

Faire progresser l'infrastructure géodésique en Europe grâce à l'EUREF

■ Martin LIDBERG - Wolfgang SOEHNE - Karin KOLLO

La sous-commission des Références européennes (EUREF) de l'Association internationale de géodésie (IAG), rassemble les efforts des agences nationales de cartographie et du cadastre (National Mapping and Cadastral Agencies NMCA), des universités et des instituts de recherche pour définir, réaliser et maintenir le système européen de référence terrestre 1989 (ETRS89) et le système européen de référence verticale (EVRS) à des fins scientifiques et pratiques en Europe. Ces systèmes sont à la base du géoréférencement en Europe et ont été approuvés par la directive INSPIRE de l'Union européenne (Infrastructure for Spatial Information in the European Community), Eurocontrol et EuroGeographics.

La réalisation, la maintenance et le développement de l'ETRS89 se font principalement à travers le réseau permanent GNSS EUREF (EUREF Permanent GNSS Network EPN). L'EPN se compose de stations permanentes GNSS (environ 350 stations), soutenues par des centres de données et d'analyse et un bureau central qui est responsable de la surveillance et de la gestion de l'EPN. Toutes les contributions à l'EPN sont fournies sur la base du volontariat, avec plus de 100 agences/universités européennes impliquées. L'EPN fonctionne selon des normes et des directives bien définies qui garantissent la qualité à long terme des produits EPN.

En réponse à une demande croissante à la fois des agences nationales de cartographie et des groupes de recherche, l'épine dorsale EPN a été complétée par des réseaux nationaux supplémentaires de stations permanentes avec des coordonnées et des vitesses de station rigoureusement calculées. À l'heure actuelle, le réseau européen dense comprend dix fois plus de stations que le réseau EPN et bénéficie de la contribution de quelque 25 institutions différentes.

Le système de référence altimétrique (lié à la gravité) EVRS est réalisé grâce à un ajustement commun du réseau européen de nivellement unifié (Unified European Levelling Network UELN) auquel la grande majorité des pays européens contribuent.

Dans cet article, nous discuterons des défis actuels et futurs concernant les infrastructures géodésiques à l'échelle continentale et la contribution d'EUREF. En particulier, nous discuterons du développement du modèle européen du géoïde, des modèles de déformations de la croûte, de la réalisation du système international de référence altimétrique (International Height Reference System IHRF) émergent en Europe et de l'établissement de la relation précise entre les versions récentes de l'IHRF et de l'EVRS.

À la fin, nous aborderons le rôle futur d'EUREF dans le paysage organisationnel émergent. Par exemple, le système européen d'observation des plaques (European Plate Observing System EPOS) est entré dans sa phase opérationnelle pilote en 2020 et des progrès sont signalés par le sous-comité UN-GGIM sur la géodésie. Cela nécessite des collaborations mutuelles afin d'atteindre des objectifs communs au profit de la société d'utilisateurs au sens large.

NDLR : cet article a été présenté en anglais à l'évènement FIG e-Working Week 2021, *Smart Surveyors for Land and Water Management - Challenges in a New Reality Virtually in the Netherlands*, 21–25 June 2021, et est publié avec l'autorisation des auteurs. Version française de la rédaction d'XYZ.

Le réseau permanent GNSS EUREF - EPN

Le réseau permanent EUREF (EUREF Permanent GNSS Network EPN) est un réseau scientifique de stations permanentes GNSS établi à partir de 1996 (<http://epncb.oma.be/>). Grâce à ses solutions de calcul du réseau quotidiennes et hebdomadaires, EUREF l'utilise pour réaliser et fournir l'accès à l'ETRS89.

L'EPN comprend (figure 1) :

- un réseau d'environ 350 stations de référence GNSS (Global Navigation Satellite Systems, telles que GPS, GLONASS, Galileo, Beidou...) fonctionnant en continu,
- des centres de données donnant accès aux données des stations,
- des centres d'analyse qui traitent et analysent en routine les données GNSS,

- les centres de produits et les coordinateurs qui génèrent les produits EPN,
- et un Bureau central qui est responsable du suivi et de la gestion quotidienne de l'EPN.

