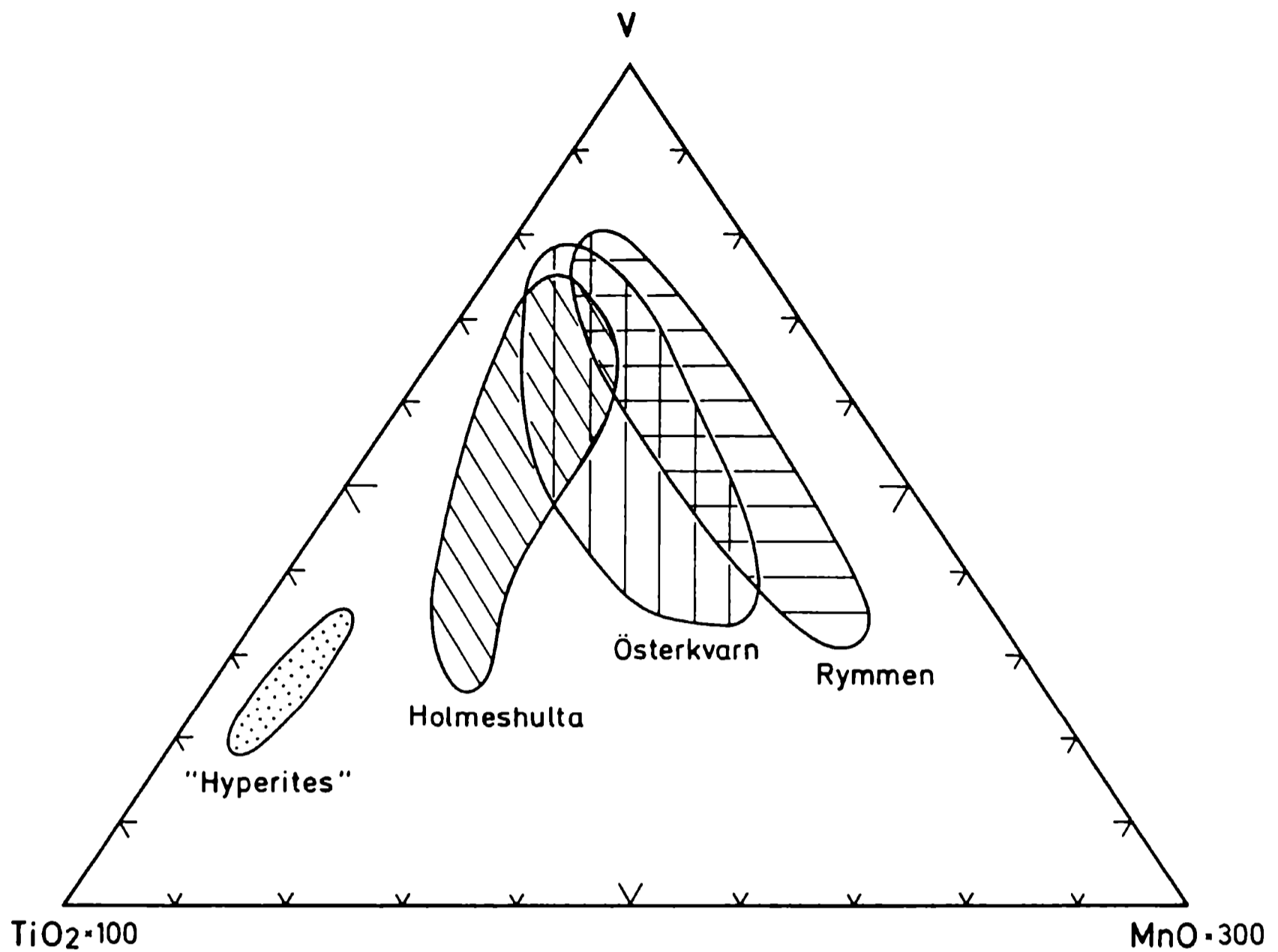


Abb. 7. Ternäres Diagramm Ti/V/Mn für Referenz-Gabbroid- und Doleritserien in Småland.

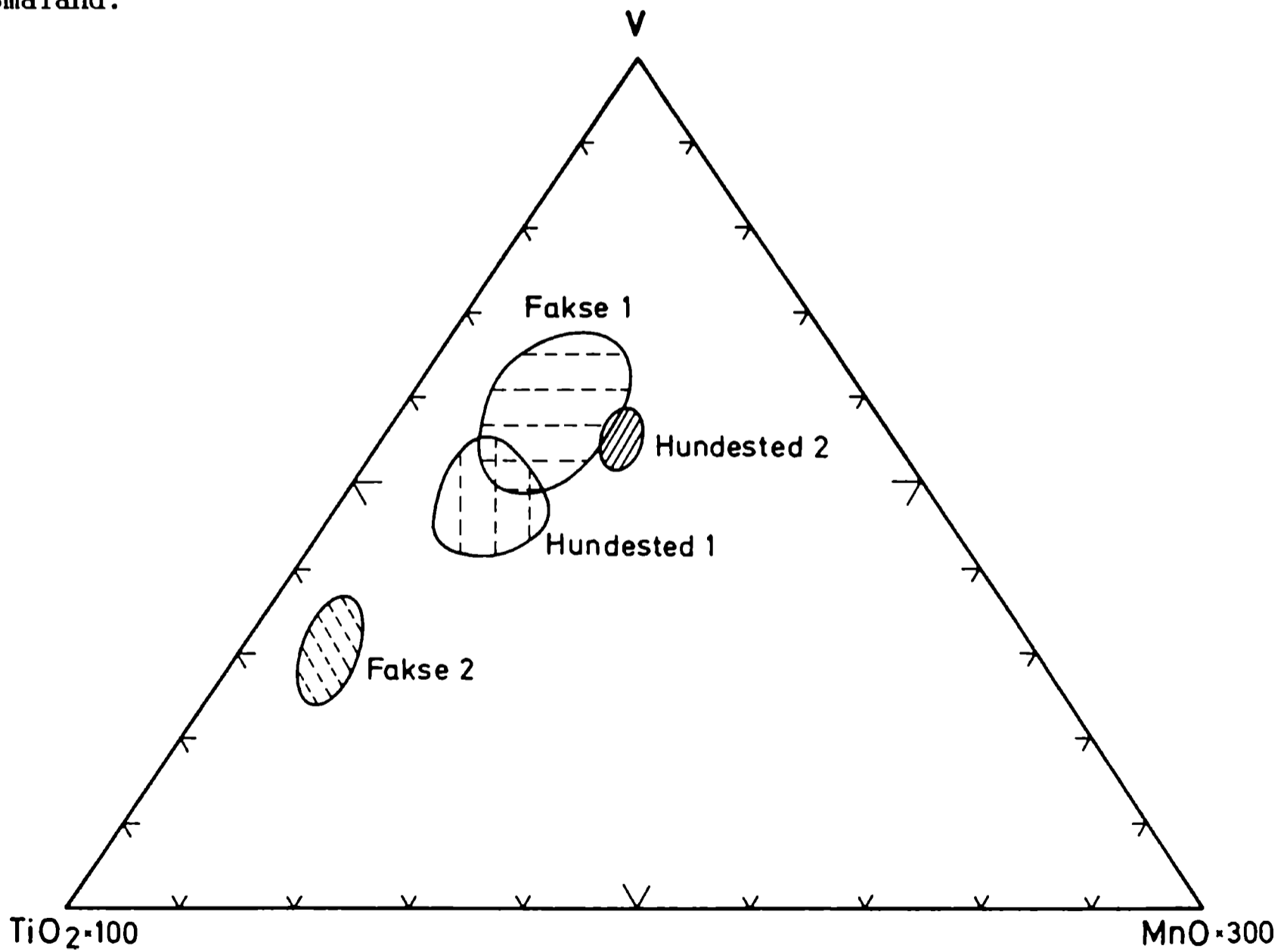


Abb. 8. Ternäres Diagramm Ti/V/Mn für Geschiebe-Gabbroidserien von Fakse Ladeplads og Hundested (Sjælland), Abgrenzung der kohärenten Serien nach kombinierter petrochemischer und makroskopischer Sortierung.

- Sr/5 gegen  $\text{Al}_2\text{O}_3 \times 5$  gegen Zr (Abb. 1) oder
- Solidifikationsindex gegen Sr (Abb. 5-6)

Beide Korrelationen sind besonders gut geeignet, zusammengehörende Gabbroidgruppen in Form geschlossener Verteilungsfelder abzubilden. Die Korrelation Sr/Al/Zr trennt jedoch geotektonisch einheitliche Gabbroidassoziationen nur ungenügend voneinander. Geotektonisch unterschiedliche Assoziationen hingegen werden so gut separiert, daß die Korrelation zur tektonomagmatischen Diskriminierung von Gabbroiden einsetzbar ist. Über Solidifikationsindex/Sr lassen sich auch geotektonisch einheitliche Gabbroidassoziationen trennen. Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit von weiten Überlappungen groß, so daß es in besonderem Maße auf die nachfolgenden Sortierschritte ankommt. Abb. 5 zeigt die Verteilung der Projektionspunkte von Beispiel-Referenzgabbroiden, Abb. 6 die von nach dem Sortiergang der "Leitserienmethode" erhaltenen kohärenten Beispiel-Serien zweier Geschiebefundorte.