L'EPN donne accès à l'ETRS89 en mettant à la disposition du public les données de poursuite GNSS ainsi que les positions, vitesses et paramètres troposphériques précis de toutes les stations EPN. Sur la base de ces

MOTS-CLÉS

GGIM, GNSS, Positionnement, Topographie d'ingénierie, Nivellement, Cadres de référence, Systèmes de référence, Standards



Figure 1. Le réseau permanent GNSS EUREF - EPN.

► produits, l'EPN contribue également à la surveillance des déformations de la croûte terrestre en Europe et à la surveillance du climat à long terme, la prévision numérique du temps et la surveillance des variations du niveau de la mer.

Les stations de poursuite EPN sont également intégrées dans les réalisations successives du Système de référence terrestre international, qui est à la base du Système européen de référence terrestre 1989 (ETRS89). L'EPN étant la densification européenne du réseau du service GNSS international, IGS (<http://igs.cbl.nasa.gov/>), une harmonisation complète des normes entre le réseau mondial et européen est proposée.

Toutes les contributions à l'EPN sont fournies sur la base du volontariat avec la participation de plus de 100 agences et universités européennes. L'EPN applique une approche distribuée avec une vingtaine d'organisations impliquées et fonctionne selon des normes et des directives bien définies (http://epncb.oma.be/_documentation/guidelines/) qui garantissent la qualité à long terme des produits de l'EPN.

■ Opérations et récents développements de l'EPN

L'EPN est géré par le bureau central (*Central Bureau CB*), qui agit égale-

ment en tant que coordinateur du réseau. Le CB, géré par l'Observatoire royal de Belgique, surveille de manière opérationnelle les performances des stations EPN en termes de disponibilité des données, d'exactitude des métadonnées et de qualité des données. La maintenance des site logs (fiche descriptive) des stations a été automatisée en utilisant le "*Metadata Management and Dissemination System for Multiple GNSS Networks*" (M3G, disponible sur <https://gnss-metadata.eu/>) [Bruyninx et al. 2019]. L'EPN n'a cessé de croître avec 15, 20 et 17 nouvelles stations dans les années 2018 à 2020. L'accent est mis sur le fait que le plus grand nombre possible de stations devraient observer et transmettre les données d'observation du GNSS européen Galileo et de manière optimale également du GNSS chinois BeiDou.

■ Produits

Les centres d'analyse de l'EPN (*Analysis Centers AC*) traitent de manière opérationnelle les observations GNSS collectées dans les stations de l'EPN. EUREF suit une approche distribuée, c'est-à-dire que 16 AC fournissent des coordonnées hebdomadaires et quotidiennes finales et d'autres solutions de leurs sous-réseaux qui leur sont attribués. Les paramètres de coordonnées

et de troposphère sont combinés pour obtenir les solutions EUREF finales. Pour obtenir des résultats homogènes suivant l'état de l'art en matière de modélisation et de traitement, EUREF retraite l'ensemble du réseau, suivant le retraitement global au sein du Service GNSS international (IGS).

Pour maintenir le Système européen de référence terrestre (ETRS89), EUREF publie, toutes les 15 semaines, une mise à jour des coordonnées et vitesses pluriannuelles des stations EPN dans les dernières réalisations ITRS/ETRS89. La cohérence des solutions pluriannuelles EPN est validée par comparaison avec, par exemple, la solution pluriannuelle IGS et montre une bonne concordance. En mai 2020, l'IGS a publié une révision de l'IGS14, à savoir l'IGb14. La première solution pluriannuelle EPN dans IGb14 (C2115) a été publiée en novembre 2020. Grâce aux cinq années supplémentaires de données d'entrée dans IGb14 par rapport à IGS14, l'accord entre les solutions pluriannuelles EPN et IGS a été amélioré lors de l'utilisation IGb14.