Die weiteren Sortierschritte haben den Zweck, anfängliche Felderüberlappungen, und damit unvollständige Trennungen aufzulösen und zunächst nicht erkannte aberrante Proben zu eliminieren. Die Abgrenzung der kohärenten Serien erfolgt visuell ähnlich wie anhand der Darstellungen der Abb. 1, 5 und 6, in Anlehnung an Referenzvorkommen, die zu jeder Zeit auf dem Monitor zum Vergleich eingespielt werden können. Abb. 7 zeigt als weiteres Beispiel die Verteilungsfelder der in Abb. 5 dargestellten Referenzgabbroide im ternären Diagramm Ti/V/Mn (Schritt 6). Abb. 8 ist die entsprechende Darstellung für dieselben Geschiebegabbroide, die auch in Abb. 6 eingesetzt sind.

Die nachfolgend aufgelisteten weiteren Schritte gewährleisten als Maximalprozedur die Berücksichtigung aller RFA-analytisch in Gabbroiden sinnvoll erfaßbaren Elemente. Die gewählten Korrelationen haben sich als besonders günstig zur Aussortierung von Gabbroid- und Doleritassoziationen erwiesen.

#### 1. Ab gegen An gegen Or.

Ab, An und Or sind die wichtigsten Komponenten gesteinsbildender Feldspäte, errechnet als normative Komponenten (NewNeso-Teilprogramm von NewPet). Bestimmende Elemente sind Na, Ca und K.

- |                                                                    |                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 2. $\text{K}_2\text{O}$ gegen Rb,                                  | 3. Sr/25 gegen $\text{Nb} \times 3$ gegen Y                                           |
| 4. V gegen $\text{MnO} \times 500$ gegen $\text{Mg}\# \times 2$    | 5. Ba gegen $\text{CaO} \times 50$ gegen V                                            |
| 6. $\text{TiO}_2 \times 100$ gegen V gegen $\text{MnO} \times 300$ | 7. $\text{MnO} \times 10$ gegen $\text{TiO}_2$ gegen $\text{P}_2\text{O}_5 \times 10$ |
| 8. $\text{TiO}_2$ gegen V                                          | 9. Zn gegen V                                                                         |
| 10. Ba gegen Sr                                                    | 11. Zr gegen Nb                                                                       |
| 12. $\text{Mg}\#$ gegen $(\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$     | 13. Y gegen Zn.                                                                       |

Die mit \* gekennzeichneten, nachfolgenden Sortierschritte können in schwierigen Sonderfällen von schlechter Trennbarkeit als zusätzliche Option herangezogen werden.

- |                                       |                                                                        |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 14.* $\text{Al}_2\text{O}_3$ gegen Ga | 15.* Zr gegen $\text{P}_2\text{O}_5$                                   |
| 16.* Y gegen $\text{P}_2\text{O}_5$   | 17.* $\text{Mg}\#$ gegen Cr                                            |
| 18.* $\text{Mg}\#$ gegen Ni           | 19.* $\text{Mg}\# / 2$ gegen Ce gegen $\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2$ |

Die ternäre Korrelation Sr/5 gegen  $\text{Al}_2\text{O}_3 \times 5$  gegen Zr sollte, wenn sie nicht zu Beginn schon eingesetzt wurde, als abschließender Kontrollschritt genutzt werden. Kogenetische Gabbroidserien müssen schmale, auf die Zr-Ecke gerichtete Züge bilden. Wenn diese sich nicht zeigen, muß von fehlerhafter Sortierung ausgegangen werden.

## 8. Bisherige Ergebnisansätze und Perspektiven

Die versuchsweise Auswertung der Gabbroidassoziationen an verschiedenen wechsellagernden Geschiebelokalitäten erbrachte eine Reihe kohärenter Gabbroidserien: Fakse Ladeplads (Ost-Sjælland) 4 Serien, Hundested (Nord-Sjælland) 2

Serien (davon eine aus metagabbroiden Coroniten), Kettingskov (Als) 2 Serien. Die Auswertung in Kettingskov wurde gemeinsam mit T.GEISLER durchgeführt. Für jede der ermittelten Serien kann eine Herkunft von den bisher untersuchten Referenzvorkommen ausgeschlossen werden. Für eine der Serien von Kettingskov zeichnet sich eine Abkunft von den von WIKMAN 1990 beschriebenen permokarbo-nischen "NW-Gangdoleriten" SW-Schonens ab (GEISLER 1994).

Die Perspektive, die den Gesamtaufwand als sinnvoll erscheinen läßt, ist, daß sich durch sukzessive Auswertung günstig verteilter Aufschlüsse langfri-stig sehr genaue flächige Bewegungsbilder für die einzelnen Eisdecken erarbei-ten lassen. Durch horizontierte Probenahmen ist Aufschluß über Veränderungen der Eisbewegung während der jeweiligen Vereisung erwarten.

Weitere wichtige Implikationen sind:

1. Rekonstruktionen der Eisbewegungen in den Herkunftsgebieten können auf zusätzliche und unabhängige, bisher nicht beachtete Information gegründet werden.

2. Die Bedeutung direkten und möglicherweise eng fokussierten Ferntransports durch glaziale Eisdecken kann gegen Vorstellungen eher weit divergierender Geschiebefächer und intermittierenden Transports abgeschätzt werden. Kontami-nation aus älteren glazialen oder auch glaziofluviatilen Ablagerungen kann auch bei wenig unterschiedlichen Transportpfaden erkannt werden.

3. Als Nebenergebnis werden einige Gabbroide als "Einzelklasten-Leitgeschie-be" definiert werden können.

4. Eine zukünftige Anwendung der "Leitserienmethode" könnte darin bestehen, daß die an Schlüssel-lokalitäten hochauflösend ermittelten Fließlinien ehemali-ger Eisschilde eine besonders verwechslungssichere Möglichkeit zur stratigra-phischen Korrelation von Moränen bieten. Vereinfacht dargestellt wür-de dies so aussehen, daß die durch Fließlinien repräsentierten Transport-korridore einer gegebenen Moräne je nach Lage und Abstand der Geschiebeloka-litäten voneinander systematisch parallelverschoben sind, wie SMED 1993 dies auf Grundlage von nach der Circle-Map-Methode ausgewerteten Leitgeschiebezäh-lungen am Beispiel weichselzeitlicher Moränen in Dänemark deutlich macht.

5. Wie bei Geschiebeuntersuchungen mit paläontologischer Ausrichtung längst üblich, sind auch Funde petrologisch wichtiger Einzelstücke zu erwarten. Abb. 9 (S.625) zeigt als Beispiel einen mineral- und korngrößengradierten geschich-teten Gabbro von Hjelm (Mön) mit wahrscheinlicher Herkunft aus Angermanland.

## 9. Danksagung

Gern danke ich denen, von deren Hilfe dieser Beitrag profitierte: wertvolle Information über norwegische und schwedische Gabbroide gaben B. DAM (Utrecht), G.J. de HAAS (Sittard), S.A. LARSON (Göteborg), L. LUNDQUIST (Göteborg) und H. WIKMAN (Lund). F. GRUBE (Hamburg) und P. SMED (Birkerød) gaben Rat bezüglich glazialer Lokalitäten und Leitgeschieben. Beiden danke ich auch für die kritische Durchsicht einer früheren Version des Manuskripts. R. WILSON (Arhus) danke ich für unveröffentlichte Gabbroidanalysen, B. STÜTZE und den Mitarbei-terinnen des Anorganisch-Geochemischen Labors im Geomatikum der Universität für die RFA-Analysen und K. KUNTERMANN für Zeichnungen.

## 10. Literatur

- ARDASHTY A 1992 Die gabbroiden Geschiebe des Endmoränenbogens der Lamstedter Phase südlich Bremervörde - Unveröff. Dipl.-Arbeit, 82 S., Hamburg.
- McBIRNEY AR 1989 The Skaergaard layered series: I. Structure and average compositions - J. Petrology 30: 363-397.
- CLARKE D 1987-1994 NewPet - (petrologisches Computer-Programm) erhältlich als Shareware von Daryl Clarke, Memorial University of Newfoundland, Depart-ment of Earth Sciences, St. John's, (NF), Canada A1B 3X5.