Densification de l'EPN

EUREF a présenté un projet sur la densification de l'EPN [Kenyeres et al. 2019] qui, à ce jour, est un effort de collaboration de 27 AC GNSS européens fournissant des séries d'estimations quotidiennes ou hebdomadaires de la position des stations des réseaux GNSS nationaux et régionaux denses et livrées au format SINEX. Les solutions individuelles sont combinées en un ensemble homogène de positions et de vitesses de stations. Un tel ensemble est extrêmement précieux pour les applications à grande échelle géodésiques et géophysiques transfrontalières. Les résultats les plus récents couvrent la période de novembre 2006 à avril 2020 (semaines GPS 1400 à 2100) en utilisant les entrées exprimées en IGS14. La solution pluriannuelle combinée comprend 31 réseaux avec des positions et des vitesses de quelque 3 300 stations, couvrant ainsi l'Europe. La description de la densification de l'EPN, les métadonnées de la station et les résultats sont disponibles sur les

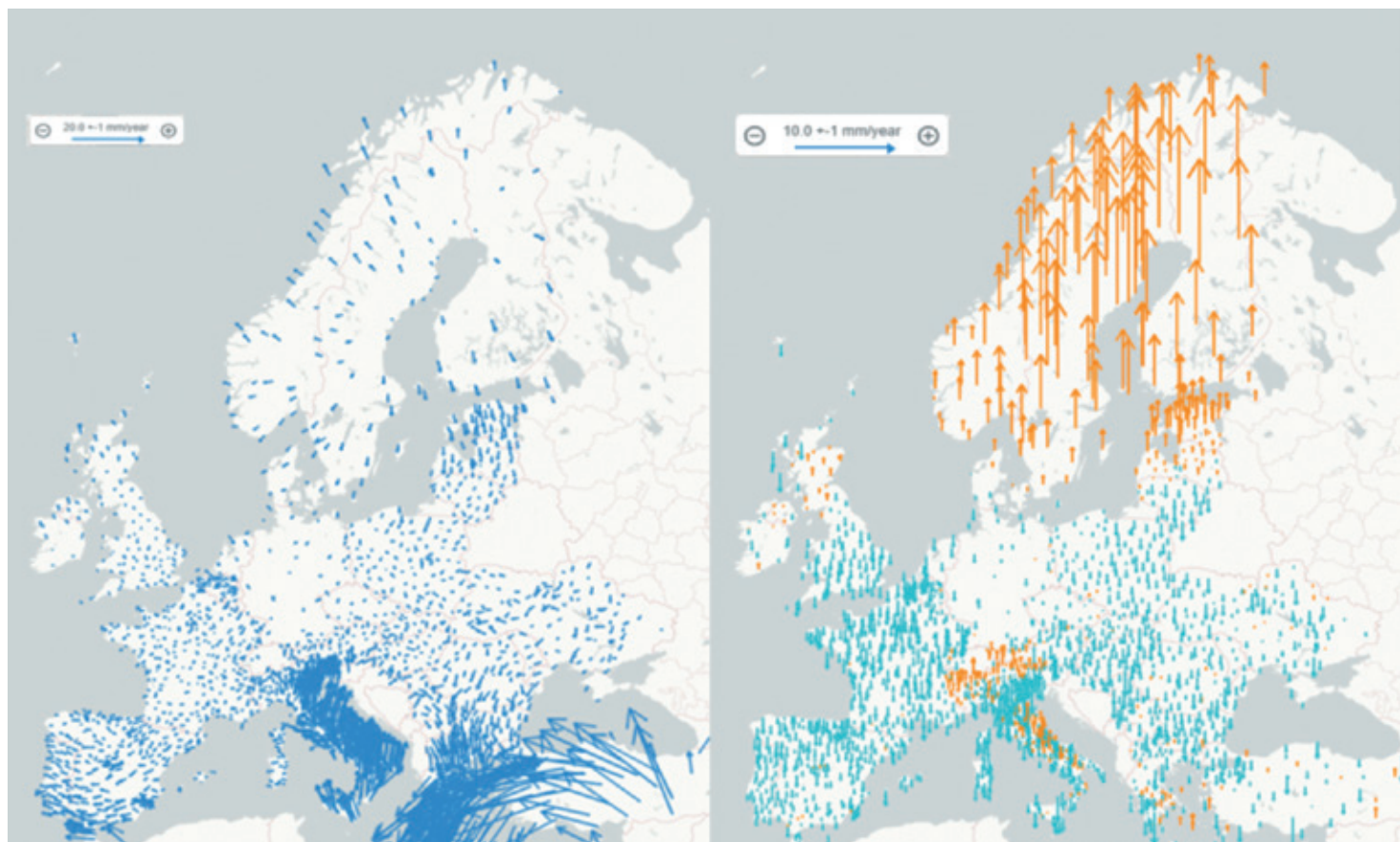


Figure 2. Vitesses horizontales et verticales obtenues de la densification de l'EPN (en ETRS89).

pages Internet de la densification de l'EPN (<https://epnd.sgo-penc.hu/>).

Champs de vitesses denses pour l'Europe

En complément de la densification de l'EPN, EUREF a introduit un projet sur les vitesses denses (figure 2). Les estimations de vitesse dans ETRF2000, dérivées par 30 contributeurs actuellement, sont l'entrée directe au processus de génération d'un champ de vitesse dense pour l'Europe. En plus des résultats des réseaux permanents GNSS, des solutions densifiées issues des campagnes GNSS, InSAR ou nivellement sont également incluses. Dans certains pays, par exemple dans les pays nordiques, des modèles de vitesse sont déjà utilisés. Ils peuvent être intégrés pour indiquer les différences possibles entre les vitesses modélisées et observées. Les résultats du projet de densification de l'EPN sont également inclus. L'alignement du référentiel géodésique de chaque

entrée est contrôlé par des stations superposées. Plus de 6 000 vitesses de stations individuelles sont disponibles pour l'Europe. La description et les résultats détaillés sont disponibles sur http://pnac.swisstopo.admin.ch/divers/dens_vel/index.html.

Système de référence vertical européen, EVRS et EVRF

L'EVRS (*European Vertical Reference System*) est le système de référence vertical européen qui est réalisé grâce à un ajustement commun des réseaux nationaux de nivellement précis disponibles, voir en figure 3. L'origine de référence des altitudes est le niveau du *Normaal Amsterdam Peil, NAP*. La récente réalisation EVRF2019 [Sacher et Liebsch 2019] comprend environ 14 000 observations et 11 000 inconnues (points nodaux). L'incertitude type moyenne des observations est proche de 1 mm/ $\sqrt{\text{km}}$. Dans les zones avec des vitesses verticales séculaires claires où

des modèles de vitesse verticale sont disponibles [Fennoscandie et Suisse], l'époque a été réduite à l'an 2000.0.

Faire progresser l'infrastructure géodésique

Le comité directeur d'EUREF (*Governing Board GB*) est actuellement en train de renouveler la stratégie d'EUREF. La tâche est toujours en cours, mais certains défis et développements prévus ont été identifiés.

■ La réalisation de ETRS89

L'ETRS89 est défini comme coïncidant avec l'ITRS à l'époque 1989.0 en codéplacement avec la plaque tectonique européenne. Il est réalisé dans les ETRF par des relations précises issues des ITRF [Altamimi 2017]. La bonne réalisation dépend donc de la stabilité à long terme au sein et entre les ITRF. L'atteinte de l'objectif global de 1 mm et 0,1 mm/an pour l'ITRF est donc également importante pour EUREF et la réalisation précise et cohérente de l'ETRS89.