- GEISLER T 1994 Hochauflösende Rekonstruktion von Eistransportwegen mit Hilfe der petrochemischen Gruppierung von gabbroiden Geschieben aus glazialen Ablagerungen erhöhter Gabbroidkonzentration: die "Leitserienmethode": ein Beitrag zur Methodik, Ansatz und Durchführbarkeit - Unveröff. Dipl.-Arbeit, 172 S., Hamburg.
- GORBATSCHEV R 1980 The Precambrian development of southern Sweden - Geol. Fören. Förh. 102: 129-136, Stockholm.
- HESEMANN J 1931 Quantitative Geschiebebestimmungen im norddeutschen Diluvium - Jb. d. Preuss. Geol. Landesanstalt (NF) 51: 714-758, Berlin.
- HAAS GJ de 1992 Source, evolution, and age of coronitic gabbros from the Arendal-Nelaug area, Bamble, southeast Norway - Proefschrift Rijksuniv. 129 S., Utrecht.
- HESEMANN J 1931 Quantitative Geschiebebestimmungen im norddeutschen Diluvium - Jb. d. Preuss. Geol. Landesanstalt (NF) 51: 714-758, Berlin.  
-- 1975 Kristalline Geschiebe der nordischen Vereisungen - 267 S., Krefeld (Geol. Landesamt Nordrhein-Westfalen).
- HUCKE K & VOIGT E 1967 Einführung in die Geschiebeforschung (Sedimentär-  
geschiebe) - 232 S., Oldenzaal. (Nederlandse Geol. Ver.).
- LARSON SA 1980 Layered intrusions of the Ulvö dolerite complex, Angermanland, Sweden - Geologisk Institutionen Publ. (A) 36: 213 S., Göteborg.
- LÜTTIG G 1958 Methodische Fragen der Geschiebeforschung - Geol. Jb. 75: 361-418, Hannover.
- MAITRE RW le et al. 1989 A classification of igneous rocks and glossary of terms - 193 S., Oxford (Blackwell).
- MEYER KD 1983 Indicator pebbles and stone counts - EHLERS J (ed.): Glacial deposits in north-west Europe: 275-287, Rotterdam (Balkema).
- MILTHERS V 1934 Die Verteilung skandinavischer Leitgeschiebe im Quartär von Westdeutschland - Abh. Preuß. Geol. Landesanstalt (NF) 156: 74 S., Berlin.
- MOSEBACH U 1992 Gabbroide Geschiebe des Endmoränenbogens der Lamstedter Phase im Bereich der Zevener Geest - Unveröff. Dipl.-Arb.: 79 S., Hamburg.
- OTTEN MT 1983 The magmatic and subsolidus evolution of the Artfjället Gabbro, central Swedish Caledonides - Proefschrift Rijksuniv., 185 S., Utrecht.
- PERSSON L & WIKMAN 1986 Provisoriska översiktliga Berggrundskartan, ser. Ba 39, Jönköping 1:250 000, Sver. Geol. Unders., Uppsala.
- SCHUDEBEURS AP 1980-81 Die Geschiebe im Pleistozän der Niederlande - Der Geschiebesammler 13 (3/4): 163-178; 14 (2/3): 91-118; 14 (4): 147-198, 1981; 15 (1/2): 73-90, 1981; 15 (3): 137-157, 1981; Hamburg.
- SMED P 1989 Sten i det danske landskab - Geografforlaget 181 S., Brenderup.  
-- 1993 Indicator studies: a critical review and a new data-presentation method - Bull. Geol. Soc. Denmark 40: 332-340, Copenhagen.  
-- 1994 Steine aus dem Norden - 195 S., Stuttgart (Borntraeger).
- VINX R 1982 Das Harzburger Gabbromassiv, eine orogenetisch geprägte layered intrusion - N. Jb. Miner. (Abh.) 144: 1-28, Stuttgart.  
-- 1992 Glacially drifted gabbroid rock suites: Petrological perspectives and a potential tool for the precise reconstruction of ice-sheet movements - Unveröff. Skript, 2 S. (verteilt an Diplomanden und außenstehende Interessierte), Hamburg.
- WIKMAN H 1990 Den prekambryska berggrunden och de permokarboniska diabaserna - NORLING E & WIKMAN H (ed.) - Beskrivning till berggrundskartan Höganäs NO/Helsingborg NV - Sver. Geolog. Unders.: 30-57, Uppsala.
- WILSON JR et al. 1981 Igneous petrology of the synorogenic Fongen-Hyllingen layered basic complex, south central Scandinavian Caledonides - J. Petrology 22: 584-627.
- ZANDSTRA JG 1983 A new subdivision of crystalline Fennoscandian erratic pebble assemblages (Saalian) in the central Netherlands - Geol. Mijnbouw 62: 455-469.  
-- 1988 Nordelijke kristallijne Gidsgesteenten 469 S., Leiden (Brill).