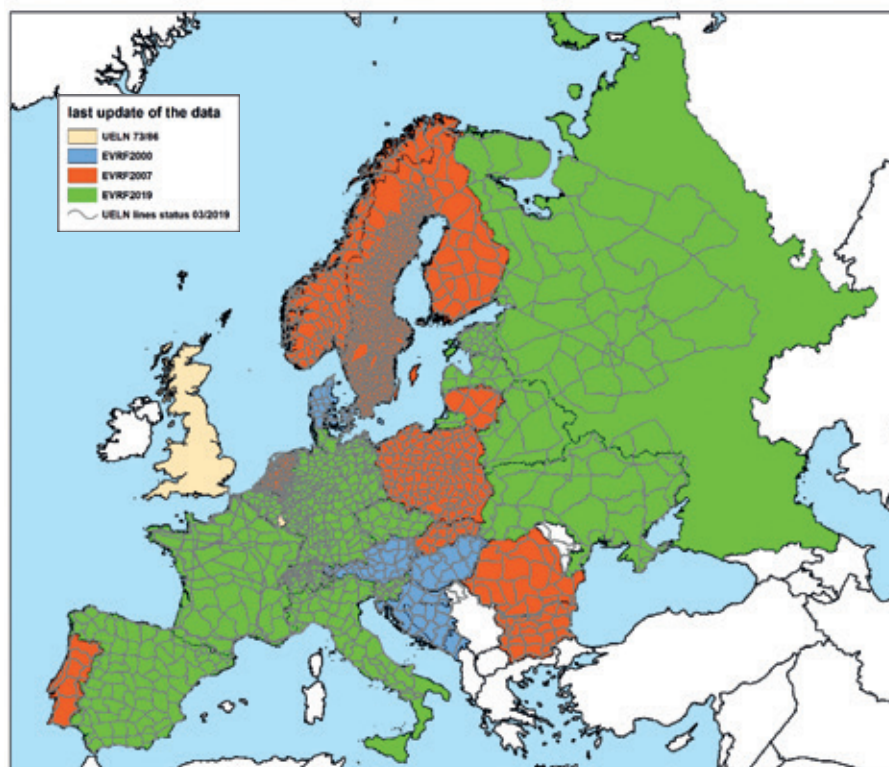


Figure 3. Le réseau unifié européen de nivellement *United European Levelling Network*, UELN, la base de la nouvelle réalisation du EVRS, EVRF2019.

■ Surface de référence des altitudes, height reference surface (HRS)

L'affinement de l'UELN avec de nouvelles données de nivellement et l'extension aux pays non encore inclus se poursuivra et des mises à jour de la réalisation de l'EVRS sont prévues. Cependant, un produit qui relie les EVRF et les ETRF à l'échelle continentale n'est pas encore disponible. Les modèles européens gravimétriques quasigéoides sont disponibles [Denker 2015], mais ne sont pas adaptés à l'EVRF et à l'ETRF et ont donc de faibles performances comme produit de transformation.

Pour surmonter ces limitations, il est proposé de calculer un modèle européen de quasigéoïde ou "géoides EVRF" en tant que surface de référence des altitudes EVRS officielle, cohérente avec les dernières réalisations EVRS et ETRS89 [Schwabe et al. 2020].

Un travail de fond important pour y parvenir consistera à améliorer l'ensemble de données avec des points UELN déterminés par GNSS (ou des stations EPN/EPN-D nivelées), initialement établis dans le cadre de l'effort sur "l'acte de densification de réseau

vertical unifié européen" (*European unified vertical network densification act*, EUVN-DA).

■ Système de référence altimétrique international

Au niveau mondial, le Système international de référence altimétrique, *International Height Reference System IHRS*, est en construction et nous voyons des progrès vers sa première réalisation dans la réalisation de la référence altimétrique internationale, *International Height Reference Frame IHRF* [Sánchez et al. 2021]. Étant donné que l'EVRS et l'IHRS seront utilisés en parallèle pendant longtemps, cela signifie que nous, EUREF, devons réaliser l'IHRF en Europe et établir des relations précises et bien définies entre l'IHRF et les versions récentes de l'EVRF.

■ Modèles de déformation et de vitesse

En Europe, il existe des services et réseaux RTK disponibles dans la plupart (voire tous ?) des pays. Ceux-ci sont généralement exploités de manière à ce que l'utilisateur obtienne la position dans la référence nationale, qui dans la plupart des cas est une réalisation de

l'ETRS89. Cependant, il est également prévu l'émergence d'un marché de masse pour un positionnement précis basé sur des services de positionnement au centimètre dans le monde entier, mais pas dans la référence nationale ou régionale. Il y aura également un service de positionnement de point précis (PPP) de Galileo et d'autres fournisseurs. Ces services mondiaux fourniront très probablement les positions dans un référentiel cinématique (en pratique ITRF récent à l'époque actuelle). Le besoin des relations précises entre les réalisations de l'ETRS89 et de l'ITRF devient donc plus important. La connaissance précise des déformations crustales au sein de la zone d'intérêt EUREF est donc vitale. Une première version d'un tel modèle de vitesse européen a été développée sur la base des résultats de la densification EPN et des vitesses denses européennes [Steffen et al. 2019] et les efforts vers un produit EUREF se poursuivent.

■ GNSS et climat

Un produit secondaire de l'analyse scientifique des GNSS est l'estimation de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère [Pacione et al. 2017]. La technologie GNSS et son infrastructure ont duré près de trois décennies, une période pendant laquelle le changement des conditions atmosphériques peut être considéré comme un "changement climatique". La série chronologique du retard zénithal troposphérique (*Tropospheric zenith delay TZD*) sur les sites de l'EPN représente une mine de données qu'EUREF génère régulièrement et sa valeur dans la surveillance du climat mondial est un aspect important des activités d'EUREF. Ceci est particulièrement important à considérer lors de l'exécution du retraitement de l'EPN, où l'EPN-Repro3 est prévu dans les années à venir.

■ Les perspectives d'organisation

Du point de vue organisationnel, nous en voyons émerger un tel paysage. Par exemple, le système européen d'observation des plaques (EPOS) (<https://www.epos-ip.org/>) est entré dans sa phase (pré) opérationnelle en 2020, et des progrès sont signalés par le sous-comité UN-GGIM sur la géodésie (*Subcommittee on Geodesy SCoG*), sans



oublier le traitement opérationnel des réseaux GNSS denses dans le cadre du programme EUMETNET GNSS vapeur d'eau (*EUMETNET GNSS Water Vapour Programme E-GVAP*). EUREF entretient de bonnes relations et une bonne coopération avec ces groupes et organisations. EUREF a l'ambition de continuer en tant qu'organisation clé sur l'infrastructure géodésique et la coopération en Europe du point de vue scientifique, ainsi que pour celui de la mise en œuvre pratique. Néanmoins, cela nécessite des collaborations mutuelles afin d'atteindre des objectifs communs au profit de la société d'utilisateurs au sens large. ●

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier toutes les organisations et personnes qui contribuent à EUREF avec des présentations lors de nos colloques ou ateliers annuels, avec des analyses, par exemple pour la densification EPN et EPN, avec des produits pour les modèles de vitesses et de déformation denses et avec des données (ex. GNSS, ou nivellement précis pour l'UELN). Nous sommes également reconnaissants pour l'engagement et l'implication des membres du comité directeur d'EUREF.

Références

Altamimi, Z., (2017) *EUREF Technical Note 1: Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference Systems*. (<http://etrs89.ensg.ign.fr/pub/EUREF-TN-1.pdf>, cited 2021-04-01).

Bruyninx, C., Legrand, J., Fabian, A., Pottiaux, E., *GNSS metadata and data validation in the EUREF Permanent Network*, GPS Solut (2019) 23: 106. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0880-9>.

Denker, H., (2015) *European gravimetric quasigeoid model EGG2015* https://www.isgeoid.polimi.it/Geoid/Europe/europe2015_g.html.

Kenyeres, A., J. G. Bellet, C. Bruyninx, A. Caporali, F. de Doncker, B. Droschak, A. Duret, P. Franke, I. Georgiev, R. Bingley, L. Huisman, L. Jivall, O. Khoda, K. Kollo, A. I. Kurt, S. Lahtinen, J. Legrand, B. Magyar, D. Mesmaker, K. Morozova, J. Nág, S. Özdemir, X. Papanikolaou, E. Parseliunas, G. Stangl, M. Ryczkowski, O. B. Tangen,

M. Valdes, J. Zurutuza, M. Weber. *Regional integration of long term national dense GNSS network Solutions*, GPS Solutions (2019) 23:122. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0902-7>.

R. Pacione, A. Andrzej Araszkiewicz, E. Elmar Brockmann, and J. Dousa. *EPN-Repro2: A reference GNSS tropospheric data set over Europe*, Atmos. Meas. Tech., 10, 1689–1705, 2017, www.atmos-meas-tech.net/10/1689/2017/, doi:10.5194/amt-10-1689-2017.

M. Sacher and G. Liebsch (2019) *EVRF2019 as new realization of the EVRS*, Presentation at the EUREF Symposia in Tallinn 22-24 May 2019. <http://www.euref.eu/symposia/2019Tallinn/01-01-Sacher.pdf>.

L. Sánchez, J. Ågren, J. Huang, Y. M. Wang, J. Mäkinen, R. Pail, R. Barzaghi, G. S. Vergos, K. Ahlgren, Q. Liu. *Strategy for the realisation of the International Height Reference System (IHR)*. J Geod 95, 33 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01481-0>.

J. Schwabe, G. Liebsch, et al. (2020) *Draft charter EUREF working group on "European Height Reference Surface"*, internal document.

R. Steffen, J. Legrand, H. Steffen, M. Lidberg, A. Kenyeres, E. Brockmann, S. Lutz. (2019) *Towards a Deformation Model for Europe using least square collocation*, Presentation at the EUREF Symposia in Tallinn 22-24 May 2019. <http://www.euref.eu/symposia/2019Tallinn/01-04-Steffen.pdf>.

Biographies

Dr Martin Lidberg est chef du département des infrastructures géodésiques de Lantmäteriet, l'autorité suédoise de cartographie, de cadastre et d'enregistrement foncier. Il est titulaire d'une maîtrise en topographie et cartographie du *Royal Institute of Technology* (Stockholm, Suède) en 1988 et a obtenu son doctorat de l'Université de technologie Chalmers (Göteborg, Suède) en 2007. Il travaille à Lantmäteriet depuis 1988. Martin est également depuis 2019 président de l'EUREF.

Dr Wolfgang Söhne est scientifique senior travaillant dans le département de géodésie de l'Agence fédérale de cartographie et de géodésie (*Bundesamt für Kartographie und Geodäsie BKG*) à Francfort-sur-le-Main, en Allemagne. Il a obtenu son doctorat à l'Université tech-

nique de Darmstadt en 1996. Il travaille au BKG depuis 2001. Depuis lors, il a été impliqué dans le groupe de travail technique EUREF (maintenant le comité directeur) dont il est devenu membre officiel en 2008. Depuis l'été 2019, il préside le comité directeur de l'EUREF. Wolfgang est également membre du conseil d'administration de l'IGS et du comité d'infrastructure de l'IGS.

Dr Karin Kollo a obtenu son doctorat en géodésie de l'Université Aalto, à Helsinki. Elle est chef du département de géodésie au Conseil foncier estonien. Ses recherches portent sur la maintenance des référentiels nationaux, l'analyse GNSS, la connexion altimétrique aux marégraphes, ainsi que la géodynamique et les études sur l'ajustement isostatique glaciaire. Depuis l'été 2019, elle est la secrétaire de l'EUREF.

contacts

Dr Martin Lidberg, martin.lidberg@lm.se

Dr Wolfgang Söhne, wolfgang.soehne@bkg.bund.de

Dr Karin Kollo, karin.kollo@maaamet.ee

ABSTRACT

The International Association of Geodesy (IAG) Reference Frame Sub-Commission for Europe, EUREF, merges efforts of National Mapping and Cadastral Agencies (NMCA), Universities and research institute to define, realize and maintain the European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) and the European Vertical Reference System (EVRS) for scientific and practical purposes in Europe. These systems are the basis for geo-referencing in Europe and have been endorsed by the European Union INSPIRE directive (Infrastructure for Spatial Information in the European Community), Eurocontrol and EuroGeographics. In this paper we will discuss current and future challenges regarding continental scale geodetic infrastructure and the contribution from EUREF. In particular we will discuss the development of European geoid model, models for crustal deformations, realization of the emerging International Height Reference System (IHR) in Europe and establishment of the precise relation between recent releases of IHRF and EVRF.